UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

Renato Carrieri

ESTRUTURAS : A RESISTÊNCIA PELA FORMA,
À LUZ DA PRODUÇÃO CONTEMPORÂNEA

São Paulo

2007

Renato Carrieri

ESTRUTURAS : A RESISTÊNCIA PELA
FORMA, À LUZ DA PRODUÇÃO
CONTEMPORÂNEA

**Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em Arquitetura e
Urbanismo.**

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

**Orientador : Prof. Dr. Reyolando Manoel Lopes
Rebello da Fonseca Brasil**

São Paulo

2007

Dedicado a

Renato Carrieri meu Pai, meu melhor Professor.

Kate Toscano Carrieri minha Mãe, uma luz na minha vida.

Catharina de Souza Costa Carrieri, meu amor.

Enzo Virgílio de Costa Carrieri, meu maior presente e a verdadeira razão de ser dos dias da minha maturidade.

Agradecimentos:

À Deus, pela graça de viver, e àqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho:

Arquitetos :

Carlos Alberto Coelho

Carlos Antunes

Cíntia Reimy Ganiko

Cláudio Roberto Pirovics

Elcio Yoshitaka Yokoyama

Eunice Helena Sguizzardi Abascal

Francisco Spadoni

Geraldo Vespasiano Puntoni

Silvio Stefanini Sant'anna

Wilson Flório

Engenheiros :

Antonio da Silva Madeira Junior

Luiz Eduardo Guimarães Dias

Silvio Miranda

E um agradecimento especialíssimo aos Professores:

Dr. Reyolando Manoel Lopes Rebello da Fonseca Brasil meu Orientador, e Dr. Augusto Carlos de Vasconcelos co Orientador, exemplos para mim de indescritível generosidade e imensa sabedoria.

Resumo

Esta Tese divide-se em 4 capítulos. Seu conteúdo refere-se à investigação preliminar das questões relacionadas à resistência da estrutura pela forma, à luz da produção contemporânea. Inicialmente pretende conceituar o fenômeno estrutural, e classificar de acordo com critérios particulares os diferentes sistemas estruturais presentes nos edifícios de qualquer natureza.

O segundo capítulo que analisa a evolução da técnica, processo lento e delicado, visa estabelecer de forma sucinta uma relação daquilo que foi construído no passado com a realidade contemporânea, sob a ótica da Arquitetura, da Engenharia, da Arte, da História e da Economia.

O terceiro capítulo analisa estruturas arquitetônicas sem flexão, as cascas delgadas e as estruturas estaiadas. A relação destas com a sua geometria favorece de modo natural uma maior resistência, sem deixar de lado os propósitos estéticos indispensáveis a toda e qualquer obra de arte.

Por fim, são discutidos os princípios que determinam a conveniência da resistência pela forma. As imagens das obras ilustram os conceitos ainda válidos, apesar das mudanças ocorridas. Os anexos referem-se ao glossário de termos, à listagem das figuras e à bibliografia.

Abstract

This Dissertation is divided into 4 chapters. Its contents refers to the preliminary investigation of the issues related to the resistance of the structure by the form, in the light of the contemporary production. It initially intends to conceptualize the structural phenomenon and classify according to particular criteria the different structural systems present in the buildings of any nature.

The second chapter, which analyzes the evolution of technique, a slow and delicate process, aims to establish in a succinct way a relation of what has been built in the past with contemporary reality, under the optics of Architecture, of Engineering, of History and of Economics.

The third chapter analyzes architectural structures without flexion, the thin barks and the stay-supported structures. The relation of these with their geometry favors in a natural manner a greater resistance, without putting aside the aesthetic purposes indispensable to each and every work of art.

Finally, one discusses the principles that determine the convenience of the resistance by the form. The images of the works illustrate the still valid concepts, in spite of the changes occurred. The attachments refer to the glossary of terms, to the listing of the figures and to the bibliography.

Riassunto

Questa Tesi si divide in 4 capitoli. Il suo contenuto si riferisce all'investigazione preliminare delle questioni concernenti la resistenza della struttura in base alla forma, alla luce della produzione contemporanea. Inizialmente, essa pretende concettualizzare il fenomeno strutturale e classificare, secondo criteri particolari, i differenti sistemi strutturali presenti negli edifici di qualsiasi natura.

Il secondo capitolo che analizza l'evoluzione della tecnica, processo lento e delicato, si propone di stabilire sinteticamente un rapporto tra ciò che è stato costruito nel passato e la realtà contemporanea, dal punto di vista dell'Architettura, dell'Ingegneria, dell'Arte, della Storia e dell'Economia.

Il terzo capitolo analizza strutture architettoniche senza flessione, le cortecce sottili e le strutture sostenute da cavi. La relazione di queste ultime con la loro geometria favorisce naturalmente una maggiore resistenza, senza trascurare i propositi estetici indispensabili ad ogni opera d'arte.

Finalmente, sono discussi i principi che determinano la convenienza della resistenza in base alla forma. Le immagini delle opere illustrano i concetti ancora validi, nonostante i cambiamenti avvenuti. Gli allegati si riferiscono al glossario di termini, all'elenco delle figure e alla bibliografia.

Resumen

Esta Tesis se divide en cuatro capítulos. Su contenido se refiere a la investigación preliminar de las cuestiones relacionadas con la resistencia de la estructura por la forma, a la luz de la producción contemporánea. Inicialmente pretende conceptualizar el fenómeno estructural, y clasificar de acuerdo con criterios particulares los distintos sistemas estructurales presentes en los edificios de cualquier naturaleza.

El capítulo segundo, analiza la evolución de la técnica, proceso lento y delicado, tiene por objetivo establecer en manera sucinta una relación de lo que fue construido en el pasado con la realidad contemporánea bajo la óptica de la Arquitectura, de la Ingeniería, del Arte, de la Historia y de la Economía.

El capítulo tercero analiza estructuras arquitectónicas sin flexión, los revestimientos delgados y las estructuras sustentadas. La relación de estas con su geometría favorece de modo natural una mayor resistencia, sin dejar de lado los propósitos estéticos indispensables para toda y cualquier obra de arte.

Por fin, se discuten los principios que determinan la conveniencia de la resistencia por la forma. Las imágenes de las obras ilustran los conceptos todavía válidos, a pesar de los cambios producidos. Los anexos se refieren al glosario de términos, al listado de las figuras y a la bibliografía.

Elogio al aprendizaje

Aprende las cosas elementarias!

Para aquellos a quienes les ha llegado la hora, nunca es demasiado tarde!

Aprende el abecedario. No bastará, pero apréndelo! No dejes que te desanimen!

Comienza! Debes saber todo.

Tienes que ser dirigente.

Aprende, hombre en el asilo!

Aprende, hombre en la prison!

Aprende, mujer en la cocina!

Aprende, tú que tienes 60 años!

Tienes que ser dirigente.

Busca la escuela, tú que no tienes casa!

No tengas miedo de preguntar, camarada!

No dejes que te induzcan a nada.

Investiga por ti mismo!

Lo que no sepas tú mismo no lo conoces.

Examina los detalles a fondo.

Eres tú el que paga las consecuencias.

Pon tu dedo en cada detalle e pregunta: Como llegó esto aquí?

Tienes que ser dirigente.

Bertolt Brecht, 1898 - 1956

“ Os projetistas de estruturas, arquitetos e engenheiros de todo o mundo vem criando a cada dia formas novas, mais arrojadas e complexas, que dificilmente encontram tradução matemática. A possibilidade de estudar seu comportamento resistente através de modelos reduzidos, graças aos progressos das técnicas de análise experimental das estruturas realizadas em laboratórios muito especializados, faz com que a maior ou menor complexidade da forma arquitetônica e da estrutura já não represente dificuldade para o projetista que aceita trabalhar em equipe com os profissionais especializados nessas técnicas. E assim se pode construir com êxito formas inusitadas, anunciando o pregão de uma revolução que se avizinha no campo da arquitetura, cujo vocabulário de formas plásticas vai se abrindo e disseminando com rapidez e fecundidade imaginativa desconhecidas em toda a história da construção ”.

Razão de ser dos tipos Estruturais - Eduardo Torroja Miret
Conselho Superior de Investigações Científicas do Instituto de Ciências da
Construção Eduardo Torroja - Madrid

SUMÁRIO

Índice dos capítulos da Tese

Introdução.

Cap. I Fundamentos de estruturas para arquitetos

Cap. II Referenciais históricos : das cavernas aos arranha céus

Cap. III Cascas delgadas e estruturas estaiadas

Cap. IV A resistência pela forma à luz da produção contemporânea

Conclusões

Anexos	Parte I	Glossário dos termos mais freqüentemente utilizados
	Parte II	Índice dos desenhos e imagens da Tese. Lista de figuras
	Parte III	Bibliografia

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

E-Mail : rc.arc@uol.com.br

Carrieri, Renato
C316e Estruturas: a resistência pela forma, à luz da produção contemporânea / Renato Carrieri. -- São Paulo, 2007.
327 p. : il.

Tese (Doutorado) - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP.
Orientador: Reyolando Manoel Lopes Rebello da Fonseca Brasil

1.Estruturas 2.Resistência 3.Arquitetura I.Título

CDU 624.01

Introdução

ESTRUTURAS : A RESISTÊNCIA PELA FORMA, À LUZ DA PRODUÇÃO CONTEMPORÂNEA

Muito me interessa estudar as relações entre o desenho que dá origem à forma e o princípio estrutural que o acompanha, objetivando ambos, o atendimento à determinado tema e à determinada função.

Tal conceito não se limita exclusivamente às edificações. No desenho dos objetos e utensílios domésticos, dos automóveis, embarcações e principalmente nas grandes estruturas de passarelas e pontes, ele deve obedecer à lógica estrutural e ao bom senso, contendo aquilo que se encontra presente nas grandes obras de arquitetura: a busca do racional e do belo, características de um mundo que se organiza em favor de uma sociedade mais humana e mais justa.

Pode haver estrutura sem arquitetura, muito embora a recíproca não seja verdadeira. Porém, a estrutura invariavelmente está associada à forma.

A necessidade da pesquisa se deve, portanto, à preocupação em torno da questão relacionada à resistência estrutural baseada na forma. Será a condição ideal aquela defendida por Nervi ? Obras como o Museu de Bilbao do Arquiteto F. Ghery foram concebidas a partir de conceitos novos do tipo “ *a forma segue a fantasia* “... E a estrutura? **Deverá restar a ela o papel secundário de mero coadjuvante do processo do projeto e da construção, porque de repente se decidiu que os caminhos trilhados pelos arquitetos até a data atual não eram adequados às novas necessidades do homem?**

Ao longo dos séculos e até hoje, inúmeras obras foram construídas levando em consideração o desempenho estrutural ideal de estruturas maciças como zigurates e pirâmides, ou estruturas que seguem modelos ditados pela Natureza como as cascas dos mais diversos tipos, as estruturas de aquedutos e pontes idealizadas em arco, ou sistemas funiculares que utilizam o cabo associado a um sistema atirantado.

Porém, a questão persiste: serão ainda ideais os sistemas de estruturas que resistem pela forma, devendo os arquitetos pensar a arquitetura em função deles, ou a evolução da arquitetura e dos sistemas construtivos que utilizam tecnologias de ponta admitem que tais princípios devem ser deixados de lado, saindo a estrutura a reboque da forma arquitetônica?

Para que fique claro : **esta é a questão central da Tese.**

Certo é que o panorama atual já não se prende à ortodoxia de alguns anos atrás, sugerindo edifícios cada vez mais altos e formas cada vez mais irregulares porque a arquitetura como dizia Violet le Duc reflete o seu tempo.

Afinal, estruturas pneumáticas capazes de mudar de forma e até de cor, por exemplo, representam a realidade de uma arquitetura da qual estamos distantes hoje, aqui neste País, infelizmente. Não há como negar tal realidade.

Então, para pôr em destaque o objetivo da pesquisa, creio que o primeiro passo consiste em realizar a leitura das diferentes tipologias estruturais de acordo com critérios que levam em consideração a geometria da forma, os materiais estruturais que compõe tais tipologias e seu comportamento estático. Os quadros sinóticos do Cap. 2 para mim de importância fundamental, ilustram adequadamente esse raciocínio.

Estará dado assim o primeiro passo para o esclarecimento da questão colocada inicialmente, visto que não é possível chegarmos a uma conclusão definitiva sem o conhecimento integral das diferentes tipologias estruturais, idealizadas e construídas desde os tempos remotos até os dias atuais, e sem interpretar seu comportamento e desempenho do ponto de vista do espaço produzido e da estrutura.

Considero necessário e indispensável saber ver a arquitetura a partir de tais premissas, e para tornar possível a comprovação da hipótese lançada, algumas obras significativas serão analisadas no Capítulo IV do ponto de vista da resistência pela forma:

É justamente por causa das inúmeras e grandiosas conquistas da Tecnologia, que hoje as expectativas dos arquitetos contemporâneos podem ser atendidas integralmente, viabilizando toda e qualquer forma idealizada pela criatividade dos profissionais, desde que seja atribuída pelos mesmos a devida importância à estrutura no processo de produção do projeto de arquitetura.

Arquitetura : A produção contemporânea.

Fig.1 Demoiselle D'avignon

No início do século XX, a partir da tela “Demoiselle D’avignon” de Pablo Picasso, a pintura passou por um processo investigativo de transformação e que fazia referência à Arte Primitiva da Humanidade, carregada de simbolismo e expressão próprios de um estágio da civilização que não havia atingido o patamar acadêmico, formal e mecanizado em excesso. O rompimento com os cânones tradicionais se dá nesse período, considerado ponto de partida das pesquisas feitas.

Simultaneamente, na música, Philip Glass sucede Debussy, Stravinsky e Ravel, que por sua vez sucedem Bach, Vivaldi e Mozart (Século XVIII) Beethoven, Brahms e Verdi (Século XIX). Na literatura, Henry Miller aproximadamente na metade do Século XX escreve o best seller “Trópico de Câncer” subvertendo a moral universal conservadora.

Com a arquitetura não poderia ser diferente.

A simetria e a ortogonalidade da arquitetura tradicional sedimentaram-se nos princípios racionalistas dos sistemas estruturais, sobre os quais se enraizaram as técnicas construtivas que utilizavam a pedra, a argila, a madeira, o ferro e depois o aço e o concreto armado como materiais estruturais. Tudo deveria obedecer aos princípios racionalistas que definiam o módulo estrutural rígido que não se podia romper por causa da produção em série, bandeira e marca registrada da Revolução Industrial que mudaria a face do mundo a partir do final do Século XVIII. O primeiro arranha céu construído em estrutura de ferro, o edifício da Cia. Seguradora (Home Insurance Company) projetado por William La Baron Jenney,

(ver Cap. 2) toma como referencia esses princípios.

Tais princípios eram levados tão a sério que, por ocasião da visita de W. Gropius ao Brasil, quando Niemeyer levou-o a conhecer algumas de suas obras ao final do passeio Gropius exclamou: “ Oscar, gosto das suas casas, mas seus espaços não são multiplicáveis...!!! ”

Mas, ao projetar a Capela de Ronchamp, (1950) Le Corbusier até então considerado o arquiteto do cubo, do paralelepípedo e do cilindro regular, ajudou a criar a tessitura de um mundo de formas mágicas que não fazia parte do repertório dos arquitetos ditos modernistas até então, com exceção talvez de Frank Lloyd Wright.

Fig. 2 Capela de Ronchamp

Fig. 3 Interior da Capela de Ronchamp

“As grandes massas curvas de Notre Dame du Haut (Ronchamp) podiam ser o resultado de alguma determinação acústica, segundo declarou Corbusier.

Mas formaram juntamente com as profundas e irregularmente distribuídas aberturas das janelas nas paredes, uma aura misteriosa que lembra tanto as catacumbas ou os imensos mosteiros de pedra da Idade Média quanto alguns conceitos espaciais ainda mal compreendidos de hoje e do amanhã”.¹

Entretanto, (e o fato representa muito para nós brasileiros), antes de Ronchamp, Oscar Niemeyer já havia percebido as imensas potencialidades do concreto armado e suas possibilidades plásticas, material dócil o suficiente para se submeter ao traço do nosso maior arquiteto, e suficientemente resistente para garantir a necessária rigidez independentemente da forma idealizada.

Fig. 4 Igreja de São Francisco

E em 1942 surge a Igreja de São Francisco, um dos cinco edifícios do Conjunto da Pampulha na forma de quatro cascas, (na verdade a maior delas é um conóide porque suas paredes não são paralelas), materializando de forma totalmente coerente as idéias e a criatividade de Oscar e de sua arquitetura, que a partir daí, iria se

espalhar pelo mundo: “ Não é a linha reta que me atrai, mas as curvas presentes nas montanhas do meu País e no corpo da mulher amada...”

Fig. 5 Salão B
Palácio de Exposições de Turim

Um pouco depois em Turim na Itália, (1947-49) Nervi vence o Concurso de projetos do Salão B do Palácio de Exposições de Turim, depois de um período de pesquisas em torno da técnica construtiva do ferrocimento, O Palácio de planta retangular com 94,30 x 75,00 m. é constituído por uma abóbada de elementos pré fabricados apoiada em elementos de transição em forma de garfo dispostos a cada 7,50 metros.

¹ BLAKE, P. **Os grandes arquitetos**. Título do original: **The Máster Builders**. Ed.Record. Rio de Janeiro. 1966. Pág. 140.

Torna-se indispensável agora, voltar ao passado e lembrar um fato de grande importância para compreensão dos acontecimentos que permitiram a evolução sensível dos métodos e processos que envolvem o ato de projetar e de construir.

Veremos no Cap. 2 mais pormenorizadamente uma cronologia dos fatos mais significativos relacionados à arquitetura e engenharia, porém, *em passant*, cabe aqui uma referência à École des Beaux-Arts que sucedeu Académie Royale d'Architecture criada pelo Ministro das finanças de Louis XIV, Jean-Baptiste Colbert, em 1671.

A École Polytechnique foi fundada depois, mais precisamente durante a Revolução Francesa em 1794, de onde se conclui que a partir daí passou a existir uma clara intenção de busca por caminhos diferentes; quase uma cisão entre as duas correntes de pensamento, fundamentadas nos princípios da École Polytechnique x École des Beaux-Arts.

O que aconteceu em seguida viria a beneficiar as duas. De acordo com Giedion² “A École Polytechnique oferecia formação científica uniforme para as escolas técnicas avançadas – l'École des Ponts et Chaussées, l'École des Mines e a l'École de l'Artillerie, enquanto que na École des Beaux-Arts a discussão girava em torno da formação do arquiteto. Discutia-se:

1. Que princípios deve seguir a formação de um arquiteto?
2. Qual a relação entre o engenheiro e o arquiteto?
3. Quais as atribuições específicas de cada um?
4. Eles constituem uma só pessoa? ”

A dúvida perdura até hoje por incrível que possa parecer. Alguns livros escritos “a posteriori” excelentes por sinal, discutem a questão da formação específica dos dois profissionais, outros falam de estrutura do ponto de vista do cálculo, pouquíssimos abordam o assunto do ponto de vista conceitual, teses apresentadas analisam a formação de ambos e o ensino de estrutura nos cursos de arquitetura.

Não se pode afirmar por outro lado que não houve evolução nas duas áreas.

² GIEDION, S. **Espaço, Tempo e Arquitetura**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2004. Cap 3. Pag. 239.

Porém, sobrevive até hoje o pensamento inaceitável que arquitetura e engenharia são duas coisas distintas e separadas por um abismo intransponível, e que estrutura é “coisa de engenheiro”... como se o assunto em si não merecesse a devida atenção dos arquitetos ficando relegado a um plano secundário, e que dele devem se ocupar somente os profissionais especializados, os calculistas de concreto ou de aço, considerados pelos arquitetos profissionais necessários, porém, de diálogo difícil.

Não poderia ser de outra forma... o diálogo é sempre difícil quando não se entende o que diz o interlocutor...

Falta de competência por parte dos profissionais de arquitetura, de interesse e de humildade para reconhecer as próprias limitações de conhecimento, essa é, infelizmente a verdade cristalina que se apresenta, no panorama atual desta profissão tão antiga e ao mesmo tempo tão bela.

Le Corbusier em sua obra básica “*Vers une Architecture*”, talvez deprimido com a situação que já naquela época se apresentava crítica, em um arroubo de pessimismo escreve:

“ Os engenheiros são viris e saudáveis, úteis e ativos, morais e alegres. Os arquitetos são desencantados e desocupados, faladores ou lúgubres. É que em breve não terão mais nada para fazer!!!!”³

Voltando à citação anterior e deixando o pessimismo de lado, acredito que houve sim, uma considerável evolução paralela nas duas áreas. Tudo que aconteceu com a Engenharia Civil se relaciona à Arquitetura porque esta não pode viver sem aquela e vice versa, no fundo ambas estão ligadas por um cordão invisível e indivisível já que o objetivo foi, é e será sempre o mesmo: construir !

³ LE CORBUSIER. **Por uma arquitetura**. Editora Perspectiva - EDUSP. 1973. Pág. 6

Lembrando a definição clássica de Lucio Costa : “arquitetura é antes de mais nada **construção**, mas, construção concebida com o propósito primordial de ordenar o espaço para determinada finalidade e visando a determinada intenção.”⁴ Ou ainda:

“Se arquitetura é fundamentalmente arte, não o é menos fundamentalmente construção. É, pois, a rigor, construção concebida com intenção plástica. Intenção esta que a distingue, precisamente, da simples construção.

Ela não atua, porém, essa intenção plástica, de uma forma abstrata, mas condicionada sempre por fatores de natureza variável de tempo e de lugar, tais como a época, o meio físico e social, os materiais empregados, a técnica decorrente do emprego desses materiais, o programa, etc. Pode-se, assim, definir Arquitetura como **construção concebida com uma determinada intenção plástica, em função de uma determinada época, de um determinado meio, de um determinado material, de uma determinada técnica e de um determinado programa.**”⁵

Portanto, pode haver construção sem arquitetura, mas o ideal é sempre buscarmos, arquitetos e engenheiros trabalhando juntos, a qualidade do espaço e a qualidade da estrutura. Vale a pena lembrar o texto da Encyclopédie d’Architecture tão antigo (1878) e ao mesmo tempo tão atual :

“ Neste ano (1877) a questão (será o destino da arquitetura render-se à engenharia? será que o arquiteto se verá ofuscado pelo engenheiro?) ingressou na Académie mediante o oferecimento de um prêmio ao melhor ensaio que discutisse a união ou a separação entre o engenheiro e o arquiteto. Davioud, um dos arquitetos que projetaram o Trocadéro, ganhou o prêmio com esta resposta: A harmonia nunca se tornará real, completa e profícua até o dia em que o engenheiro e o artista fundirem-se em uma só pessoa. Temos por um longo tempo vivido sob a ilusão insensata de que a Arte constitui uma espécie de atividade distinta de todas as outras formas de inteligência humana, tendo sua única fonte e origem na personalidade do próprio artista e em sua imaginação volúvel”⁶

⁴ COSTA, L. **Sobre arquitetura**. Porto Alegre. Centro dos estudantes universitários de arquitetura. 1962.Pag. 203.

⁵ COSTA, L. **Sobre arquitetura**. Porto Alegre. Centro dos estudantes universitários de arquitetura. 1962.Pag. 113.

⁶ GIEDION, S. **Espaço, Tempo e Arquitetura**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2004. Cap 3. Pag. 242.

Em relação a este polêmico tema, os Engenheiros e Professores, Y.C.P. Rebello e R.M.L. Rebello da F. Brasil, escreveram um belíssimo e esclarecedor artigo publicado nos Anais das XXXII Jornadas Sul americanas de Engenharia Estrutural em Maio de 2006, transcrito parcialmente nesta Tese, onde afirmam:

“ Dúvidas históricas à parte, o que ocorria na verdade é que, de fato, no caso das construções, no início só existia um único profissional: o arquiteto. Esse profissional projetava os espaços, definia a estrutura, as fundações, os materiais, processos construtivos e até a decoração. Quando mais tarde, a loucura humana, na sua ânsia de conquistas lançou mão da pólvora, não como forma de demonstrar beleza e alegria como nos fogos de artifício, mas como objeto de destruição, a arquitetura feminina e cheia de encantos das catedrais teve de dar lugar à arquitetura masculina e sólida das fortificações. Nasce o engenheiro, o homem dos engenhos, treinado para construir paredes capazes de suportar grandes impactos.

A engenharia, assim, não deixa de ser um ramo da arquitetura que se especializou em edificações de grande resistência aos bombardeios das balas de canhão. Mas, infelizmente, mãe e filha se estranharam, e como personagens que se percebem com objetivos diferentes, seguem seus caminhos separados.

A arquitetura, como que ressentida da separação, penetra de maneira quase suicida em uma visão parcial do objeto edificado, a forma pela forma, expressando-se como pura arte, alheia e até mesmo nauseada dos benefícios que a evolução tecnológica poderia trazer.

A engenharia, adolescente arrogante, motivada pela possibilidade de estar mais próxima aos novos engenhos, apropria-se da tecnologia e a torna hermética, difícil de ser entendida por quem não fosse um iniciado. Deslumbrada pelo brilho das possibilidades tecnológicas faz-se penetrar na estreita faixa da especialização. Uma especialização que a cega impedindo-a de ver outras fronteiras...”⁷

⁷ REBELLO, Y.C.P. BRASIL, R.M.L.R.da F. Anais das XXXII Jornadas Sul americanas de Engenharia Estrutural. Maio 2006. ISBN 85- 99956-01-9

O panorama atual das profissões, hoje, é praticamente o mesmo desde a Renascença. O arquiteto, via de regra alheio às questões técnicas define a forma do edifício, deixando a solução estrutural por conta do engenheiro calculista, com quem não consegue estabelecer o menor diálogo, limitando-se a reclamar quando subitamente se dá conta da presença de um pilar em um lugar não desejado.

Tal situação tem origem nas graves deficiências nos conteúdos dos cursos de formação de arquitetos. Lamento profundamente o instante em que mãe e filha, como dizem Y. Rebello e R. Brasil trilharam caminhos diferentes!

Entretanto, há um pequeno número de admiráveis engenheiros e arquitetos que exercem brilhante e indistintamente as duas atividades : Santiago Calatrava, Marc Minram, João F. Lima e Vilanova Artigas (este já falecido) em um momento mais recente. Maillart, Nervi e Eduardo Torroja em um passado não muito distante.

No mínimo, a meu ver, os dois profissionais devem exercer suas atividades em conjunto, pois o ideal é o perfeito entrelaçamento entre as duas profissões!

Foi através do trabalho conjunto do arquiteto e do engenheiro que nasceram as grandes obras. O Centro Georges Pompidou, O Ginásio Esportivo de Tóquio, a Ópera de Sidney, as estruturas estaiadas das coberturas leves e das pontes modernas e os arranha céus que já estão superando hoje os 500 metros de altura. Novas realizações estão por vir e virão, graças à inesgotável criatividade e conhecimento dos dois profissionais, apoiados por uma tecnologia que a cada dia se aprimora, tendo como meta e objetivo principal o conforto, o bem estar e a realização do próprio homem.

CAPÍTULO 1

Fundamentos de estruturas para arquitetos

- **Fundamentação teórica :**
Conceitos fundamentais
Vínculos na Engenharia Estrutural
- **Estrutura e sua organização :**
Critérios de classificação dos sistemas estruturais de acordo com a sua geometria, materiais e comportamento estático.
- **O processo de transmissão de cargas :**
Estruturas formadas por associação de elementos lineares e planos x estruturas que resistem pela forma.

Estrutura : conceitos fundamentais

Tais conceitos indispensáveis a meu ver, objetivam uma compreensão melhor do todo, considerando que na grande maioria dos casos a estrutura é formada pela associação de elementos diferentes, com geometria também diferente, constituindo um conjunto harmônico onde cada um deles cumpre exatamente o seu papel

Elemento

Cada uma das partes de um todo.

Elemento estrutural

Cada uma das partes do todo que compõe uma estrutura. Apresenta um comportamento específico quando submetido isoladamente a um carregamento.

Sistema

Disposição dos elementos de um todo, coordenados entre si, e que funcionam de forma organizada.

Partido Arquitetônico

Consequência formal de uma síntese das condicionantes de projeto, tais como: programa, topografia, legislação, ideologia teórica entre outros.

Partido Estrutural

Decisão sobre aspectos da tecnologia que envolvem a definição e organização do sistema formado por um conjunto de elementos de concreto, aço ou madeira, papelão e outros materiais alternativos, tomada no momento em que se adota determinado partido arquitetônico.

Sistema Estrutural

Conjunto de elementos resistentes que, diante de uma solicitação externa, geram ações e reações entre si, utilizando mecanismos internos capazes de transportar cargas desde a cobertura até a fundação.

Estrutura:

Conjunto de elementos construtivos responsáveis pela estabilidade do edifício. Ossatura.⁸

A Estrutura é parte integrante, e em alguns casos, a própria essência da arquitetura. Para idealizá-la é preciso conhecê-la a fundo. Deve ser expressiva, visto que a forma do edifício está intimamente associada à forma da estrutura.

É fundamental para o estudante conhecer as diferentes tipologias, devidamente classificadas do ponto de vista da forma, materiais e comportamento estático, para posterior definição do partido arquitetônico contendo no mínimo a intenção da solução estrutural.

A estrutura pode ser tomada como um princípio fundamental na organização dos projetos arquitetônicos, ou como um mecanismo suporte de cargas. Sob esse aspecto estruturar implica o ato de estabelecer hierarquia e ordem simultaneamente em termos de espaço arquitetônico e translação de força física⁹.

As estruturas convencionais, são formadas por associações de elementos lineares planos e espaciais, ou resistentes pela forma, como as cascas as membranas sustentadas por cabos ou as pontes estaiadas.

A definição do Sistema Estrutural :

A Estrutura pode ser considerada um sistema de transmissão de forças, ou um conjunto de elementos que permite o deslocamento de forças externas, utilizando-se de mecanismos internos capazes de transportar cargas desde a cobertura até a fundação.

Como as potencialidades atuais dos sistemas estruturais simples ou compostos são muito grandes, o problema se reduz à questão da escolha do sistema estrutural mais adequado ao partido arquitetônico.

Como incorporar o sistema ao edifício ? Não se trata propriamente de incorporar, mas sim de idealizar tanto a arquitetura como a estrutura ao mesmo tempo no momento da concepção. Os primeiros croquis já deverão conter uma intenção preliminar da solução estrutural.

⁸ CORONA&LEMONS. Dicionário Brasileiro de Arquitetura, EDART - SP.Livraria e Editora Ltda. 1ª Edição, 1972. p. 207, 208

⁹ SNYDER, James C. & CATANESE, Anthony J. ; Introdução à arquitetura / [coordenação editorial de tradução [de] Heloísa Frederico. - Rio de Janeiro: Campus, 1984. p. 266

É importante e necessário lembrar que à medida que os edifícios aumentam de tamanho, o papel da estrutura como determinante da forma torna-se progressivamente um imperativo.

Podemos afirmar que uma das primeiras providências a serem tomadas no processo de definição do sistema, é a decisão em torno do tamanho do vão estrutural que determina o posicionamento dos pilares e demais componentes. A integração das partes com o todo irá determinar um mecanismo eficiente para a distribuição das forças através do sistema, desde a cobertura até as fundações.

A transferência das cargas verticais (em se tratando de estruturas convencionais), é feita por meio de elementos horizontais (lajes e vigas), que transmitem a somatória das cargas ao sistema suporte constituído por pilares ou paredes portantes. Espaço arquitetônico e sistema estrutural transformam-se em realidade devido à concepção integrada do espaço e da estrutura, ao princípio da ação e reação e ao mecanismo da flexão, visto que a transferência de cargas verticais através de elementos horizontais (vigas) para os verticais (pilares), é realizada por ela.

Na transmissão das cargas, a economia exige que a mesma se faça segundo um mesmo eixo vertical, desvios de pilares portanto devem ser evitados e na medida do possível eixos de paredes devem coincidir com os eixos de vigas, de onde se conclui que a devida integração estrutura e arquitetura é fundamental para a qualidade de qualquer projeto.

Na prática os edifícios são calculados em ordem oposta àquela em que são edificados. O processo é cumulativo. As cargas são acrescidas aos elementos de sustentação sucessivamente, na medida em que vão se aproximando da condição ideal de suporte representada pelo solo.

Fig. 1 Pilares e Vigas

Nas estruturas de pórticos, o conjunto dos pilares vigas e lajes estão ligados entre si através dos elementos denominados vínculos.

Dependendo da maior ou menor rigidez existente entre eles, elas (as estruturas) irão trabalhar em determinada condição estática.

Diz-se que a estrutura se encontra em uma condição isostática ou hiperestática, de acordo com o tipo de vínculo que caracteriza suas ligações. Veremos quais são eles.

Vínculos na Engenharia Estrutural

Nas estruturas formadas pela associação de elementos lineares e planos (pilares, vigas, tirantes e lajes) os elementos estão ligados entre si através de vínculos que lhes conferem um grau de liberdade maior ou menor, dependendo das suas condições de apoio.

Através deles, o edifício estará em uma condição isostática ou hiperestática, transferindo as cargas dos pavimentos até a fundação, visto que o conjunto se encontra digamos, “ancorado” ao terreno, responsável pela assimilação daquelas e pelo equilíbrio final do sistema.

Graus de Liberdade das Estruturas :

Um ponto tem, no plano, 3 possibilidades de movimento em relação a outro ponto:

Translação Vertical

Translação Horizontal

Rotação

Para termos uma estrutura, deve existir uma relação entre o movimento possível de um ponto de uma das peças do sistema, em relação a um ponto de outra das peças que compõe a estrutura.

Essa relação vincula a possibilidade de movimentos relativos entre as peças.

As regras mais simples são:

- 1) Não pode ter movimento de translação horizontal.
- 2) Não pode ter movimento de translação vertical.
- 3) Não pode ter movimento de translação e rotação.

Apoio:

Apoio é todo ente capaz de “vincular” um corpo a um sistema, de forma a impedir ou não o seu movimento em relação a este.

Os tipos de vínculos teóricos são:

1) Apoio simples:

Impede o movimento em relação a duas direções.

Absorve reações horizontais e verticais, porém não absorve momentos.

Permite a rotação do sistema em torno de 1 ponto.

Também chamado articulado fixo.

Reações:

Fig. 2

Fig 3

Fig. 4 - 5 : Estação Ponte Santo Amaro - Segmento Capão Redondo-Largo 13.

2) Apoio móvel:

Neoprene, rolete de aço etc.

Fig. 6

Impede o movimento vertical permitindo o horizontal e a rotação da peça em torno do ponto vinculado.

Permite reação ortogonal à sua linha de ação. Desse modo absorve somente reações verticais, porém não absorve momentos nem reações horizontais.

Deslocamento horizontal favorecido

Fig. 7

Fig. 8 Apoio móvel

Os 2 primeiros são comumente chamados articulações.

3) Engaste:

Impede o movimento em relação a duas direções, bem como a rotação.

Absorve reações horizontais e verticais e momentos.

Não permite movimento.

Fig. 9

Fig 10 : engaste

Exemplos:

Símbolo

Nome

Ação

Esforços

Engaste

Restringe todos os movimentos

Absorve momentos + forças

Apoio fixo

Restringe as translações

Absorve forças

Apoio móvel

Restringe as translações perpendiculares ao plano de rotação

Absorve Forças perpendiculares ao plano de rotação

Fig. 11

Estrutura e sua organização

A Estrutura é a essência da Arquitetura. Creio eu, que é absolutamente fundamental para qualquer arquiteto, saber ver a arquitetura a partir do reconhecimento interpretação e apropriação das diferentes tipologias estruturais, devidamente classificadas e organizadas, para definição do partido arquitetônico contendo no mínimo a intenção da solução estrutural.

Parece intuitivo que uma área maior resiste a uma carga maior, todavia, embora o conceito de “porte” de uma edificação esteja associado a uma complexidade maior da estrutura que a sustenta, não podemos afirmar que as dimensões do sistema estrutural acompanham de modo proporcional o aumento progressivo de área.

E por que é assim? Porque os elementos estruturais ligados entre si através de vínculos, deverão proporcionar a estabilidade necessária desde que dimensionados adequadamente, isto parece claro; todavia outras variáveis devem ser levadas em consideração, como o material estrutural e seu módulo de elasticidade, o tipo de ligação, a geometria dos elementos que compõe o sistema e o próprio sistema.

Então, para compreensão e posterior adoção desta ou daquela solução, ou deste ou daquele material, adotei critérios que levam em consideração os aspectos geométricos dos elementos estruturais e respectivos sistemas, os materiais estruturais e as técnicas construtivas importantes quando se pretende discutir questões relacionadas à solução estrutural e a execução da obra além da própria arquitetura, e o comportamento estático dos diferentes sistemas.

Qual solução adotar, qual o material estrutural mais conveniente, que tipo de ligação deverá existir, estrutura iso ou hiperestática ? tais questões deverão ser devidamente analisadas em função da economia, da praticidade construtiva e de determinada estética, sempre presente quando se trata de um verdadeiro projeto de arquitetura, diferenciado portanto de simples construção sem qualquer intenção plástica.

Critérios geométricos de Classificação

Critérios de classificação quanto aos materiais estruturais e técnicas construtivas

<i>Alvenarias</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Estruturais { Auto portantes { Taipa de mão { Taipa de pilão 	
<i>Concreto armado</i>	Moldado “in loco”	
<i>Concreto protendido</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Pré-tracionado { Pós-tracionado embainhado 	<ul style="list-style-type: none"> { com aderência { com aderência { sem aderência
<i>Madeira</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Maciça { Convencional { Bambu 	
<i>Pré fabricados</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Concreto { Aço 	
<i>Processos alternativos</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Argamassa armada { Solo cimento { Vidro { Papelão 	
<i>Estruturas mistas</i>	<ul style="list-style-type: none"> { Aço x concreto { Aço x madeira { Concreto x madeira 	

Critérios de classificação quanto ao comportamento estático

- **Estrutura Hiperestática**

Conforme definição anterior, nas estruturas hiperestáticas os elementos transmitem entre si esforços de flexão ao longo do sistema, reduzindo a intensidade dos esforços e permitindo a utilização de peças mais esbeltas formando o conjunto, um bloco espacial como se pode ver nas imagens abaixo:

Fig. 12 - Estrutura Hiperestática.
Organização tridimensional

Fig. 13 Edifício da Eletropaulo. SP

Viga contínua : a deformação por flexão em um vão transmitir-se-á ao outro.
As cargas sobre um vão serão resistidas pelo comprimento total da viga.

Fig. 14 Diagrama

Influência da continuidade no mecanismo portante.:

Em virtude da continuidade, a rotação da viga nos apoios fica restrita. A flexão máxima ocorre nos vãos extremos, onde a rotação de uma extremidade não é obstruída.

Fig. 15 Diagrama

Influência da rigidez do pórtico na distribuição dos esforços e na forma da estrutura :

Pórtico biengastado

Deformação por flexão

Diagrama de Momentos fletores

Fig. 16 Diagrama

Exemplo notável:

Fig. 17 Pórtico Estação Largo 13. Arqº J.W.Toscano

- **Estrutura Isostática**

Cada elemento transmite aos demais somente esforços de compressão ou tração resultando peças independentes entre si, permitindo a execução de estruturas desmontáveis (pré - fabricadas).

Pórtico biarticulado : [viga sem balanços].

Deformação por flexão

Diagrama de Momentos fletores

Fig. 18 Diagrama

Exemplo notável :

Fig. 19 MASP / São Paulo

Fig. 20 Esquema estrutural

O Processo de transmissão de cargas : análise gráfica.

O percurso da carga : processo de se determinar o modo como uma estrutura recolhe, transmite e redireciona o peso próprio e a carga acidental, através de seus elementos construtivos até as fundações e o solo.

Estruturas formadas por elementos lineares e planos

Fig. 21 - Plano horizontal e vertical
Distribuição uniforme de tensões

1. Área contribuinte

Parte de uma estrutura que contribui para a carga sobre um elemento ou peça estrutural.

2. Faixa de carga

Área contribuinte por comprimento unitário de uma peça estrutural de apoio.

3. Carga contribuinte

Carga que atua sobre um elemento ou peça estrutural coletada de sua área contribuinte.

Fig. 22 O percurso das cargas no espaço

4. Elemento principal

Peça estrutural que é essencial para a estabilidade de um todo estrutural.

5. Elemento secundário

Qualquer peça estrutural apoiada em um elemento principal.

6. Elemento terciário

Qualquer peça estrutural apoiada em um elemento secundário.

7. Apoio

Ponto, superfície ou massa que suporta um peso. Área de contato entre um elemento de sustentação, como uma viga ou treliça, e uma coluna, parede ou outro suporte subjacente.

Fig. 23 Detalhe

Estruturas que resistem pela forma : cascas

Transmissão de cargas. Análise gráfica

Palácio das Artes - São Paulo, 1951

Oscar Niemeyer, Zenon Lotufo, Hélio Uchôa, Eduardo K. de Mello

Fig. 24 - As forças seguem a direção dos meridianos e paralelos.

Fig. 25 - As direções das forças meridional e anular são defletidas como em um campo magnético.

Estruturas que resistem pela forma : tendas

Transmissão de cargas. Análise gráfica

Tennessee Amphitheater - EUA, 1982

McCarty, Bullock & Holsaple Inc.

Fig. 26 - Distribuição de tensões de tração

Grandes estruturas : pontes

Transmissão de cargas. Análise gráfica

Golden Gate Bridge – EUA, 1933 - 1937

Joseph Strauss

&

Irving Morrow

Fig. 27 - Transmissão de cargas pelo conjunto formado por cabos e tirantes

Iron Bridge – Inglaterra, 1776

Thomas Farnolls

&

John Wilkinson

Fig. 28 Transmissão de cargas

CAPÍTULO 2

Referenciais históricos

Início da Civilização

Fig. 1

Fig. 2 Museu de Arte Contemporânea

Entre tantos fatos significativos que marcaram a História Universal está a transformação das primitivas sociedades ao longo dos séculos, conforme os três períodos que correspondem à Pré História: os tempos que antecedem, que acompanham, e que sucedem os grandes fenômenos glaciais. Os últimos aconteceram pelo menos há 10.000 anos.

Toynbee¹⁰ afirma que a idade Pré Histórica se inicia a partir do acontecimento mais importante da história humana até hoje : o despertar da percepção consciente.

Mas, naquela época como em qualquer outra, períodos de frio intenso impõem a necessidade do uso de vestimenta e principalmente a busca do abrigo contra as intempéries.

A atividade constante durante o dia, traduzida na busca do alimento e na luta pela sobrevivência, implica na necessidade de repouso à noite, e em segurança.

Deixando os primitivos abrigos naturais, grutas e cavernas, as primeiras luzes da inteligência permitiram o imprevisto das habitações de junco, argila e palha, materiais encontrados com facilidade na Natureza. Portanto, a habitação como necessidade básica sempre esteve ligada ao ato de construir.

¹⁰ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.1 p. 47.

Fig. 3 Os sistemas primitivos. Vivendas Celtas primitivas

Análise gráfica do sistema estrutural da Figura 3 :

Fig. 4 Barras AC e BC submetidas a flexo compressão

Desde então, e em função de tais necessidades, o homem “inventa” a agricultura e a criação de animais, cria rebanhos, trabalha primeiramente as pedras transformando-as em instrumentos de corte na idade da pedra lascada, depois os metais, segundo Toynbee¹¹ **embora a domesticação de plantas e animais selvagens tenha se tornado o esteio da vida humana, a invenção da metalurgia foi o *chef d’oeuvre* do virtuosismo tecnológico**, e ensaia um tipo rudimentar de escrita que irá aparecer mais tarde, cunhada inicialmente em tábuas de argila, material natural utilizado também na fabricação de tijolos crus. O tijolo endurecido ao fogo é originário da região situada a Leste do Rio Eufrates.

A pedra natural por outro lado, muito antes de ser utilizada para construção do abrigo, servia como monumento aos mortos, pois nossos ancestrais embora donos de uma cultura rudimentar, necessitavam alimentar a esperança e a expectativa da sobrevivência do espírito. Para tanto, os monumentos religiosos formavam o elo inicial de ligação dos homens com os deuses.

Talvez a primeira manifestação de um sentimento religioso tenha sido o Menir, bloco de pedra de forma alongada encravado no solo com a parte pontuda voltada para o céu. Quando os menires eram dispostos em círculos denominavam-se Cromlechs. O mais famoso desses megalitos construído nas planícies de Salisbury na Inglaterra é Stonehenge, também conhecido como a “dança dos gigantes”.

Porém, o que caracteriza a idealização intuitiva de um sistema estrutural, onde dois elementos verticais trabalhando à compressão apóiam um terceiro horizontal submetido à flexão, é o Dólmen, sistema trilítico rudimentar e primeiro exemplo de associação pilar e viga:

¹¹ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.5 p. 67.

Fig.5 Dólmen de Stonehenge 2000 b.C. Salisbury England

O mesmo sistema aparece também em muitas construções, algumas das quais notáveis como o Portal dos Leões na Grécia:

Fig.6 Lion Gateway 1300 b.C. Mycenae Greece

Fig.7 Diagrama de tensões em uma barra fletida

A barra AB está submetida à flexão pura

Egito : Arquitetura monumental construída para a Eternidade.

A civilização mais antiga a deixar como herança monumentais construções que até os dias de hoje comprovam sua engenhosidade, é a egípcia. No antigo Egito é que se inicia a História da Arquitetura, embora todos os historiadores estejam de acordo em relação ao fato da Suméria (3.100 a 2.500 a.C.) ser universalmente considerada hoje, a civilização regional mais antiga.

Na arquitetura ao contrário dos Sumérios, e embora influenciados por estes até na estrutura da própria escrita, os Egípcios não utilizaram os tijolos de barro para erigir seus monumentos. Traduziram sua arquitetura monumental do tijolo de barro para a pedra, visto que havia abundância de material para tais objetivos.¹²

As construções egípcias mais notáveis são os Hipogeus, sepulcros escavados na rocha, as pirâmides, feitas de pedra e destinadas a servir como última moradia dos Faraós, e as Mastabas, túmulos de dimensões menores de forma tronco piramidal. Nota-se, portanto, que os aspectos monumentais das construções na Antigüidade estavam relacionados com o lado religioso das civilizações da época, porque se acreditava que a imortalidade podia ser atingida desde que o corpo permanecesse enterrado em um túmulo de dimensões monumentais.¹³

Segundo Salvadori,¹⁴ estas gigantescas estruturas constituem o maior conjunto de monumentos construídos pelo homem : treze milhões de blocos de calcáreo, dois milhões e trezentos mil na maior delas, Quéops ou *Khufu*, de acordo com seu nome egípcio, pesando cada qual duas toneladas e meia em média, perfazendo um total de seis milhões e meio de toneladas de pedra, que só permaneceram estáveis por causa da resistência da camada arenosa sob a qual existia uma formação de granito plana e compacta.

¹² TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra..** Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.7 p. 87.

¹³ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra..** Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.9 p. 104.

¹⁴ SALVADORI, Mário. **Why Buildings Stand Up.** New York: Norton, 2002. p 28.

Quéops possui $\frac{2}{3}$ da altura do primeiro arranha céu americano, o Woolworth Building em Nova Iorque, e durante séculos, com seus 137 metros deteve o recorde de altura, quebrado somente quando da construção da Catedral de Colônia na Alemanha, meados do século XVIII.

Percebe-se que na Antigüidade, embora ainda não existissem os processos construtivos baseados no comportamento de elementos resistentes capazes de trabalhar de forma solidária, nem por isso as construções deixavam de cumprir os propósitos a que se destinavam, permanecendo até os dias de hoje como fiel testemunho da capacidade inventiva da humanidade.

Fig. 8 Pirâmide de Gizé 2550 - 2470 b.C. :

Estrutura à compressão pura

Fig. 9 AB : apoio elástico

Análise gráfica

A história das civilizações passa pelos Sumérios, (povo cuja fusão com os Acádios mais tarde deu origem aos Caldeus), estabelecidos às margens dos rios Eufrates e Tigre, enquanto a Índia e a China organizavam-se geopoliticamente em territórios até hoje ocupados por seus descendentes. A região dos rios Tigre, Eufrates e Nilo, conhecida como Mesopotâmia (atual Iraque), e localidades próximas transformaram-se no berço de um grande número de raças e culturas impossíveis de se definir com rigor, visto ser imprecisa a ordem cronológica dos acontecimentos.

Toynbee afirma ¹⁵ que, muito provavelmente um pouco depois do surgimento das civilizações sumério acadiana e egípcia, as civilizações da Meso América e da cordilheira andina na América do Sul, embora existentes, eram desconhecidas de quaisquer dos habitantes do Velho Mundo até Colombo desembarcar pela primeira vez no lado americano do Atlântico.

A Caldéia e Assíria eram regiões em que o uso característico da argila caracterizava os processos construtivos, da seguinte forma:

Na Caldéia : Argila em forma de tijolo.

Na Assíria : Argila associada à pedra.

O arco de tijolo já era construído pelos Egípcios e pelos Assírios, de modo que os Romanos posteriormente o receberam como herança de civilizações mais antigas.

A grande maioria dos historiadores afirma que a abóbada de berço era construída com frequência na Babilônia, cidade situada na Mesopotâmia e capital do Império do mesmo nome fundada pelos Amoritas, povo de língua semítica.¹⁶ Lá também se construiu a mais antiga torre que se tem notícia : A torre de Babel.

Uma primeira análise dos processos construtivos utilizados pelas primitivas civilizações permite de imediato as deduções seguintes:

- os materiais disponíveis eram basicamente a argila matéria prima da alvenaria de adobe, a pedra e a madeira;
- as técnicas construtivas se baseavam no apoio simples dos materiais sobrepostos e a estrutura resultante trabalhava exclusivamente à compressão.

¹⁵ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**.. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.4 p. 50.

¹⁶ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**.. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.8 p. 100.

A limitação do comportamento estrutural das edificações não significava que as construções eram de pequeno porte. O templo babilônico conhecido como Zigurate, de planta quadrada, atingia quase 400 m. de lado. O pagode indiano estruturado em madeira sobre base de pedra chegava a cinco pavimentos.

Textos de livros especializados dão idéia das gigantescas dimensões dos templos Egípcios.

Pérsia:

Do Egito e da Caldéia, duas correntes de idéias se propagam em duas direções:

Uma se dirige à Ásia e a outra ao Ocidente, levando o conhecimento ainda precário, porém adequadamente sedimentado em longos experimentos, que daria origem à nossa arquitetura.

A corrente oriental, partindo do Egito, dirige-se à Pérsia, atual Irã, expandindo-se pelo Continente Asiático e entrando em contato com as antigas civilizações da Índia e da China, onde uma dinastia denominada Shang (Ying) havia surgido por volta de 1.500 a.C.¹⁷

Necessário assinalar que enquanto a civilização chinesa estava surgindo na bacia do rio Yang Tse, a correspondente Meso Americana estava entrando na fase de formação da sua cultura, considerando que estes povos que viviam da coleta de alimentos silvestres e da caça, passaram a viver da agricultura¹⁸

No Oriente, a argila também era utilizada como matéria prima na construção de cúpulas e abóbadas, chegando os Persas a apoiar as primeiras em estruturas de planta quadrada, fato que por si só já representava um considerável avanço na arte de construir.

¹⁷ TOYNBEE, Arnold. A Humanidade e a Mãe Terra. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.13 p. 139.

¹⁸ TOYNBEE, Arnold. A Humanidade e a Mãe Terra. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.13 p. 142.

Portanto, utilizando a argila a pedra e a madeira, esta última tão abundante na China e no Japão, que permitiu um avanço considerável das artes da carpintaria tanto de um lado como do outro, visto que a China representou para o Japão o que o Império Romano representou para o Ocidente, construiu-se muito na Antigüidade.

Um “caldo de cultura” que envolvia também conhecimentos essencialmente práticos relacionados com as técnicas construtivas acumulados por milênios, acabou por atingir a Grécia, levado pelos Fenícios inventores do alfabeto e povo considerado navegador por excelência, que acabou servindo de elo de ligação entre o Vale do Nilo e as ilhas do Mar Egeu. Paralelamente, as culturas Assíria e Caldéia, esta última herdeira dos conhecimentos dos Assírios, iriam exercer forte influência no Ocidente, levada por terra pelos Hititas.

Não se sabe exatamente como isso ocorreu. O registro desses acontecimentos se perde na noite dos tempos, e não há maneira de descobrir o fio da meada de tantos e tão importantes acontecimentos. Porém a gênese do interesse pelo avanço das idéias que proporcionaram tantas descobertas está na curiosidade latente no espírito humano, e em suas necessidades de abrigo e sobrevivência, individual enquanto homem, e coletivo enquanto raça evoluída.

Alguns fatos marcantes assinalam a evolução do conhecimento e da técnica até então:

1 O aparecimento da escrita a partir da invenção do alfabeto, marco zero da História das civilizações.

2 A domesticação do cavalo na estepe Eurasiana por volta de 1.800 a.C. e a invenção de uma nova arma militar – o carro de duas rodas puxado a cavalo, o que explica as invasões bárbaras na Suméria, Acádia e Egito no Século XVIII a.C. bem como o sucesso dos invasores. Essas invasões provocaram grandes deslocamentos das populações tendo como consequência uma vasta modificação no mapa das civilizações do Velho Mundo.¹⁹

¹⁹ TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.12 p. 126.

3 A invenção da moeda, favorecendo as negociações até então realizadas à base de troca simples de mercadorias.

4 A utilização do ferro permitindo a fabricação de artefatos e utensílios indispensáveis no dia a dia, além de ferramentas capazes de cortar e moldar adequadamente as matérias primas.

Grécia e Roma.

Os gregos, descendentes de duas raças distintas, os dóricos e os jônicos, achavam que a criatura humana era a medida de todas as coisas.

Sua Arquitetura e seus horizontes eram feitos de acordo com tais princípios, e por causa disso se eternizaram.

O uso do ferro forjado pelos Assírios e pelos Hititas, (mormente estes últimos que guardavam para si o domínio da técnica como se fosse um segredo de estado), favorecendo o corte mais preciso da pedra e o desenho do relevo, constituiu-se na inovação que permitiu mais tarde o desenho das caneluras na coluna grega. Não surpreende o fato de que em Atenas o ferro já estivesse sendo usado substituindo o bronze para a produção de ferramentas e armas por volta de 1.050 a.C.²⁰

²⁰ TOYNBEE, Arnold. A Humanidade e a Mãe Terra. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.14 p. 152.

Fig. 10 Partenon

Fig.11 Planta

Fig.12 Análise gráfica do sistema estrutural do Parthenon

Embora não houvesse se apropriado do princípio do arco e seus derivados (abóbadas e cúpulas), limitando-se às combinações do sistema trilítico (colunas e dintéis), suas construções eram feitas com tal proporção e equilíbrio, que sua obra mais representativa, o “Parthenon”, faz parte do rol das obras mais marcantes da História da Arquitetura.

Para os gregos, a construção de um templo não assumia o significado dos dias de hoje em que o templo é um local de orações. Para eles, o templo era dedicado aos deuses que lá residiam. Os elementos de seus edifícios não diferiam muito dos atuais a não ser por um detalhe significativo: o sistema estrutural resultante da associação de pilar viga e laje, chamados na época coluna arquitrave e teto, baseava-se na resistência isolada de cada componente, formando um conjunto essencialmente isostático tal como os pré-moldados modernos, somente que seus elementos eram evidentemente muito menos resistentes.

A cultura helênica voltava suas idéias e seu pensamento para os deuses do Olimpo, enquanto que a romana dedicava-se a realizações materiais indispensáveis à sobrevivência de um Império que viria a se tornar referência histórica no mundo ocidental.

Da arte grega, centrada na criatura humana e dedicada ao culto da harmonia e da beleza, evoluímos em busca de uma arquitetura já nessas alturas necessariamente utilitária.

Os processos construtivos atestam um gênio organizador que dispõe sem medida da força material, e a arte de construir consiste em utilizar essa força ilimitada que as grandes conquistas do Império colocaram a seu serviço.²¹

Pontes, aquedutos, palácios, mercados, anfiteatros, termas, eram construídos a partir da **descoberta do concreto** e da construção das abóbadas de berço e de arestas

O concreto romano era uma mistura de cacos de mármore e tijolo, areia e um cimento vulcânico chamado “pozolana”.

A argamassa resultante enfeixada por paredes de tijolos ou blocos de pedra, formava um conjunto estrutural bastante consistente trabalhando à compressão, capaz de receber a carga das abóbadas e cúpulas como no caso do Panteon, domo hemisférico cujo diâmetro interior mede mais de 40 m. tendo seu ponto mais elevado situado a 43 m. de altura, e que utiliza um sistema construtivo essencialmente monolítico: seus contrafortes de sustentação tem 6 m. de espessura !!

²¹ Choisy, Auguste. **História de la Arquitectura**. Ed. Victor Leru. Buenos Aires [1951]. Cap. 12. Pg 227.

Fig. 13 Panteon

Fig. 14 Planta

Dessa forma foi resolvido o maior problema dos construtores da época: como vencer um vão de grandes dimensões. Tanta engenhosidade, aliada a um senso prático agudo, acabaram por permitir uma evolução considerável das suas técnicas construtivas.

Fig. 15 Análise Gráfica

Exemplo notável da eficiência dos novos métodos é o Coliseu, um edifício de enormes proporções (45 m. de altura) capaz de acomodar 50.000 pessoas, mais do que a maioria dos estádios brasileiros modernos. A técnica utilizada consistia em agrupar abóbadas de arestas ao longo de dois eixos de 150 x 180 m. em estrutura radial, sustentando fileiras de assentos em torno de um espaço de arena, onde aconteciam as corridas de bigas e os combates entre gladiadores.

Roma foi fundada pelos Etruscos, habitantes da Etrúria ou Tirrênia, a Itália antiga, em + ou – 550 a.C.²². O grande mérito da civilização Romana deve-se à incorporação de elementos de outras culturas, deixando de lado tipologias arquitetônicas menos interessantes em vista das limitações construtivas relacionadas às pequenas dimensões das vigas de madeira ou dos blocos de pedra, e as preocupações helenísticas com as chamadas “ordens”, passando à pesquisa e posterior descoberta de novos sistemas construtivos.

Um deles é a tesoura formada por um triângulo indeformável de lados comprimidos e base tracionada.

Ao contrário dos gregos que apoiavam as coberturas diretamente sobre vigas, os romanos descobriram que a carga das duas metades dos telhados exerce sobre os apoios uma tensão absorvida pelo tirante. Embora muita gente não saiba, por volta do ano 0 da era cristã já se conhecia a técnica de armar telhados com a linha trabalhando à tração e o pendural independente.

Mas a razão fundamental que permitiu a construção dos aquedutos, e das grandes obras como o Panteon e o Coliseu, foi utilização **do arco**, a maior invenção da História da Arte Clássica e da Arquitetura. De acordo com os Historiadores modernos, o arco já havia sido utilizado pelos Egípcios, Assírios e Etruscos que se encarregaram de transmitir aos Romanos aquilo que foi o mais importante legado de uma civilização para outra.

Uma segunda análise dos processos construtivos utilizados por ocasião do momento histórico que corresponde à derrocada do Império Romano e o início da difusão do Cristianismo pelo mundo, leva-nos a mais uma importante conclusão:

²² TOYNBEE, Arnold. **A Humanidade e a Mãe Terra**.. Rio de Janeiro: Zahar Editora. 1979. Cap.34 p. 301.

Depois do sistema trilítico, da construção da abóbada de berço e da abóbada de arestas, a cúpula forma com aquelas o conjunto de elementos que irá determinar o rumo nos próximos séculos, aos Arquitetos e à Arquitetura, tanto do ponto de vista estético quanto da estabilidade das construções.

O que havia, era uma procura instintiva de um modelo que atendesse a necessidade de se vencer grandes vãos, amparando e concentrando os esforços resultantes das cargas das coberturas em um número menor de apoios situados na periferia dos edifícios, às vezes apoiados por paredes maciças destinadas a combater empuxos gigantescos, impossíveis de serem absorvidos pela fragilidade dos materiais utilizados.

Portanto, as dimensões dos edifícios aumentaram consideravelmente, **e embora sua estabilidade estivesse relacionada à sua massa**, não há como negar a audácia estrutural dos Romanos, e os avanços obtidos na concepção das estruturas.

Percebe-se que, enquanto os gregos utilizavam basicamente o pilar e a viga, na arquitetura dos romanos, os arcos as abóbadas e as cúpulas estavam presentes assinalando uma maior preocupação com as dimensões do espaço interno, enquanto que os gregos davam mais ênfase à forma escultural externa. Além disso, os edifícios romanos assumiam proporções muito maiores.

A Idade Média: o poder da Igreja e do Estado.

A história política da Idade Média mistura-se à história da Igreja, e a construção destas significava ao mesmo tempo afirmação de poder, tanto espiritual quanto político.

O termo “Idade Média” assinala um intervalo de tempo correspondente a milhares de anos, que vai do Império Romano à Renascença, mais ou menos entre o ano 500 da era Cristã até o início do Século XVI, marcado por uma seqüência de invasões e guerras permanentes conhecido pela expressão “Idade das Trevas”. Os anglos saxões conquistam a Inglaterra no Século V, os muçulmanos invadem a Espanha no Século VIII, hordas húngaras invadem a Europa central no Século IX, enquanto que os vikings se estabelecem na Normandia no século X e a China é invadida por Genghis Khan, líder Mongol no Século XIII.

Porém, do lado Oriental do Império Romano, mais precisamente em Bizâncio, os construtores iniciavam suas atividades em um ritmo febril, inaugurando uma era extremamente fecunda chamada de “Era de Ouro”, em se tratando de Arte e de Arquitetura. Começa em 532 a construção da mais famosa das igrejas Bizantinas : a Basílica de Santa Sophia, de Antêmio de Trales e Isidoro de Mileto que por sinal não eram arquitetos, mas matemáticos!

Fig. 16 Basílica de Santa Sophia

Fig. 17 Croqui

A Catedral de Constantinopla construída por ordem do Imperador Justiniano impressiona pelas suas dimensões. A cúpula principal de tijolos, com mais de 30 m de diâmetro parece flutuar no espaço. Os enormes empuxos horizontais são absorvidos pelas semi- cúpulas do eixo leste-oeste e pelos contrafortes maciços ao norte e ao sul, situados do lado externo das naves laterais e unidos por arcos aos 4 pilares centrais. (ver fig. 16)

A esta altura, a Arquitetura Românica (início do século IX) caracterizada pelos sistemas trabalhando a compressão, flui através das obsessivas tentativas de se aperfeiçoar os modelos estruturais destinados a servir de suporte aos edifícios religiosos dotados de programas cada vez mais complexos que demandavam espaços cada vez mais generosos.

Todavia, à medida que a arquitetura evolui no Oriente, com o Império Bizantino dando continuidade à cultura e às tradições romanas, o mesmo não acontece do lado Ocidental, onde as construções de grande porte acontecem de forma esporádica, na maioria das vezes face à demanda crescente do Estado e do Clero, reduto das principais manifestações intelectuais da época.

A arquitetura atravessa então um longo período de estagnação por quase cinco séculos, quando a Europa convulsionada pelas invasões bárbaras vivencia no intervalo de tempo compreendido entre os séculos XI e XII uma realidade bem distinta motivada pelo sentimento de fé religiosa, razão principal das peregrinações em direção ao Oriente e das Cruzadas.

O Ocidente desperta para uma nova realidade... O instintivo desejo de reorganização social se faz presente de forma imperativa: surgem as línguas românicas e a arte se transforma.

E em dois momentos bem distintos, o Românico caracterizado pelo seu próprio nome tomado emprestado às diversas línguas que lhe são contemporâneas e pelo uso de vários tipos de abóbadas, (de berço, de arestas, e de berço geminadas), e o Gótico onde a estrutura passa a representar seu verdadeiro papel na história da arte construtiva, trazem vida nova à arquitetura, que adquire uma feição desconhecida até então, resultado de tantos e tão exaustivos experimentos.

Um único e grandioso objetivo é comum aos dois: colocar uma abóbada na Basílica Latina.²³

O Gótico preconiza e realiza em um esforço supremo uma parte de algo que o Movimento Moderno séculos depois iria cristalizar :

A obediência irrestrita à lógica construtiva do edifício, onde a estrutura atuante terá seu peso próprio reduzido, e onde cada elemento irá desempenhar o seu verdadeiro papel.

Até o românico, a massa compacta das coberturas se une às paredes portantes formando um único bloco maciço.

Fig. 18 Esqueleto de nervuras

No Gótico, um esqueleto de nervuras sob as abóbadas de arestas, se encarrega de transportar as cargas para fora do corpo principal do edifício até os arco botantes, libertando as superfícies laterais maciças de seu papel de sustentação, pontilhando-as de vitrais coloridos capazes de permitir a entrada de luz no interior das catedrais até então pobremente iluminadas.

Outra característica do gótico é o arco ogival, um artifício utilizado com o propósito de aumentar a altura das colunas, construídas muito baixas e com seções exageradas pelos arquitetos românicos. Graças a tais artifícios, **pela primeira vez na História da Arquitetura o “esqueleto estrutural” começa a tomar forma independente das paredes de vedação**, representado pelas colunas sustentando abóbadas sobre pendentes apoiadas em contrafortes, livrando assim grandes superfícies laterais sem função estrutural, agora preenchidas por vitrais capazes de permitir a entrada de luz no interior das catedrais até então pobremente iluminadas.

²³ Choisy, Auguste. **História de la Architectura**. Ed. Victor Leru. Buenos Aires [1951]. Cap. 15. Pg 402.

Uma das obras características do Gótico é a Catedral de Notre Dame em Paris, que teve seu início em 1163 no final do século XII, porém a obra que marca seu início é a Catedral de St. Denis iniciada em 1144.

Fig. 19 Notre-Dame de Paris

Fig. 20 Catedral de St. Denis

Na Itália, a Catedral de Florença (Santa Maria del Fiore) iniciada em 1296, mais Renascentista primitiva do que Gótica, teve a estabilidade da cúpula construída após a construção do corpo principal da igreja, garantida graças à genialidade de Brunelleschi.

O Autor do projeto da igreja foi Arnolfo di Cambio. A execução foi interrompida devido à sua morte até que outro arquiteto, Giotto, retomasse a obra. Algumas modificações foram introduzidas na planta original por dois outros Arquitetos que a concluíram em 1357: Francesco Talenti e Andrea Pisano.

Sua planta é cruciforme. No encontro das duas cruzes onde se forma o tambor foi erguida a cúpula., iniciando-se os trabalhos em 1417.

Fig 21 Planta
Catedral de Florença

A responsabilidade pela nomeação do Arquiteto responsável pelo projeto e direção das obras cabia à Guilda de Ofícios de Florença, supervisionada pela comissão que supervisionou a construção da Igreja, a Opera del Duomo. Era sabido que as dificuldades para a execução eram imensas, e havia um certo temor que a obra não se realizasse por várias razões, a principal delas dizia respeito à total impossibilidade de utilização naquela época, de andaimes capazes de sustentar a cúpula durante a construção mesmo que provisoriamente.

Foi através de um concurso realizado após a conclusão da estrutura octogonal que apoiaria o domo, que um jovem Florentino chamado Filippo Brunelleschi para espanto geral afirmou que o mesmo poderia ser construído sem o auxílio do cimbramento central, até então considerado indispensável.

Para a mentalidade conservadora dos construtores daquela época, idéias revolucionárias como a invenção de Filippo pareciam inverossímeis, mas a tenacidade e a ousadia e a convicção daquele jovem de apenas 24 anos acabaram prevalecendo. Ele preparou um pequeno modelo feito de tijolos para que a Comissão pudesse entender o que ele havia planejado e acabou por convencê-la. Finalmente foi nomeado um dos responsáveis pelo projeto.

Brunelleschi havia começado sua carreira como escultor, tendo conquistado o segundo lugar no concurso realizado para a escolha do projeto da porta do Batistério, concurso este vencido por Ghiberti. Por causa do resultado, este, foi nomeado como o segundo responsável.

Mas a invenção era de Filippo, e ele sabedor de que Ghiberti não poderia prosseguir com o projeto e a execução sozinho, acabou dando um jeito de permanecer como o único responsável pelo serviço fingindo-se de doente. Como era de se esperar o artifício deu certo, e ele acabou permanecendo como o único responsável pelo projeto, contando apenas com a colaboração de d'Antonio Battista mestre construtor.

Mudou-se para perto da obra, escolhendo pessoalmente a argila que serviria para o cozimento dos tijolos e supervisionando os mínimos detalhes da execução, chegando a treinar ele próprio a mão de obra não especializada, que não fazia parte das Corporações de Ofícios.

A tarefa consumiu dezesseis longos anos, os últimos de sua vida, até que sua idéia revolucionária ficasse pronta em 1436.

De acordo com Salvadori, a conclusão da magnífica obra levou Leon Batista Alberti o primeiro historiador da arquitetura a escrever:

“ Quem seria injusto e hostil a ponto de não louvar Pippo o Arquiteto, ao ver aqui uma estrutura tão portentosa, erguida acima das nuvens, tão grande a ponto de cobrir com sua sombra todo o povo da Toscana, construída sem qualquer auxílio de escoramentos centrais em madeira, uma invenção a respeito da qual, se eu sou um bom juiz, é tão inacreditável que tenha sido realizada em nossa época, que jamais os antigos poderiam imaginar ser um dia, factível de ser concebida. ”²⁴

O sistema estrutural da cúpula, previa duas estruturas radiais octogonais ligadas entre si por nove anéis paralelos de diâmetro progressivamente menor da base até o topo.

A estrutura repousava em um anel de compressão, tal como são idealizadas as modernas cúpulas em concreto armado e aço. Este anel sustentava o lanternim de mármore colocado no topo, e desenhado por ele próprio.

A peculiaridade do sistema consiste na possibilidade de inspeção da estrutura, realizada por intermédio de escadas e galerias situadas entre as duas superfícies.

Mas a real garantia da estabilidade do sistema se devia aos anéis de arenito ligados às nervuras, reforçados na sua parte externa por correntes de ferro capazes de absorver as tensões tração geradas pelo peso da cúpula.

²⁴ SALVADORI, Mario. **Why Buildings Stand up ?** N.York : W.W. Norton & Company. 1990. Cap. 13.

Salvadori faz uma interessante comparação da estrutura do domo de Santa Maria dei Fiore com o Pantheon, afirmando :

“ Enquanto o Pantheon permanece estável graças aos peso das grossas paredes externas capazes de absorver os empuxos horizontais na base da cúpula, os duplos domos leves projetados, repousam na suficientemente rígida estrutura mista de arenito e ferro dos anéis que impediram o colapso da cobertura nos mais variados estágios da construção. ” ²⁵

Na verdade os sistemas estruturais do Pantheon e do domo da Catedral são muito semelhantes. O que diferencia os dois, é o fato de o primeiro descarregar como diz Salvadori, todo o seu peso nas paredes externas, enquanto o domo absorve as tensões sozinho graças ao reforço dos anéis travados pelas correntes de ferro.

Outra peculiaridade é que o Pantheon dispõe de uma única rede de nervuras, enquanto que o domo da catedral possui oito nervuras duplas com largura de 4,20 m.e mais duas menores com largura de 2,10 m. intercaladas entre as principais, totalizando 24 nervuras, todas apoiadas no anel central situado no topo que sustenta o lanternin de mármore, a esfera dourada e a cruz.

As superfícies formadas por triângulos esféricos entre as nervuras, em número de oito externamente e mais oito internamente, são inclinadas para dentro em relação ao eixo vertical do domo.

O conjunto todo permanece estável graças ao travamento realizado pelos anéis horizontais reforçados por correntes de ferro revestidas com chumbo, dispostos da base até o topo em intervalos iguais, como ilustram os croquis.

Fig 22 Croqui

Anéis paralelos

²⁵ SALVADORI, Mario. **Why Buildings Stand up ?** N.York : W.W. Norton & Company. 1990. Cap. 13. Pag. 238.

Fig 23 Corte esquemático

O sistema apoia duas cascas finas de tijolo trabalhando exclusivamente à compressão. Entre elas, cinco galerias circulares possibilitam a inspeção da cúpula, permitindo a visualização das ligações entre as nervuras e os nove anéis horizontais.

Apesar do formato octogonal pode-se afirmar que o desempenho do conjunto formado pelas nervuras inclinadas, pelos anéis horizontais reforçados por correntes e pelas superfícies de tijolos intertravados, funciona como um domo contemporâneo.

Fig 24 Esquema estrutural : perspectiva

O mais incrível da solução de Brunelleschi foi a idealização de um projeto executado sem a necessidade de escoramento central, e a consciência que temos de que naquela época não havia o conhecimento de base científica que existe hoje, colocado à disposição dos arquitetos realmente interessados, e que permitiu a construção de magníficas estruturas de domos conforme os exemplos exibidos nas próximas páginas desta Tese.

Afinal, naquela época, Isaac Newton nem havia nascido!

É bem provável que Filippo tenha analisado cuidadosamente os domos construídos pelos romanos, em especial o Pantheon, e observado que quando as nervuras se apóiam no anel central que trabalha à compressão, fica pendente a solução do problema das cargas transmitidas por elas para baixo, gerando empuxos horizontais gigantescos. Em alguns casos, como é sabido, para anular esses empuxos é necessário que o anel da base seja protendido, como é o caso do Auditório Elis Regina do Parque Anhembi projetado pelos Arquitetos Miguel Juliano e Jorge Wilhelm.

Segundo Salvadori, um detalhe foi decisivo para o trabalho :

“ Durante a construção, o anel superior somente pode atuar de forma eficiente somente quando seu perímetro está fechado. Mas não dava para fechar o anel superior instantaneamente, e no caso, enquanto ele não estivesse fechado não dava para apoiar todos os meridianos.

Brunelleschi resolveu o quebra cabeças utilizando um expediente simples que consistia em conectar o anel superior ainda incompleto aos anéis inferiores já devidamente concluídos. Ele apoiava os tijolos que formavam os triângulos esféricos os de cima sobre os de baixo, mas intercalava as camadas de modo tal que a cada 3 tijolos deitados, um era inserido na vertical, formando uma espiral ascendente ao longo da superfície do domo ligando-se à camada adjacente e criando um efeito de espinha de peixe na alvenaria.

Como o tempo requerido para o assentamento da argamassa era menor do que o tempo necessário para completar uma nova fiada de tijolos, cada fiada incompleta e em execução estava sempre amarrada às três últimas dispostas abaixo, absorvendo o empuxo horizontal graças ao apoio simples sobre as camadas inferiores.”²⁶

²⁶ SALVADORI, Mario. **Why Buildings Stand up ?** N.York : W.W. Norton & Company. 1990. Cap. 13. Pag. 240.

Quando se inspeciona a disposição dos tijolos por meio das galerias entre as duas superfícies percebe-se que nenhum detalhe construtivo deixou de ser resolvido, graças à percepção aguda do Autor. Os tijolos dispostos em ângulo reto em relação à superfície e inclinados para dentro podem ser observados a olho nu.

A genialidade da concepção da estrutura do domo, que assegura um desempenho equilibrado ao conjunto graças à integração entre as nervuras os anéis e as superfícies inclinadas de tijolo maciço, deve ter sido notada pelos membros da Comissão que iria supervisionar a construção da Igreja, que a partir daí resolveu pagar para verificar, se de acordo com o Autor, realmente a estrutura do domo poderia ser erguida sem o auxílio do escoramento central, tal como ocorreu.

Irônica, e inesperadamente, quando a obra se encontrava quase concluída, e Brunelleschi já havia desenhado o lanternin de mármore que iria sustentar a esfera e a cruz, em 1446 ocorre o seu falecimento.

Fig 25 Catedral de Florença

O grande Arquiteto não veria sua obra concluída, mas o reconhecimento a admiração do povo de Florença expressa por meio de uma placa colocada dentro da Catedral que ele projetou e construiu contando apenas com a ajuda dos operários humildes, seus compatriotas, são e sempre serão eternos, visto que se trata de uma das obras mais grandiosas e belas de toda a História da Arquitetura !!

A Renascença (Século XV a XVII)

Limitado pela falta de deduções matemáticas, (o primeiro cálculo matemático da História aconteceu em 1742, realizado por Giovanni Poleni, professor de Física experimental da Universidade de Padova, para fins de reforço estrutural da cúpula da Basílica de São Pedro em Roma), visto que os primeiros estudos sobre o comportamento físico dos elementos estruturais foram feitos por **Galileo Galilei** (1564 – 1642), o Gótico se extingue no século XV.

Em 1452, Leon Battista Alberti, humanista italiano, arquiteto e principal responsável pelas teorias artísticas do Renascimento, escreve “*de Re Aedificatoria*” distribuída em dez livros, expondo novas teorias baseado nos textos de Vitruvius, considerado o primeiro grande teórico da Arquitetura, **sugerindo o estabelecimento de uma divisão clara entre as tarefas de quem projeta, das tarefas de quem constrói.**

Filippo Brunelleschi, como vimos, é outro que se identifica com o primeiro período Renascentista. E, embora houvesse produzido artistas como Francesco Borromini, Donato Bramante, Gian Lorenzo Bernini, Raffaello Santi (Raphael), Leonardo da Vinci, Michelangelo Buonarroti, Andrea Palladio e Giacomo Barozio da Vignola, muito pouco ou quase nada se produziu em termos de inovação estrutural na Renascença.

Tendo como centro Florença, a arquitetura da Renascença espalhou-se pela Europa, em especial pela Alemanha e Espanha até a chegada do Barroco por volta do século XVII.

Em paralelo, alguns fatos de importância fundamental para a História e para a Ciência relacionados à Arquitetura e à Engenharia, ocorreram :

1. Em 1637, René Descartes (1596 - 1650) publica “ O Método “, obra que conduz a uma maior sistematização da Ciência.

Quando afirma : “ *I have described the earth, and all the visible world, as if it were a machine* ”, Descartes anuncia a Idade da Razão, e o nascimento do Método Científico Moderno.²⁷

2. Isaac Newton (1642-1727), cientista e matemático inglês, estabelece em 1667 os postulados e fundamentos da Física Moderna.

A partir daí, ficou claro que a Arquitetura passava a fazer parte da Ciência, e que as partes distintas que compõe o edifício deveriam ser resolvidas de acordo com princípios matemáticos em termos não só de espaço físico, mas também de comportamento estrutural.

Um pouco depois (1671) o Ministro das finanças de Louis XIV, Jean-Baptiste Colbert, cria a Academie Royale d’Architecture em Paris.

Os fatos mais importantes que se relacionam à História da Arte, da Arquitetura e da Engenharia estão organizados nesta Tese algumas páginas adiante.

Entretanto, o Barroco inserido entre o Renascimento e o Neo Classicismo e apesar de ter chegado ao Brasil (mais precisamente em Minas Gerais), e da profusão ornamental que o caracteriza, também nada acrescentou à questão estrutural que permaneceu estagnada até meados do século XVIII.

²⁷ PEARSON, D. New Organic Architecture – The Breaking Wave University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 33.

O Neoclássico (século XVII a XIX)

Nada mais tendo sido descoberto depois do Românico e do Gótico, a arquitetura regride no tempo para ir buscar nas suas raízes greco romanas, algo que lhe dê significado enquanto arte, porém distante dos modernos processos construtivos visto que o concreto armado e o aço ainda esperavam para serem descobertos.

Tudo que foi possível resgatar não foi além mais uma vez do simples ornamento, como se o retorno às formas clássicas servisse de contraponto à impossibilidade de evolução depois da Renascença tardia.

Mais ou menos o que aconteceu a partir do momento em que a moda efêmera do “Pós Modernismo” decidiu que o Movimento Moderno estava morto e enterrado, e já não servia para mais nada...

O Neoclacissismo ou Renascimento Clássico produziu obras universais como o Arco do Triunfo, monumento situado nos Champs Elysées e projetado por V.E.T. Chalgrin.

Em meados do século XIX nasce o Modernismo, conhecido na França, Bélgica e Inglaterra como Art Nouveau, movimento que atingiu não somente a Arquitetura, mas também as artes gráficas e a decoração. Está ligado à obra de Victor Horta na Bélgica, e Louis Sullivan nos Estados Unidos.

Fig. 26 Torre Eiffel

Uma de suas obras mais representativas é a Torre Eiffel, uma extraordinária estrutura de ferro do Engenheiro Francês Gustave Eiffel, marco monumental da Exposição Universal de Paris em 1889, construída para atrair visitantes para a Exposição e também para celebrar o centésimo aniversário da Revolução Francesa. No início foi rejeitada pela crítica e ia ser demolida, mas acabou virando o símbolo da cidade.

Mas ela não é o marco inicial do modernismo.

Foi com a descoberta do concreto armado e a construção de pontes e edifícios em estruturas metálicas, que se iniciou o processo de desenvolvimento tecnológico até então estagnado.

A Revolução Industrial e a Modernidade Clássica.

No final do século XVIII, fatos que mudaram o rumo da História já haviam se consumado:

- A invenção da máquina a vapor de James Watt marca o início da Revolução Industrial em 1765.
- O vão de 30m.do Rio Severn na Inglaterra, foi vencido pela ponte de ferro Coalbrookdale Bridge em 1777.
- No projeto da Fiação Phillip & Lee em Stanford - Inglaterra (1801) realizado pela firma Boulton & Watt Corp. o ferro foi utilizado pela primeira vez na articulação pilar x viga I.

O profundo impacto da Tecnologia sobre a Arquitetura havia começado.

Em meados do século XIX, o ferro foi empregado na construção de edifícios pela primeira vez:

A partir de um projeto elaborado pelo Arquiteto francês Henri Labrouste, a Biblioteca Sainte Geneviève foi construída na França em 1850, e o Palácio de Cristal projetado por Joseph Paxton, na Inglaterra em 1851.

Um pouco antes, por volta de 1800 na França, surgiam as primeiras galerias cobertas em estrutura de ferro e vidro, precursoras dos atuais Shoppings Centers.

Outro marco histórico é a Galeria das Máquinas, projeto de Charles Dutert e Victor Contamin para a Exposição Mundial de Paris (1889), não somente em função do novo material e tipologia estrutural, mas também devido às suas proporções: vão de 115 m. e altura de 45 m.! Pela primeira vez, o aço é utilizado em uma construção desse porte.

Em 1856, Sir Henry Bessemer engenheiro Inglês envolvido em pesquisas relacionadas com a produção de artefatos bélicos, havia descoberto e desenvolvido o processo de fabricação do aço, que a partir de 1890 substitui o ferro como material estrutural.

Curiosamente, quase ao mesmo tempo, o engenheiro Francês Joseph Louis Lambot realizava os primeiros experimentos visando estruturar a argamassa de concreto com tela metálica.

A descoberta e posterior sistematização do uso do concreto armado, (em 1902 o Profº Emil Morsch desenvolveu a primeira teoria sobre o dimensionamento), serviu de base para a consolidação do Movimento Moderno.

Auguste Perret, Adolf Loos Peter Behrens, e Frank Lloyd Wright representam a primeira geração de Arquitetos modernistas mais em função da utilização da nova técnica construtiva, considerando que as premissas do Movimento Moderno foram na verdade lançadas pelo suíço Charles Edward Jeanneret, conhecido como Le Corbusier.

Corbusier tinha sido estagiário juntamente com Mies Van Der Rohe e Walter Gropius do escritório de Behrens, embora essa palavra na época não existisse.

Seus cinco pontos exigiam uma maneira de construir completamente diferente daquela utilizada até então:

- Os pilotis.
- O terraço jardim.
- A planta livre.
- A estrutura independente
- A janela em fita.

Naturalmente seus colegas também contribuíram para a cristalização de tais premissas. Walter Gropius foi o fundador da Bauhaus em Weimar, e Ludwig Mies Van Der Rohe, é dono de uma produção profissional de alta qualidade além da riqueza de sua contribuição intelectual.

Mies inclusive é autor de um postulado singular, a famosa frase “Less is More” ilustrando o novo pensamento arquitetônico que a cada dia se firmava, e que em pouquíssimo tempo encarregou-se de retirar a ferrugem acumulada há séculos, nas engrenagens que movimentavam em câmara lenta a “máquina de morar”, conforme definiu Le Corbusier.

Era o fim da produção artesanal, da deselegância dos espaços limitados, de uma era que durava há séculos, e o início de um tempo decidido a mudar a fisionomia da Arquitetura e do Urbanismo, traduzindo em uma melhor qualidade de espaço as possibilidades ilimitadas dos novos sistemas estruturais e respectivas técnicas construtivas.

“A Arquitetura deve refletir o seu tempo”, dizia Eugène Emmanuel Viollet -le- Duc, um dos grandes teóricos da Arquitetura juntamente com Vitruvius e Le Corbusier.

Estavam lançadas as bases de um movimento que literalmente viraria no avesso o universo da Arquitetura e do Urbanismo em todo o mundo.

O rápido aumento da densidade demográfica em áreas densamente povoadas, e a descoberta da utilização dos metais e do cimento na Construção Civil, causaram o aparecimento de dois artefatos de importância fundamental, que iriam desempenhar um papel extremamente importante no desenvolvimento da Arquitetura e do Urbanismo daí em diante:

A ferrovia tornada factível após a descoberta do processo de laminação de trilhos favorecendo o transporte de cargas, e a invenção do elevador.

Em 1853 **os primeiros elevadores mecânicos** foram construídos por Elisha Graves Otis em Nova York.

O primeiro elevador de passageiros demorou um pouco para ser visto na Europa. Foi segundo os historiadores, o elevador exibido na Exposição de 1867 em Paris.

Com tantas condições favoráveis, não haveria como impedir o processo de verticalização que viria a seguir, consequência direta da possibilidade de ocupação dos lotes urbanos com edifícios de múltiplos andares passíveis de serem galgados por escadas e elevadores.

A construção de arranha céus foi acontecendo inicialmente nos Estados Unidos simultaneamente em diversas cidades, e em seguida na Europa, embora o processo de urbanização tenha se intensificado com ritmo idêntico nos dois continentes.

Não se sabe se isto se deve ao espírito empreendedor dos norte-americanos ou ao pensamento europeu mais conservador, fruto de tradições urbanas seculares e de valores culturais mais arraigados.

Nos Estados Unidos o engrandecimento do indivíduo atrelado à expansão da riqueza nacional, acabou por determinar uma produção acelerada de arranha céus de grande altura destinados às atividades comerciais, hoteleiras e das Companhias de Seguros. Mergulhada nesse clima de euforia desenvolvimentista é que surgiu o movimento denominado Escola de Chicago cujo precursor foi William Le Baron Jenney.

O edifício de sua autoria construído em 1883 para a Cia. De Seguros “*Home Insurance Company*” é considerado o marco inicial da Escola de Chicago, e o primeiro edifício em estrutura metálica, erguido de acordo com os princípios modernos que passaram a vigorar.

E início do Século XX arquitetos como Auguste Perret , construtor da primeira estrutura em concreto armado do mundo utilizada em edifício alto, o edifício da Rua Franklin, e Erich Mendelsohn responsável pelo projeto da torre Einstein em Potsdam, Alemanha, passaram a aproveitar as inúmeras vantagens da nova técnica recém descoberta.

Fig. 27 Edifício da Rua Franklin

Fig.28 Torre Einstein: desenho do Autor.

Obras notáveis foram construídas, como o Empire State Building de Shreve, Lamb and Harmon architects, o Edifício de escritórios da Pan Am de Emery, Roth & Sons, Pietro Belluschi e Walter Gropius, o Seagram Building de Mies van Der Rohe e Phillip Johnson, o World Trade Center de Minoru Yamasaki & Assoc. Design Architects, quebrando sucessivos recordes de altura.

A Modernidade avançada.

Na Europa e na Ásia a produção de Arquitetos como Kenzo Tange, Renzo Piano, Richard Rogers, Norman Foster, Jean Nouvel e Santiago Calatrava, refletem o resultado de uma procura ansiosa pela qualidade de espaço, apoiada nos processos tecnológicos inerentes à Sociedade industrializada que viveu no Século XX.

Fig 29 Ópera de Sidney

Em meados do Século XX (1956 – 1973) o Arquiteto Norueguês Jørn Utzon projetou um Edifício totalmente fora dos padrões da época. Dez cascas com 60 m. de altura, situadas às margens da Baía de Sidney acabaram por se transformar em um dos principais símbolos da Austrália: a Casa de Ópera de Sidney.

Fig 30 Centro Cultural Georges Pompidou

Em 1977 outra obra polêmica iria marcar a paisagem da cidade de Paris, representando uma escola denominada **High Tech**: O Centro Cultural Georges Pompidou, edifício de proporções bem acima da média, onde o exoesqueleto e os dutos de fornecimento de água, gás e eletricidade permanecem à vista.

Mas, uma das obras mais características do pensamento arquitetônico da segunda metade do Século XX, onde a liberdade de concepção arquitetônica aliada ao desempenho eficiente de uma estrutura de cabos deu origem a uma forma extremamente elegante, é o Yoyogi Sports Center projetado por um dos maiores, senão o maior arquiteto japonês de todos os tempos: Kenzo Tange.

Os dois ginásios foram construídos para a Olimpíada de Tóquio realizada em 1964.

No maior, dois cabos de aço ancorados em 2 pilares sustentam os tirantes e a cobertura conforme o croqui. A superfície resultante é curva, formada pela malha de cabos atirantados aos cabos principais, de um lado, e ao embasamento em anel de concreto do outro.

No menor, o sistema é semelhante. Um único pilar central em concreto, (assim como os pilares do ginásio vizinho), sustenta o cabo principal, que por sua vez sustenta um conjunto de cabos atirantados à ele de um lado, e ao embasamento do outro, desenvolvendo-se a trama em espiral e apoiando a cobertura.

Fig 31 Yoyogi Sports Center

Fig 32 Croqui do autor

Trata-se de uma estrutura mista em relação aos materiais estruturais utilizados, concreto e aço, cada qual trabalhando de acordo com suas características, o aço à tração e o concreto à compressão absorvendo a tração nos cabos.

Concluindo a análise dos séculos que antecederam o Movimento Moderno, diria que tudo que aconteceu antes, contribuiu para o aprimoramento da técnica construtiva, passando pelo acontecimento significativo e fundamental da Revolução Industrial e chegando à descoberta do aço e do concreto estrutural no final do Século XIX.

Mais ou menos como acontece com o cortador de pedras martelando um bloco talvez cem vezes sem que uma só rachadura apareça; no entanto, na centésima primeira martelada a pedra se abre em duas, e sabemos que não foi a última que conseguiu, mas todas as outras que vieram antes. ...

A História do desenvolvimento da Arquitetura e da Engenharia está ligada intimamente à História da Cultura. Tudo que conseguimos até hoje desde a aurora dos tempos, é resultado do trabalho incansável e da genialidade do espírito humano criado por Deus à sua imagem e semelhança.

“A interpenetração do desejo artístico e das leis da matéria está na raiz de toda a criação artística. Foram os métodos de construção que mudaram com o tempo.”²⁸

²⁸ Giedion, S. Espaço, Tempo e Arquitetura. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2004. pag. 708.

Evolução histórica através do desenho da coluna

Desde o pilar grego, as mudanças que ocorreram em relação aos materiais estruturais e ao desenho deste elemento tão importante da estrutura, senão a mais importante pois é ela que se encarrega de transferir as cargas para o solo, assinalam a evolução da técnica construtiva, e antes disso, de todo um raciocínio relacionado à Arte de Construir.

Até a Revolução Industrial, a madeira, a pedra e o tijolo representavam a matéria prima que dava forma à coluna. Depois deles, o **pilar de ferro foi o primeiro elemento estrutural produzido em escala industrial**, verdadeiramente um símbolo da arquitetura do Século XIX.

Ninguém melhor do que o Engenheiro Espanhol **Eduardo Torroja y Miret**, incompreensivelmente muito pouco conhecido nos cursos de Arquitetura assim como sua obra, conseguiu resumir com tanta propriedade o tema em uma das mais belas páginas da literatura do gênero; é de arrepiar! Diria que, em se tratando de um texto sobre a arquitetura e estrutura, não se pode afirmar que se trata de literatura técnica: é poesia pura !

“ A estrutura é geralmente formada por um elemento ou por uma combinação de vários deles.

O apoio é ao longo dos tempos um dos elementos mais fundamentais. Entre tantos, o mais genuíno é a coluna; quanto a Humanidade pensou e trabalhou sua forma ! Em seus entalhes se sente o toque aprazível dos maiores artistas. Se ela não foi de por si, um monumento, a Humanidade deveria tê-lo erigido em sua homenagem ! Sua missão é suportar algo sobre seu capitel; mesmo que sem ele, solitária ou em renque de companheiras, a coluna é bela porquanto se ergue sobre o solo em um anelo de superação. Sua ereta verticalidade, é reflexo da figura humana olhando para o céu.

Ergue sua cabeça sobre a que rodeia, e proclama com orgulho sua imóvel permanência em razão de seu ideal e de seu ser. Tem o prístino e misterioso encanto do primeiro êxito, a paternidade das conquistas construtivas ao longo dos tempos !”²⁹

²⁹ Torroja Miret, Eduardo. **Razon y ser de los tipos estructurales**. Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Instituto de Ciencias de la Construcción E. Torroja. Madrid [2000]. 403 p. Cap. 6. P 87.

Pilar grego - Parthenon

447 - 432 a.C.

Pilar em concreto romano - Pantheon

120-124

Pilares apoiados por arcobotante - Notre-Dame de Paris

1163-1250

Pilar em concreto armado - Edifício Sede Ministério da Educação e Saúde 1936
Lúcio Costa, Oscar Niemeyer, Carlos Leão, Jorge Moreira,
Affonso E. Reidy e Ernani Vasconcellos

Pilar escultórico em concreto armado - Palácio da Alvorada 1956
Oscar Niemeyer

Pilar em concreto armado – Monumentos aos mortos 2ª Guerra Mundial 1956
Hélio Ribas Marinho e Marcos Konder Neto

Pilar escultórico em concreto armado - Ginásio de Guarulhos
João Batista Vilanova Artigas e Carlos Cascaldi

1960

Pilar escultórico em concreto armado - FAU
João Batista Vilanova Artigas e Carlos Cascaldi

1961

Pilar em concreto armado - Rodoviária de Jaú
João Batista Vilanova Artigas

1973

Pilar metálico – World Trade Center
Minoru Yamazaki

1977

Pilar metálico – Sede da Renault
Foster Associates

1983

Pilar metálico - Igus Factory
Nicholas Grimshaw

1992

Pilar em concreto armado – Museu de Arte Contemporânea de Niterói
Oscar Niemeyer

1996

Detalhe do Pilar – Centro Cultural Jean Marie Tjibaou
Renzo Piano

1998

Pilar em concreto protendido (protensão transversal)
Estação Ponte Santo Amaro
Harza Hidrobrasileira

1999

Pilar de vidro – Loja da Apple N.York

2004

Processos construtivos x materiais estruturais. Evolução histórica demonstrada por gráfico.

Croquis do Autor

Cronologia dos eventos mais significativos da história da história da arquitetura e engenharia

- Descoberta da possibilidade de utilização dos metais, provavelmente na fabricação de utensílios . O cobre (3.500 a.C) o bronze (2.500 a.C) e o ferro (1.700 a.C).
- Os Egípcios utilizam argamassa de lodo misturado à palha seca para assentar tijolos, adicionando algum tempo depois gesso à mistura, para assentamento dos gigantescos blocos da grande pirâmide. 3.000 a.C*
- Os Romanos usam um resíduo de lava vulcânica conhecido como “pozzolana” encontrada nas proximidades de Pozzouli, na Baía de Nápoles para produzir um concreto primitivo. Vitrúvio faz menção à proporção de 2 partes de pozzolana para 1 de cal. 300 a.C *
- Os Gregos constroem o Parthenon. Séc. I *
- Na cidade de Alexandria, Cláudio Ptolomeu estudou os movimentos celestes e chega a conclusão de que a Terra é o centro do Universo, e tudo no Cosmos gira em seu redor. Séc.II
- A Arte do Concreto se perde após a queda do Império Romano. Séc. IV *
- Criada a primeira Universidade, em Bolonha na Itália. 1096
- Alberti propõe uma separação entre as atividades daquele que faz o projeto em relação às atividades de quem constrói. 1450

- Nicolau Copérnico afirma que o Sol é o novo centro do Universo. 1543
- Andréa Palladio escreve “Os quatro livros de Arquitetura 1570
- Galileo Galilei reafirma o que disse Copérnico. 1610
- Galileo Galilei inicia os primeiros estudos sobre a estrutura, e publica sua obra fundamental contendo as primeiras noções sobre a resistência dos materiais: “*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*“. 1638
- René Descartes (1596 - 1650) publica “ *O Método* “ , obra que conduz a uma maior sistematização da Ciência. 1638
- Isaac Newton depois de publicados os estudos de Galileu e Descartes, estabelece os postulados da Física. 1667
- O Ministro das finanças de Louis XIV, Jean-Baptiste Colbert, cria a Academie Royale d’Architecture. Paris. 1671
- Robert Hooke publica seus estudos sobre a teoria da elasticidade. 1676
- Invenção da máquina a vapor de J. Watt marca o início da Revolução Industrial. 1765
- Primeira obra em estrutura metálica : ponte em arco com 30 metros de vão em ferro fundido construída na Inglaterra sobre o Rio Severn. 1777
- Criada a primeira escola de Engenharia na França, a École Polytechnique por Gaspard Monge, que, além disso, inventa a Geometria Descritiva. 1795

- No projeto da fiação Philip & Lee em Stanford, (Inglaterra) realizado pela firma Boulton & Watt Corp. o ferro é utilizado pela 1ª vez na articulação viga x pilar. 1801
- A máquina a vapor é usada pela 1ª vez para movimentar vagão de estrada de ferro. 1804
- A École Royale de Beaux-Arts sucede a Academie. 1819
- Início da laminação de trilhos. 1820
- J. Aspdin obtém a patente da produção do cimento Portland na ilha de Portland-Inglaterra. 1824
- Construção da 1ª ferrovia para trens de passageiros na Inglaterra. 1825
- Navier determina de forma correta a distribuição das tensões nas Vigas. 1826
- Início do Ensino de Arquitetura, através da inauguração da Academia de Belas Artes pelo Imperador D.Pedro I. Rio de Janeiro. 1826
- Atribui-se o crédito pela 1ª utilização do cimento na Engenharia a I.K. Brunel, responsável por uma obra executada no Rio Tamisa na Inglaterra. 1828 *
- Invenção e construção da 1ª locomotiva moderna , a Rocket, por G. Stephenson. 1829
- Construção da primeira estrutura em concreto armado: um barco! J. L. Lambot. 1850

- Bibliothèque Saint Geneviève (Paris): primeira vez em que o ferro foi utilizado na construção de um edifício público, e a primeira obra em ferro projetada por arquiteto H. Labrouste . 1850
- E. Otis constrói os primeiros elevadores mecânicos em N. York. 1853
- Arcos treliçados de ferro laminado apoiados em colunas de ferro fundido, Sustentando uma cúpula com clarabóia (Bibliothèque Nationale). 1855
- H. Bessemer descobre o processo de produção do aço. 1856
- Cimento Portland é utilizado na construção do sistema de esgoto da cidade de Londres. 1859 – 1867 *
- A 1ª ferrovia ligando dois continentes é construída (Union Pacific). 1860
- Abóbada de berço em ferro fundido e vidro (Galeria Vittorio Emanuele). 1877
- Elementos tradicionais (pilar x viga e laje) são armados por François Hennebique pela 1ª vez com armadura metálica. (Exposição Universal de Antuérpia). 1879
- Thomas Edison inventa a luz elétrica. 1879
- W. Le Baron Jenney fundador da Escola de Chicago constrói o 1º edifício alto em estrutura metálica para a Cia de Seguros “Home Insurance Company”. 1883
- Ponte do Brooklyn (John A. Roebling): ponte suspensa por cabos de aço e tabuleiro rígido (N. York - USA). 1883

- J. Monier obtém a patente da argamassa de concreto reforçada com tela metálica. 1884
- Criação do curso de Engenheiro Arquiteto na Politécnica. 1894
- Torre Eiffel : Exposição Internacional de Paris. Seria demolida, mas agradou tanto que acabou ficando ... 1889
- Galeria das Máquinas (Charles Dutert / Victor Contamin) : arcos plenos com 115 m. de vão. A primeira obra em aço do mundo. 1889
- Forth Bridge. Primeira ponte totalmente construída em aço (Escócia) Benjamin Baker & John Fowler. 1890
- Desenvolvimento da 1ª teoria sobre o dimensionamento do Concreto Armado na Alemanha. Emil Morsch. 1902
- Construção do primeiro edifício em concreto armado. A. Perret. Paris. 1903
- Publicação da primeira Norma do concreto armado na Alemanha. 1904
- Construída a casa Milá (Gaudi) em Barcelona. 1910
- É lançado o 1º automóvel: o modelo T da Ford Motors. 1908
- Construção do Viaduto Santa Ifigênia em São Paulo. 1913
- Fundação da Portland Cement Association. 1916 *
- A ASTM (American Standard Testing Materials) estabelece uma fórmula Padrão para a produção do cimento Portland. 1917 *

- Criação do curso de Engenheiro Arquiteto na Escola de Engenharia Mackenzie. 1917
- Desenvolvimento do processo de protensão na França, com a utilização de fios de aço de alta resistência. E. Freyssinet. 1924
- Lançamento das premissas do Modernismo com cinco princípios básicos. Le Corbusier. França. 1926
- Construção da Vila Savoye - residência com interpretação fiel dos cinco princípios do Movimento Moderno. Le Corbusier. Paris. 1929
- Eduardo Torroja projeta e constrói a cobertura em casca de concreto com reduzida espessura em Algecira. 1930 *³⁰
- Proposição da primeira Norma Brasileira para o cálculo de concreto armado. ABCP (Associação Brasileira de Concreto Portland). 1931
- Criação da Comissão Nacional de Siderurgia na era Vargas. 1931
- Em 1933, um Decreto Lei regulamenta as profissões do Engenheiro e do Arquiteto. 1933
- Nervi utiliza pela primeira vez a técnica da pré fabricação na construção de Hangares. 1939
- Conjunto da Pampulha. Belo Horizonte. Formas livres. Pela primeira vez é explorado todo o potencial do concreto armado por Oscar Niemeyer. 1942

³⁰

<http://www.Portcement.org>

- Construído o Edifício Sede do Ministério da Educação e Saúde.
em estrutura hiperestática, marco inicial do Modernismo no Brasil.
Rio de Janeiro. Le Corbusier, Lucio Costa, Oscar Niemeyer e equipe. 1943
- Fundação da Escola de Arquitetura Mackenzie, incorporando o curso de
Engenheiro Arquiteto da Escola de Engenharia. 1947
- Fundação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de
São Paulo, a partir do desmembramento do curso de Engenheiro
Arquiteto da Escola Politécnica. 1948
- Nervi utiliza pela 1ª vez a técnica do ferro cimento, no projeto e construção
do Salão B do Palácio de exposições de Turim. 1949
- Le Corbusier constrói a Unidade de Habitação de Marseille em concreto
Aparente. 1952
- Patente da construção do primeiro domo geodésico. Buckminster Fuller
(USA). 1954
- Estrutura em forma de tenda. Exposição Federal de jardinagem. Frei Otto
(Alemanha). 1955
- Frei Otto funda o Centro de Desenvolvimento de Construções Leves, em
Berlim, primeiro passo para a criação do Instituto de Estruturas Leves da
Universidade de Stuttgart. 1957
- Edifício Garagem América. Estrutura metálica utilizada na construção do
primeiro edifício de múltiplos pavimentos. Rino Levi (São Paulo) 1957

- Lançamento do 1º automóvel nacional :DKV Vemag. 1957
- Jørn Utzon inicia o projeto da Ópera de Sidney. 1959
- E. Dieste constrói a Igreja de Atlântida toda em tijolos (piso, paredes e cobertura). 1960
- Consolida-se a Reforma Artigas. Criação dos Departamentos e Sequências de Projeto História e Tecnologia. 1962
- O arquiteto japonês Kenzo Tange projeta e constrói a Arena Olímpica de Tokyo, uma das mais belas estruturas do mundo. 1964
- Inaugurado o Centro Georges Pompidou em Paris, marco da arquitetura “high tech” dos arquitetos Renzo Piano e Richard Rogers. 1977
- Brasil, importador de aço. 1980
- O. Niemeyer recebe o prêmio Pritzker, considerado o Nobel da Arquitetura. 1988
- Fica pronto o MAC de Niterói de O.Niemeyer, a antítese da resistência pela forma, e ao mesmo tempo um dos marcos da arquitetura mundial. 1996
- Construídas as torres Petronas, do Arquiteto C. Pelli, os edifícios mais altos do mundo até a presente data. 1997
- A Prefeitura de Bilbao na Espanha, inaugura o Museu projetado por F.Gehry, obra escultórica e ao mesmo tempo polêmica, toda revestida em titânio, às margens do Rio Nervión. 1997

- Brasil, 8º produtor de aço do mundo (27 milhões de toneladas / ano). 2001
- Paulo Mendes da Rocha é o segundo arquiteto brasileiro a receber o prêmio Pritzker de Arquitetura. 2006

O Brasil e o Movimento Moderno.

O final deste capítulo tem por objetivo analisar resumidamente o Movimento Moderno, antítese das correntes acadêmicas vinculadas ao Ecletismo do Século XIX, que reinterpretado pelos mais importantes arquitetos da época, possibilitou uma radical e definitiva virada de página da história, constituindo-se em uma verdadeira exaltação à cultura brasileira.

Como arquitetura é arte que não pode prescindir da técnica, devem ser aqui assinaladas as infinitas possibilidades que a nova técnica do concreto armado oferecia, exploradas à exaustão por Niemeyer. Sua arquitetura de formas livres rompia com os princípios da ortogonalidade e racionalidade construtiva defendida pelos mais radicais, e inaugurava com a singela Igreja de São Francisco um momento novo na história, colocando os arquitetos e a arquitetura brasileira em lugar de destaque perante o cenário internacional.

A arquitetura brasileira não teria identidade própria, não fosse pela contribuição desses pioneiros, cuja produção valorizou a arquitetura brasileira e os próprios arquitetos até então considerados profissionais de pouca expressão, meros desenhistas de fachadas e coisas afins de menos importância, uma vez que a arquitetura era feita pelos engenheiros civis, e os cursos de formação profissional não passavam de especialização dos cursos de engenharia.

A transformação rápida e até certo ponto radical da sociedade rural em urbana em nosso país, passou por diferentes ciclos, até que a relativa riqueza proporcionada pela próspera economia cafeeira impulsionou alguns pequenos investimentos na área comercial e industrial.

A intelectualidade brasileira acompanhava com interesse tudo que acontecia fora daqui. Em clima de total efervescência cultural, o Teatro Municipal de São Paulo abriga em 1922 a Semana de Arte Moderna, embora em matéria de arquitetura nada tivesse acontecido que despertasse atenção, em face da produção pequena da época.

As primeiras manifestações que faziam referência ao Movimento Moderno na arquitetura partiram do arquiteto russo Gregori Warchavchik, que havia fixado residência no Brasil em 1923, assim como vários arquitetos europeus interessados na produção nacional apoiada no momento econômico favorável que o país atravessava, como Jacques Pilon, Giancarlo Palanti, Lucjan Korngold, Victor Reif, Lina BoBardi e Adolf Franz Heep.

Sua residência concluída em 1928 e construída na Rua Santa Cruz na Vila Mariana, é considerada a primeira residência com tendências modernas.

Contava ela com móveis desenhados pelo próprio arquiteto, e com quadros dos principais artistas da época que haviam participado da Semana de 22, tais como Tarsila do Amaral, Anita Malfatti e Di Cavalcanti.

O impacto causado pelas suas primeiras obras foi muito grande, e acabou rendendo dividendos inesperados: Lucio Costa, recém empossado Diretor da Escola de Belas Artes no Rio de Janeiro o convidou para participar da reformulação do currículo tradicional do curso de arquitetura.

Embora permanecendo por pouco tempo na direção da ENBA, Lucio Costa desempenhou um papel importante como gestor de um processo de renovação dos currículos tradicionais, fato que viria mais tarde servir de base para a criação das faculdades autônomas de arquitetura.

Inúmeros estudantes e profissionais recém-formados se deixaram influenciar pelas idéias de Lucio Costa, por sua vez influenciado também por Le Corbusier e Frank Lloyd Wright quando da visita deles ao Brasil.

Projetos de Álvaro Vital Brasil em São Paulo, dos irmãos Marcelo e Milton Roberto no Rio de Janeiro, e de Luiz Nunes no Recife e em Olinda seguiam os princípios de Le Corbusier, porém a obra que pode ser considerada o marco inicial do Movimento Moderno no Brasil é o Edifício do Ministério da Educação e Saúde do Rio de Janeiro.

Outro projeto que conquistou elogios rasgados da crítica internacional possibilitando o reconhecimento estrangeiro à nossa Arquitetura foi o Pavilhão Brasileiro na Feira Mundial de Nova Iorque em 1938, projetado por Lucio Costa e Oscar Niemeyer, então um jovem e promissor arquiteto.

Foi dessa forma que Niemeyer despontou. Projetou a Obra do Berço em 1937 e o Grande Hotel de Ouro Preto, sendo logo em seguida convidado por Juscelino Kubitschek na ocasião prefeito de Belo Horizonte, para projetar alguns edifícios públicos em um bairro novo da capital de Minas conhecido como Pampulha.

O reconhecimento internacional devido ao grande sucesso obtido pelo Pavilhão Brasileiro na Feira de Nova Iorque, acabou por sensibilizar a mídia e a opinião pública Norte Americana. Em 1943 o MoMA (Museum of Modern Art) promoveu a belíssima exposição “*BRAZIL BUILDS*” transformada em uma publicação “*Brazil Builds : Architecture New and Old*” de Philip Goodwin, que registrava a produção contemporânea dos principais arquitetos brasileiros.

Foi com base no Plano de Governo de Juscelino e na Arquitetura Moderna brasileira que já havia alcançado reconhecimento internacional, que surgiu Brasília, no rastro de uma política de desenvolvimento que definia a atividade industrial e não a agrícola, como o carro chefe do desenvolvimento. Não seriam a agricultura ou a agropecuária as produtoras dos insumos básicos da economia daí em diante, e sim a indústria.

Em 1931 Getúlio criou a Comissão Nacional de Siderurgia, e em 1941 com financiamento de 20 milhões de dólares do Eximbank, começou a construção da Usina de Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro. Hoje o Brasil é o 8º produtor Mundial de aço com 27 milhões de toneladas ano.

Em paralelo, o crescimento da indústria do cimento no princípio do século, visto que nos anos 20 quase todo o cimento consumido era importado, veio de encontro às necessidades de um país carente de hospitais, escolas, indústrias, conjuntos residenciais, estradas, barragens etc.

Se lastrear o desenvolvimento no crescimento do nosso parque industrial foi decisão acertada ou não, é muito difícil de afirmar. Se tínhamos vocação para incrementar esta ou aquela atividade, também é difícil dizer, não obstante a grandeza territorial de um país de dimensões continentais. O fato é que o crescimento do país no Século XX em todos os sentidos, inclusive populacional é uma verdade indiscutível, e a esperança de todos nós está agora voltada para o dia de amanhã, onde todos deverão ter merecidas oportunidades iguais de educação, trabalho, transporte e habitação, tal qual acontece em qualquer Estado civilizado.

E se não foi possível realizar a leitura completa dos principais acontecimentos inseridos em período tão extenso, ao menos podemos reafirmar aqui a esperança no futuro, porque tudo aquilo que realizamos até agora traz a marca da genialidade de um povo fraterno, generoso, digno e trabalhador, presente na pintura de Tarsila do Amaral, na música de Heitor Villa-Lobos e Antonio Carlos Jobim, e na arquitetura de Lucio Costa, Vilanova Artigas e Oscar Niemeyer.

PANORAMA DE OBRAS SIGNIFICATIVAS, DA ANTIGUIDADE À IDADE CONTEMPORÂNEA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
COMPLEXO DE GIZÉ	2550 a. C.		EGITO
LION GATEWAY	1300 a. C.		GRÉCIA
ZIGURATE CHOGA ZAMBIL	Séc. XIV a. C.		MESOPOTAMIA
PARTHENON	447 - 432 a. C.		GRÉCIA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

POLYKLEITOS THEATER

350 a. C.

GRÉCIA

COLISEU

72 – 82

ROMA

PANTHEON

120 - 124

ROMA

VAULT OF THE
BANQUETING HALL

550

IRAQUE

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
ST. DENIS CATHEDRAL	1144		FRANÇA
NOTRE DAME DE PARIS	1163 – 1250		FRANÇA
KING'S COLLEGE CHAPEL	1446		INGLATERRA
COALBROOKEDALE BRIDGE	1777	T. FARNOLLS & J. WILKINSON	INGLATERRA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

PONT DES ARTS

1803

L. A. de CESSART
&
J. DILLON

FRANÇA

BIBLIOTHÈQUE ST.
GENEVIÈVE

1850

H. LABROUSTE

FRANÇA

PALÁCIO DE CRISTAL

1851

J. PAXTON

INGLATERRA

GALLERIA V. EMANUELE

1863 - 67

G. MENGONI

ITÁLIA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

PONTE DO BROOKLIN

1883

J. A. ROEBLING

EUA

HOME INSURANCE
BUILDING1885
demolido em 1931

W. LE BARON JENNEY

EUA

GALERIA DAS MÁQUINAS

1889

C. DUTERT

FRANÇA

TORRE EIFFEL

1889

ENG° G. EIFFEL

FRANÇA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

FORTH BRIDGE

1890

BENJAMIN BAKER
&
JOHN FOWLER

ESCÓCIA

25 BIS - RUE FRANKLIN

1903

AUGUSTE PERRET

FRANÇA

VIADUTO SANTA EFIGENIA

1913

GIULIO MICHELE
&
GIUSEPPE CHIAPPORI

BRASIL

VILLA SAVOIE

1928

LE CORBUSIER

FRANÇA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

EMPIRE STATE

1931

SHREVE, LAMB
&
HARMON

EUA

EDIFÍCIO DO
MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO E SAÚDE

1936

L. COSTA, O. NIEMEYER,
C. LEÃO, J. MOREIRA,
A. E. REIDY &
E. VASCONCELLOS

BRASIL

JOCKEY CLUBE DE SÃO PAULO

1937

E. da C. BAHIANA

BRASIL

IGREJA DE SÃO FRANCISCO

1943

O. NIEMEYER

BRASIL

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

UNIDADE DE HABITAÇÃO
MARSELHA

1946 - 1952

LE CORBUSIER

MARSELHA

PALÁCIO DAS ARTES

1951

O. NIEMEYER, Z.
LOTUFO, H. UCHÔA, E.
K. de MELO

BRASIL

IGREJA DE ATLÂNTIDA

1953

ELADIO DIESTE

URUGUAI

ED. GARAGEM AMÉRICA

1957

RINO LEVI

BRASIL

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
<hr/>			
MUSEU DE ARTE DE SÃO PAULO	1957	LINA BO BARDI	BRASIL
PALAZZETTO DELLO SPORT	1960	PIER LUIGI NERVI	ROMA
FAU - USP	1961	J. B. V. ARTIGAS & C. CASCALDI	BRASIL
TERMINAL TRANSPORTES TRANS WORLD AIRLINES	1963	E. SAARINEN	EUA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
NATIONAL YOYOGI SPORTS CENTER	1964	K. TANGE	JAPÃO
PALÁCIO DAS CONVENÇÕES	1967	M. JULIANO e SILVA, J. WILHEIM	BRASIL
COBERTURA DO ESTÁDIO OLÍMPICO DE MUNICH	1972	F. OTTO	ALEMANHA
CENTRO POMPIDOU DE ARTE E CULTURA	1977	R. PIANO	FRANÇA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
HONG KONG BANK	1986	N. FOSTER	HONG KONG
COMMUNICATIONS TOWER	1992	N. FOSTER	ESPANHA
MUSEU BRASILEIRO DA ESCULTURA	1995	P. MENDES DA ROCHA	BRASIL

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
<hr/>			
MUSEU DE ARTE CONTEMPORANEA	1996	O. NIEMEYER	BRASIL
MUSEU DE BILBAO	1997	F. GEHRY	ESPANHA
PETRONAS TOWER	1998	ENG° T. TAMASETTI & R. BERSEKUTU	MALÁSIA
THE EDEN PROJECT	1998	N. GRIMSHAW	INGLATERRA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
------	-----	-------	------------

AKASHI KAIKYO
BRIDGE

1998

HONSHU SHIKOKU
BRIDGE AUTHORITY

JAPÃO

PAVILHÃO DE
PORTUGAL

1998

ÁLVARO SIZA VIEIRA

PORTUGAL

BURJ AL ARAB

1999

W. S ATKINS AND
PARTNERS

EMIRADOS
ÁRABES UNIDOS

LEHRTER BAHNHOF

2002

VON GERKAN MARG
AND PARTNER

ALEMANHA

OBRA	ANO	AUTOR	LOCALIDADE
BLUR BUILDING	2002	E. DILLER & R. SCOFIDIO	SUÍÇA
IGREJA BATISTA DE FORTALEZA	2003	N. ISSA & R. M. PAULETTI	BRASIL
NOVO PÓLO DA FEIRA DE MILÃO	2005	MASSIMILIANO FULKSAS	ITÁLIA

CAPÍTULO 3

Estruturas sem flexão : cascas delgadas e estruturas estaiadas

Estruturas de superfície curva

“O advento do concreto armado trouxe um novo alento à construção de cúpulas, até então temidas em virtude do extraordinário peso decorrente das enormes dimensões exigidas pelas antigas construções de alvenaria.

Apesar de, nessa época serem restritos os conhecimentos teóricos fornecidos pela Estática, notáveis foram as obras executadas, como o domo do Pantheon com 44 metros de vão construído pelos romanos, o da Catedral de Santa Sofia, construído por Justiniano no Século VI em Constantinopla, o da Catedral de Florença no Século XV com 42 metros, o da Basílica de São Pedro construído por Michelangelo no Século XVI com 40 metros, e ainda um grande número de domos executados pelos turcos.

Desde a construção do Pantheon nenhum progresso ocorreu em relação à teoria de tais estruturas, até que em 1828 G.Lamé e E.Clapeyron apresentaram os primeiros estudos sobre cúpulas de rotação com carregamento simétrico em relação à seu eixo.

Ainda recentemente, já com o concreto armado, o conhecimento incompleto do comportamento espacial das estruturas em casca, só permitia a execução de grandes vãos através de pesadíssimos e portanto custosos elementos auxiliares, como se observa no Festhalle de Breslau.

Através desses elementos planos (vigas, quadros, arcos etc.) as cargas externas são transferidas às fundações principalmente por flexão, não se levando em conta entretanto a distribuição espacial dos esforços.

Grande foi o progresso quando na Alemanha Companhia Zeiss e sua filial Dyckerhoff Widmann desenvolveram o estudo das estruturas em cascas cujo comportamento tri-dimensional traz como consequência tensões consideravelmente menores que nos sistemas planos. Surgia assim um novo elemento, a superfície auto-sustentante.

Enquanto, os membros suportes só permitiam vãos bastante restritos, pois seu peso próprio cresce rapidamente com o vão, isto não acontece no caso das cascas que atuam não só como sistema suporte espacial mas também como de cobertura.

O peso por unidade de área projetada horizontalmente, cresce pouco com o vão, comunicando ao novo sistema uma grande economia.

As cascas são estruturas muito usadas pela natureza como alojamento protetivo, por sua grande resistência, pelo mínimo emprego de material e grande riqueza em formas. É o caso da noz, do ovo, do casulo, dos moluscos, dos crustáceos, da casca do amendoim etc.

Os bordos das cascas abertas constituem zonas de fraqueza estrutural porque só permitem sistemas de tensões agindo paralelamente a eles. Esforços de contorno devem ser transmitidos para o interior da casca, por flexão. Uma casca de ovo representa uma estrutura de grande resistência, entretanto cortada ao meio, um pequeno esforço de bordo é suficiente para sua ruptura.

Como regra geral a natureza protege os bordos livres das cascas delgadas engrossando a zona fraca, como no caso da casca de noz. O mesmo princípio é usado pela indústria de vidro e de latarias onde os bordos delgados são fortalecidos por meio de elementos enrijecedores.”³¹

Arcos são elementos estruturais curvos com a convexidade voltada para cima. As estruturas de superfície curva geradas pelo deslocamento ou pelo giro do arco, em razão do seu comportamento tem reduzida espessura e conseqüentemente peso muito pequeno, o que não significa que não são resistentes à esforços. Por causa do seu comportamento peculiar e da capacidade de vencer grandes vãos, **diz-se que são estruturas que resistem pela forma.**

Estruturas resistentes pela forma portanto, são aquelas onde não há flexão.

Essas estruturas derivadas do arco, são conhecidas como cascas.

³¹ Oliva, W. M. & Altenfelder Silva, L.F. Cascas de concreto armado – Teoria da membrana. Revista Politécnica : Abril - Junho 1953.

A respeito do arco, um esclarecimento importante se faz necessário: Vamos imaginar uma barra retilínea e homogênea sujeita a um carregamento uniformemente distribuído. Se de algum modo curvamos a barra para cima, à medida que aumentamos sua curvatura invertendo-se o diagrama de esforços de flexão, progressivamente a flexão irá diminuindo.

É por causa disso que se diz que o arco parabólico é gerado invertendo-se a forma assumida pelo cabo sujeito a uma carga linear horizontal, forma esta denominada parábola. O arco parabólico é geometricamente idêntico à ela, ressalvando-se apenas a direção da curvatura. (efeito espelho).

Todavia, em função de circunstâncias eventuais como carga accidental, esforços de vento e recalques diferenciais, o eixo do arco poderá sofrer um desvio em relação ao seu traçado original. A partir daí ele estará submetido a esforços de flexão mesmo que reduzidos, o que poderá causar efeitos de segunda ordem conhecidos como perturbação de borda como veremos adiante.

Como dissemos, tudo que acontece com o arco acontece com suas formas derivadas conhecidas como cascas. O que significa dizer que as cascas são derivadas do arco ?

Sabemos que o arco assim como o pórtico, é um elemento estrutural contido em um plano vertical, recebendo cargas igualmente contidas no mesmo plano. Se deslocarmos o arco horizontalmente, o resultado desse deslocamento será uma figura geométrica espacial denominada casca cilíndrica ou abóbada.

Fig. 1 Croqui do autor

É bom lembrar que elementos geométricos contidos em um plano, quando deslocados horizontalmente por exemplo, geram volumes derivados da sua forma. Assim, da mesma maneira que a casca cilíndrica é resultado do deslocamento do arco, o cilindro propriamente dito é o resultado do deslocamento do círculo. Obviamente, há **uma relação direta entre o sólido geométrico e a sua geratriz contida no plano.**

Da mesma maneira o resultado do giro do arco em torno de seu eixo será a cúpula esférica, desde que a geratriz seja o arco pleno, isto é, o arco derivado da meia circunferência, e igualmente a figura gerada pela revolução da circunferência em torno de seu eixo é a esfera. Em torno desse tema existem inúmeras variações.

Por exemplo, arcos de alturas diferentes alinhados paralelamente, decrescentes em altura até um determinado ponto e crescentes daí em diante, formam uma superfície de dupla curvatura denominada parabolóide hiperbólico.

Fig. 2 Croqui do autor

Quando se trata de circunferências de diâmetros progressivamente menores alinhadas em paralelo, o volume resultante é o cone. Se o volume for gerado por arcos de alturas diferentes decrescentes, e alinhados paralelamente, o volume formado é denominado conóide porque se assemelha à forma do tronco de cone seccionado e dividido em duas metades iguais.

Em síntese, o componente básico dos elementos de superfície curva e sua principal geratriz, é o arco, elemento estrutural dotado de grande expressão estética e que trabalha preponderantemente à compressão, por causa disso uma das maiores descobertas da arte clássica e da engenharia. É importante lembrar também que cada um dos sólidos gerados a partir do arco assume um comportamento próximo ao dele, respeitando-se suas características principais.

Naturalmente o comportamento da abóbada e da cúpula resultantes do deslocamento ou giro do arco abatido não é o mesmo da abóbada ou cúpula resultantes do arco elevado. Aqueles, apresentam reações horizontais muito grandes necessárias para equilibrar os momentos fletores, enquanto que nestes últimos predominam as reações verticais.

No arco abatido, as reações são inclinadas nas suas extremidades e tangentes à curva. **Por esse motivo, o desenho do elemento de apoio deverá assumir uma forma coerente com a direção dos esforços, porque quanto mais se aproximar da sua resultante mais facilmente irá se opor a ela**, tal como acontece no Olympic Hall (Noruega), projeto Niels Torp Architects.

Fig. 3 Olympic Hall

Fig. 4 Croqui do autor

É bom lembrar também que as cascas de dupla curvatura constituem um sistema suporte de cargas mais eficiente do que aquelas de curvatura simples.

Antes de prosseguir, é necessário observar um aspecto muito importante no comportamento dos elementos estruturais de eixo linear ou curvo. Trata-se de uma conclusão a que cheguei após o estudo das estruturas e seus diferentes comportamentos, na medida em que difere a sua geometria:

Nas estruturas convencionais, a grande “ vilã ” por assim dizer é a flexão, inclusive do ponto de vista do dimensionamento. É muito mais simples o cálculo da tração ou compressão pura do que o cálculo da flexão, porque esta vem sempre acompanhada da força cortante quando não, da cortante associada à torção como no caso das vigas balcão. A flexão ocorre sempre que elementos estruturais de eixo retilíneo são colocados na horizontal, apoiados em suas extremidades. Na maioria dos casos não há como evita-la, porque talvez 90% dos edifícios são construídos utilizando sistemas estruturais convencionais formados pela associação de pilares, vigas e lajes. **Porém não há como negar o desempenho favorável das estruturas de superfície curva.** Um exemplo esclarece bem esse raciocínio: um fio flexível e inextensível suspenso em suas extremidades e submetido unicamente à ação do seu peso próprio, forma uma curva denominada catenária, e como se sabe trabalha unicamente à tração.

Segundo o eminente Engenheiro e Professor Dr. Augusto C. de Vasconcelos em seu livro *Estruturas Arquitetônicas*, “se a gravidade passasse a atuar de baixo para cima e o cabo se mantivesse rígido, trabalharia exclusivamente à compressão”.³²

Em alguns casos, a flexão nas cascas aparece em função da pequena altura da flecha ou devido ao comprimento do eixo longitudinal da casca. Para vãos menores do que duas vezes a largura, seu comportamento é nitidamente o do arco, para vãos superiores a três vezes a largura, o funcionamento predominante é o de viga.³³

Por essa mesma razão, as cascas duplas da Biblioteca do Memorial da América Latina estão apoiadas na grande viga protendida com 90m. de vão.

Como conclusão, podemos afirmar que para cada forma existe um comportamento específico, e o que realmente os arquitetos precisam ter em mente, é que de uma maneira geral, as cascas **são estruturas muito resistentes, contendo uma grande porcentagem de material trabalhando à compressão que é o que realmente interessa**, variando entretanto de comportamento de acordo com suas características geométricas. É importante também saber que, abóbadas, cúpulas, parabolóides, hiperbolóides conóides, toróides e todas as formas compostas e derivadas, **fazem parte de um leque de possibilidades à total disposição dos arquitetos**, desde que as mesmas façam parte do seu repertório formal. Somente depois de conhecer todas as tipologias estruturais resistentes ou não pela forma, poderá o arquiteto escolher a sua preferida. No capítulo 2 desta Tese, que entre outras coisas analisa as tipologias estruturais do ponto de vista dos materiais, da forma e do comportamento estático, há uma chave onde as estruturas de superfície curva se encontram classificadas.

³² Vasconcelos, A.C. *Estruturas Arquitetônicas*. São Paulo: Studio Nobel 1991. Cap. 3 p. 49.

³³ Vasconcelos, A.C. *Estruturas Arquitetônicas*. São Paulo: Studio Nobel 1991. Cap. 3 p. 62

Evidentemente que do ponto de vista construtivo, a dificuldade é maior quando se trata de executar estruturas de superfície curvas ao invés de estruturas aporticadas convencionais por causa da grande complexidade geométrica das cascas e suas respectivas formas. O mesmo se pode afirmar em relação ao descimbramento das mesmas. Apesar disso, entretanto, foi a criatividade de um arquiteto que possibilitou a concepção de uma casca, cuja belíssima forma é resultado da associação de 6 parabolóides hiperbólicos, conhecida como Restaurante “Los Manantiales”, obra do Felix Candela, situada em Xochimilco no México e datada de 1958, a respeito da qual o Autor comenta:

“As cascas tem de ser estáveis, e sua forma deve permitir um aproveitamento racional do espaço interior. Ao mesmo tempo devem ser tão simétricas quanto possível porque a simetria favorece e simplifica seu desempenho estrutural.”³⁴

Fig. 5 Los Manantiales

a maior conquista estrutural da humanidade em mais de 2000 anos de desenvolvimento espiritual e tecnológico.

Talvez eles sejam também a materialização mais próxima do céu e sua única representação feita pelo homem, e é por isso que um domo aparece nos proteger como o céu de uma noite clara, abraçando-nos e protegendo nossa pequenez e solidão”.³⁵

A respeito das cúpulas esféricas também conhecidas como domos, Mario Salvadori comenta em sua obra “ Why buildings stand up ”:

“Os domos são os reis de todas as coberturas e a Meca de quantos tem religião, o céu dos amantes de teatro, a cobertura igualitária dos fãs dos esportes e

³⁴ Fonte: http://www.greatbuildings.com/buildings/Los_Manantiales.html

³⁵ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.13 p. 253

Realmente, quando se trata de vencer grandes vãos em duas direções sem suportes intermediários, “a forma mais natural e carregada de sentido técnico” como diz Torroja em “Razón de ser dos tipos estructurais” é a cúpula.³⁶

A primeira cúpula moderna foi construída para a fábrica Carl Zeiss em Jena na Alemanha em 1922.

Inexplicavelmente, atualmente tem diminuído a quantidade de estruturas em forma de casca a partir de projetos elaborados por arquitetos, apesar das facilidades em relação ao seu dimensionamento muito maiores hoje do que no início do século passado, quando não havia à disposição dos engenheiros os modernos processos de cálculo atualmente utilizados.

Certos programas arquitetônicos tipo auditórios e espaços de exposições, seriam muito melhor atendidos por soluções derivadas das coberturas de superfície curva. Não tenho como afirmar que em todos os casos, as estruturas aporticadas são sempre melhores em termos de funcionalidade de espaço e facilidade construtiva. O que está acontecendo talvez seja simples reflexo da falta de aprofundamento de tais questões, no âmbito das disciplinas de estruturas inseridas na grade os cursos de arquitetura.

E o mesmo se pode afirmar em relação às retesadas e às estaiadas.

³⁶ TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales** Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 8 pg 128

Análise da geometria e do comportamento estrutural das cúpulas.

As superfícies de revolução permitem o equilíbrio entre as tensões internas e as cargas mediante tensões de membrana. Cada ponto “P” descreve um círculo de raio igual à distância de “P” ao eixo de rotação. Este círculo é denominado paralelo enquanto que curva geratriz da superfície é um meridiano.

Tais superfícies são chamadas de cúpulas. Nestas, o equilíbrio é alcançado pelo trabalho em conjunto de ambos. Os meridianos resistem à compressão e os paralelos à tração atuando como verdadeiros tirantes circulares, ou como diz Salvadori, “tal qual os anéis de um barril”³⁷

Fig. 6 Croqui do autor

Tipos de cúpulas, materiais estruturais & apoios

As cúpulas podem ser esféricas quando resultam da rotação de um arco de circunferência em torno de um eixo, elípticas quando resultam da rotação de meia elipse ao redor de um eixo vertical, ou parabólicas quando resultam do giro de uma parábola em torno de um eixo vertical.

Podem ser construídas com materiais que trabalham unicamente a compressão, como o tijolo.

As cúpulas de tijolo foram muito usadas na antiguidade. Atualmente, as cúpulas de concreto armado, concreto protendido e aço são as mais freqüentemente utilizadas. Os apoios podem ser flexíveis, (diz-se que os apoios são flexíveis quando se utilizam articulações sem cintamento) cintados (apoios sobre anéis) ou engastados.

³⁷ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.13 p. 255

Comportamento estrutural

Desenvolvem basicamente tensões de tração e de compressão.

As tensões de compressão tanto maiores quanto mais se aproximam da base da cúpula, se distribuem pelos meridianos, e as de tração por paralelos cujo diâmetro é progressivamente menor à medida que se aproximam do topo.

A cúpula esférica se encontra em equilíbrio perfeito, visto que os apoios despertam apenas reações verticais na direção da tangente no extremo da casca. Diz-se que o sistema é autoportante.

Seu desempenho extremamente favorável se deve fundamentalmente ao fato de que a flexão é reduzida pelo trabalho conjunto dos anéis horizontais, que trabalham na verdade como verdadeiros tirantes circulares associados aos meridianos.

Fig. 7

Fig. 8

A relação entre a espessura da casca e o vão é extremamente desproporcional, chegando em alguns casos a $L / 300$, enquanto que no arco de concreto por exemplo, sistema estrutural onde os paralelos não existem ela fica compreendida entre $L / 20$ e $L / 30$ do raio.

Segundo Salvadori,³⁸ a rigidez obtida graças à ação combinada dos meridianos e dos paralelos é espantosamente alta. Um domo de concreto armado com envergadura de 30 metros e apenas 5 ou 8 centímetros de espessura apresentará no topo uma deformação por flexão de no máximo 2,5 milímetros, portanto $1 / 12\ 000$ de sua envergadura. Em comparação com ela, a flexão na viga é 33 vezes maior, ou $1 / 360$ do vão!!

³⁸ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.13 p. 256

Todavia, se as reações não estiverem dirigidas na direção da tangente, há necessidade de um apoio que equilibre a componente horizontal.

Não existindo os vínculos nas extremidades do arco absorvendo os empuxos horizontais “e” em A e B a estrutura funciona como viga e não como arco.

Fig.9

O elemento de apoio (engaste) destinado a absorver o empuxo horizontal “e” oferece restrições à deformação da casca, e constitui um fator de perturbação de borda. Neste caso devemos levar em consideração os efeitos de flexão causados por esforços introduzidos na borda como veremos adiante.

A esse respeito Torroja afirma em sua monumental obra “Razon y ser de los tipos estructurales” :

“Pode-se afirmar que o arco (engastado) sempre leva vantagem, saindo com lucro do jogo : escamoteia parte de suas funções estruturais passando-as a outro elemento independente da estrutura propriamente dita, qual seja, o terreno!

Bastaria que os apoios permitissem o deslizamento horizontal do arco, para que ele deixasse de comprimir horizontalmente o terreno e se convertesse em viga curva, trabalhando à flexão como se fosse uma reta.” ³⁹

Fig. 10

³⁹ TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales** Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 7 pg 110

Conforme a figura 10, podemos observar duas zonas distintas de trabalho onde ocorrem compressão na parte superior e tração na inferior. Tais zonas estão separadas por um paralelo (na verdade um anel), que faz as vezes de linha neutra. Exatamente nesse ponto a tendência é não se ocorrer compressão nem expansão na superfície.

O ponto em questão pode ser definido por um ângulo de 52° com o eixo vertical da cúpula, portanto a área circunscrita pelo anel situada acima do ponto, estará sujeita a compressão e a área situada abaixo à tração.

As tensões horizontais portanto, mudam de sinal para $\phi = 52^\circ$ e o cálculo indica que as tensões meridianas crescem sempre de cima para baixo e o anel de borda absorve o empuxo horizontal.

Como no topo da casca as tensões são de compressão e na base são de tração, para a cúpula trabalhar exclusivamente à compressão deverá ter uma abertura angular de 104° podendo inclusive ser construída com materiais inertes tipo tijolo ou pedra.

Se ϕ máximo = 90° , as tensões extremas são verticais e não há necessidade do anel de borda: a própria cúpula absorve totalmente os empuxos.

Fig. 11

Uma obra onde se percebe nitidamente o que acontece nestes casos, é a estação ferroviária Lehrter Bahnhof do Arquiteto alemão Von Gerkan Mark, em Berlim. Nela, Von Gerkan utilizou uma treliça de reforço que reproduz integralmente o desenho do diagrama de esforços.

Fig. 12 Estação Ferroviária Lehrter Bahnhof

Fig. 13 Detalhe

Deformação crítica do perfil por flexão

Fig. 14

Redução da perturbação por flexão, da borda inferior da casca :

Para reduzir-se os momentos fletores na base da cúpula, sua espessura deve ser maior na base, à razão de 2,3 a 2,4 vezes de acordo com Wilby⁴⁰, caso contrário torna-se necessário apoiar a estrutura em um anel protendido, tal como ocorre na “Oca” do Parque Ibirapuera.

Deflexão anular oposta da borda inferior da casca e da viga anular, causada pela direção das forças anulares.

Inversão da direção defletiva na viga anular, mediante protensão, e consequente eliminação de deflexão anular oposta

Fig. 15

⁴⁰ Wilby, C.B. **Concrete dome roofs**. Longman Scientific & Technical, 1993. p. 313

Na monumental obra de Eduardo Torroja inúmeras vezes citada nesta Tese, (*Razon y ser de los tipos estructurales*) a questão fica muito clara quando o Autor afirma:

“ O problema da perturbação por flexão na borda pode causar trincamento na base da cúpula, e até ruptura por compressão, somando-se as compressões normais que ocorrem nos meridianos à compressão causada pela flexão.

O atirantamento do anel da base constitui a solução ideal para o problema reduzindo consideravelmente a flexão meridiana.

Ao protender o anel octogonal que recolhe e equilibra os empuxos radiais da cúpula sobre seus apoios mediante os tensores de rosca colocados em suas barras, a cúpula se mantém perfeitamente equilibrada; inclusive, forçando-se ligeiramente a protensão do anel, percebe-se que a parte central da casca se ergue, despregando-se por assim dizer de seus cimbres, o que permite até a retirada do cimbramento sem as precauções que esta operação necessita !! ”⁴¹

Fig. 16 Croqui do autor

O ideal é definir as condições de apoio adequadas altura da casca, fazendo com que não ocorra a flexão, funcionando o conjunto como uma membrana conforme diz o Profº Vasconcelos em *Estruturas Arquitetônicas*, desenvolvendo apenas tensões de membrana. ⁴²

O Autor afirma ainda que é sempre muito mais fácil calcular uma casca pela teoria da membrana do que pela flexão...

Na Antiguidade nada se conhecia sobre o comportamento estrutural das cúpulas, e muito provavelmente várias delas ruíram devido às tensões gigantescas que surgiam na base em função do peso próprio.

⁴¹ TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales** Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap 8 pg 133

⁴² Vasconcelos, A.C. **Estruturas Arquitetônicas**. São Paulo: Studio Nobel 1991. Cap. 3 p. 64

Sistemas primitivos

Fig. 17 Arcos

Um sistema em arco pode ser montado, amarrando-se na parte superior dois troncos cravados no solo e paralelos entre si. A forma do arco semi circular à esquerda, irá aparecer mais tarde no Românico. Bem depois o arco em ponta irá se tornar uma das características do Gótico.

Fig. 18 Construções primitivas

O croqui à esquerda ilustra provavelmente uma das construções mais primitivas da Humanidade encontrada próximo a Nice na França. Com 6 x 15 metros aproximadamente, acomoda mais de quinze pessoas.

À direita, uma trama ortogonal de galhos flexíveis, empregada na construção de uma tenda indígena na forma de domo.

Fig. 19 Domus

O desenho ilustra um domus de geometria radial com cobertura de sapê característico das tendas indígenas norte-americanas. A foto mostra mulheres índias cobrindo uma tenda na feira internacional Trans-Mississipi em Omaha, Estado de Nebraska em 1898.

Fig. 20 Tendas

Embora as tenda cônicas sejam montadas e desmontadas com muita facilidade são muito confortáveis do ponto de vista térmico; uma cerca externa ajuda na proteção nos dias frios de inverno. Até uma fogueira pode ser acesa internamente, e o duplo revestimento de pele garante total isolamento no calor e no frio.

Alguns exemplos significativos

Forma clássica de abóbada em argila.

**Vila de casas com quintal.
Cobertura de sapê.**

Local: Mali

Igreja de São Francisco de Assis

Local : Pampulha

Data : 1943

Oscar Niemeyer

Concessionária Fiat Mais

Local : São Paulo

Data : 194 –

Antonio Berdinelli Marchesini

**Piscina Coberta Centro Esportivo
Baby Barioni**

Local : SP
Data : 1948

Ícaro de Castro Mello

Palácio das Artes

Local : São Paulo
Data : 1951

Oscar Niemeyer,
Zenon Lotufo,
Hélio Uchôa,
Eduardo K. de Mello

TWA

Local : Nova Iorque
Data : 1956-1963

Eero Saarinen

Los Manantiales

Local : México
Data : 1958

Felix Candela

Palácio das Convenções

Local : São Paulo

Data : 1967

Miguel Juliano e Silva,
Jorge Wilhelm

Posto Catacumba

Local : Rio de Janeiro

Data : 1968

Dilson Gestal Pereira,
Waldyr Antunes Figueiredo,
Paulo Roberto M. Souza,
Alfredo Lemos

Residência Marcos Acayaba

Local : São Paulo

Data : 1973

Marcos de Azevedo Acayaba

Biblioteca Latino Americana Victor Civita

Local : São Paulo

Data : 1987

Oscar Niemeyer

Izumo Dome

Local : Japão

Data : 1992

Kajima Design

Olympic Hall

Local : Noruega

Data : 1992

Niels Torp Architects

Centro de Apoio ao Grande Incapacitado Físico

Local : Brasília

Data : 1995

João Figueiras Lima

Lehrter Bahnhof

Local : Alemanha

Data : 2000 - 2002

Von Gerkan Marg and Partner

Estruturas retesadas : a síntese através da forma.

Buscando inspiração nos Romanos que há 2000 anos atrás cobriam seus estádios com estruturas retesadas utilizando um encordoamento de cânhamo (vide Coliseu) com mais de 150 metros, e nos povos indígenas Norte Americanos exímios construtores de tendas fabricadas com peles de animais, embora existam registros históricos assinalando a utilização de tendas pelos povos nômades em torno do ano 8000 a.C. arquitetos e engenheiros contemporâneos têm utilizado em larga escala sistemas de cabo para os mais variados fins, por exemplo, para coberturas de estádios esportivos e pavilhões além de pontes pênséis, vencendo neste caso vãos extremamente grandes, verdadeiros recordes nos campeonatos mundiais de vão livre como no caso da Ponte Akashi Kaikyo no Japão, analisada um pouco adiante nesta Tese.

A reprodução dos cenários das cidades pertencentes ao Império Romano nas séries especiais das emissoras de televisão contemporânea, mostra a intimidade dos generais e políticos da época debaixo das tendas das mais variadas formas e cores.

É importante estabelecer antes de mais nada um critério de organização dessas estruturas, que se subdividem em três grandes grupos principais:

- Estruturas formadas pela associação de membranas e tirantes ou membranas e malhas metálicas de fios flexíveis, ou simplesmente estruturas de membrana.
- Estruturas formadas pela associação de tirantes, cabos e estais, as chamadas estruturas estaiadas e pênséis, capazes de suportar grandes carregamentos externos, e as redes de cabos cujo comportamento é muito semelhante ao comportamento das membranas, todas elas trabalhando exclusivamente à tração.
- Estruturas pneumáticas, onde a estabilidade da membrana de cobertura depende da pressão do ar. São muito raras no Brasil, entretanto.

No primeiro caso estão as estruturas construídas com tirantes associados às membranas, onde os elementos estruturais trabalham somente à tração, não resistindo a momentos fletores ou força cortante; tiram partido do desempenho favorável dos seus elementos de sustentação, os tirantes, que desde que rigidamente ancorados em suas extremidades, permanecem em perfeito equilíbrio.

Têm como característica principal a leveza (massa em média de 5 a 8 kg por metro quadrado) e a capacidade de vencer grandes vãos.

A produção contemporânea dos projetos de tendas, ainda muito pequena em comparação com o que está sendo feito em concreto armado e protendido, aço e madeira, têm sido denominadas de “arquitetura têxtil” em referência aos tecidos polimerizados utilizados na produção das mantas.

Esses tecidos podem ser naturais como o algodão ou sintéticos como o vinil. Porém, seja qual for o material utilizado, a sua resistência à flexão é nula, devendo-se adotar como parâmetro a única maneira de torná-los um pouco mais rígidos : submetendo-os à tração, assim como um lenço colocado do lado de fora da janela de um carro em movimento, só se estabiliza quando esticado com as duas mãos.

No segundo, se enquadram as grandes estruturas de pontes que utilizam um conjunto de cabos e estais associados ao tabuleiro, e as malhas de cabos.

Em relação a estas últimas, ver : cobertura do Estádio Olímpico de Múnic.

Os cabos são formados pelo entrelaçamento de tirantes (elementos unidimensionais) e estais são formados por sua vez pelo entrelaçamento de vários cabos.

No terceiro, as estruturas pneumáticas que, segundo o Prof^o Ruy Pauletti dividem-se em 3 grupos:

1. Estruturas insufladas : uma membrana fecha um espaço útil e é suportada por uma pressão interna maior do que a pressão atmosférica.
2. Estruturas aspiradas onde ocorre o contrário: a pressão interna é menor.

3. Estruturas infladas : são utilizados balões pressurizados em forma de vigas, colunas, arcos, como elementos estruturais. Necessitam pressões maiores do que no caso das insufladas uma vez que a pressão interna é usada para conferir rigidez aos elementos estruturais que resistem globalmente por meio de mecanismos mais tradicionais como a flexão.⁴³

Estruturas de tendas:

O projeto considerado pioneiro foi o de quatro pavilhões em Nijni-Novogorod, 1895 na Rússia. A obra é considerada a primeira em que uma estrutura funciona como membrana. Já em 1926, Federico Canobbio desenvolveria as bases das modernas tensoestruturas com o projeto de uma cobertura para estufa agrícola. Canobbio daria outro passo na década de 50 com a realização de uma cobertura circense encomendada pela família Orfei. Hoje na quarta geração, a Canobbio é a mais importante empresa italiana de tensoestruturas.

A obra que marcou a fase mais moderna das coberturas tensionadas foi a Arena de Raleigh (1953), um parque de exposições agropecuárias na Carolina do Norte (EUA), concebido por Mathew Nowicki. A forma é um parabolóide hiperbólico. Nas décadas de 60 e 70, as tensoestruturas ganharam enorme destaque com os projetos concebidos pelo Alemão Frei Otto, sobretudo os de cobertura para as piscinas e estádios utilizados nos Jogos Olímpicos de Munich, em 1972⁴⁴. Foi a primeira vez que se utilizou um programa de computador para analisar a rede de cabos.

As primeiras maquetes de coberturas tensionadas foram concebidas por Frei Otto com arame. Em seguida, usando água e sabão, mergulhava-se o modelo em uma tina até que fossem preenchidos os vazios entre os fios. Quando retirada, a maquete estava envolvida por uma película de bolha de sabão.

Os modelos eram em seguida postos à frente de uma grade reticulada com planos ortogonais. A sombra da estrutura formada sobre o fundo de planos ortogonais era então fotografada, conseguindo-se dessa forma uma resposta ao modelo proposto.⁴⁵

⁴³ PAULETTI, R. M. de O. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Depto. de Eng^a de Estruturas e Fundações. Tensoestruturas – Idéias básicas. BT / PEF / 9909 ISSN 0103-9822

⁴⁴ Revista Técnica. “Alívio a tensão”. São Paulo: Ed.Pini, nº 35. Jul/Ago 1998. Pág. 26

⁴⁵ Revista Técnica. “Alívio a tensão”. São Paulo: Ed.Pini, nº 45. Mar/Abr 2000. Pág. 64

No Brasil, a mais importante tensoestrutura para cobertura foi a do Ginásio de São Cristóvão no Rio de Janeiro, projetada pelo Arquiteto Sérgio Bernardes, destruída por um incêndio alguns anos depois.⁴⁶

Embora no texto acima publicado na revista *Téchne*, esteja constando como pioneiro o projeto dos quatro pavilhões em Nijni-Novogorod de 1895 na Rússia, além da Arena de Raleigh datada de 1953, o Profº Engº Ruy M.de O. Pauletti diz no artigo “A evolução das Tensoestruturas” que a tenda é a mais antiga forma de moradia, existindo evidências de abrigos feitos com peles e ossos de mamutes com mais de 40.000 na Ucrânia.⁴⁷

Ele afirma ainda que os primeiros registros são fragmentos iconográficos dos Assírios (3.000 a.C) e egípcios. Também os exércitos persas que guerreavam contra os gregos usavam tendas luxuosas, e através dos gregos seu uso transmitiu-se para os romanos, surgindo posteriormente o papilio (borboleta), tenda militar de planta retangular, cujo nome decorre das forma particular de dobragem.⁴⁸

Realmente, as técnicas de estruturar as tendas utilizando tirantes, suportes metálicos e as membranas de poliéster com revestimento de PVC ou de fibra de vidro com teflon, (material utilizado para revestimento de utensílios domésticos) com durabilidade muito maior do que os tecidos de fibras naturais (até 25 anos) e grande resistência à dobraduras, são conquistas muito recentes.

Nas imagens, um comparativo da tenda negra do Oriente Médio com uma tensoestrutura contemporânea e suas respectivas ancoragens.

⁴⁶ Revista *Téchne*. “Alivie a tensão”. São Paulo: Ed.Pini, nº 35. Jul/Ago 1998. Pág. 26

⁴⁷ Boletim Técnico da E.P.U.S.P Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. “Evolução das Tensoestruturas”. 1999. Pág. 1

⁴⁸ Boletim Técnico da E.P.U.S.P Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. “Evolução das Tensoestruturas”. 1999. Pág. 3

Fig. 21 Estruturas de membrana : detalhes das amarrações, do antigo ao contemporâneo.

Detalhe preparado pelo Profº. J. R. Soutello

As estruturas de membranas, caracterizadas por sua conformação geométrica não linear, equilibram os esforços solicitantes desenvolvendo tensões de tração e cisalhamento tangentes à sua superfície, não apresentando rigidez à flexão. Por causa disso só se tornam rígidas ao serem esticadas, mudando de forma conforme a disposição dos tirantes e conforme o carregamento, da mesma forma que um cabo suspenso em suas extremidades tem sua forma alterada conforme a disposição das cargas que o solicitam:

Fig.22

Aqui no Brasil os sistemas retesados têm sido pouco utilizados, um pouco por causa do preconceito: de uma maneira geral o pensamento converge para uma crença qualquer do tipo “as tendas são construções efêmeras”, isto é, tem pouca durabilidade, um pouco por desconhecimento dos arquitetos em relação às características dos materiais, comportamento estrutural e processo construtivo.

É pena porque apresentam grande leveza e plasticidade, apesar de que devem ser tomados alguns cuidados em relação à sua execução:

- Fundações mais sofisticadas e caras podem se tornar imprescindíveis quando o conjunto estiver sujeito a esforços de vento capazes de provocar um efeito conhecido como “flutting” (drapejamento) submetendo-as a grandes tensões de tração.
- Ancoragens adequadas empregando olhais metálicos engastados em bases de concreto nesses casos tornam-se indispensáveis. É aconselhável também que os mastros principais de sustentação sejam rotulados em sua base, de modo a dispor de no mínimo um grau de liberdade (giro) devido ao “flutting” provocado pela ação do vento.
- A forma deve obedecer as diretrizes do partido arquitetônico, levando em consideração sua capacidade de vencer grandes vãos, sua leveza não somente do ponto de vista da plasticidade, e a capacidade de filtrar convenientemente a luz solar dada a translucidez das mantas, tirando partido dos efeitos da radiação como fonte de economia de energia.
- Seus componentes são os tirantes de aço, as membranas e os blocos de ancoragem.

Concluindo esta abordagem resumida do tema Estruturas Retesadas, não há como deixar de relacioná-la à essência da pesquisa desenvolvida com vistas ao lançamento das premissas iniciais desta Tese: serão ainda válidos os postulados de Nervi acerca da resistência pela forma à luz da produção arquitetônica contemporânea?

Fica claro que a estabilidade do sistema e sua resistência às solicitações externas estão diretamente relacionadas à concepção da arquitetura & estrutura e aos modernos processos de cálculo, baseados ultimamente no método dos elementos finitos.

Em pouquíssimos casos se pode observar com tanta precisão, a total integração entre duas atividades tão essenciais para a organização do espaço, atividades estas absolutamente complementares entre si : **arquitetura e estrutura**. Quando a concepção arquitetônica está pronta a estrutura que lhe dá suporte também estará, e também muito raramente iremos perceber soluções arquitetônicas onde a resistência está tão intimamente associada à forma como no caso das estruturas retesadas.

Uma obra notável do Arquiteto Saarinen, idealizada a partir da resistência pela forma e baseada no desempenho altamente satisfatório dos cabos quando submetidos à tração, é a do Aeroporto de Dulles situado em Washington. Os cabos são dispostos em uma única direção, ancorados em pilares inclinados e mantidos sob tração pelo peso da cobertura feita com placas de concreto.

"No Aeroporto de Dulles, a estrutura é também um elemento ativamente participante da arquitetura. O vão transversal de 50m. é vencido por uma malha de cabos enrijecida por concreto. A malha é apoiada, em cada extremo, em uma viga horizontal de concreto armado que vence os 15 vãos de 12m entre pilares. A cobertura, através das vigas horizontais, aplica aos pilares forças verticais, os momentos a eles aplicados pelas forças de empuxo teriam um valor muito maior que a solução de pilares inclinados propostos pelo projeto. Com a inclinação dos pilares, parte dos momentos de empuxo são aliviados pelos momentos contrários aplicados pelas cargas verticais. Este é outro exemplo de como a forma arquitetônica pode colaborar de maneira sensível na diminuição das dimensões estruturais e receber de volta esse benefício em formas estruturais mais elegantes.”⁴⁹

Fig. 23 Aeroporto de Dulles

Os exemplos a seguir, ilustram os conceitos citados neste capítulo.

⁴⁹ REBELLO, Yopanan C.P. **Arquiteturas e Estruturas** Revista AU n° 80 Out - Nov 98 pg 101

Fig.24 Teia de aranha

Fig.25 Estabilidade do varal

Exemplos significativos

National Yoyogi Sports Center

Kenzo Tange

Local : Japão

Data : 1964

Leichtbau Institute

Frei Otto

Local : Alemanha

Data : 1967

Estádio Olímpico de Munich

Gunter Behnisch and Partner
Frei Otto (Projeto de cobertura)

Local : Alemanha

Data : 1972

Queeny Park Pavilion

Jones Mayer Associates

Local : EUA

Data : 1978

Florida Festival

Robert Lamb Hart

Local : EUA

Data : 1980

Estrutura de Cobertura do Rinque de Patinação do Complexo Olímpico de Munich

Ackermann and Partner

Local : Alemanha

Ano : 1980

Haj Terminal at Jeddah International Airport

Skidmore Owens & Merrill

Local : Arabia Saudita

Data : 1981

Sede de Vendas da Renault

Foster Associates

Local : Inglaterra

Ano : 1981

Tennessee Amphitheater

McCarty, Bullock & Holsapple Inc.

Local : EUA

Data : 1982

Estádio de Torino

Engenharia Estrutural: Schlaich,
Bergemann and Partners

Arquitetura: Hutter, Cordero, Ossola,
Majowiecki

Local : Itália

Data : 1989

Igus Factory

Nicholas Grimshaw

Local : Alemanha

Ano : 1992

Communications Tower

Norman Foster

Local : Espanha

Data : 1992

Denver International Airport

C.W.Fentress J.H.Bradburn
&
Associates

Local : EUA

Data : 1994

Buckingham Palace Ticket Office London

Hopkins Architects

Local : Inglaterra

Data : 1994

Campo de Marte Tent

Josep Ollé
Stefano Bertino
Calonggiero Celeste

Local : Espanha

Data : 1998

The Eden Project

Nicholas Grimshaw

Local : Inglaterra

Data : 1998

Research Laboratory

Samyn and Partners

Local : Itália

Data : 1999

Igreja Batista Central de Fortaleza

Ruy Marcelo Pauletti

Local : Brasil

Data : 2003

Maritime Terminal

José Lastra

Guillermo Capellán

Ricardo Miñana

Local : Espanha

Data : 2003

Pontes e Passarelas

“ El puente de Londres se está cayend o...”⁵⁰

(canción popular inglesa)

Introdução.

A respeito das obras dos arquitetos, Artigas disse uma vez:

“Tenho a impressão de que a maior coragem que um artista pode ter, é ser arquiteto!”

Uma obra de arquitetura fica lá, milhares de anos, aquela porcaria colocada lá, todo mundo passa pela frente e olha, e não dá para esconder dentro de um Museu, não é para por em uma sala, ela é a própria sala, é uma barbaridade!!!!...”

No seu jeito espontâneo, o Pai da Arquitetura Moderna Paulista afirma de forma convicta que não dá para ignorar a obra construída de um Edifício, mesmo de pequeno porte. O que se dirá das pontes...

Vejo uma bela ponte como uma das poucas manifestações da criatividade do espírito humano capaz de se integrar e até melhorar a paisagem natural onde se insere. A graça e a indizível leveza de uma ponte suspensa compõe um cenário único, muitas vezes emoldurado pelo sol poente destacando-se contra o fundo azul do céu como uma das principais afirmações de engenhosidade e senso estético da Humanidade, e objeto impossível de ser ignorado impressionando com sua majestade até as criaturas menos sensíveis.

Inexplicavelmente sinto uma paixão muito grande por elas, talvez por ter vivido minha infância próximo a uma (a Ponte Pênsil em São Vicente), e aproveitando esta magnífica oportunidade visto que mais do que quaisquer outros exemplos representam de forma eloqüente **a verdade cristalina da estrutura que resiste pela forma**, prazerosamente as incluí nesta Tese.

Sempre foram e sempre serão ferramenta indispensável ao homem desejoso de atingir o seu destino pela via mais rápida, pois também tanto quanto a linha reta, representam o caminho mais curto entre dois pontos distantes.

⁵⁰ Salvadori&Heller. Estructuras para Arquitectos. Ediciones La Isla. 1ª Edição, 1966. p. 3.

Pelo menos acredito na inteligência dos homens, e tenho certeza que será muito pouco provável observarmos nelas a assimetria de alguns edifícios contemporâneos...

Pontes costumam custar muito caro...

Pode-se definir Ponte como uma estrutura capaz de transpor um acidente natural como um rio ou um vale, ou mesmo quando não se trata de acidentes naturais, veja-se o caso das rodovias, é condição obrigatória e indispensável não bloquear o caminho sob ela. O desenho e a construção de pontes remonta ao início dos tempos e faz parte da História, e assim como as primitivas habitações que empregavam materiais como a argila e o junco, (ver Cap. 2 - Referenciais Históricos) as pontes primitivas muito provavelmente devem ter sido construídas em pedra natural ou em madeira, visto que um simples tronco de árvore deitado e apoiado nas margens de um pequeno córrego constitui sem dúvida uma estrutura de ponte, embora primitiva.

Isto sem falar nas pontes naturais como o enorme arco de pedra que cruza o rio Ardeche na França.

Fig. 26 Ponte de corda de videira

Fig. 27 Arco de pedra com 80 metros de vão. Parque Nacional dos arcos. Utah, EUA

Ponte primitiva de corda, suspensa sobre o Rio Trisuli, no Nepal.

Fig. 28 Ponte de corda

Fig 29 Caminho de pedra

Tarr Steps

Caminho de pedra através do Rio Barle, Noroeste da Inglaterra (Somerset).

“Um maravilhoso caminho de pedra sobre o Rio Barle, feito como todo mundo sabe, pelo Diabo por causa de uma aposta ...”
(R. D. Blackmore, Lorna Doone, 1869)

A rigor podemos dividir as tipologias estruturais das pontes construídas desde o início dos tempos, em três categorias básicas : pontes em viga, em arco e suspensas.

Pontes em viga apoiam-se no terreno. Pontes em arco estão sujeitas à compressão pura e empurram horizontalmente suas extremidades. As reações capazes de absorver os empuxos horizontais das pontes em arco são fornecidas pelo próprio terreno quando este é constituído de material sólido como a rocha por ex. Por outro lado o sistema estrutural de uma ponte suspensa é mais sofisticado e via de regra é formado por um tabuleiro sustentado por tirantes encarregados de transferir a carga para os cabos, e daí para os pilares. O conjunto todo com exceção destes últimos trabalha à tração pura. Os pilares estão sempre sujeitos à compressão.

Os sistemas estruturais das pontes são muito diversificados e definidos em função de vários fatores, como o tamanho do vão, a resistência do solo que depende naturalmente da geografia do local, a carga que irá receber, (pedestres, rodovias, ferrovias etc.). Evidente que o vão e a carga são determinantes na definição do sistema e do material estrutural a ser utilizado, todavia pontes de todos os tipos podem ser construídas em qualquer lugar desde que as condicionantes citadas sejam levadas em consideração no momento da definição do partido, tal como acontece com os edifícios.

Tipologias estruturais mais freqüentes :

Pontes em viga (vãos até 250 metros)

Alma cheia

Treliçada

- **Pontes em arco (vãos até 500 m)**

Montantes apoiados em 2 rótulas.

Montantes apoiados em 2 engastes.

Tabuleiro atirantado.

- **Pontes Estaiadas**

- **Pontes Pênseis (responsáveis pelos maiores vãos)**

Fig. 30

Os esforços a que estão sujeitas as pontes são devidos aos efeitos naturais e dinâmicos, peso próprio, carregamentos relativos ao tráfego etc.

Agentes naturais como o vento, mudanças de temperatura e carga de neve são extremamente importantes para efeito de cálculo estrutural de uma ponte, embora nenhuma delas possa certamente resistir a catástrofes como terremotos de grandes proporções.

A História começa a ser escrita :

Sabe-se que os Romanos deram um notável impulso à Arquitetura e à Engenharia, porém sua contribuição não se restringe apenas às construções de edifícios.

A invenção do concreto ciclópico, material composto por pedaços de tijolo fragmentado e cacos de mármore assentados com argamassa de cal e uma espécie de areia encontrada na região do Vesúvio conhecida como pozzolana, na verdade um resíduo de lava vulcânica, associado ao uso de formas possibilitando o uso do concreto nas fundações sob a água como no caso da Ponte Sant'Angelo no Rio Tiber em Roma, e a utilização do arco de concreto embora com vãos limitados, constituem um avanço notável no processo de construção de pontes e aquedutos.

“A envergadura máxima de um arco romano era de aproximadamente 30 metros, e sua forma sempre foi a de um semicírculo por causa da facilidade de se erguer andaimes circulares de madeira ou cimbres para a sua construção.”⁵¹

Fig. 31 Ponte Sant'Angelo

Ponte Sant'Angelo

Local : Rio Tiber (Roma)

Data : 134 d. C.

Construída por Hadrian
(Imperador de Roma 114 - 138 d.C.)

⁵¹ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé.** SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.9 p. 160

Fig. 32 Ponte de Alcântara

Ponte de Alcântara Século I

Comprimento total	: 180 metros
Vão máximo	: 30 metros
Largura dos pilares	: 9 metros
Altura máxima	: 50 metros

O uso dos metais teve início por volta do ano 3.500 a.C na Mesopotâmia e no Egito. Dos metais conhecidos, o mais antigo e o primeiro a ser utilizado é o cobre. É muito provável que a primeira fusão tenha ocorrido acidentalmente quando, ao se acender uma fogueira cercada de blocos de pedra contendo veios de cobre, o fogo derreteu o metal.

Por volta de 1.500 a.C. o homem começou a moldar o cobre derretido em formas, fabricando utensílios domésticos rudimentares. O bronze, resultado da mistura do cobre com o estanho surgiu no Egito em 2.500 a.C.

O uso do ferro obtido por meio da fusão do minério aconteceu muito tempo depois, por volta do ano 1.700. a.C. Os Hititas, povo que habitava a região onde fica a Síria, são os responsáveis pela produção do chamado ferro forjado, i.é o minério de ferro aquecido e trabalhado na forja, (conjunto formado pela fornalha, fole, bigorna e martelo). Evidentemente que naquela época os processos deviam ser bastante rudimentares, aquecendo-se o minério no fogo e chegando-se à forma desejada por meio de golpes aplicados com pedras pesadas.

Mas apesar de descoberto em época anterior, o ferro não era um material utilizado nos tempos romanos. “A fama dos construtores das pontes romanas se reflete nas majestosas pontes de alvenaria, sempre com arcos circulares, que talvez alcancem o pico da realização na poderosa ponte sobre o Tagus em Alcântara, Espanha.

Construída por Caius Julius Lacer para Trajano, os altos pilares de granito e os arcos de 30 metros de largura que apóiam as pistas a uma altura de 50 metros sobre o rio ficaram em pé por quase 2000 anos. As enormes pedras que formam o arco pesam mais de oito toneladas cada e eram moldadas de uma forma tão precisa que não necessitavam de argamassa nas juntas. Os arcos devem ter sido construídos sobre estruturas temporárias de madeira, escoradas.

Os pesados arcos de pedra foram sem dúvida erguidos por um sistema de polias em grupo operados por meio de manivela, provavelmente baseado no princípio do moinho de pedal. Ferramentas usadas pelos operários incluíam serras, cinzéis, bizéis, calço e pá. Eles também usavam prumo e nivelador”.⁵²

⁵² Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 193.

A Idade Média:

Tumultos e desequilíbrios sociais de toda ordem, sucederam a queda do lendário Império Romano como era de se esperar, e com isso a construção de pontes na Europa diminuiu de intensidade, excetuando-se um curto período durante o reinado de Carlos Magno.

A interrupção se estendeu ao longo de oito longos séculos e envolveu não somente a construção de pontes como também de edifícios de grande porte, face às invasões bárbaras na Europa. (Ver Cap. 2 - Referenciais Históricos).

A partir da invenção do arco ogival no lado Oeste do Continente Europeu e sua crescente utilização no Oriente Médio devido às maiores facilidades de execução, visto que além das formas pontiagudas atraentes ele não demandava uma mão de obra muito qualificada porque não exigia tanta precisão quanto o arco circular, e os empuxos horizontais praticamente são inexistentes, houve um aumento considerável do número de obras construídas tanto de pontes como de edifícios. Um certo declínio de qualidade acabou acontecendo inevitavelmente; é bom lembrar que a mão de obra medieval não se comparava à mão de obra do tempo do Império Romano!

Fig. 33 Florença : Ponte Vecchio

Curiosamente e ao contrário do que é feito hoje, as pontes da Idade Média além de servir de elemento de ligação entre dois pontos servindo aos pedestres e ao tráfego, ainda serviam de suporte para outros fins : lojas, mercados, cabines de pedágio e capelas eram construídas sobre elas, como no caso desta romântica ponte construída em Florença sobre o rio Arno por Taddeo Gaddi.

Chama a atenção pelo fato de ter sido construída em arco abatido ao contrário das pontes romanas antigas em arco de circunferência.

“ Pontes como a Valentré no Cahors, França ou a Ponte sobre o rio Monnow no País de Gales eram protegidas por mecanismos que aumentavam consideravelmente a segurança como sistemas de elevação do tabuleiro, rampas e altas Tôres com ameias e fendas de flecha. Sua manutenção era considerada um trabalho de dedicação para a qual o dinheiro era obtido por doação ou por pedágios cobrados para tráfego no rio e na rodovia.

Uma das mais famosas pontes medievais na França é a Ponte d’Avignon sobre o Reno, cuja construção começou sob a direção de St. Benezet em 1177 terminando dez anos mais tarde.”⁵³

Avignon : St. Bénézet’s Bridge

1177 – 1187

“Bénézet’s um pobre pastor de ovelhas dotado de força sobrenatural. Declarou certa vez que seria capaz de construir uma ponte onde nem Deus nem São Pedro ou São Paulo ou Carlos Magno ou qualquer outra pessoa o faria. Só acreditei que era verdade quando ele conseguiu mover um gigantesco bloco de granito no meu palácio.”

(Legendárias palavras do Bispo de Avignon - 1177)

Fig 34 Avignon : St. Bénézet’s Bridge

A Ponte d’Avignon cruzava o rio por meio de 20 imponentes arcos elípticos cada um com 30 metros de vão. Dizia-se que St. Benezet tinha recebido inspiração divina para construir a Ponte, mas antes que ela fosse concluída ele faleceu e foi enterrado em uma capela situada em um dos molhes.

⁵³Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 193.

Hoje, somente dois ou três arcos permanecem de pé por causa dos bombardeios que aconteceram nas 2 grandes guerras, e devido também à ação do gelo do rio. Por sorte a Capela que se tornou um local de peregrinação também resistiu.

Mais ou menos na mesma época, ou mais precisamente 12 meses antes do início da construção da Ponte d'Avignon, Peter de Colechurch tornou-se responsável por uma tarefa praticamente impossível : construir a velha Ponte de Londres. Na realidade esta ponte de pedra foi a primeira a ser construída sobre fundação de alvenaria em um rio cuja correnteza era bastante rápida além das oscilações do nível d'água por causa do sobe e desce contínuo das marés. Acabou de ser construída em 1209, mantendo-se por mais de 600 anos junto com seus famosos túneis usados como vielas de residências e de lojas. Em sua homenagem os ingleses compuseram uma antiga e famosa canção popular “El puente de Londres se está cayend o...” citação que abre este capítulo.

A Renascença:

Embora os cursos de arquitetura e engenharia civil ainda não existissem (a primeira Escola de Engenharia – “École Polytechnique” é de 1794), os Engenheiros e Arquitetos do Renascimento, artistas, artesãos e membros importantes das Cortes, tornaram-se responsáveis por construções ousadas, pela criação de equipamentos mecânicos como bombas hidráulicas acopladas a reservatórios de água que serviam tanto residências particulares como cervejarias, por sistemas de drenagem e irrigação e muitas outras invenções que tornaram mais confortável a vida dos habitantes das vilas e cidades da Renascença porque além de tudo economizavam mão de obra e como consequência, salários.

O mais notável foi sem dúvida Leonardo da Vinci o homem do Renascimento. Seus desenhos e invenções causam perplexidade e admiração até hoje. Porém, não havia meios que possibilitassem troca rápida de informações dada a precariedade dos meios de comunicação. Não se falava ainda no fenômeno da globalização... as invenções eram consideradas segredo de Estado como por exemplo a Geometria Descritiva inventada mais tarde por Gaspard Monge (1794), e não existia a inacreditável diversidade de informações e a velocidade com que elas são trocadas graças ao advento dos modernos computadores e da rede mundial “*worldwideweb*”.

“A autoconfiança e a iniciativa deste período são simbolizadas pela proposta de Leonardo da Vinci, de construção de uma ponte em arco de alvenaria com vão de 275 metros sobre o Golden Horn em Istambul. Seus desenhos parecem adequados, exceto pela dificuldade de sustentação do centro (suportes temporários de madeira) sobre os quais o arco deveria ter sido construído.

Este foi o período de construção de algumas das mais famosas pontes do mundo tais como as pontes de Notre Dame e a Ponte Neuf em Paris, a Rialto em Veneza e a Santa Trinitá em Florença.”⁵⁴

Ponte Neuf

1558 - 1607

A Ponte Neuf está para Paris assim como o coração está para o corpo humano. Ela é centro de movimento e circulação ...

É suficiente para um passeio de meia hora quando você pretende encontrar uma pessoa que está procurando e se ao final de alguns dias você não a encontrar, pode ter certeza de que ela está longe de Paris.

(Louis – Sébastien Mercier. Jornal de Paris, 1782-88.)

Fig. 35 Ponte Neuf

Ponte de Rialto

1588 - 1591

“Esta esplêndida ponte, no ponto onde foi construída, serve como referência para uma das mais belas e nobres cidades italianas...”

O canal de Veneza é excepcionalmente largo, e a ponte deve ter sido construída para que mercadores do mundo todo pudessem ali se encontrar para fazer seus negócios.”

(Andréa Palladio, I quattro libri dell’architettura, 1570)

Fig. 36 Ponte de Rialto

⁵⁴ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 193.

Por volta dos séculos XVII e XVIII, o assunto construção de pontes na Europa que era empírico tornou-se científico. “Em 1716 foi criado o Corpo dos Engenheiros de Pontes e Estradas (Corps des Ingénieurs des Ponts et Chaussées) ao qual todos os planos de construção de pontes deveriam ser submetidos e aprovados.

Jean Perronet, o construtor de algumas das mais belas pontes da época, incluindo a Ponte Neuilly sobre o Rio Sena e a linda Ponte de la Concorde em Paris foi indicado como Diretor da primeira Escola de Engenharia do mundo, a famosa École des Ponts et Chaussées fundada em 1747.

“Cientistas como Galileu Galilei e Robert Hooke já investigavam a Teoria das vigas e estruturas de treliça, e construtores de pontes eram requisitados para trabalhar seguindo especificações detalhadas”.⁵⁵

⁵⁵ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 193.

As Pontes metálicas e a Era das ferrovias

No final do Século XVII e início do Século XIX uma sequência de acontecimentos relacionados às obras que utilizavam estruturas metálicas acabou por sedimentar o desenvolvimento no Continente Americano e Europeu. Nos Estados Unidos, por exemplo, a ligação da Costa Leste à Costa Oeste e a colonização desta última, apesar dos infaustos acontecimentos que acarretaram o desaparecimento de toda uma civilização dos nossos irmãos indígenas e sua riquíssima Cultura, só se tornou possível graças à construção das redes ferroviárias depois da invenção do laminador de trilhos (1820). A locomotiva havia sido inventada por George Stephenson em 1829.

Ora, construir ferrovias significava transpor rios vales e desfiladeiros, e para isso obviamente se tornou imperativo a construção das pontes de todos os tipos em prazos recordes e com a necessária resistência. A partir daí os construtores de pontes não estavam mais limitados ao uso do tijolo da pedra e da madeira.

Na Europa, a Inglaterra a França a Alemanha a Itália e a Rússia logo perceberam a extraordinária eficiência do transporte ferroviário, e trataram de construir suas redes que hoje atravessam o Continente de um extremo a outro.

A primeira ponte exclusivamente em ferro no mundo, existente até os dias de hoje, foi uma ponte em arco de circunferência com 30,5 metros de vão, desenhada por Thomas Farnolls Pritchard e construída sobre o Rio Severn no Coalbrookdale em 1777.

Apesar disso porém, o ferro já havia sido usado nos cabos das pontes suspensas.

De uma certa forma, seu desenho reproduz em ferro o desenho das abóbadas de pedra, o que diga-se de passagem é mais apropriado à natureza do material estrutural. O ferro resiste muito bem à compressão assim como a pedra, mas não vai muito além disso porque não se deforma como o aço, material muito mais nobre e de extrema ductilidade, muito mais adequado portanto para trabalhar à flexão.

Fig. 37 Iron Bridge

Iron Bridge

1776 – 1779

Primeira ponte em ferro do mundo.
Thomas Farnolls & John Wilkinson

Detalhes

“A Ponte Pritchard carregou o tráfego das pistas por mais de 170 anos. Seguiram-se um grande número de arcos de ferro fundido desenhados por Telford, o primeiro dos quais foi o de uma ponte em Shropshire com 40 metros. Mas o mais ambicioso dos seus projetos, foi o do arco de 180 metros feito para substituir a velha ponte de Londres, embora a ponte nunca tenha sido construída.”⁵⁶

No Norte do País de Gales, T.Telford projetou e construiu em 1819 uma ponte suspensa com 176 metros de vão. A Ponte Menai ficou famosa por causa da inventividade do seu processo construtivo : após testa-las para ter certeza que eram seguras, Telford usou correntes de ferro batido colocando-as na água e rebocando-as até o local da construção.

O tabuleiro foi então colocado por baixo e içado. A pista era estreita e bastante vulnerável a esforços de vento por causa da não utilização de elementos de contraventamento, tanto que ela teve de ser reforçada em 115 anos por duas vezes, até ser inteiramente reconstruída em 1940.

⁵⁶ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 193.

Ponte Menai

Local : País de Gales

Data : 1826

Thomas Telford

Fig. 38 Ponte Menai

Nessa época era muito comum as estruturas das pontes apresentarem baixa resistência em relação às cargas de vento, tempestades etc. e não foram poucos os casos de estruturas que sofreram colapso devido à acidentes naturais.

Um nome entretanto entrou para a História : John A. Roebling nascido na Alemanha e estabelecido nos Estados Unidos. É dele o crédito relativo ao projeto e à construção da primeira ponte suspensa, suficientemente rígida para se tornar capaz de resistir à ação do vento e também ao impacto do tráfego de uma ferrovia.

Na ponte sob as Cataratas do Niágara, J.A. Roebling adotou uma solução inusitada e engenhosa, projetando dois tabuleiros superpostos reforçados por treliças separadas em intervalos regulares de 5,50 metros, um para tráfego de trens e outro para veículos sobre rodas, vencendo um vão livre de 250 metros. A ponte foi concluída em 1855.

Os tabuleiros eram sustentados por cabos aéreos inclinados e ancorados nas laterais do desfiladeiro. Uma verdadeira proeza para a época!

Durou 42 anos.

Treliças montadas inicialmente em madeira e ferro, (os montantes verticais eram de ferro) foram patenteados a partir de 1840 por Howe, Pratt e Warren, “uma vez que o triângulo nas palavras do grande construtor de pontes John Roebling, é a mais indeformável das figuras geométricas. Desse modo era possível obter-se uma treliça triangulada, substancialmente mais leve do que uma viga de alma cheia”.⁵⁷

⁵⁷SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.9 p. 165

É bom lembrar que antes das ferrovias, a maior parte do tráfego de carga viajava por via fluvial, evidentemente em uma velocidade muitíssimo menor. A utilização da estrutura metálica nos projetos de pontes de todos os tipos, permitiu a homens como T. Telford, R. Stephenson, I.K. Brunel e J.A. Roebling uma expansão considerável das inúmeras possibilidades construtivas, influenciando inclusive na execução das fundações sob a água. Foi nessa época que se usou pela primeira vez o ar comprimido para construção das câmaras destinadas à concretagem dos alicerces submersos.

Na execução destes, cilindros metálicos de ferro eram construídos na margem dos rios, rebocados e submersos no local da obra. O ar comprimido injetado dentro da câmara expulsava a água, de modo que os operários podiam entrar no cilindro vazio para retirar a lama remanescente, desbastar a pedra e fixar a base utilizando concreto.

“Este método foi utilizado pela primeira vez na Ponte de Rochester sobre o Medway em Rochester, Kent – Inglaterra em 1851 por Sir W. Cubitt e J. Wright. Subsequentemente, I.K. Brunel utilizou o mesmo processo para execução das fundações da Ponte de Chepstow, Monmouth – País de Gales e em escala muito maior para a Ponte de Royal Albert em Saltash, Cornwall – Inglaterra (1855-1859). Brunel desenhou um cilindro em ferro batido com diâmetro de 10 metros para apoiar o pilar central que teve de ser afundado através de 21 metros de lâmina d’água e quase 5 metros de lama até atingir o fundo rochoso.”⁵⁸

⁵⁸ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.U.A : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 194.

As primeiras pontes em aço.

Na época que corresponde aos últimos 30 anos do Século XIX período pós Revolução Industrial, o incremento da produção do aço em larga escala através do processo de laminação para obtenção dos sub produtos como chapas e perfis de secção retangular, favoreceu a utilização de treliças e vigas de grande altura, facilitando em muito a resolução do maior problema enfrentado pelos projetistas de pontes: a distância entre as margens que exigia sempre estruturas capazes de vencer grandes vãos.

Paralelamente, avanços nas pesquisas e estudos teóricos estavam acontecendo, principalmente em relação à resistência dos materiais.

Nomes como K.Culmann e J.C. Maxwell desenvolveram métodos gráficos de análise estrutural que permitiram aos engenheiros traçar os diagramas de tensões de flexão e força cortante que ocorrem nas vigas.

O aço é um material mais eficiente quando se trata de vencer vãos porque resiste muito melhor aos esforços de flexão do que o ferro. Este último não é dúctil como ele, portanto a utilização do aço como material estrutural em substituição ao ferro foi acontecendo de forma gradativa.

Antes disso porém, os arcos de ferro da Ponte Maria Pia (1877) e da Ponte Dom Luis I (1885) foram construídas sobre o Douro na região da cidade do Porto – Portugal, a primeira projetada por A. G. Eiffel e T. Seyrig, e a segunda por Seyrig.

Maria Pia Bridge
1877

Gustave Eiffel (1832 – 1923)

Tornou-se símbolo da cidade do Porto, em Portugal.

Fig. 39 Maria Pia Bridge

No sul da França, duas magníficas pontes ferroviárias foram construídas - o gracioso Viaduto Garabit (1885) com arco central de 165 metros sobre o Rio Truyère, na verdade o clímax da carreira do construtor de pontes G.Eiffel que 4 anos mais tarde seria o responsável pela torre que se tornou o símbolo da exposição de Paris que leva seu nome, e a primeira Ponte em aço da França : Viaduto Viaur (Aveyron – 1898)

Fig 40 Viaduto Garabit

Viaduto Garabit
1885

Alexandre Gustave
Boenickhausen-Eiffel

O clímax na carreira de construtor de pontes G. Eiffel, o Viaduto Garabit no sul da França.

Brooklyn Bridge

1869 - 1883

Johann August Roebling
(1806 - 1869)

Uma estranha criatura alada:

“A Brooklyn Bridge é uma das maravilhas do mundo e um dos maiores monumentos do Séc. XIX”. (Montgomery Schuyler, 1883)

Fonte: GRAF, Bernard. Bridges that changed the World. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 72.

Fig. 41 Brooklyn Bridge

A história da construção da majestosa Ponte do Brooklyn (1869-83) com quase meio quilômetro de vão livre, constitui-se em uma verdadeira saga que envolve o nome de dois grandes Engenheiros, John e Washington Roebling respectivamente pai e filho, e Emily Warren esposa deste último, além do Prefeito da cidade, do Governador do Estado, dos políticos locais e até do Presidente dos Estados Unidos.

Não era para menos. Tratava-se de um verdadeiro desafio e um desejo antigo dos americanos acalentado desde o ano de 1800: ligar o Brooklyn à Ilha de Manhattan, desejo difícil de realizar devido ao alto custo estimado e à impossibilidade física por causa da grande distância entre as margens.

John Roebling não chegou a ver a sua ponte construída. Por causa de um acidente em uma doca ele veio a falecer em 21 de julho de 1869. Seu filho, o Cel. Washington Roebling foi o responsável pela construção auxiliado por sua esposa Emily.

A veia poética de Mario Salvadori permitiu a ele, descrever em seu livro “Por que os edifícios caem” o que foi e o que é a Brooklyn Bridge:

“A Ponte do Brooklyn foi uma realidade e um símbolo: a mais longa ponte pênsil do mundo com um vão principal de 486,3 metros, um monumento à persistência de dois homens e uma mulher, os dois Roebling e Emily Warren, esposa de Washington.

É talvez, a mais bela ponte do mundo. Não existe visão mais empolgante do que a silhueta de Manhattan ao pôr do sol vista através da rede de montantes inclinados, tirantes verticais e cabos curvos da ponte. Ela tornou possível a Grande Nova York, unindo seus dois *boroughs* (bairros) mais populosos.”⁵⁹

“A Ponte do Brooklyn, tão velha... é tão imponente e ao mesmo tempo tão rude quanto um gladiador, enquanto que a Ponte George Washington, mais antiga sorri como um jovem atleta. Suas duas torres góticas de pedra são muito simpáticas porque são americanas e não Beaux - Arts. Estão impregnadas dessa tolice nativa...”

Charles Edouard Jeanneret
(Le Corbusier)
When the Cathedrals Were White

Fig. 42 Brooklyn Bridge: um brilho especial na ligação N.Y.C. & Brooklyn

Louve-se a honestidade dos Americanos ao publicar a caricatura da Ponte produzida em 1893 e a crítica ácida de Le Corbusier, na página 63 do próprio Guia do A.I.A (Instituto Americano de Arquitetos).

Firth of Forth Bridge:

A primeira ponte construída inteiramente em aço no mundo e uma das maiores existentes, é uma ponte ferroviária escocesa com vão de 518 metros. Também foi alvo de caricatura devido ao seu desenho originalíssimo : são 3 secções em balanço apoiadas em 3 linhas de pilares, e cada ponta do balanço sustenta uma pontezinha em treliça. No total são 3 enormes treliças e 2 pequenas pontes.

Para definir sua forma, Benjamin Baker realizou durante dois anos uma exaustiva seqüência de testes para avaliar o esforço de vento, porque a ponte Tay Bridge anteriormente construída por Thomas Bouch havia ruído justamente quando um trem estava realizando a travessia e 65 passageiros além dos tripulantes morreram.

⁵⁹SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé.** SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.10. pag. 181

Fig. 43 Forth Rail Bridge

Forth Rail Bridge

1882 – 1890

Benjamin Baker & John Fowler

“The supremest specimen of all ugliness”

William Morris

Comprimento total : 2.460 m.

Peso do aço : 58 000 ton.

Altura da torres : 100 m.

A primeira ponte em aço do mundo!

Fig. 44 Modelo de ponte com balanços laterais com o Assistente japonês K. Wantanabe no centro...

Para viabilizar a execução da concepção do sistema estrutural da ponte com seus braços cantileveres unidos, foram necessárias 54.000 toneladas de aço Siemens-Martin, considerado bem mais resistente do que o aço comum comercializado.

Escoras tubulares com diâmetro de 3,65 metros foram projetadas e utilizadas na estrutura trabalhando exclusivamente à compressão. Todo o aço utilizado foi produzido em Indústrias construídas especialmente para essa finalidade.

O lado cômico fica por conta do comentário do poeta e escritor inglês William Morris (1834-1896) (*“the supremest specimen of all ugliness...”*) conhecido por sua seriedade e austeridade. Ao que parece o desenho da Forthrail Bridge não lhe agradou...

Três formas de liberar o tráfego nas vias fluviais para as embarcações que se aproximam de pontes de pequena altura passaram a ser utilizadas:

- 1° Os tabuleiros são erguidos para cima como nas pontes dos castelos medievais.
- 2° Sistema guilhotina quando o tabuleiro situado entre duas torres pode ser erguido na vertical.
- 3° O vão central gira em torno de um eixo liberando as passagens laterais dos canais.

Fig. 45 Croqui do autor

Um exemplo de ponte cujos tabuleiros são erguidos é a Tower Bridge construída em Londres. Trata-se de uma basculante simples de pino giratório com dupla chapa, operada através de força hidráulica derivada do vapor.

Pelo jeito, em vista dos comentários publicados no periódico Londrino, também não agradou...

Fig. 46 Tower Bridge

Tower Bridge

1886 – 1894

Sir Horace Jones (1819 – 1887)

“A Tower Bridge é a mais monstruosa e ridícula imitação de arquitetura que jamais vimos.”

O Construtor, Londres
30 de junho de 1894.

Fig. 47 Tower Bridge

Pontes de Concreto Armado .

Alguns Engenheiros notáveis devem ser aqui citados, não somente por causa da sua participação no processo de construção de pontes de concreto, mas principalmente devido à contribuição dada à técnica do Concreto Armado desde sua invenção em meados do Século XIX (ver Cap. 2). Devemos citar F.Hennebique, E. Freyssinet, este, inventor dos processos de protensão do concreto e R.Maillart.

Maillart foi aluno de François Hennebique, Engenheiro francês responsável pela experiência pioneira de armar pela primeira vez elementos tradicionais de concreto (pilar, viga e laje) com armadura metálica.

Inicialmente os Países Escandinavos a Suíça e a França tomaram a iniciativa.

“O primeiro arco notável de concreto armado, a Ponte de Châtellerauld (1898) projetada por Hennebique tinha um vão com mais de 50 metros. Maillart foi o idealizador da estrutura.”⁶⁰

Maillart foi o responsável pela evolução do desenho das estruturas de ponte em concreto armado, porque a tendência até então era apoiar tabuleiros em vigas e estas nos pilares tal qual era feito com os sistemas estruturais em madeira e em ferro.

Ao projetar, ele retirava tudo o que era supérfluo, limpando por assim dizer o desenho. Na Ponte Tavanasa, com um vão de 48 metros acima do Vorder Rhein, Suíça, infelizmente levada por um deslizamento de terra em 1927, Maillart utilizou uma laje fina de concreto armado em forma de arco, juntando-a ao tabuleiro através de uma série de lâminas verticais rígidas formando um conjunto monolítico e estável.

⁶⁰ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 196.

Fig. 48 Ponte Tavanasa

Ponte Tavanasa
1905

Robert Maillart

Uma pequena ponte triarticulada perfeitamente sintonizada com o entorno, situada em Grisons, Suíça.

Fig. 49 Diagrama

O diagrama ao lado ilustra uma estrutura triarticulada, e foi feito por Carl Cullmann, professor de Maillart que o traduziu na forma da estrutura da ponte.

“Nas pontes de Maillart, os pilares em forma de placa se fundem à plataforma e aos arcos que parecem estar imbuídos da elasticidade de uma mola de aço e da flexibilidade de um ramo de salgueiro”⁶¹

“Como exemplos de pontes notáveis na Inglaterra podemos citar a Royal Tweed em Berwick concluída em 1928. Foi também a primeira em estrutura de concreto armado. Seus 4 arcos tem vãos variáveis de 50 a 110 metros. Outra, considerada uma das mais belas pontes sobre o Tamisa por sua simplicidade e esbeltez é a Ponte de Waterloo em Londres, projetada pela firma Rendel, Paumer & Tritton associados com Sir G.G.Scott.

Na França, Freyssinet conseguiu um vão recorde de 130 metros sobre o Sena na St. Pierre du Vauvray (1923), superado mais tarde pela Ponte Albert Louppe perto de Plougastel.

Em 1934 a Suécia assumiu a liderança com a Ponte Traneberg em Estocolmo com um arco de 180 metros, logo superada pela Ponte Esla na Espanha com 204 metros concluída em 1942, mas um ano mais tarde a Suécia recuperou a liderança com o vão de 264 metros da Ponte Sandö projetada por C.R.Kolm sobre o Rio Angerman.”⁶²

⁶¹ Giedion, S. Espaço, Tempo e Arquitetura. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2004. Cap.VI p. 496.

⁶² Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 197.

Embora tais ocasiões sejam raras, ocasionalmente vigas de concreto pré moldado são usadas por uma questão de praticidade, economia e rapidez construtiva em pontes de vãos múltiplos e pequenos. Uma das principais vantagens alegadas é que se a obra for executada a partir de um projeto bem feito e bem detalhado, não haverá necessidade de manutenção limpeza e pinturas periódicas como no caso das pontes de aço. Um típico exemplo é a Ponte de San Mateo sobre a Baía de São Francisco

Pontes de vãos longos.

Independente do tipo de solução estrutural há uma envergadura máxima para cada tipo de ponte e uma proporção de resistência e peso dos materiais, além do que haverá uma margem insuficiente de segurança para apoiar o peso do tráfego, seu próprio peso e qualquer outra força a que estará submetida.

Pontes em arco.

A Ponte Sydney na Baía do mesmo nome na Austrália, projetada por Sir Ralph Freeman (1924-32) é considerada o maior arco de aço do mundo por causa da sua gigantesca envergadura (500 metros) sobre o canal profundo, onde nenhum apoio era viável.

Ao fundo a Ópera de Sidney de Jørn Utzön.

Muito semelhante, outro arco de aço, a Ponte Bayonne construída sobre o estreito Kill van Kull, situado entre as ilhas Staten e Bayonne, N.Jersey - E.U.A. foi projetada por O.H. Ammann depois do início da Ponte de Sydney e terminada poucos anos antes.

Fig. 50 Ponte Sydney Harbour

Ponte Sydney Harbour
1924 – 1932

Sir Ralph Freeman

Fig. 51 Ponte Bayonne

Ponte Bayonne
1928 – 1931

O.H. Ammann

Quadro comparativo Sidney x Bayonne

	Construção	Toneladas de aço	Vão principal (m.)	Vão sob o tabuleiro (m.)
Sidney	1924 – 32	38.390	503	52,4
Bayonne	1928 - 31	16.520	503,6	45,7

Pontes Suspensas.

Em se tratando de pontes suspensas, em um período de pouco mais de 60 anos, de 1931 (Ponte G.Washington com 1.067 metros) a 1998 (Ponte A. Kaikyo com 1.998 metros), o vão máximo praticamente dobrou.

Salvadori diz que elas são as rainhas do mundo das pontes, e mais, “elegantes e leves na aparência, econômicas no projeto, seguras na construção as pontes pênseis estão se espalhando por todas as partes do mundo, ligando metrópoles nações e continentes e mantendo ocupadas as equipes de fiandeiros do aço de continente a continente. Embora tenham se aproximado de seus limites extremos, estes ainda não foram atingidos e seu futuro é seguro. Estão ajudando a fazer da nossa Terra um só mundo”⁶³

Os propósitos colocados no texto escrito por Salvadori em relação à construção das gigantescas pontes suspensas são absolutamente verdadeiros. Não há como negar que o mundo não é mais uma aldeia, e que a ligação física de continentes países e raças só poderá beneficiar a humanidade desde que essa aproximação tenha como objetivo a paz, e o significado de equilibrar as diferenças econômicas e sociais infelizmente ainda existentes entre os povos.

Se as pontes pênseis receberam de Salvadori o título de rainhas, no dizer do Arquiteto e Professor J.R.G. de Soutello “os cabos são os campeões olímpicos de vão livre”. A extraordinária resistência dos elementos de aço que compõe a estrutura de uma ponte suspensa trabalhando à tração, cabos e tirantes que sustentam o tabuleiro associados aos pilares de sustentação encarregados de transferir as cargas para as fundações é que favorece o altíssimo desempenho do seu sistema estrutural, garantindo assim a possibilidade de se atingir enormes distâncias.

No caso de limites extremos, verifica-se até o não paralelismo entre os pilares situados nas extremidades da ponte devido à curvatura da superfície da terra.

Não resta dúvida que se trata de **estruturas resistentes pela forma**, e que o uso dos materiais obedece à uma lógica transparente: cada material trabalhando dentro de um regime totalmente compatível com suas características físicas, aço à tração e concreto à compressão, garantindo a necessária resistência ao conjunto a partir do desempenho altamente satisfatório dos materiais de que são feitos os elementos da estrutura. O determinante desse brilhante desempenho, inegavelmente é o desenho, a definição e escolha dos mesmos.

⁶³ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé.** SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.10. pag. 197

Alguns truques por assim dizer são indispensáveis: no topo dos pilares onde o cabo transmite tensões de compressão, ele deverá correr livre sobre uma roldana, de modo que as reações verticais sejam obrigatoriamente paralelas ao eixo vertical dos mesmos. Quaisquer situações em que as tensões transmitidas aos pilares não sejam exclusivamente de compressão poderão causar momentos indesejáveis na ligação dos pilares com as fundações, considerando-se os enormes valores das cargas transmitidas pelos cabos.

Ao lado, a imagem do detalhe do aparelho que libera a passagem do cabo, no tampo da Golden Gate em São Francisco.

Fig. 52 Detalhe

Um outro procedimento aconselhável é a utilização de treliças de sustentação do tabuleiro dispostas lateralmente, visando conferir-lhe a necessária rigidez e evitando oscilações perigosas que podem ocasionar até o colapso do sistema, como aconteceu na Ponte de Tacoma.

Fig. 53 Tacoma Bridge

Tacoma Bridge

Local : Estreito de
Tacoma (Washington)
Data : 1940

Leon Moisseiff

Em resumo, a combinação de um sistema estrutural com os materiais adequados transforma uma ponte em “não somente em um triunfo da Tecnologia mas também em uma obra bela”⁶⁴

Pontes suspensas de vãos contínuos crescentes acabaram sendo construídas nos Estados Unidos na primeira metade do Século passado, utilizando cabos paralelos presos às torres.

⁶⁴ SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.10, pag. 196

Eles são indiscutivelmente mais econômicos para vãos acima de 450 metros. A partir da construção dos primeiros modelos, novas idéias foram incorporadas como os tabuleiros superpostos ligados por treliças laterais da Ponte George Washington e da Ponte Verrazano Narrows. Essa solução é conhecida como tabuleiro em forma de tubo retangular deitado, e em alguns casos como o da Humber Bridge ele é uma verdadeira caixa de aço fechada; desnecessário dizer que a caixa ôca com as laterais maciças ou mesmo treliçadas é ideal para resistir à torção.

A solução do cabo de aço retorcido é outra inovação, adotada na Ponte Island of Orleans em Quebec (1935) e na Ponte Lions Gate em Vancouver (1939).

Duas grandes pontes suspensas construídas em 1933 marcam a paisagem da Baía de São Francisco : as Pontes Transbay projetada por C.H. Purcell e a gigantesca Golden Gate desenhada por J. B. Strauss com um vão de 1.280 metros, uma maravilha suspensa sobre as águas azuis do Pacífico.

Fig. 54 Golden Gate

Golden Gate

1933

J.B.Strauss

“Strauss nunca construirá sua ponte, ninguém construirá a Golden Gate tendo em vista as insuperáveis dificuldades que surgirão diante de qualquer um que tenha intenção de materializar essa idéia maluca.”

John Bernard McGloin:

“Sinfonias em aço, Baía de São Francisco e a Golden Gate”

Fig 55 Golden Gate

A aparente leveza das suas duas imensas torres “Art Deco” se deve a sugestão do Arquiteto Consultor Irving Foster Morrow, responsável também pela escolha da cor entre o laranja e o vermelho.

Depois de enfrentar incontáveis problemas originados pelas tormentas pelas marés e pela topografia local, a torre norte foi construída no local onde existia um maciço geológico, e a sul dentro de uma grande câmara de eclusa que atinge a profundidade de 34 metros até encontrar o leito do oceano.

Hoje, como disse Strauss após a conclusão da obra, a Golden Gate surge em toda sua majestade em meio à bruma, muito acima do cume das montanhas.

Na Europa, digna de nota também é a Ponte Tancarville terminada em 1959 sobre o estuário do Rio Sena, com um vão de 610 metros. As torres são de concreto armado e os cabos principais constituídos por 56 cordas de aço retorcido separadamente e ancorados no tabuleiro, de modo a fornecer rigidez extra contra forças aerodinâmicas.

Pontes de concreto protendido.

O concreto protendido surgiu na década de 30 após experimentos realizados pelo Engenheiro francês Eugène Freyssinet (1879 – 1962).

Analizando o comportamento de uma viga convencional com dois apoios submetida a tensão de flexão simples, Freyssinet verificou que, do total da massa de concreto da viga, a parte situada abaixo da linha neutra (uma grande parte diga-se de passagem) não trabalha, e só serve na realidade para “segurar” a armadura porque o concreto não oferece praticamente nenhuma resistência à tração.

Partindo desse princípio, ele resolveu aumentar a parcela de material trabalhando à compressão introduzindo um componente artificial na forma de um vetor capaz de comprimir a massa de concreto reduzindo significativamente o diagrama de momentos tal como acontece nos arcos.

O processo consiste então em colocar o concreto em um estado de protensão tracionando e liberando parcialmente a armadura metálica que passa através dele. Ao ser liberada do esforço inicial de tração, a armadura volta ao seu comprimento original.

Como os materiais são solidários, o concreto tende a acompanhar a armadura, e em consequência disso a viga assume um comportamento semelhante ao do arco fazendo desaparecer as tensões de flexão. Sem dúvida, o concreto protendido representa o mais importante avanço na construção de pontes desde que o concreto armado se tornou conhecido, considerando-se também o aprimoramento dos métodos de protensão nos anos do pós guerra.

O uso de seções pré moldadas protendidas biapoiadas vem proporcionando um aumento nas dimensões dos vãos que podem ser atingir até 120 metros. Convém entretanto, proteger cuidadosamente o aço usado no trabalho de protensão contra a corrosão. A eliminação de fissuras na superfície do concreto tornando-a lisa e homogênea, constitui um requisito de extrema importância.

Os sistemas de protensão também são bastante competitivos em termos de custos desde que a mão de obra empregada seja especializada, e em circunstâncias favoráveis pode representar alternativa interessante à utilização do aço estrutural, em se tratando de vãos até 150 metros.

Tipologias e métodos de construção em concreto protendido:

Uma grande variedade incluindo pontes de vigas simples, vigas em balanço ou de múltiplos tramos podem ser construídas em concreto protendido.

Para vãos menores que 40 metros, pontes com vigas simplesmente apoiadas são os sistemas mais econômicos. Aumentando-se o vão, pontes de vigas contínuas com rigidez máxima nos apoios tornam-se mais econômicas.

Pontes em arco de concreto muito raramente são protendidas porque o arco encontra-se naturalmente comprimido em virtude da sua forma, e a protensão pouco acrescenta em termos de resistência.

Pontes de concreto protendido podem ser construídas de três diferentes formas: através da montagem das unidades premoldadas transportadas até o local da obra, por lançamento do concreto *in loco*, ou combinando-se os dois processos anteriores simultaneamente.

A segunda alternativa torna-se mais econômica quando há mão de obra especializada disponível.

Estabilidade Aerodinâmica.

“O desmoronamento da Ponte Tacoma Narrows em Washington, ocorrido em 1940 após 4 meses da sua conclusão e depois de mais de 50 anos de imunidade contra falhas desse tipo, fez com que o estudo da estabilidade aerodinâmica de repente ganhasse relevância importante. Essa ponte foi de longe a mais flexível digamos, entre suas contemporâneas. Tinha um vão de 850 metros por 12 de largura. Sob ventos moderados, o deck não somente balançava para os lados como ficava também sujeito à intensa vibração e torção. Por fim, sob um vento de somente 65 km por hora as vibrações se tornaram tão violentas que o deck partiu ao meio e caiu dentro d’água.

Apesar dos testes em túneis aerodinâmicos com modelos de pontes e seus componentes, a explicação para a instabilidade aerodinâmica é uma questão de teoria a respeito da qual opiniões existiam divergentes, porém atualmente existe um certo número de exigências para que isso não ocorra.

Tais exigências incluem abertura da estrutura para passagem do vento onde for possível, empregando treliças e vigas cruzadas, ou deixando fendas longitudinais ao longo do deck entre a pista e as vigas mestras. A rigidez pode também ser aumentada apoiando o deck em vigas laterais superiores e inferiores, utilizando-se cabos diagonais a partir das torres, e até mesmo ancorando-se os cabos principais ao deck no centro do vão.

Testes realizados por R.A.Frazer e C. Scruton em 1946-51 em um túnel aerodinâmico de 18 metros especialmente construído, comprovou as vantagens mencionadas acima. Todas elas com raras exceções foram adotadas no projeto da segunda ponte Tacoma Narrows concluída em 1950, na qual a largura e a rigidez foram consideravelmente aumentadas”⁶⁵.

Estética.

Ao longo dos tempos algumas pontes podem ser consideradas obras de arte, apesar de que inúmeras não passam de obras unicamente utilitárias. Hoje, aceita-se que a economia e os aspectos funcionais sejam determinantes, mas qualquer projeto de ponte deve ser também um trabalho de arte, harmonizando-se com seus arredores e satisfazendo os sentidos principalmente os visuais de quem a contempla. Para essa finalidade foram criadas Instituições como o Instituto Americano de Construções em Aço, que premia a mais bela ponte construída a cada ano.

Na Inglaterra as autoridades públicas exercem um considerável grau de controle sobre os projetos importantes, que devem ser aprovados pela comissão denominada Royal Fine Art antes de serem executados. Construções de pistas expressas estão associados à construção de pontes, e naturalmente um projeto de qualidade é que irá determinar o caráter arquitetônico do conjunto e o modo como irá se harmonizar com o entorno.”⁶⁶

⁶⁵ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 199.

⁶⁶ Encyclopedia Britannica. Vol 4 **Bridges**. E.UA : William Benton Publisher. 1965. Vol. 4 p. 200.

Conclusões.

Havia dito que não consigo encontrar uma razão para o estranho fascínio que sempre senti pelas pontes, não só porque representam algumas das maiores realizações do homem, considerando não somente suas grandiosas dimensões (não levando em conta a singeleza de algumas), mas também o resultado final de sua composição na moldura da paisagem onde estão envolvidas.

O que fascina é o desenho harmonioso aliado ao seu extraordinário desempenho como estrutura. A sinuosidade das curvas dos cabos de uma ponte suspensa por assim dizer imitando a assimetria das montanhas e dos rios, ou o inusitado e curto percurso da Ponte dos Suspiros pairando sobre as águas do canal de Veneza, são imagens que impressionam profundamente. Aqueles que prestarem alguma atenção a um dos sistemas mais antigos utilizados pelo homem perceberão ali o quanto evoluímos da Antiguidade até a Idade Contemporânea. Das cavernas aos arranha céus e das primitivas pontes de madeira até as imponentes pontes suspensas detentoras dos maiores recordes mundiais de vão.

Robert Maillart nascido em Berna em 1872 por exemplo, era dono de um agudo senso estético. Formado em Engenharia na Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) de Zurique em 1894 foi autor de inúmeros projetos de pontes, além de autor do sistema estrutural conhecido hoje como laje cogumelo.⁶⁷

Na ponte de Salgina-Tobel fica perfeitamente claro, a elegância do desenho associado à função estrutural. Como diz Eduardo Torroja Miret referindo-se a este caso especificamente, “quando o arco é rebaixado e a altura do tabuleiro apoiado sobre ele é pequena, é natural a fusão de ambos elementos”⁶⁸; na imagem, percebe-se com que habilidade Maillart aumentou a espessura dos costados do arco, viabilizando desse modo a operação com extraordinária sensibilidade.

⁶⁷ Monzillo de O. Luciana. O desenvolvimento das estruturas arquitetônicas do Século XX. Dissertação de Mestrado. FAU Mackenzie. 1998. Cap. 3 pg 39

⁶⁸ TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales** Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 14 pg 260

Fig. 56 Ponte Salgina-Tobel

Apenas um ponto parece obscuro: **a pouquíssima participação dos profissionais de arquitetura nos projetos das grandes pontes.** Será sempre assim ou haverá um dia em que poderemos contribuir muito mais com tão grandiosas realizações?

Espero que a primeira hipótese não seja a definitiva.

As 100 maiores do mundo Suspension

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Akashi Kaikyo	Kobe-Naruto	Japão	1998	1990
East Bridge, Great Belt Fixed Link	Fünen- Zealand	Denmark	1998	1624
Humber	Hull	Inglaterra	1981	1410
Jiangrin	Yangtze River	China	1997	1385
Tsing Ma	Hong Kong	China	1997	1377
Verrazano Narrows	Nova Iorque	E.U.A	1964	1298
Golden Gate	São Francisco	E.U.A	1937	1280
Höga Kusten	Veda	Sweden	1997	1210
Mackinac	Straits of Mackinac, MI	E.U.A	1957	1159
Minami Bisan-Seto	Kojima- Sakaide	Japão	1988	1100
Fatih Sultan Mehmet	Istambul	Turquia	1988	1090
Bosporus I	Istambul	Turquia	1973	1074
George Washington	Nova Jersey, NY	E.U.A	1931	1067
Kurushima III	Onomichi- Imabari	Japão	1999	1030
Kurushima II	Onomichi- Imabari	Japão	1999	1020
Ponte 25 de Abril	Lisboa	Portugal	1966	1013
Forth Road	Queensferry	Scotland	1964	1006
Kita Bisan – Seto	Kojima- Sakaide	Japão	1987	990
Severn	England – Wales	U.K.	1966	988
Shimotsui-Seto	Kojima- Sakaide	Japão	1988	956
Ohnaruto	Kobe-Naruto	Japão	1984	876
Tacoma Narrows	Tacoma Narrows, WA	E.U.A	1940	853
Innoshima	Onomichi- Imabari	Japão	1983	770
San Francisco / Oakland Bay Bridge	São Francisco	E.U.A	1936	704
Bronx-Whitestone	Nova Iorque	E.U.A	1939	701

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 118.

Estaiadas

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Tatara	Onomichi-Imabari	Japão	1999	890
Pont de Normandie	Le Havre	França	1995	856
Qingzhou	Fuzhou	China	1996	605
Minjiang				
Yangpu	Xangai	China	1993	602
Xupu	Xangai	China	1997	590
Meiko-Chuo	Nagoya	Japão	1997	590
Skarnsundet	Trondheim	Norway	1991	530
Tsurumi	Yokohama	Japão	1994	510
Tsubasa				
Ikuchi	Onomichi-Imabari	Japão	1991	490
Higashi-Kobe	Kobe	Japão	1992	485
Ting Kau	Hong Kong	Hong Kong	1997	475
Alex Fraser	Vancouver, BC	Canadá	1986	465
Yokohama Bay	Yokohama	Japão	1989	460
Hoogly II	Calcutta	Índia	1992	457
Severn II	Bristol	Inglaterra	1996	456
Rama IX	Bankok	Thailand	1987	450
Queen Elizabeth II	Dartford-Thurrock	Inglaterra	1991	450
Carlos Fernandez Casado	Barrios de Luna	Espanha	1983	440

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 118.

Treliças Metálicas em Balanço

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Quebec	Quebec	Canadá	1917	549
Forth	Queensferry	Scotland	1890	521
Nanko	Osaka-Amagasaki	Japão	1974	510
Commodore Barry	Chester, PA	E.U.A	1974	501
Greater New Orleans	Louisiana	E.U.A	1958	480
Freater New Orleans II	Louisiana	E.U.A	1988	480
Howrah River	Calcutta	Índia	1943	457
Gramercy	Gramercy, LA	E.U.A	1995	445
San Francisco/Oakland Bay Bridge	São Francisco	E.U.A	1936	427
Baton Rouge	Baton Rouge, LA	E.U.A	1968	376

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 118.

Arco Metálico

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
New River Gorge	Fayetteville, WV	E.U.A	1978	518
Bayonne	Nova Jersey , NY	E.U.A	1931	504
Sydney Harbor	Sydney	Austrália	1932	503
Fremont	Portland, OR	E.U.A	1973	383
Port Mann	Vancouver, BC	Canadá	1964	366
Thatcher	Balboa	Panamá	1962	344
Trois Rivières	Quebec	Canadá	1967	335
Runcorn-Widnes	Mersey River	Inglaterra	1961	330
Zdákov	Lake Orlik	República Tcheca	1967	330
Birchenough	Sabi River	Zimbabwe	1935	329

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 118.

Arco de Concreto

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Wanxiang	Yangzi River	China	1996	420
Krk I (east span)	Krk Island	Croácia	1980	390
Jiangjehe	Wu River	China	1995	330
Yongjiang	Guangxi	China	1996	312
Gladesville	Sydney	Austrália	1964	305
Amizade	Paraná River	Brasil / Paraguai	1964	290
Bloukrans	Van Stadens Gorge	África do Sul	1983	272
Arrábida	Porto	Portugal	1963	270
Sandö	Kramfors	Sweden	1943	264
Chateaubriand	La Rance	França	1991	261

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 119.

Treliça Metálica com Apoios nas Extremidades

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Astoria	Columbia River, OR	E.U.A	1966	376
Francis Scott Key	Baltimore, MD	E.U.A	1977	366
Oshima	Yanai City – Oshima	Japão	1976	325
Kuronoseto	Akune City - Nagashima	Japão	1974	300

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 119.

Caixa de Concreto com Nervuras

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Stolmasundet	Austevoll	Norway	1998	301
Raftsundet	Lofoten	Norway	1998	298
Humen	Pearl River	China	1998	279
Varodd	Kristiansand	Norway	1994	260

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 119.

Caixa Metálica com Nervuras

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Costa e Silva	Niterói - RJ	Brasil	1974	300
Neckartalbruecke	Weitingen	Alemanha	1978	263
Sava I	Belgrade	Sérvia	1956	261
Ponte de Vitoria III	Espírito Santo	Brasil	1989	260

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 119.

Móveis

Nome	Localização	País	Ano	Dimensão (metros)
Arthur Kill	Elizabeth, NJ	E.U.A	1959	170
Al-Firdan	Canal de Suez	Egito	1964	168
Cape Cod Canal	Cape Cod, MA	E.U.A	1935	166
Mississippi River	Fort Madison, IA	E.U.A	1927	160
South Capitol Street	Washington, DC	E.U.A	1949	118

Fonte: DUPRÉ, J. Bridges : N.York: Black dog & Leventhal Publishers. 1997. p. 119.

Pontes no Brasil

Ponte Maurício de Nassau

Local : Recife

Data : 1917

Emílio Baumgart

Ponte Hercílio Luz

Local : Santa Catarina

Data : 1922 - 1926

Robinson e Steinmann

Ponte Emílio Baumgart (Ponte de Herval)

Local : Santa Catarina

Data : 1933

Emílio Baumgart

Ponte sobre o Rio Peixe

Local : Lindóia, São Paulo

Data : 1938

Clodomir Ferro Valle

Segunda ponte sobre o rio das Antas

Local : Rio Grande do Sul

Data : 1949

Antonio Alves Noronha

Ponte sobre o lago Paranoá

Local : Brasília

Data : 1968

Oscar Niemeyer

**Ponte Rio Niterói
(Ponte Presidente Costa e Silva)**

Local : Rio de Janeiro

Data : 1974

Antonio Alves Noronha Ltda.
Howard Needles, Tammen & Bergendoff
International Inc.

**Estação Ponte Santo Amaro - Marginal
Pinheiros**

Local : São Paulo

Data : 1999

Harza Hidrobrasileira

Ponte JK (ex-ponte Mosteiro)

Local : Brasília

Data : 2002

Alexandre Chan

Ponte Rodovia dos Imigrantes

Local : São Vicente

Data : 2002

Pontes no Exterior

Pont du Gard

Local : sul da França (Gard River),
perto de Avignon
Data : 18 a. C.

Marcus Vipsanius Agrippa

Kapell Bridge

Local : Lucerne
Data : 1300 - 1333

Ponte Vecchio

Local : Florença
Data : 1345, 1564 - 1565

Taddeo Gaddi (1300 - 1366)

Ponte de Mostar

Local : Mostar

Data : 1557 - 1566

Mimar Hajrudin

Bridge of Sighs

Local : Veneza

Data : 1600

Antonio di Bernardino Contino (1566 – 1600)

Clifton Suspension Bridge

Local : Bristol

Data : 1831 – 1864

Isambard Kingdom Brunel (1806 – 1859)

Quebec Bridge

Local : Quebec

Data : 1904 – 1907, 1913 – 1917

Theodore Cooper (1839 – 1919)

12. Setembro.1916

Plougastel Bridge

Local : França
Data : 1925 – 1930

Eugène Freyssinet (1879 – 1962)

George Washington Bridge

Local : Nova Iorque
Data : 1927 – 1931

Othmar Hermann Ammann (1879 – 1965)

Tacoma Bridge

Local : Estreito de Tacoma
(Washington)
Data : 1940

Leon Moisseiff

“Europabrücke”

Local : Innsbruck
Data : 1959 – 1963

Karl Plattner (1919 – 1986)

Verrazano Narrows Bridge

Local : Nova Iorque
Data : 1959 – 1964

Othmar Hermann Ammann (1879 – 1965)

Bosporus Bridge

Local : Istambul
Data : 1970 – 1973

Hochtief AG

Köhlbrand Bridge

Local : Hamburgo
Data : 1970 – 1974

Egon Jux

Ganter Bridge

Local : Suíça
Data : 1980

Christian Menn

Humber Bridge

Local : Inglaterra
Data : 1981

Gilbert Roberts

Sunshine Skyway Bridge

Local : EUA
Data : 1986

Figg & Muller

Alamillo Bridge

Local : Seville
Data : 1987 – 1992

Santiago Calatrava

Akashi Kaikyo Bridge

Local : Kobe
Data : 1988 – 1998

Honshu – Shikoku Office of Bridge
Construction

London's Millennium Bridge

Local : Londres
Data : 1996 – 2000

Norman Foster

Erasmus Bridge

Local : Países Baixos
(Rotterdam)
Data : 1996

Ben van Berkel

Green Bridge

Local : Londres

Data : 1998

Piers Gough

Royal Victoria Dock Bridge

Local : Londres

Data : 1998

Lifschutz Davidson Design / Techniker

Sunniberg Bridge

Local : Suíça

Data : 1998

Christian Menn /
Bänziger Köppel Brändli and Partner

Honshu – Shikoku Bridge

Local : Japão

Ano : 1999

Viaduto de Millau

Local : França

Data : 2001 – 2004

Foster and Partners

Passarelas no Brasil

Passarela Bonocô

Local : Salvador
Data : 1986 – 1988

João Figueiras Lima

Passarela Chame-Chame

Local : Salvador
Data : 1986 – 1988

João Figueiras Lima

Estação de Transbordo do Iguatemi

Local : Salvador
Data : 1988

João Figueiras Lima

Passarela Shopping Market Place x Shopping Morumbi

Local : São Paulo

Passarela Center Norte

Local : São Paulo

Passarela Estação Largo 13

Local : São Paulo

Passarela JK

Local : São Paulo

Passarela Via Oeste

Local : Rodovia Castelo Branco

Passarelas no Exterior

Main - Danube Channel Footbridge

Local : Alemanha

Data : 1986

Richard Dietrich / Heinz Brüninghoff

Passarela sobre rodovia

Local : França

Data : 1989

Marc Mimram

Campo Volantin Footbridge

Local : Espanha

Data : 1990 – 1997

Santiago Calatrava

Passarela em Ross's Landing

Local : EUA

Data : 1991

Site Architects

West Índia Quay Footbridge

Local : Londres

Data : 1996

Future Systems / Anthony Hunt Associates

Petrer Bridge

Local : Espanha

Data : 1998

Carme Piños / Miquell Llorens

Traversina Footbridge

Local : Suíça

Data : 1999

Conzett, Bronzini, Gartmann AG

Passarela Solferino sobre o Rio Sena

Local : Paris

Data : 1999

Marc Mimram

Plashet Grove School Bridge

Local : Inglaterra

Data : 2000

Birds Portchmouth Russum / Techniker

Cronologia

- 2000 ^a. C Sistemas construtivos em arco usados na Mesopotâmia, Egito e outras localidades, porém, não na construção de pontes.
Pontes suspensas primitivas surgiram neste período na China e na Índia, e provavelmente na China sistemas de pontes rudimentares em balanço foram pela primeira vez utilizadas.
- Séc. 15 ^a.C Arcos em mísula usados em Tumbas construídas em Mycenae na Grécia.
- Séc. 7 ^a.C Aqueduto de pedra, em mísula, construído em Jerwan, Mesopotâmia.
- Séc. 7 - 6 ^a.C Ponte construída sobre o Eufrates na Babilônia.
- Séc. 6 ^a.C Pontes flutuantes construídas no Danúbio e no Bósforo por Mandrocles de Samos.
- 480 ^a.C Xerxes constrói uma ponte de barcas (mais de 600) sobre o Hellespont.
- Séc. 3 ^a.C Primeiros registros estabelecidos na China, relativos às pontes suspensas em bambu e correntes de ferro.
- Séc. 2 ^a.C Os Romanos constroem pontes de alvenaria com fundações apoiadas em Compartimentos estanques.
- 62 ^a.C. Ponte Fabricius construída em Roma.
- 55 ^a.C. Júlio César constrói ponte de viga em cavalete sobre o Reno.
- Séc. 1 ^a.C. Vitruvius escreve De architectura.
- 14 d.C. Ponte du Gard – França.
- 100 d.C. Trajano constrói o Aqueduto de Segovia e a Ponte de Alcântara sobre o Danúbio.
- 134 d.C. Ponte Sant'Angelo em Roma.
- 605 d.C. Ponte Ji Bridge na China.
- Séc. 12 d.C. Apogeu da Arquitetura Românica baseada no arco pleno.
- Séc. 12 d.C. O Gótico começa a substituir o Românico.
- 1188 Ponte d'Avignon.
- 1210 Antiga Ponte de Londres.
- Séc. 13 Villard de Honnecourt projeta pontes em treliça de madeira.
- 1218 Ponte de corrente suspensa em Twärenbrücke, Suíça.

1345	Ponte Vecchio – Florença.
1357	Charles Bridge em Praga.
1371	Construído o arco de maior vão da Idade Média (72 m.) em Trezzo pelo Duque de Milão.
1507	Primeira ponte em pedra (Ponte Notre Dame) em Paris.
1511	Nasce Bartolommeo Ammanati.
1512	Nasce Antonio da Ponte.
1518	Nasce Andréa Palladio.
1567	Ponte Santa Trinitá em Florença construída por Ammanati.
1570	Os Quatro Livros de Arquitetura de Palladio ilustram tipos de pontes em treliça.
1591	Ponte Rialto construída por Antonio da Ponte.
1595 _ 1617	Projeto da Ponte Verantius em “Machinae Novae”.
1600 _ 40	Pontes Allahverdi Khan e Khaju em Isfahan.
1708	Nasce Jean-Rodolphe Perronet.
1750	Ponte Westminster : primeira ponte que se segue a Ponte de Londres.
1755_60	Pontes em arco com vãos acima de 61 m. construídas em Schaffhausen, Reichenau e Wettingen pelos irmãos Grubenmann.
1757	Nasce Thomas Telford
1761	Nasce John Rennie
1772	Perronet constrói a Ponte de Neuilly sobre o Sena.
1776	O recorde de vão para ponte suspensa em bambu (200 m.) é quebrado na província de Szechuan na China.
1779	Construída em Coalbrookdale a 1ª Ponte em arco de ferro no mundo.
1791	Perronet constrói a a Ponte La Concorde em Paris.
1796	Ponte Wear em arco metálico, Sunderland.
1800	Primeira ponte suspensa construída nos Estados Unidos por J.J.Finley.
1803	Nasce Robert Stephenson.
1805	Aqueduto de Pontcysyllte construído por Telford.
1806	Nasce John Roebling e Isambard Kingdom Brunel.
1808	Finley patenteia o sistema de ponte suspensa.
1810	Nasce Charles Ellet, projetista da Ponte Wheeling em Ohio.

- 1811 Ponte “Colossus” em arco treliçado de Lewis Wernwag construída sobre o Rio Schuylkill.
- 1815 Pontes Craigellachie e Bonar em arco metálico, são construídas por Telford na Escócia.
- 1817 Primeira Ponte Waterloo em alvenaria construída por Rennie.
- 1819 Primeira Ponte Southwark em ferro também construída por Rennie.
- 1820 Cap. Samuel Brown constrói uma ponte suspensa com 137 m. sobre o Rio Tweed.
Nasce James Eads, projetista da Ponte do Mississipi.
- 1822_40 Mais de cem pontes suspensas em ferro batido são construídas na Europa por Seguins, Dufour e outros.
- 1824_31 A velha Ponte de Londres é demolida e a nova, projetada por Rennie, é construída em alvenaria.
- 1826 Telford constrói a Ponte Suspensa sobre o estreito de Menai e A ponte Conway.
- 1830 Treliças para grandes vãos são patenteadas nos Estados Unidos.
- 1831 Vicat propõe o uso de cabos aéreos trançados pela primeira vez.
- 1832 Nasce G.Eiffel
- 1834 “Grand Pont Suspendu” a maior ponte suspensa, é construída por Chaley na Suíça.
- 1840 Patente da treliça “Howe” em ferro, nos Estados Unidos.
- 1843 Nasce F. Hennebique, um dos pioneiros do concreto armado.
- 1849 Construída a High Level Bridge em Newcastle, projetada por Stephenson.
- 1850 Robert Stephenson constrói as pontes metálicas em perfil tubular Conway e Britannia.
- 1855 Construída por John Roebling, a Ponte Suspensa rodoferroviária de pista dupla no Niágara.
- 1859 Inauguração da Ponte Suspensa Royal Albert construída por Brunel.
- 1866 Roebling quebra o recorde mundial de vão (322), construindo a ponte suspensa sobre o Ohio em Cincinnati.
- 1867 J. Monier patenteia o concreto armado.

1872	Nasce o Suíço Robert Maillart, mestre no design de pontes em concreto armado.
1874	James Eads constrói a ponte em arco triplo sobre o Mississipi em St.Louis.
1876	Desastre nos Estados Unidos: colapso da Ponte Ashtabulano Ohio, em 29 de dezembro.
1879	Cai a primeira Tay Bridge. Nasce Freyssinet na França, o pioneiro do concreto protendido, e Ammann, Suíço-americano especialista em pontes suspensas de aço.
1883	Construção da Ponte do Brooklyn por Roebling, quebrando o recorde de vão com 486 m.
1884	G.Eiffel termina o Viaduto Garabit.
1886	Nasce Steinman, projetista americano de pontes.
1889	Construída em aço, a Forthrail Bridge, os dois maiores vãos em viga cantilever do mundo, cada um com 521 m.
1894	Construída a Tower Bridge em Londres.
1907	Colapso da não concluída Ponte de Quebec. Nasce na Alemanha F.Leonhardt, projetista de pontes.
1916	Hell Gate Bridge concluída em N.York.
1917	Concluída a Ponte de Quebec.
1929	Ponte Ambassador em Detroit (ponte suspensa) alcança o maior vão (564 m.) em Detroit.
1930	Maillart constrói a Ponte Salginatobel na Suíça, e Freyssinet conclui a Ponte Plougastel na Inglaterra.
1931	Concluídas as Pontes G.Washington e Bayonne.
1932	Concluída a Ponte sobre a Baía de Sidney.
1937	Concluída a Golden Gate.
1940	Cai a Ponte Tacoma.
1950	Freyssinet conclui a revolucionária Ponte em concreto protendido sobre o Rio Marne na França.
1951	Nasce Santiago Calatrava, arquiteto e engenheiro espanhol.

1952_58	Construídas as primeiras pontes estaiadas na Alemanha e na Suécia.
1956	Construída a maior (em comprimento) ponte do mundo sobre o lago Pontchartrain na Louisiana.
1957	Construída a maior ponte suspensa sobre o estreito de Mackinac.
1962	Concluída a Ponte Maracaibo na Venezuela.
1964	Recorde para pontes suspensas quebrado pela Ponte Verrazano. Concluída a primeira ponte suspensa de vão longo na Europa, a Firth of Forth na Escócia. Concluída a Ponte Gladesville em Sidney : a primeira ponte em concreto com mais de 300 m.
1966	Concluída a Severn Bridge e a Tagus Bridge em Portugal, o primeiro viaduto suspenso na Europa.
1970	Pontes de aço em viga caixão sofrem colapso em Milford Haven - País de Gales, e em Melbourne na Austrália.
1978	Construída a Ponte Gorge sobre o New River, West Virginia : o maior arco em aço do mundo.
1980	Construída a Ponte Ganter na Suíça.
1981	Construída a Humber Bridge na Inglaterra : recorde de vão para pontes suspensas.
1985	T.Y.Lin propõe uma ponte entre continentes: a Peace Bridge ligando o Alaska e a Rússia através do estreito de Bhering.
1988	Primeira Ponte Honshu-Shikoku no Japão.
1990	Estudo de Viabilidade para ligar a Espanha ao Marrocos.
1991	Recorde de vão para pontes estaiadas : Ponte Skarnsundet na Noruega.
1992	Ponte de Alamillo de S. Calatrava, construída para a Expo 92.
1993	Construída ponte estaiada em Shangai com 602 m.
1994	Construída a a maior ponte estaiada do mundo: a Ponte da Normandia.
1997	Inaugurada a Ponte Suspensa Tsing Ma em Hong Kong com 1.137 m.
1998	A segunda ligação Honshu - Shikoku completada com a Ponte Suspensa Akashi~Kaikyo, até hoje o recorde mundial de vão.

- 1999 A terceira ligação Honshu – Shikoku concluída com a Tatara Bridge, recorde mundial de vão para pontes estaiadas.
- 2000 A Ponte sobre o Estreito de Messina na Itália quando concluída, deverá quebrar o recorde mundial de vão.

Fonte: <http://www.nireland.com/bridgeman/Chronology.htm>

CAPÍTULO 4

Estruturas : a resistência pela forma, à luz da produção contemporânea.

“ ALLA TORRE DI P/SA CHE DA OTTO SECOLI, NON CROLLA.... “⁶⁹

⁶⁹ SALVADORI, Mario. Le strutture in architettura Etas Kompass Milano 1964. Prefacio pg. 12.

5 “Monstros Sagrados” da Arquitetura e da Engenharia.

Pier Luigi Nervi

Pequena Biografia

1891 Pier Luigi Nervi nasce na cidade italiana de Sondrio.

Ao concluir seus estudos no curso secundário, matricula-se na Faculdade de Engenharia de Bolonha.

1913 Formado em Engenharia Civil, trabalha 10 anos no Ufficio Tecnico della Società per Costruzioni Cementizie de Bologna, interrompendo suas atividades de 1915 a 1918 por ter sido convocado para lutar na 1ª guerra como Oficial do Corpo de Engenheiros Italianos.

1920 Abre seu próprio escritório, a “Sociedade de Engenheiros Nervi e Nebbiosi” sediada em Roma.

1924 Casa-se com Irene Calosi. O casal teve 4 filhos: Antonio, Mario, Carlo e Vittorio, dos quais, 3 acabaram por se formar, participando a partir daí do escritório do Pai e de todas as obras realizadas por ele a partir dos anos 50, com o mesmo entusiasmo e dedicação.

1926-27 Projeta e dirige a construção da sua primeira estrutura, o Cine Teatro Augusteo em Nápoles.

1930-32 Nervi entra no concurso para escolha do projeto do Estádio Municipal de Florença e acaba vencendo. É a primeira obra sua que desperta interesse Internacional.

1932 Funda juntamente com seu primo o Engenheiro Bartoli, a Construtora Nervi e Bartoli que administra e dirige até o fim da sua vida.

1935 Após vencer o concurso promovido pela Força Aérea Italiana, constroi em Orvieto seus dois primeiros hangares em estrutura geodésica e em concreto armado.

1939 Ao mesmo tempo que desenvolve o projeto dos hangares, Nervi utiliza pela primeira vez a técnica da pré fabricação.

1945 Assume como Professor responsável a Cadeira de Técnicas de Construção e Tecnologia dos Materiais na Faculdade de Arquitetura de Roma onde permanece até 1962.

1947-49 Nervi vence o Concurso de projetos do Salão B do Palácio de Exposições de Turim, depois de um período consideravelmente longo de pesquisas em torno da técnica construtiva do ferrocimento, que consistia na superposição de malhas finas de aço dispostas em camadas e pulverizadas com argamassa de areia e cimento sem os agregados graúdos e com uma dosagem forte de cimento, resultando em um material flexível e suficientemente resistente apesar da pequena espessura média. O prêmio foi justo e se deve à praticidade e à economia possibilitadas pela aplicação de tais princípios no projeto e na execução da obra.

1949-50 Utilizando a mesma técnica projeta e constroi o Salão C do Palácio de Exposições.

1950 Recebe o título de Doutor Honoris Causa da Universidade de Buenos Aires na Argentina, e em seguida da Universidade de Edimburgo na Escócia, da Technische Hochschule de Munich na Alemanha, da Universidade de Varsóvia na Polônia, de Harvard e Dartmouth College nos Estados Unidos, da Alta Escola Politécnica de Praga e da Universidade de Londres.

1953-58 Participa do projeto do Edifício Sede da Unesco em Paris como responsável pela estrutura do Edifício do Secretariado e do Palácio das Conferências, fazendo parte da equipe de Marcel Breuer e Bernard Zehrfuss.

1957-59 Trabalha junto com várias arquitetos, sobretudo com o próprio filho Antonio Nervi, no projeto dos Edifícios construídos para as Olimpíadas a serem realizadas em Roma em 1960.

1959-69 Ao longo de toda uma década trabalha ininterruptamente em vários projetos contando com a colaboração prestimosa de seu filho Arqº Antonio Nervi. Dessa época são os Edifícios do Palácio do Trabalho em Turim, da Fábrica de Papel Burgo em Mântova e da Caixa Econômica em Veneza, o que não impede Nervi de desenvolver atividades também fora da Itália. Projeta a Estação Rodoviária de N.York, vários arranha céus em Montreal, a Catedral de Santa Maria em São Francisco e a nova Sede da Bolsa Internacional do Trabalho em Genebra.

1979 Pier Luigi Nervi morre serenamente em sua casa na cidade de Roma em 9 de Janeiro.⁷⁰

⁷⁰ NERVI JR., P.L. DESIDERI, P. POSITANO, G. **Pier Luigi Nervi.** G.Gili. Barcelona 1982. Pg. 234.

A resistência pela forma :

“ Entre as várias qualidades do concreto armado e do ferro-concreto, uma das mais fecundas é a que permite a realização de superfícies resistentes, de qualquer maneira sejam elas curvas ou enrugadas.

Esta característica possibilita estruturas, nas quais a capacidade estática é consequência direta de curvaturas ou enrugamentos dados à superfície, cuja espessura permanece sempre muito pequena em comparação às dimensões do organismo resistente. Em outras palavras a eficácia estática é fruto, mais da forma da estrutura e de sua atitude resistente espalhada, do que de concentrações de ações agentes e de secções resistentes, fixadas ao longo de elementos isolados.

É evidentemente difícil dar uma definição destes sistemas especiais que, entretanto proporia chamar de resistentes pela forma, embora a Natureza e produtos de uso comum nos ofereçam numerosas aplicações.

De fato, cálices de flores, folhas lanceoladas, canas, cascas de ovos e invólucros de insetos, conchas, leques, abat-jours, carrocerias de automóveis, vasos de vidro e mesmo objetos de vestuário como chapéus, são outros tantos exemplos de resistência de forma.

É sem dúvida, de uma importância extraordinária que o novo meio construtivo nos permita de estender - pela primeira vez desde que humanidade está construindo – estas estruturas a dimensões grandes, aliás grandíssimas.

Entre as tentativas feitas nesta direção no passado, e o que será realizável no futuro, há tal diferença de tamanho, que se pode justamente considerar o campo das estruturas resistentes pela forma como completamente novo.

Não é uma exageração entusiástica prever que os estudiosos do futuro sintetizarão o trabalho arquitetônico de nossa época justamente no ter iniciado estas novas formas, tão estreitamente ligadas às qualidades técnicas das estruturas do concreto armado.

Não devemos todavia esquecer que a realização prática de grandes estruturas resistentes pela forma encontra notáveis dificuldades de caráter projetual e teórico, que devem ser frisadas.

As estruturas resistentes pela forma nunca são planas, e as mais eficientes, estática e arquitetonicamente correspondem a superfícies de curvatura dupla ou enrugadas, podem ser raramente exprimidas por meio de equações simples, aptas a serem introduzidas no mecanismo matemático das equações diferenciais e das integrações resolutivas, de maneira que o tratamento teórico dos sistemas de forças que se estabelecem em seu íntimo, ou, em outras palavras, sua resolução é impossível na maioria das vezes, ou então trabalhosa demais pelas exigências da prática profissional.

Estas dificuldades de caráter teórico não são todavia em minha opinião as mais graves e insuperáveis.

Além dos progressos rápidos que a Ciência das construções fará certamente neste campo, é de fato sempre possível se valer de pesquisas experimentais que permitem resolver da melhor maneira qualquer sistema resistente, por quanto complicado for.

A verdadeira dificuldade a superar, para alcançar aquele desenvolvimento das estruturas resistentes pela forma, do qual depende em medida tão grande o progresso da construção, está na falta de intuição estática e arquitetônica correspondente a este específico funcionamento estático, e na dificuldade de formar dita intuição.

Os numerosos exemplos que nos rodeiam são pequenos demais (folhas, cálices de flores, invólucros de insetos) e não interessam portanto o peso de nosso corpo ou a força de nossos músculos, ou então, como no caso dos objetos decorativos ou dos utensílios, estão fora da possibilidade de experiências estáticas diretas.

As carrocerias dos automóveis, a fuselagem e as asas dos grandes aviões, os cascos de ferro dos navios, exemplos eloqüentes da resistência da forma, polarizam nossa atenção exclusivamente do ponto de vista mecânico, de maneira que também essas experiências notáveis, permanecem quase que completamente estéreis, no campo construtivo-arquitetônico.

Por consequência, a resistência de forma, embora a mais eficiente de todas e a mais difundida da Natureza, não entrou naquele conjunto de intuições estáticas inconscientes, do qual provem os esquemas e as realizações estruturais. Não somos ainda acostumados a pensar estaticamente pela forma.

As primeiras realizações em concreto feitas nesse campo, isto é, as estruturas casca de forma simples, como as abóbadas cilíndricas em casca, ou as abóbadas conoidais, apresentam uma demonstração eloqüente da eficácia estática destes sistemas e de suas possibilidades.

Possibilidades que se poderão desenvolver em medida não imaginável, passando a formas mais complexas quais as superfícies toroidais e de translação, ou da combinação destas com enrugamentos aptos a eliminar as flambagens locais – causa principal da instabilidade das estruturas de resistência superficial.

Julgo oportuno a esta altura, acenar a um tipo de estruturas importantes também típicas do concreto, embora não pertençam rigorosamente a essa categoria, nas quais o fato estático e o fato normal se unem em uma síntese completamente nova e sem antecedentes nas construções do passado.

Estas estruturas avançadas e estudadas teoricamente pelo Engenheiro Aldo Arcangeli, meu exímio colaborador, e realizadas pela Sociedade Nervi e Bartoli através de processos construtivos estudados pelo autor, baseiam-se sobre o conceito de dispor as nervuras de sistemas resistentes superficiais espaciais ou planos, ao longo das isostáticas das tensões ou dos momentos principais ou, em outras palavras, ao longo das curvas preferenciais dos fluxos de forças que se originam no interno de um sistema solicitado por forças.

Tais linhas são algo de absoluto, que depende exclusivamente do jogo de forças e de sistemas resistentes em ação.

O admirável está no fato de que nós, limitando nossa tarefa à de modestos intérpretes de verdades físicas, descobrimos harmonias de forças imprevistas, altamente expressivas.

As nervuras de uma laje disposta ao longo das isostáticas do momento, adquirem um movimento curvilíneo de grande eficácia estética; mais expressivas ainda são as nervuras de uma laje cogumelo, isto é, de uma laje sustentada por pilares sem vigas principais.

As nervuras de uma grande tubagem que funciona como ponte-canal, colocadas ao longo das isostáticas das tensões principais, apresentam um jogo de curvas que poderia parecer fruto de uma sensibilidade decorativa requintada.

Aplicando o sistema construtivo a elementos pré fabricados, será fácil passar em seguida a estruturas resistentes pela forma reforçadas por nervuras ao longo das isostáticas; abre-se de tal forma, um campo de ilimitadas possibilidades arquitetônicas.

É mister todavia, não esquecer que à base de todos esses casos que prometem mais desenvolvimentos, está o simples fato executivo de ter endereçado o concreto armado a uma libertação progressiva dos vínculos de forma, das formas em madeira.

Até estes vínculos não forem completamente eliminados, a arquitetura do concreto armado será sempre guiada pela necessidade de ser, embora por um momento só, uma arquitetura de madeiramento.

Resultado importante e promissor, por mim alcançado em quase quarenta anos de contato apaixonado com as estruturas de concreto. ” ⁷¹

O fato do projeto se constituir no passo inicial para execução de qualquer obra que se pretenda de qualidade não representa novidade, como também não é novidade a importância e o significado da idealização da estrutura com seus elementos colocados cada qual na sua posição, e desenhados igualmente com o mesmo cuidado.

Nervi buscava além das premissas acima, **o equilíbrio e a expressão encontradas nas obras cujas soluções de estrutura seguiam o caminho natural percorrido pelas forças no espaço.** Para isso o concreto armado constitui-se no material mais adequado e belo jamais descoberto por causa da sua maleabilidade, isto é, ele se adapta à forma tal qual a água se adapta o recipiente que a contém.

⁷¹ NERVI, Pier L. **Habitat – Revista das Artes no Brasil - nº 3**, São Paulo : Habitat Editora.Distribuidora e Editora do Museu de Arte de São Paulo. Resistência de Forma. Pg. 17 e 18

E desde que corretamente ligadas entre si, as peças que compõe a estrutura passam a trabalhar de maneira solidária, permitindo que as reações em cada ponto de apoio sejam absorvidas pelo elemento vizinho, como que diluindo as ações e reações provenientes das cargas e do pêso próprio em todo o conjunto resistente, que passa a funcionar como um bloco rígido e homogêneo inserido no espaço definido pelo projeto arquitetônico.

“Nervi desejava que o projetista se dedicasse a resolver esteticamente o organismo estrutural onde as novas tecnologias permitem concentrar os esforços, reduzindo as dimensões das seções, rarefazendo a matéria, pondo a mostra o que estava escondido e submetendo à dialética da visão o que antes era objeto de avaliação puramente técnica.”⁷²

Um dos exemplos mais marcantes dessa sua filosofia de pensamento é o belíssimo “Palazzetto dello Sport” situado em Roma (1956-57) : um ginásio com capacidade para 5.000 pessoas sentadas, projetado por ele e pelo Arquiteto Annibale Vitellozzi para os Jogos Olímpicos que iriam se realizar em 1960 na “cidade dos Césares”

Na verdade são três os Edifícios construídos para os Jogos : além do Palazzetto, o Palazzo dello Sport e o Stadio Flamínio, em cujos projetos Nervi também trabalhou, respectivamente com o Arquiteto Marcello Piacentini e com seu próprio filho o Arquiteto Antônio Nervi.

A estrutura cuja geometria é a da cúpula, é formada por uma coroa perimetral de nervuras radiais apoiadas em um anel central de compressão na parte superior, e em 36 peças em forma de garfo na parte inferior inclinadas de acordo com a tangente do arco geratriz.

As bordas da cúpula são trianguladas e a vedação de vidro circunda o ginásio sob a cúpula, conforme ilustra o desenho. Os empuxos horizontais são totalmente absorvidos pelo apoio das peças em “Y” constituído por um anel de fundação em concreto protendido com 81,50 m. de diâmetro e 2,50 m. de espessura.

⁷² NERVI JR., P.L. DESIDERI, P. POSITANO, G. **Pier Luigi Nervi**. G.Gili. Barcelona 1982. Pg. 15.

Fig. 1 Palazzetto dello Sport – Corte esquemático da estrutura

Fig. 2 Cúpula

De acordo com P. L. Nervi Jr., P. Desideri e G. Positano, “ a cúpula calculada como membrana está constituída por 1620 elementos pré fabricados de forma romboidal; o seu diâmetro à altura da imposta é de 60 m. e a sua altura desde a chave da abóbada é de 21 m. Todos os serviços, estão instalados sob as arquibancadas ao longo do perímetro do edifício.”⁷³

Fig. 3 mação do pé do cavalete

Fig. 4 Esquema estático

⁷³ NERVI JR., P.L. DESIDERI, P. POSITANO, G. **Pier Luigi Nervi**. G.Gili. Barcelona 1982.

Eduardo Torroja Miret

Pequena Biografia

1899 Eduardo Torroja nasce em Madrid, filho do matemático Eduardo Torroja Caballé, foi um dos melhores especialistas de seu tempo em construção de concreto, desenvolvendo conceitos estudados por grandes arquitetos como Félix Candela.

1917 Ingressa na faculdade de engenharia

1923 Começa a trabalhar na Companhia de Construções Hidráulicas Civis, dirigida por seu ex-professor José Eugenio Ribera, onde permanece até 1927, participando de importantes projetos, como cimentação da ponte Sancti-Petri em San Fernando (Cádiz).

1927 Abre um escritório próprio em Madrid. Em seus projetos desenvolve modelos experimentais em tamanho reduzido para o estudo da estrutura. Empenhado na melhora das técnicas construtivas cria, junto com um grupo de engenheiros e arquitetos uma empresa (ICON) com laboratórios apropriados para a mediação e investigação dos modelos.

1934 A partir desta empresa nasce o Instituto Técnico da Construção e Edificação, da qual Torroja seria o primeiro secretário.

1939 Torna-se professor de Cálculos de Estrutura na Escola Especial de estradas, canais e portos. E nos anos seguintes leciona matérias como: Resistência dos materiais, Fundamento de cálculo e Execução de obras de concreto armado e protendido. Neste mesmo ano o Instituto Técnico da Construção e Edificação passaria a integrar-se com o Conselho Superior de Investigações Científicas

1941 É convidado a assumir a direção do Laboratório Central de Ensaio de Materiais de Construção, criado em 1898 e situado na própria escola. Também se encarrega do projeto do novo edifício para este laboratório.

1948 Sem abandonar suas atividades de projetista estrutural, participa de diversas atividades científicas, tanto nacionais como internacionais, chegando a ser presidente da Associação Internacional do Concreto.

Foram-lhe entregues diversas condecorações, entre elas a “la Gran Cruz de Alfonso X el Sábio”, “la Gran Cruz de la Orden del Mérito Civil”, entre outras.

A última parte de sua vida desenvolveu atividades científicas no Instituto Técnico da Construção e do Cimento, que passaria a ser chamada de Instituto Eduardo Torroja da Construção e do Cimento, em sua homenagem.

Clube Tachira

Local : Caracas
Arquitetura : Eduardo Torroja
Estrutura : Eduardo Torroja
Ano : 1957

Fig. 5 Clube Tachira

Fig. 6 Estudo

Mercado de Abastos

Local : Algeciras
Arquitetura : Eduardo Torroja
Estrutura : Eduardo Torroja
Ano : 1933

Fig. 7 Vista Geral

Viaducto del Aire

Local : Madrid
Arquitetura : Eduardo Torroja
Estrutura : Eduardo Torroja
Ano : 1933

Fig. 8 Vista Geral

Hipódromo de Zarzuela

Local : Madrid
Arquitetura : Eduardo Torroja
Estrutura : Eduardo Torroja
Ano : 1935

Fig. 9 Vista Geral

Fig. 10 Corte

Arco Esla

Local	: Espanha
Arquitetura	: Eduardo Torroja
Estrutura	: Eduardo Torroja
Ano	: 1939

Fig. 11 Vista Geral

Fig. 12 Corte

Alloz Aqueduto

Local	: Espanha
Arquitetura	: Eduardo Torroja
Estrutura	: Eduardo Torroja
Ano	: 1939

Fig. 13 Detalhe

Fig. 14 Vista Geral

Fig. 15 Diagrama de momentos

Ponte Tordera

Local : Espanha
Arquitetura : Eduardo Torroja
Estrutura : Eduardo Torroja
Ano : 1939

Fig. 16 Vista Geral

Fig. 17 Vista

Eladio Dieste

Pequena Biografia

- 1917 Eladio Dieste nasce na cidade de Artigas – Uruguai.
1943 Forma-se na faculdade de Engenharia de Montevideu.
Principais obras:

Cascas de dupla curvatura.

Igreja de Atlântida. Estación Atlântida.
TEM S.A. Montevideu.
Empacotadora de Cítricos Caputto. Salto.
Mercado de Porto Alegre.
Banco de Seguros do Estado. Montevideu.
Mercado de Maceió.
Depósito J. Herrera y Obes. Montevideu.
Central Lanera Uruguia.
Shopping Center. Montevideu.
Azucitrus S.A. Paysandú.
Tops Fray Marcos S.A. Depósito de Lanas. Florida.
Lanas Trinidad. Barraca Durazno.

Cascas Autoportantes.

Ginásio de Maldonado.

Pavilhão dos Comerciantes. Mercado de Porto Alegre.

Área de controle do Mercado de Porto Alegre.

Mercado do Rio de Janeiro.

Estação de ônibus de Salto.

Agroindústria Domingo Massaro S.A.

Lanas Trinidad S.A. Flores.

Silos.

Em Vergara.

Em Young - Rio Negro.

Em Estrella - R.G. do Sul.

Em Colônia.

Estruturas em folha poliédrica.

Ginásio para Hogar Estudiantil de Montevideú.

Igreja de Durazno.

Pontes Ferroviárias.

Desvio da Represa Rincón del Bonete.

Professor Honorário da Faculdade de Arquitetura de Buenos Aires.

Professor contratado pela Unesco para ciclos de conferências em Universidades Latino Americanas.

Eladio Dieste faleceu em 1966 com apenas 53 anos.

“Tenho procurado ser coerente com as exigências do meu trabalho. Faze-lo bem.

Ele tem me levado ao caminho do descobrimento, primeiramente de mim mesmo. Este caminho segue a forma, e esta deverá estar entrelaçada nas leis que regem a matéria em equilíbrio.”⁷⁴

Em seu curto período de vida (1943 – 1996) o Engenheiro Uruguaio Eladio Dieste tornou-se responsável por um histórico de obras onde se observa a marca pessoal deste grande profissional : a busca obstinada da qualidade do espaço baseada na funcionalidade aliada à beleza.

Porém, apesar da produção de alta qualidade, o reconhecimento alcançado por ela está muito aquém da sua importância; há que se considerar também que o uso pioneiro da chamada cerâmica armada, feliz associação entre o tijolo, a argamassa de assentamento e o aço, está intimamente ligado ao seu nome. Os resultados alcançados, revelam não somente uma preocupação de ordem estética, mas também a preocupação com o uso adequado dos materiais componentes dos sistemas construtivos, e **uma enorme capacidade de retirar deles a máxima eficiência estrutural através do uso consciente das formas adequadas.**

Em sua arquitetura, frequentemente surgem em destaque volumes audaciosos que apesar da escala grandiosa do espaço, sugerem intimidade e aconchego em uma atmosfera de luz controlada, onde superfícies curvas de tijolo de textura aparente permitem que se usufrua com serenidade o ambiente construído.

A fluidez do traço do projetista se percebe através do equilíbrio dos volumes da obra materializada como no caso da Igreja de Atlântida. A sensibilidade de Dieste ao associar a qualidade do espaço organizado ao desempenho estrutural adequado, está presente nesta e em inúmeras obras realizadas no Continente Sul Americano, como por exemplo no Mercado Municipal de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul.

⁷⁴ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 13.

A utilização do sistema estrutural e respectiva técnica construtiva da cerâmica armada quando utilizada da forma não convencional, entenda-se como convencionais as estruturas que utilizam o pórtico como módulo básico, seja ele construído em concreto armado, aço ou cerâmica armada, requer por si só um profundo conhecimento dos conceitos que irão determinar a estabilidade do conjunto da obra, considerando que tensões de flexão podem ser equilibradas também mediante a resolução correta das superfícies curvas, permitindo desse modo à estrutura resistir pela forma, sem nenhum recurso associado à técnica do concreto armado que já havia completado 40 anos por ocasião do seu nascimento, (edifício da Rua Franklin em Paris : A.Perret - 1903) técnica essa que permitiu um gigantesco passo adiante e uma evolução considerável da construção e consequentemente da arquitetura.

“ Sua crítica ao sistema de decomposição de projetos em planos, à redução da arquitetura a fórmulas abstratas a fim de ajustar-se às necessidades do cálculo estrutural simplista, como tem sido visto não se limita ao campo teórico, surge todavia de sua própria experiência no sentido de explorar outros sistemas, mais propriamente aqueles onde não é o cálculo que determina a arquitetura, mas sim a forma os materiais estruturais e o respectivo sistema construtivo em íntima colaboração é que determinam os parâmetros do cálculo ” (Marina Waisman)⁷⁵

As razões que levaram E. Dieste a usar a técnica da cerâmica armada, estão relacionadas quase que exclusivamente às questões sócio econômicas e culturais que moldavam o cenário dos países sul americanos em vias de desenvolvimento como o Uruguai sua terra natal.

Dieste acreditava que fazia muito mais sentido construir com tijolo, um material natural, pois é feito de argila, do que construir grandes edifícios utilizando o concreto armado e o vidro como elemento de vedação, sistema construtivo característico dos arranha céus americanos inseridos em uma realidade totalmente diversa da realidade dos países da América Latina.

⁷⁵ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 25.

Porém, Dieste achava que não fazia sentido construir com tijolo do mesmo modo que são construídos edifícios em concreto armado, onde pilares, vigas e lajes são dispostos de forma tal que os planos de piso teto e parede, perpendiculares na maioria das vezes, formam ângulos retos entre si, compondo um arranjo próprio da grande maioria das construções convencionais.

Afirma ele, “uma arquitetura sadia não pode ser produzida sem o uso racional e econômico dos materiais de construção. Refiro-me inclusive à arquitetura como expressão artística em seu nível mais elevado. Em última análise não há uma diferença essencial entre o econômico e o moral. São os aspectos morais que levam ao sucesso qualquer empreendimento idealizado pelo homem, e para se atingir o sucesso torna-se indispensável uma utilização racional e respeitosa dos recursos da Natureza. Este é o verdadeiro sentido da palavra economia : uso cuidadoso e portanto profundo das possibilidades daquilo que é natural.

Por causa disso se justifica a busca das formas que se ajustem em estreita relação com aquilo que fazemos, às leis que regem a matéria, levando em conta, além disso, que é o homem que deve trabalhar essa matéria, manipula-la.”⁷⁶

Prosseguindo: “Falta-nos uma independência inocente e sadia, não orgulhosa e empertigada: uma atitude autêntica e viva diante da realidade.

Creio que uma arquitetura que leve em conta gostos e hábitos de nossa gente, nosso clima tão peculiar, o estrutural e o construtivo vinculado às nossas possibilidades, à capacidade dos nossos construtores e com o inesperado da expressão da nossa luz e da nossa paisagem, deverá ter com certeza um matiz nacional”.⁷⁷

A postura independente de Dieste não deixa dúvidas a respeito do seu sentimento patriótico e da sua conduta profissional, e nos faz meditar sobre tudo que tem acontecido com os países do Continente Sul Americano em relação à dependência econômica a que estamos submetidos ainda, imposta há muitos anos pelos países mais ricos e mais privilegiados.

⁷⁶Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 28.

⁷⁷ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 29

É caso de perguntar se o modelo de desenvolvimento estabelecido por questões essencialmente políticas, tem alguma coisa a ver com os nossos hábitos e a nossa cultura.

Não se pode afirmar que, apenas pelo fato do processo construtivo que utiliza armaduras metálicas para reforçar a argamassa formada pelo cimento, agregados graúdos e miúdos e a água ter sido descoberto na França, e o cimento propriamente dito na cidade de Portland na Inglaterra, (ver capítulo 2 desta Tese) não devemos prestar atenção às inúmeras possibilidades desta técnica, mas por outro lado também não se pode deixar de reconhecer o valor de Dieste como Engenheiro e como Arquiteto por vocação, responsável por grande número de obras com profundo significado estético e extraordinária qualidade construtiva, baseadas na praticidade da cerâmica armada utilizada como material estrutural, **e na resistência pela forma marca registrada da sua produção.**

O próprio Dieste diz que não se pode produzir uma arquitetura genuinamente nacional com o que concordo inteiramente. A verdadeira arquitetura prescinde de lugar, estilo ou coisa que o valha. Será sempre boa ou má arquitetura independentemente do local onde for produzida ou até da técnica utilizada. A produção de E. Dieste é prova eloqüente das ricas possibilidades do humilde tijolo.

Por outro lado, cotidianamente assistimos a construção de verdadeiros monumentos ao mau gosto em nome de modismos passageiros, apesar da sofisticação da tecnologia que a cada dia se aprimora mais, e dos recursos colocados à disposição do empreendedor, seja ele um representante do Poder Público ou da Iniciativa Privada.

E não se trata somente de analisar a obra de arquitetura sob a ótica da estética exclusivamente. A deficiência mais grave consiste em projetar o edifício seja de que porte for, não levando em consideração que ali dentro daquele espaço idealizado, irá residir aquele que ao que tudo indica, se constitui no Ser mais evoluído da Criação: o próprio homem.

Podemos então afirmar a partir daí, e segundo Dieste, que “o uso sábio, humano e imaginativamente rico do espaço, produz uma intensa felicidade.”⁷⁸ Se, além disso, o que se produziu é algo dotado de profundo senso estético, os objetivos do projetista e do construtor serão plenamente atingidos, adquirindo a obra o caráter de permanência que caracteriza a verdadeira arquitetura.

A Cerâmica Armada.

A utilização da cerâmica armada como sistema portante de edificações destinadas a atender variados programas arquitetônicos como igrejas, torres, construções industriais, silos, ginásios etc. se justifica segundo Dieste por inúmeras razões:

1. A elevada resistência mecânica. O tijolo desde que de boa qualidade consegue resistir a carregamentos que variam de 1000 a 1500m kgf / cm².
2. O peso específico do material (1.600kgf / m³) é menor do que o do concreto armado (2.500kgf / m³).
3. O módulo de elasticidade do tijolo é menor do que o do concreto, favorecendo dessa maneira uma maior adaptabilidade às deformações.
4. O material tijolo, com um mínimo de cuidado resiste melhor ao envelhecimento e às mudanças bruscas de temperatura.
5. Ao contrário do que possa parecer, os eventuais reparos em estruturas de cerâmica armada são menos perceptíveis do que em uma estrutura de concreto não revestida.
6. A massa do tijolo apresenta uma excelente isolamento térmica, favorecida pela possibilidade de introdução de aberturas capazes de permitir uma boa solução de ventilação.
7. Melhor comportamento acústico.

⁷⁸ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 31.

8. Maior capacidade de regulação natural da umidade relativa do ambiente, devido à excelente higroscopia.
9. Em comparação com o concreto armado, o tijolo irradia menos calor no verão, absorvendo por outro lado uma maior quantidade de calor no inverno.
10. Com as atuais técnicas de fabricação a partir de um processo de produção industrializado, o custo por m³ do material não se compara a nenhum outro de qualidade semelhante.
11. Em muitos casos o custo da estrutura também é muito baixo em comparação com as demais técnicas.

A economia global aliada às vantagens descritas acima, deve-se também à facilidade de assimilação por parte da nossa mão de obra das técnicas construtivas que utilizam o tijolo; provavelmente porque descendem de povos com tal tradição construtiva, e também porque dadas as condições econômicas em que se encontram os Países Sul Americanos, temos aqui as condições necessárias para o desenvolvimento dessas aptidões.⁷⁹

Obras

Mercado de Porto Alegre.

Avenida Farrapos. Porto Alegre - Brasil. 1972.

Na década de 60 obedecendo a diretrizes do governo, diversos mercados foram construídos nas principais cidades brasileiras porque se dizia na época que o Brasil teria o tamanho da sua agricultura, e em sendo assim, haveria de existir lugares suficientes para aprovisionar a produção agrícola, e depois de construídos, naturalmente que os mercados deveriam ser abastecidos.

⁷⁹ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 3.

O projeto foi elaborado pela equipe formada pelos arquitetos gaúchos Maximiliano Fayet e Claudio Araújo e pelo Engenheiro Eladio Dieste.

O plano geral é composto por diversos edifícios, o maior deles o gigantesco pavilhão dos produtores (47 x 280 m.) onde a produção é vendida diretamente.

Na cobertura, abóbadas de dupla curvatura favorecem a iluminação direta através de lanternins.

Abóbadas autoportantes pré comprimidas compõe harmoniosamente os pavilhões dos comerciantes, assinalados pelo pórtico de entrada formado por abóbadas auto portantes.

Fig. 18 Vista geral

Fig. 19 Execução das abóbadas

Fig. 20 Corte do pavilhão dos produtores

Fig. 21 Fachada do pavilhão dos comerciantes

Fig. 22 Pavilhão dos produtores

Fig. 23 Acesso pavilhão dos produtores

A Igreja de Atlântida

Estrada 11 km 164, Estación Atlântida - Uruguai. 1960.

“... neste projeto, não queria que a arquitetura deste templo religioso representasse um obstáculo para um recolhimento verdadeiro; ao contrário queria que fosse sua primeira manifestação. Os meios e os materiais utilizados na construção teriam também que ser expressivos: são simples como os fiéis para quem a igreja foi construída, porém, foram tratados com um desvelo que pretendia se transformar na homenagem que os humildes verdadeiramente merecem!”⁸⁰

E. Dieste

A arquitetura de superfícies onduladas da Igreja de Atlântida se tornou possível primeiramente por causa do esforço realizado por seu projetista. Tratava-se da sua primeira obra de arquitetura, o que representou para ele um considerável aprendizado. Porém foram necessários 2 anos de atividade ininterrupta para colocar de pé as paredes de dupla curvatura constituídas por um conjunto de elementos de tijolo, argamassa de cimento e areia e armadura metálica, medindo 16 x 30 metros.

As paredes com 30 cm de espessura, são na verdade conóides de diretriz reta com 7 metros de altura.

A superfície ondulada teve de ser marcada no terreno primeiramente para depois ser erguida, servindo ao mesmo tempo de apoio para a cobertura abobadada ajudando a absorver seus empuxos, e para o beiral.

A cobertura vence um vão médio de 16 metros e máximo de 18,80 metros, variando a flecha de 7 a 147 cm. o que pressupõe que os vales das ondas sejam quase horizontais. Neles repousam os tensores destinados a resistir os empuxos ancorados nas fiadas de coroamento das paredes, permitindo assim que a cobertura trabalhe como casca autoportante.

⁸⁰ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 163.

Dieste afirma que nesta obra não foram seguidos métodos rigorosamente matemáticos, visto que a expressão matemática da equação da superfície é extremamente complexa. Apesar disso, o dimensionamento final da estrutura não deixe dúvidas em relação à segurança e economia.

O campanário é totalmente de cerâmica armada. O mais surpreendente é que o consumo de aço em toda a obra não chega a 200 kg. Tudo isso a um custo na época (1959) de US\$ 30.00 por metro quadrado!!!

Fig. 24 Fachada principal

Fig. 25 Paredes concebidas como cascas de dupla curvatura

Fig. 26 Idem

Fig. 27 Vista da torre do campanário

Fig. 28 Fachada posterior

Fig. 29 Vista interna

Uma explicação necessária sobre os fundamentos estáticos da geometria das abóbadas “Diestianas”.

Para compreender as intenções de Dieste em relação às soluções estruturais extremamente criativas que idealizava, algumas considerações são necessárias:

A técnica da cerâmica armada utiliza um conjunto de elementos, a cerâmica propriamente dita, o aço da armadura metálica e a argamassa de areia e cimento, que, embora de natureza diferente, quando utilizados estruturalmente assumem um comportamento bastante homogêneo. Além disso Dieste elegia como diretriz da forma a catenária, fazendo a estrutura trabalhar à compressão pura.

O reforço da armadura, uma verdadeira rede metálica armada em duas direções faz com que a estrutura apresente reações de pequena ordem mesmo diante de cargas concentradas, de modo a permitir que a mesma permaneça trabalhando sempre no regime elástico, portanto dentro de uma margem de segurança bastante aceitável.

Para superfícies a serem cobertas por grandes vãos, como no Mercado de Porto Alegre, Dieste dava preferência à variação na altura da lâmina associada à dupla curvatura conforme ilustram os desenhos e imagens, resultando na forma conhecida como dente de serra. Devido à forma, as peças são dotadas de grande inércia e extrema resistência às tensões de torção, tornando-se, portanto capazes de resistir também às ações do vento cujas curvas de pressão invariavelmente são distintas daquelas originadas pelo peso próprio. Internamente a superfície curva apresenta um comportamento ideal frente às questões acústicas, favorecendo além de tudo isso a solução clássica da iluminação zenital.

Fig. 30 Perspectiva do conjunto

Fig. 31 Detalhe da secção transversal

Fig. 32 Secção transversal

Outra solução utilizada por Dieste em várias obras é a da abóbada cilíndrica.

Para absorver os empuxos horizontais nas extremidades do último vão, ele inseria vigas deitadas, e nos encontros os empuxos se neutralizam transferindo para baixo apenas tensões verticais de compressão pura, conforme ilustram os desenhos.

Essa solução arquitetônica dispensa as vedações nas extremidades conhecidas como tímpanos, na maioria das vezes caras e antiestéticas.

Fig. 33 Perspectiva de um conjunto de abóbadas cilíndricas Fig. 34 Detalhes

Refrescos del Norte S.A.

Essa solução de cobertura foi empregada com êxito na fábrica de refrescos situada na cidade de Salto no Uruguai, construída em 1980.

Fig. 35 Fábrica de refrescos

Fig. 36 Local de observação da área de trabalho

“ A expressão para ser autêntica não pode ser gratuita; o primeiro fundamento diz respeito à coerência entre aquilo que projetamos e as Leis que regem a matéria em equilíbrio, por isso parece natural adequar aquilo que será construído aos esforços que deverão ser corretamente absorvidos. É o que faz a Natureza em um milenar e sutilíssimo processo de ajuste da forma à função. Mas é evidente que esse ajuste quando feito pelo homem nem sempre pressupõe economia, ao menos diante de uma análise preliminar.

Porém, a coerência formal e o necessário ajuste expressivo não são válidos em si mesmo, já que necessitam de uma resposta ética às peculiaridades do programa, do projeto e posteriormente da obra que pretende apropriar-se de uma determinada porção do espaço. São como uma escola de conduta, e somente a partir dela pode florescer uma Arte sólida e verdadeira; sem as revelações dos mistérios do mundo da Arte, não faremos nunca de nossas vidas, algo realmente humano!! ” ⁸¹

⁸¹ Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. Pag. 272.

Oscar Niemeyer

Pequena Biografia

1907	Oscar Niemeyer nasce no Rio de Janeiro
1928	Conclui o curso secundário no Colégio dos Barnabitas Santo Antônio Maria Zaccaria
1929	Matricula-se na Escola Nacional de Belas Artes do Rio de Janeiro, que seria dirigida a partir de 1931 por Lucio Costa
1935	Inicia sua vida profissional no escritório de Lucio Costa
1936	No escritório de Lucio Costa participa da equipe que desenvolve o projeto do Edifício do Ministério da Educação e Saúde considerado o marco inicial do Movimento Moderno no Brasil.
1937	Projeta a obra do Berço no Rio, seu primeiro projeto construído.
1939	Convidado por Lucio Costa viaja a N.York como membro da equipe que projeta o Pavilhão do Brasil na Feira Mundial.
1940	Conhece JK o Prefeito de BH que o convida a projetar o Conjunto da Pampulha.
1946	Projeta a sede do Banco Boa Vista na Candelária – RJ

- 1947 Viaja a N. York como membro do comitê de planejamento da ONU encarregado do projeto da sede da ONU. Seu projeto é aprovado em 1º
- 1951 Projeta o Parque Ibirapuera com Zenon Lotufo, Hélio Uchoa e Eduardo Kneese de Mello.
- 1952 Projeta sua residência na Estrada das Canoas no RJ.
- 1954 Projeta o MAM de Caracas Venezuela.
- 1956 Convidado por JK para projetar a NOVACAP é nomeado Diretor do Departamento de Arquitetura.
- 1957-60 Em Brasília projeta o Palácio da Alvorada, o Congresso Nacional, o Palácio do Planalto, o Supremo Tribunal Federal entre outros.
- 1962 É nomeado Diretor da Escola de Arquitetura da UnB. Viaja ao Líbano para projetar a Feira Internacional e Permanente de Tripoli e Conjunto Esportivo no Líbano.
- 1965 Retira-se da UnB com 200 professores em protesto contra a Ditadura. Começa a realizar projetos para diversos países da Europa entre os quais a sede do PC Francês em Paris.
- 1966 Impedido de trabalhar no Brasil estabelece-se na França.
- 1968 Na Itália projeta a sede da Editôra Mondadori.
- 1969 Na Argélia projeta a Universidade de Constantine.
- 1972 Na França projeta a Bolsa do Trabalho de Bobigny e o Centro Cultural Le Havre.
- 1975 Projeta a sede da Fata Engeneering na Itália.
- 1982 Projeta o Sambódromo no Rio.
- 1983 Projeta o sistema de Escolas Públicas chamadas CIEPs.
- 1987 Projeta o Memorial da América Latina e o Edifício sede do jornal l'Humanité na França.

- 1988 Recebe o Prêmio Pritzker de Arquitetura em Chicago – EUA.
- 1991 Projeta o MAC de Niterói e o Parlamento da A. Latina em SP.
- 1997 Inicia os estudos para o Caminho Niemeyer em Niterói, o MAM de Brasília e o Paço Municipal de Americana – SP.
- 1998 Projeta o Centro Cultural de Jacarepaguá RJ. Inicia os projetos do Centro Cultural de Santa Helena no Paraná; o complexo arquitetônico Memorial e Palácio Legislativo U.Guimarães em Rio Claro SP; a Escola de Música G. Novaes em S.J.da Boa Vista SP; o Memorial Darcy Ribeiro no Sambódromo no RJ; o Memorial Maria Aragão em São Luis do Maranhão e o Presépio de Natal em Natal R.G. do Norte.⁸²

⁸² NIEMEYER, O. **As Curvas do tempo** Ed. Revan. Rio de Janeiro 1998.

Pavilhão L. N. Garcez

Local	: Parque Ibirapuera
Arquitetura	: Oscar Niemeyer, Zenon Lotufo, Hélio Uchôa, Eduardo Kneese de Mello
Estrutura	: Escritório Técnico Figueiredo Ferraz
Ano	: 1951

Fig. 37 Vista Geral

Fig.38 – Planta.

Cúpula de concreto armado com subsolo + três níveis unidos por rampas, com plantas diferentes que tocam apenas a superfície convexa, contando com fundações e estrutura independentes.

A iluminação é feita através de aberturas circulares em sua base com vidro fixo, daí a necessidade de instalações de ar condicionado.

Foge ao padrão convencional dos blocos prismáticos que compõe a maioria das construções existentes, e hoje, isolada em meio ao verde do Parque destaca-se pelas suas grandes dimensões: São mais de 70 m. de diâmetro vencidos por uma casca com 10 cm de espessura!

Inaugurado em 1955 como Palácio das Artes, abrigou o Museu do Folclore e da Aeronáutica, tendo sido recentemente reformado, continua sendo um dos pavilhões de exposições mais importantes e concorridos da cidade.

Museu de arte contemporânea

Local	: Niterói
Arquitetura	: Oscar Niemeyer
Estrutura	: Bruno Contarini
Ano	: 1996

Fig. 39 - Vista geral da obra

Oscar projetou e a Prefeitura construiu o Museu de Arte Contemporânea de Niterói: sobre um único pilar central, um tronco de cone invertido repousa com tal naturalidade, que faria enrubescer, se fosse possível, os edifícios vizinhos, diante da ousadia do maior nome da nossa arquitetura.

Não há como não associar a imagem, a um disco voador pousado no Mirante da Boa Viagem, nivelando a expressão do museu com a exuberância da natureza que o circunda. Uma fita de vidro escuro assinala a regularidade do perímetro em contraste com a sinuosidade das rampas de acesso.

A obra do arquiteto Oscar Niemeyer contou com projeto estrutural do engenheiro Bruno Contarini. Tudo começou em 1991 quando Niemeyer telefonou às 10 da manhã de seu atelier em Copacabana para Contarini, que já havia feito diversos cálculos para ele. Pediu que fosse até seu atelier para discutirem sobre uma obra para a qual haviam sido solicitados seus serviços. Essa discussão se prolongou até as 16 horas sem interrupção para o almoço. Conversaram sobre as linhas gerais do projeto e do que seria possível executar em concreto protendido.

Contarini conta que Niemeyer telefonou-lhe novamente às 8 horas da segunda-feira seguinte e pediu para passar novamente em seu escritório. O projeto já estava praticamente definido, faltando apenas alguns detalhes. No livro lançado sobre o museu, no item “Explicação necessária”, Niemeyer assim se expressou:

“Às vezes um projeto custa a se definir. Outras vezes ele surge de repente como se antes, nele nos tivéssemos detido cuidadosamente. E isto aconteceu com este projeto”.

Foi assim que, segundo a descrição de Bruno Contarini, começou o projeto de uma das mais bonitas obras de arquitetura e engenharia no mundo inteiro. Considerada em arquitetura como uma das sete maravilhas do mundo moderno, a sua parte de engenharia também apresenta algumas soluções de engenhosidade, baseada em muitos anos de experiência da engenharia brasileira.

O edifício tem a forma de uma taça apoiada em uma grande sapata, e conta com um anexo enterrado com salões para o equipamento de apoio ao Museu. O prédio principal possui 6 pavimentos.

O solo é constituído de alteração de rocha, tendo sido cortado anteriormente numa profundidade de 10 m para formar uma praça plana. Para construir a sapata foi necessário retirar mais 7 m de terra. Com o alívio obtido com a retirada de 17 m de terra, a aplicação das cargas concentradas da nova obra não constituía qualquer complicação, pois as novas tensões no solo ainda eram inferiores à tensão que existia inicialmente no solo não modificado.

Fig. 40 - Aspecto da armação pronta da sapata, mostrando ainda a abertura deixada para permitir a concretagem do fundo.

Fig. 41 - Estrutura do mezanino vista em corte. Termina internamente em um hexágono vazio de onde se vê o 2º pav.

A armação da sapata é bastante pesada como se pode ver na fig. 40.

A cobertura possui 50 m de diâmetro e é constituída por uma estrutura de lajes nervuradas com nervuras se apoiando em vigas radiais ligeiramente abauladas. Toda a cobertura se apóia apenas em seis colunas redondas. O núcleo não alcança a cobertura e morre no 2º pavimento.

As colunas só encontrarão apoio em vigas protendidas enormes que funcionam como gigantescos consolos com efeito espacial, transferindo todas as cargas para o núcleo cilíndrico central. Suas bases fazem parte do que se vê por baixo de toda a construção, dando-lhe a forma artística tão apreciada.

Fig. 42 - Disposição dos cabos no nível do 2º pavimento, como armação negativa dos 6 consolos. As paredes formam com as vigas dos pavimentos uma enorme viga duplo T.

O mezanino está dependurado na borda externa da cobertura por intermédio de uma casca cônica voltada para cima. Sua borda superior, junto com uma dobra da cobertura, forma uma calha enorme que recolhe toda a água que escorre da superfície da cobertura. O mezanino em si é outra laje nervurada que termina nas seis colunas que recebem a cobertura. Abaixo do mezanino, na fachada, está a janela que existe em toda a volta da construção, sem qualquer interrupção, não existindo montantes.

Tem-se a impressão de dois discos superpostos que não se tocam. A fig. 30 descreve em corte a estrutura do mezanino.

Os dois pavimentos 1º e 2º são as partes mais importantes da obra. Ligados entre si por paredes estruturais com a altura dos pavimentos, de disposição radial, são engastadas no tubo central que possui parede de 80 cm de espessura. Essas vigas parede possuem enormes momentos negativos e são em número de 6 como os pilares.

Elas não podem passar de um lado para o outro como seria natural, por causa do buraco do elevador central. Por este motivo os cabos de protensão se desviam deixando livre o miolo e assumindo uma disposição em estrela. Essa armação está representada na fig. 42 observando-se que os cabos são protendidos apenas pelas bordas no perímetro externo. Trata-se de uma disposição muito engenhosa que satisfaz bem às exigências arquitetônicas e estéticas.

Outra parte importante da obra são as rampas de acesso ao 1º e ao 2º pavimentos. Ao invés de projetar planos inclinados, como seria usual, Niemeyer preferiu criar rampas sinuosas com bifurcação para chegar ao 1º pavimento e continuar até o 2º. A estrutura da rampa foi concebida em forma de caixão perdido com protensão, e a estrutura aparenta ser uma laje lisa. As rampas foram concebidas como engastadas na base e nas chegadas aos pavimentos 1º e 2º. Ao longo da estrutura existem 3 pilares intermediários.

A planta do 2º pavimento é totalmente livre de colunas e conta com o buraco do elevador fechado. Sendo os elevadores acionados por baixo com auxílio de parafusos, não houve necessidade de prever casa de máquinas superior.

A concepção da estrutura exigiu a participação conjunta do arquiteto e do projetista, que, com auxílio do computador foi desenvolvendo cálculos aproximados para definir algumas dimensões exequíveis, até se chegar no que seria viável exigir. Definidas as dimensões principais, foi organizado um modelo matemático da estrutura usando programas de elementos finitos e o programa SAP 90 com o qual se obtém uma análise completa da estrutura e determinação dos esforços principais e respectivas deformações. Também se procedeu a uma análise das vibrações, garantindo o desempenho em serviço e o conforto do usuário.⁸³

⁸³ VASCONCELOS, Augusto Carlos de, CARRIERI, Renato, A Escola Brasileira do Concreto Armado. São Paulo: Axis Mundi, 2005. p. 74

Obs. : o texto que descreve a solução estrutural do MAC foi escrito pelo Prof. Drº Augusto Carlos de Vasconcelos e foi publicado no livro “A Escola Brasileira do Concreto Armado”

Sei da importância da escolha do sistema estrutural que melhor traduz a intenção do partido arquitetônico, e estou consciente que a estrutura relaciona-se diretamente com a forma, conforme exemplificam a grande maioria dos exemplos anteriores, e além disso não tenho dúvidas, que cabe ao Arquiteto defini-los da melhor maneira, pois são partes indivisíveis de um todo que se pretende em harmonia.

Não há dúvida também que os exemplos ilustram perfeitamente o pensamento de alguns dos mais representativos profissionais da área da Engenharia e da Arquitetura em todo o mundo, traduzidos nas obras analisadas, uma pequena parte da sua brilhante produção.

Porém, as questões que envolvem a conveniência da concepção de uma estrutura que resiste pela forma no atual momento que a arquitetura contemporânea atravessa, em alguns casos parecem deixadas um pouco de lado. O fato se deve ao desconhecimento por parte dos arquitetos dos postulados estabelecidos e seguidos por Nervi, exemplificados em suas obras, ou tais idéias fazem parte de um passado definitivamente enterrado pelos arquitetos e engenheiros contemporâneos porque não significam ou não servem para mais nada?

Pode-se observar que a obra denominada Pavilhão Lucas Nogueira Garcez de O. Niemeyer conhecida em São Paulo como a Oca, repousa suavemente sobre a grama que permeia o piso do Parque Ibirapuera aparentemente sem esforço estrutural além dos empuxos horizontais absorvidos pelo anel protendido da base, nada pequenos por sinal.

Em contrapartida, o MAC de Niterói permanece de pé em função da brilhante solução de estrutura idealizada por Niemeyer e Contarini, como que **negando tudo aquilo que foi dito por Nervi**, e contrariando até os efeitos da gravidade que determina a atração da matéria pela matéria em razão direta das massas e no inverso do quadrado das distâncias. [3ª Lei de Newton].

Nenhuma outra obra de arquitetura parece sintetizar tão claramente uma das principais premissas da arquitetura moderna, estabelecida por Auguste Perret :

“ Il faut faire chanter le point d’appui...” [É preciso fazer cantar o ponto de apoio].

Em sua obra clássica “Espaço, Tempo e Arquitetura” Giedion afirma, creio que de forma premonitória :

“No século XIX, a engenharia estrutural deu expressão aos desejos mais recônditos no inconsciente do arquiteto. No século XX as coisas são diferentes. A arquitetura está na vanguarda, e em geral exige mais do engenheiro do que esse, por ora, pode realizar.

A engenharia estrutural nasceu dos novos métodos de cálculo e do desenvolvimento da produção de metais ferrosos. Para fins de cálculo, todos os componentes estruturais eram concebidos como elementos lineares - forças obrigadas a seguir e agir em uma direção determinada – de modo que seu comportamento pudesse ser medido e calculado de antemão. Essas cargas eram conduzidas através de vigas, treliças e arcos, como através de um canal. A pré fabricação e a padronização seguiram, naturalmente, esse procedimento linear. A Torre Eiffel é o exemplo mais famoso de sua primeira aplicação.

O auge do desenvolvimento foi alcançado pouco antes de 1890, com pontes notáveis lançadas ao ar, a Torre Eiffel e o Palais des Machines, de 1889.

O arranha céu nasceu simultaneamente em Chicago. Sua construção, baseada em elementos lineares pré fabricados, vem sendo continuamente aperfeiçoada até os dias de hoje. Também os procedimentos altamente complexos para o cálculo de vigas de concreto protendido seguiram, até certo ponto, os métodos lineares próprios do século XIX.

A engenharia estrutural do século XX segue um caminho diferente. É cada vez maior a tendência de acionar todas as partes de um sistema estrutural, em vez de concentrar o fluxo das cargas em linhas ou canais únicos.

Tais sistemas podem ser livremente expandidos em todas as direções, o que provoca certas dificuldades. As cargas não podem ser facilmente controladas, e geralmente fogem ao cálculo preciso. **Somente testes por meio de modelos e simulações podem ajudar. A estrutura funde-se com o irracional e o escultural** ”⁸⁴

Bem, à parte os dons de profeta de Giedion, ao que parece, realmente ele estava vislumbrando o futuro, porque descreve em 1941 os métodos e processos utilizados por Gehry em 1997...

⁸⁴ Giedion, S. Espaço, Tempo e Arquitetura. SP : M. Fontes Ed. Ltda. 2004. Introdução pag. 10.

Frank O. Gehry

Pequena Biografia

Frank O. Gehry cresceu em Toronto Canadá e se mudou para Los Angeles junto com sua família em 1947. Estudou Arquitetura na Universidade da Califórnia onde se graduou em 1954, continuando seus estudos em Urbanismo na Universidade de Harvard. Depois de trabalhar com os arquitetos Victor Gruen e Pereira & Luckman em Los Angeles, e com André Remondet em Paris abriu sua firma Frank ° Ghery & Associates Inc. em 1962. Desde então vem desenvolvendo uma sólida carreira profissional durante quatro décadas projetando Edifícios públicos e privados na América, Europa e Ásia.

Nos anos oitenta projeta o espaço para uma exposição em Los Angeles sobre o construtivismo russo. Nesse momento sua carreira dá uma guinada e ele começa a trabalhar relações complexas a partir de sólidos simples.

Sob essa tendência se enquadram o Museu Aeroespacial da Califórnia (1984) a Escola de Direito de Loyola (1984) e as residências Winton e Schnabel todas elas nos Estados Unidos. Em 1989 recebe o prestigioso prêmio Pritzker de arquitetura, o primeiro de sua carreira.

Nos anos noventa os volumes simples se transformam as superfícies, vão se encurvando e os cantos vão se tornando menos geométricos e mais orgânicos. Enquadram-se aqui o Museu de Bilbao e a sede do National Nederlanden em Praga.

Ao repassar sua obra, se chega à conclusão que não existe um só Ghery, mas vários: aquele que realizava experimentos sobre a percepção dos objetos em perspectiva, e sobre a utilização na arquitetura de materiais baratos e marginais como a tela metálica e o papelão; aquele que introduz elementos figurativos na arquitetura e a mudança de escala dos objetos mais comuns; aquele que adota as estratégias de composição dos construtivistas russos articulando sistemas complexos baseados em peças simples; e aquele que projeta edifícios com superfícies sinuosas graças a utilização de programas de computador da Nasa.

Existe uma clara diferença entre seus primeiros experimentos e a enorme projeção midiática de suas obras atuais. Dir-se-ia que Ghery descobriu sua própria capacidade de surpreender, e por essa razão, de qualquer ponto do planeta clientes o procuram para pedir exatamente o que ele oferece: espetáculo.⁸⁵

Fig. 43 Museu Guggenheim de Bilbao

Local : Bilbao - Espanha
Arquitetura : Frank O.Gehry
Ano : 1997.

Fig. 44 Implantação

O Museu Guggenheim de Bilbao. Uma pequena mostra da produção dos arquitetos estrangeiros contemporâneos.

Segundo Gehry, “as referências e a inspiração para o projeto vieram do filme “Metrópolis” de Fritz Lang, das esculturas de Brancusi, e, sobretudo do vigor e da força que a cidade de Bilbao irradia.”⁸⁶

⁸⁵ CUITO, A.. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. Pág. 28.

⁸⁶ CUITO, A.. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. Pág. 60.

“Tive sorte de ter sido influenciado por pintores e escultores. Nunca senti que os artistas estão fazendo algo diferente de nós. Tenho percebido que há um momento, o momento da verdade, quando você decide: qual a cor, qual o tamanho, como será a composição? Então você nota que aquele momento é diferente, e o resultado será também diferente.”⁸⁷

Para resumir meu pensamento em relação à obra do Museu de Bilbao, digo que ela representa a subversão total da ordem estabelecida, ordem essa existente até o momento em que o Autor definiu os parâmetros originais do projeto.

Sua concepção representa um momento importante do percurso profissional do arquiteto canadense, talvez até o ápice, e a conclusão de uma série de experimentos realizados em torno das proposições volumétricas obtidas a partir de composições com sólidos simples. A obra impacta pela volumetria e pelo brilho.

Foi inteiramente revestido com 60 toneladas de titânio comprado na Rússia a preço convidativo, impressionando também por causa do contraste com o entorno e pela aparência do metal de revestimento, que além de tudo muda de tonalidade conforme o ângulo de incidência da luz do sol sem perder o brilho.

O risco é a linguagem utilizada se tornar repetitiva e cansativa, não resistindo ao julgamento do tempo, transformando-se como alguns artigos de consumo imediato em objeto descartável

A verdade é que a obra situada às margens do rio Nervión, atraiu a atenção, embora não seja a única realizada na cidade com o objetivo de revalorizar a região. O projeto de revitalização da faixa portuária é do Arquiteto César Pelli, e o projeto do aeroporto, do Arquiteto Santiago Calatrava.

O objetivo de incrementar o turismo foi atingido graças ao conjunto das obras e ao investimento de milhões de dólares da parceria público privada firmada entre o Círculo de Empresários Bascos, o Setor Público e a Fundação Solomon R. Guggenheim provedora do Museu.

⁸⁷ VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. Pag. 95

Voltando ao início desta Tese onde Picasso é citado, Naomi Stungo afirma que, “exatamente como os cubistas no início do Século XX que fragmentaram a perspectiva do ponto único na qual se alicerçava a Arte Ocidental, a arquitetura de Gehry no final do século, apresenta os prédios como uma assombrosa desarmonia, uma experiência de todos os ângulos ao mesmo tempo.”⁸⁸

Gehry começa a projetar pelo croqui. Só depois passa para o estudo volumétrico.

Fig. 45 Croqui de Gehry

Fig. 46 Maquetes

Mas o Museu de Bilbao, assim como outras obras do arquiteto, não seria viável não fosse pela descoberta e posterior utilização de um programa de computador desenvolvido na França, o **CATIA** utilizado na Indústria Aeronáutica para projetar o jato Mirage.

Fig. 47 Imagens geradas por computador

A estrutura é formada por uma trama de treliças, vigas e pilares metálicos que acompanham a forma. É conhecida nos Estados Unidos como “Steel Frame”. Traduzida na acepção do termo, a palavra significa “armação (ou estrutura) de aço”, na nossa língua, estrutura metálica. Difere, porém, do Steel Frame sistema autoportante de construção a seco conhecido e já utilizado aqui no Brasil, formado por uma malha ortogonal de aço galvanizado que utiliza perfis “U” de chapa dobrada distantes entre si de 400 a 600 mm.

⁸⁸ STUNGO, N. **FrankGhery**. Carlton Books Limited - Cosac&Naify. Londres. 1999 SP. 2000. Pág. 11.

Esse sistema criado e desenvolvido nos Estados Unidos, Europa, Ásia, Austrália e Nova Zelândia é muito utilizado na costa oeste americana onde Gehry cresceu, por causa dos movimentos de terra muito frequentes e da grande resistência e flexibilidade da malha, e lá é conhecido como “Light Steel Frame”.

Fig. 48 Estrutura

Fig. 49 Estrutura

Fig. 50 Estrutura

O chamado Light Steel Frame se comporta como as grelhas que se deformam flexionando ao mesmo tempo a trama adjacente que envolve o ponto de carga.

Mais uma vez lembro da extraordinária antevisão de Giedion :

“A engenharia estrutural do século XX segue um caminho diferente. É cada vez maior a tendência de acionar todas as partes de um sistema estrutural, em vez de concentrar o fluxo das cargas em linhas ou canais únicos.

As cargas não podem ser facilmente controladas, e geralmente fogem ao cálculo preciso. Somente testes por meio de modelos e simulações podem ajudar. A estrutura funde-se com o irracional e o escultural”

Esses sistemas são totalmente diferentes dos nossos, pouco conhecidos aqui, e viáveis devido aos recursos dos modernos programas de computadores obviamente muito avançados.

Infelizmente nossa realidade é mais pobre, não há investimento suficiente em pesquisa, e as conseqüências afetam diretamente o mercado consumidor dos serviços prestados pelos profissionais da área de arquitetura e engenharia.

Estaremos também, intoxicados de concreto armado? De forma alguma. Cada obra tem seu momento, seu lugar, seu sistema e material estrutural convenientes.

E o que será mais conveniente: a forma livre ou a forma otimizada e mais econômica de uma estrutura? Poderia o Museu de Bilbao ser construído em concreto armado?

O que irá determinar a melhor solução é o projeto de arquitetura, a verdadeira síntese das condicionantes que envolvem o programa, o terreno e sua localização, a legislação de Município, Estado e União, as condições econômicas do investidor, as visuais privilegiadas e a criatividade dos profissionais envolvidos com o projeto, de modo que cada caso deverá ser analisado separadamente.

Porém, deverá sempre estar assegurada a total liberdade de criação, porque nada, nenhum programa de computador substitui a mão do artista no momento em que ele, inspirado, coloca no papel aquilo que virá a ser um quadro, uma sinfonia, uma obra de arquitetura, ou, moldada em argila, mármore, madeira ou metal, uma singela ou exuberante escultura.

As opiniões dos colegas a respeito da obra, três arquitetos professores e um engenheiro, este último, decano dos profissionais e professores de engenharia no Brasil, cada qual com uma visão particular, coletadas durante a pesquisa, são relatadas na forma dos textos abaixo:

1º Prof.º **Dr. Augusto Carlos de Vasconcelos** Engenheiro e Professor das Universidades: Escola Politécnica da USP, FEI, FAU USP, Mackenzie; fundador da primeira fábrica de estruturas pré-moldadas de concreto protendido no Brasil; Prof. Convidado para avaliação de Teses de Mestrado e Doutorado na EPUSP e na Escola de Engenharia de São Carlos; recebeu prêmio Emilio Baumgart do Instituto Brasileiro do Concreto; foi membro de ligação (Liaison Member) entre as Normas Brasileiras e as Normas Americanas do American Concrete Institute (ACI); escolhido o engenheiro do ano pelo Instituto de Engenharia, e, em 2003 recebeu em Vancouver o título de Honorary Member do American Concrete Institute.

I - Estaremos intoxicados de concreto armado ?

O uso extensivo do concreto armado em substituição ao aço se deveu a uma crença mentirosa de que as estruturas de concreto armado eram eternas e não necessitavam de manutenção.

Essa mentira foi percebida muitos anos depois de construídas as primeiras grandes estruturas de concreto armado, pelo aparecimento de fissuras, carbonatação do concreto e corrosão das armaduras dentro da massa de concreto. Só então se percebeu que, dependendo do ambiente externo, algumas estruturas se deterioravam rapidamente e exigiam reforços e proteção. Estruturas sujeitas a ambientes marinhos se deterioravam mais depressa do que outras construídas em ambientes secos afastados da orla marinha. Os cloretos que impregnam o ar marinho, penetram no concreto, atingem a superfície do aço dentro do concreto, destróem a camada passivadora de óxido ferroso que recobre o aço recém adquirido e aplicado na obra. Esses cloretos são capazes de criar diferenças de potencial entre pontos da superfície de uma barra de aço e provocar correntes elétricas destruidoras do equilíbrio químico. Em consequência são produzidos outros óxidos hidratados de ferro, com volumes várias vezes maior do que o do ferro que lhes deu origem. Tais óxidos assim formados criam espaços para seu alojamentos, expulsando o concreto que os envolvem. Esse concreto, submetido a esforços de dentro para fora, rompe ao longo do comprimento da barra oxidada, criando caminho livre para novas penetrações de cloretos e de oxigênio.

O concreto, que normalmente possui $pH = 9$ devido à presença de hidróxido de cálcio, vai perdendo aos poucos sua alcalinidade devido à formação de carbonato de cálcio pela absorção do CO_2 do ar. Como o carbonato de cálcio é neutro ($pH=7$) resulta uma diminuição do pH do concreto e com isso é destruída a camada passivadora de óxido ferroso na superfície das barras. Assim, o aço se torna vulnerável à oxidação.

Constatou-se que muitas estruturas se tornam muito vulneráveis conforme o ambiente a que estão expostas. Se isso fosse conhecido nos primórdios do uso do concreto armado, talvez o aço continuasse sendo utilizado com preferências.

A crença de que as estruturas de concreto eram mais resistentes ao fogo do que as de aço ou madeira também contribuiu para que as preferências se voltassem para o concreto armado, que conduziam a prêmios de apólices de seguro mais econômicas.

Outro fator favorável ao uso do concreto armado foi a possibilidade ilimitada de criação de formas novas e variadas nos projetos arquitetônicos.

O uso da protensão permitiu ampliar os limites de utilização além dos limites usuais válidos para o concreto armado, graças à redução da fissuração, das deformações (deslocamentos) e das dimensões das peças.

O aço continuava exigindo pinturas a cada ano, prêmios mais elevados das apólices de seguro e limitação da criatividade dos arquitetos.

O fator decisivo para o desenvolvimento do concreto armado no Brasil foi a crença de que esse material de construção não exigia mão-de-obra especializada. Poderia ser produzido na própria obra, sem preocupação com o peso no transporte das peças, pois as peças eram moldadas no próprio local definido pelo projeto. Os operários apenas tinham que carregar o concreto misturado em carrinhos e lançá-lo dentro das fôrmas no próprio local. Não era exigido nenhum treino especial dos operários. Os impostos também eram menores do que os aplicados no transporte dos produtos industrializados.

Todos esses fatores contribuíram para uma preferência do concreto armado em relação ao aço ou madeira.

Vem agora a questão inicial: Estamos intoxicados de concreto armado ?

De certa maneira, SIM. Os arquitetos preferem formas curvas, o que torna mais complicado o projeto com estrutura metálica. Ainda se acredita na maior durabilidade das estruturas de concreto, principalmente depois que as normas começaram a introduzir exigências para o comportamento das estruturas em serviço, em dependência do tipo de ambiente de exposição. Com o uso de computadores, tornou-se possível calcular qualquer tipo de estrutura, seja de concreto ou de aço, tornando-se viável o controle da fissuração e dos deslocamentos, para qualquer tipo de solicitação, inclusive fogo, sismos, furacões e efeitos térmicos.

O prazo de construção tem sido outro fator a ser considerado na escolha do material de construção. Prazo significa investimento e isto pode ser decisivo para o retorno do capital empatado. Enquanto as fundações e infraestrutura estiver sendo executada no canteiro de obras, a estrutura, quer seja de aço ou de concreto, pode estar sendo executada em fábricas especializadas, encurtando os prazos de execução. Isto pode ser viável qualquer que seja o material escolhido, dependendo do projeto e do planejamento da construção. O exemplo do Museu de Bilbao é típico: foi escolhido o aço como material de construção, não obstante as formas curvas complicadas e as dimensões enormes das peças. Poderia ter sido escolhido o concreto ao invés do aço ? Claro que sim, mas a escolha do aço foi mais bem acolhida.

Portanto, pode-se concluir que nem sempre é o concreto o material de construção mais adequado em qualquer tipo de projeto. O essencial é que o material de construção seja escolhido pelo próprio projetista no ato de lançar sua estrutura. O projeto deve ser desenvolvido de acordo com o material escolhido e nunca no final do projeto arquitetônico. Não são todos os arquitetos que se deixam “intoxicar” pelo concreto....

II – O que será mais conveniente: a forma livre ou a forma otimizada e mais econômica de uma estrutura ? O Museu de Bilbao poderia ser de concreto armado ?

Quando se inicia um cálculo de dimensionamento a partir de um projeto arquitetônico, escolhem-se os elementos resistentes mais convenientes e seus apoios, prevendo dimensões compatíveis com as exigências do arquiteto.

Essas dimensões não são as definitivas. Pode acontecer que não sejam suficientes para suportar as cargas previstas com a categoria dos materiais prescritos. As dimensões são então alteradas e, se forem incompatíveis com as exigências de projeto, parte-se para outra escolha da estrutura resistente, até que se consiga algo aceitável. Pode acontecer ainda que as dimensões admitidas sejam excessivas, sendo possível reduzi-las para obter uma estrutura mais econômica. Para um principiante isto pode ser um trabalho descomunal, exigindo várias tentativas frustradas.

Para um profissional treinado, quase sempre a primeira tentativa é satisfatória, sendo possível alguma redução em prol da economia. Essas várias tentativas para se alcançar a solução melhor é o que se chama “otimização” do projeto. Pequenas alterações da arquitetura podem possibilitar grandes melhorias na escolha da melhor estrutura.

Quando o projeto permitir várias soluções satisfatórias, uma delas pode ser melhor pelo máximo aproveitamento dos materiais, pela maior facilidade de execução, pela maior rapidez de concretagem ou pela melhor aparência final. Isto também faz parte da otimização.

Há casos, entretanto, em que se torna difícil até mesmo encontrar uma estrutura que satisfaça a todas as exigências, resultando soluções complexas de difícil execução. O uso de protensão pode constituir a única solução possível. Em outros casos pode ser necessário realizar a construção em etapas, forçando a estrutura a receber parte do carregamento numa situação em que a peça ainda esteja incompleta. O restante do carregamento, neste caso, só será aplicado depois da concretagem final da 2ª etapa. Tudo isto constitui recursos possíveis para redução de dimensões até alcançar as exigências incontornáveis.

Quando todos os recursos tiverem sido esgotados, será necessário escolher outros materiais: concreto leve, alumínio, criação de vazios...

No caso do Museu de Bilbao, a estrutura é tão complicada que para sua descrição foi necessário construir uma maquete e determinar as coordenadas dos pontos capazes de defini-la, por meio de medida direta. A tentativa de definir matematicamente as superfícies projetadas se mostrou inaplicável.

2º **Prof.^a Dr.^a. Eunice Helena Sguizzardi Abascal.** Arquiteta e Professora da Universidade Mackenzie.

“É preciso entender que a produção arquitetônica contemporânea hoje, é uma produção que trilha caminhos experimentais, quando a relação forma, espaço e estrutura são diferenciados.

A produção contemporânea não se pauta por uma única realidade dogmática relativa a produção de arquitetura e vários caminhos experimentais relacionados não apenas à estrutura e à matéria, mas ao espaço, as qualidades do espaço, qualidades perceptivas que ele é capaz de determinar, estão presentes na constituição dos pontos de partida que levarão à arquitetura. Então, ao indagarmos se as suposições que Pier Luigi Nervi são hoje compatíveis e pertinentes, nós precisamos pensar a respeito dos limites dessa compatibilidade e pertinência.

Há arquiteturas que ainda são pautadas por um experimentalismo estrutural amplo, vamos citar, por exemplo, as obras de Santiago Calatrava. No entanto, se vamos estudar com mais profundidade o próprio Calatrava, vamos perceber que essas obras de arquitetura não são pautadas no interesse exclusivo por soluções estruturais; vem junto alusões simbólicas, relações com a natureza, apropriação dos elementos naturais na constituição da estrutura.

Então há toda uma constituição de pensamento simbólico e metafórico embutida na organização, na determinação da estrutura. Não existe hoje um raciocínio estrutural puro descontaminado de relações com outros determinantes arquiteturais.

Ao estudar a obra de Frank Gery, mais especificamente o Museu de Guggenheim de Bilbao, podemos considerar que ela é concebida a partir de um processo de experimentação, ao mesmo tempo formal, plástico e espacial, dá para ver aí outros determinantes, tais como: a relação entre a espacialidade interna obtida e o entorno. A inserção do objeto arquitetônico no lugar é tão, ou mais importante do que a solução estrutural.

Então a concepção do Museu de Guggenheim é compreendida a partir dos modelos tridimensionais que o arquiteto elabora ao longo do processo projetivo. Ele não parte exclusivamente do desenho, da representação bidimensional; ao contrário, faz todo um caminho de experimentação estrutural, física, material, espacial, com maquetes e modelos tridimensionais que permitem o entendimento das forças presentes no espaço definido pela estrutura, e que levam a um entendimento preciso do espaço gerado.

Esses elementos servem também para definição do tipo de suporte ou determinantes estruturais necessários, para que estes projetos possam permanecer em pé e cumprir dignamente sua função estrutural.

Esses experimentos permitem entender a arquitetura não apenas como pilar e viga, mas como um complexo constituído por peles, envoltórias, colunas, espaços que se determinam clássica espacial e formalmente por intermédio dessa mesma estrutura.

Os elementos estruturais são concebidos plasticamente do ponto de vista da geração de determinados espaços previstos, e é nisso que a gente tem que pensar, para entender um pouco melhor a produção dos arquitetos atuais, que muitas vezes são considerados meros formalistas.

Se pensarmos no expressionismo de Antoni Gaudí que a primeira vista também é considerado apenas um formalista, vamos entender a relação imediata e muito próxima que Gaudí desenvolve em termos de forma, expressão espacial e estrutura.

Estaremos então, entendendo o mesmo princípio que está presente, no caso, nas obras do Arquiteto Frank Gehry.”

3º Prof.º **Dr. Wilson Flório** Arquiteto e Professor da Universidade Mackenzie.

Analisar a obra de Frank Gehry não é tarefa fácil! Isso porque a materialidade de suas obras está baseada em muitos aspectos tecnológicos que antecedem as questões de linguagem.

Para compreender o que esse arquiteto faz, deve-se percorrer o mesmo trajeto traçado por ele, descobrindo como ele foi tomando as decisões projetuais, de acordo com as dificuldades e oportunidades do momento.

Posso afirmar que as obras de Frank Gehry são muito mais do que obras esculturais com a intenção de impressionar o grande público. Não é apenas uma obra para a "sociedade do espetáculo" como diria Guy Debord, também não é fruto apenas das possibilidades dos recursos computacionais.

Gehry tem trilhado caminhos únicos na criação de seus projetos, que vão desde a hibridação de recursos manuais computacionais até a fabricação de modelos manuais e digitais tridimensionais em grandes formatos, destinados a análise de um conjunto de aspectos técnicos, estéticos e perceptivos.

Mas há dois aspectos que interessam diretamente à sua pesquisa: as inovações tecnológicas construtivas e os modelos digitais 3D.

De fato as inovações de Gehry estão ligadas mais ao processo construtivo do que ao sistema estrutural. A estrutura de Bilbao é convencional porque é formada por barras (praticamente todas), retas, de 3 metros de comprimento que constituem a estrutura.

A curvatura externa deve-se à uma estrutura secundária, constituída por perfis tubulares que estão conectados a prolongadores soldados à estrutura primária.

Sobre esses perfis tubulares da estrutura secundária se apoia um conjunto de perfis metálicos retos formando uma estrutura terciária, sobre a qual são colocadas as chapas metálicas que revestem o edifício. Portanto, em Bilbao, o que dá a aparência curvilínea não é a estrutura primária e sim as chapas metálicas sobre a estrutura terciária.

Mas a título de comparação, no Experience Music Project, em Seattle, Gehry cria uma estrutura em pórticos, curvilínea, também convencional, mas com grande complexidade. Posso afirmar que, sem dúvida, Gehry cria estruturas convencionais, mas fabricadas por processos inovadores CAD-CAM.

As maiores inovações estão no processo de projeto, quando o arquiteto utiliza modelos digitais tridimensionais para detalhar todos os componentes do edifício. Além disso, os projetos complementares gerados pelos outros parceiros de projeto são enviados ao arquiteto e incorporados em um único banco de dados, em um único modelo digital, que concentra todas as informações de todos os projetos feitos.

Assim, o modelo 3D permite visualizar e compatibilizar as interferências de todos os elementos em três dimensões, o que favorece a programação de todas as atividades a serem realizadas durante a construção.

Os modelos digitais fornecem informações de toda a geometria de cada perfil metálico que será cortado pelo sistema CAM (computer aided manufacturing).

As chapas metálicas são cortadas a laser ou plasma, de acordo com a espessura da chapa, e depois soldados e enviados ao canteiro de obras.

4º **Prof.º MSc. Silvio Stefanini Sant’anna.** Arquiteto e Professor da Universidade Mackenzie.

A resposta da primeira pergunta (o museu de Bilbao é desconstrutivista?) pode resumidamente ser sim. O Bilbao é uma obra desconstrutivista por romper estruturas padrões e consagradas, a partir de novas formas de rever e submeter o processo projetual do arquiteto. No entanto, esta é uma afirmativa dentro de um conceito desenvolvido ao longo de um período em que desenvolvi o meu mestrado sobre a arquitetura desconstrutivista. Vale lembrar que o desconstrutivismo não trata de um movimento arquitetônico isolado. Assim como o modernismo, estamos falando de mudanças sociais, culturais, econômicas e artísticas onde arquitetura na sua característica renovadora e avant guard responde as expectativas da sociedade.

Quanta a estrutura, não se trata de avaliar se está correta ou não. Duas questões devem ser levantadas no sentido de entender a questão estrutural do Bilbao:

A plástica formal pretendida permitia outra forma estrutural como o pórtico ou a modelagem em concreto?

*Foi possível conseguir leveza e a ruptura ortogonal da forma, graças ao sistema de **plataform ballon** desenvolvido em steel frame nos E.U.A. e muito utilizado principalmente nas regiões onde os terremotos exigem sistemas leves e resistentes. Ou seja, o desenvolvimento tecnológico permite a busca de sistemas estruturais capazes de criar novas informações e novos interesses. Como no caso das pirâmides, a estrutura me parece perfeita.*

A familiaridade do arquiteto com o sistema estrutural proposto não acaba por ser um facilitador da concepção da plástica formal?

Obviamente, Frank Gehry, arquiteto canadense radicado em Santa Mônica-Los Angeles Estado da Califórnia, se apropria desse paradigma estrutural para desenvolver experimentações em seu trabalho. Graças a mobilidade estrutural permitida por esse sistema, vem difundindo seu trabalho de forma única e diferenciada por todo o mundo, como temos visto em várias publicações.

Nota-se em relação às obras executadas a partir dos projetos elaborados por Pier Luigi Nervi, Eladio Dieste e Eduardo Torroja, uma observância irrestrita aos postulados do primeiro, que estabelecem para efeito da concepção da arquitetura e da estrutura, não como condição “sine qua non” mas como condição desejável, a resistência pela forma.

Não creio, entretanto, que tais conceitos não façam parte do provavelmente imenso repertório de conhecimento dos arquitetos Oscar Niemeyer e Frank Gehry.

Em relação a este último, verdade seja dita, se não foi o primeiro foi um dos pioneiros a se libertar da tirania do ângulo reto presente nas quinas formadas pelas paredes e pisos paralelos, produzindo obras por assim dizer “radicais” onde o espaço se amolda e se dilui de forma vaga e imprecisa entre as superfícies de vedação.

Porém, não acredito que os conceitos que estabelecem a conveniência da resistência pela forma estejam ultrapassados, e definitivamente enterrados como idéias que não encontram rebatimento na produção dos arquitetos contemporâneos.

Senão, vejamos : em um passado não muito distante, Buckminster Fuller arquiteto e designer americano (1895-1983), inventor da cúpula geodésica, foi o Autor do projeto do Pavilhão dos Estados Unidos na Expo 67 realizada em Montreal no Canadá.

Nada me parece tão eloqüente em se tratando de resistência pela forma quanto a invenção de B.Fuller; e só aqui em São Paulo existem dois significativos exemplos : a cobertura do terraço do embasamento do Conjunto Nacional (projeto Arqº David Libeskind) e a cobertura do saguão de entrada da sede social do Clube Paineiras do Morumbi (Arqº Paulo Bastos).

Fig. 51 Pavilhão dos Estados Unidos na Expo 67

Para mim, a questão se encontra agora suficientemente esclarecida pela frase lapidar de Giedion : **“a estrutura funde-se com o irracional e o escultural”** porque cada vez mais, a arquitetura se aproxima da escultura, **fato em si que não pode ser considerado um desvio de seus objetivos principais.**

Alguns anos depois, em 1998, o Arquiteto Inglês N.Grimshaw lançou mão da solução da estrutura geodésica para cobrir o que poderia ser visto apenas como uma estufa de plantas construída em St. Austell na Cornuália Britânica, na verdade é bem mais que isso: trata-se de um centro com 23.000 m² de área, voltado para estudos relacionados com o meio ambiente, contando com extenso programa funcional.

Cada módulo hexagonal é constituído por uma cápsula transparente almofadada, fabricada com um polímero especial chamado ETFE, cujo peso corresponde aproximadamente a 1% do peso do vidro.

Fig.52 The Eden Project

Fig. 53 Vista Interna

Percebe-se que hoje, graças à inesgotável criatividade dos arquitetos e aos recursos oferecidos pelos modernos programas de computador capazes de simular tridimensionalmente por mais complexa que seja qualquer forma idealizada, a frase de Corbusier (“...os arquitetos em breve não terão mais nada para fazer”) não se transformou em mais uma triste realidade dos nossos dias.

Duas obras extraordinárias.

Com tantos exemplos de boa arquitetura, se necessário for escolher a melhor, ou as duas melhores, será necessário pensar muito para tomar uma decisão. Mas não queria deixar de enaltecer no final desta Tese, a genialidade de Oscar Niemeyer e a elegância de Christian Menn, presentes respectivamente na Bolsa do Trabalho de Bobigny, um dos edifícios mais belos do mundo, e na Ponte Ganter, graciosa como um pássaro sobrevoando um vale nos Alpes Suíços.

Fig. 54 Bolsa do Trabalho de
Bobigny

Fig. 55 Vista Interna

Fig. 56 Ponte Ganter

A relação do que está acontecendo no exterior com a realidade brasileira:

O panorama atual da arquitetura internacional reflete hoje uma clara tendência de mudança do pensar e fazer arquitetura, na direção oposta de tudo que foi produzido até o passado mais recente. Não vigoram mais os postulados que determinavam a regularidade, a ortogonalidade e a simetria dos partidos arquitetônicos.

Com o auxílio dos modernos softwares, hoje se consegue projetar e simular tridimensionalmente qualquer forma, viabilizando integralmente a execução da obra futura também porque as técnicas construtivas assim o permitem.

O Desconstrutivismo.

Baseado nas teorias dos filósofos franceses como Jacques Derrida, o movimento chamado Desconstrutivismo apareceu em 1990, e representa hoje o caminho trilhado pelos jovens arquitetos europeus e americanos, que tem no arquiteto americano Peter Eisenman o seu teórico principal, um dos arquitetos do chamado “grupo dos cinco” junto com Méier, Hejduk, Gwathmey e Graves.

Não acredito em conservadorismo quando se faz arquitetura, porém, se por um lado não faz sentido construir hoje residências com pátios internos, arcos atirantados e os afrescos das casas da Renascença, por outro também fica difícil entender colocações do tipo “ *o meu melhor trabalho não tem objetivo. Quem se importa com a função?* ” [Peter Eisenman]⁸⁹.

A citação creditada à Eisenman está na página 155 do livro “Arquitetura Comentada” de autoria da Prof^a Carol Strickland, Ph. D. pela Universidade de Michigan. Como acreditar em trabalhos sem objetivos, ou na forma sem função?

Fig. 57 UFA Cinema Center

No parágrafo abaixo na mesma página :
“... mais tarde (Eisenman) construiu várias casas **inabitáveis** designadas por algarismos romanos para servir de mostruário às suas teorias... ???!”⁹⁰

Seguidores da mesma linha, os arquitetos Wolf Prix nascido na Áustria e Helmut Swiczinsky na Polônia, do escritório COOP Himmelblau, são autores de alguns projetos de leitura complicada e forte impacto visual, como o “UFA Cinema Center” em Dresden na Alemanha (1996 – 1998).

⁸⁹ STRICKLAND, C. Arquitetura comentada. Ediouro. Rio de Janeiro. 2003. Pág. 155.

⁹⁰ STRICKLAND, C. Arquitetura comentada. Ediouro. Rio de Janeiro. 2003. Pág. 155.

Uma arquitetura com tais soluções de espaço necessitará forçosamente de programas sofisticados para resolução da estrutura.

A arquitetura de Santiago Calatrava extremamente consistente em relação às soluções estruturais e de significativo efeito visual que utiliza a estrutura como ornamento, tende mais para uma linha “organicista”, reproduzindo às vezes o desenho dos esqueletos dos animais, galhos de árvores etc.

Calatrava atribui importância fundamental às questões estruturais, porque após concluir os estudos de arquitetura em Valência, ainda foi estudar Engenharia em Zurique onde se Doutou em 1981 com uma Tese sobre a maleabilidade das estruturas.

É dele o belíssimo projeto do novo Terminal do Aeroporto de Sondika . A obra faz parte dos planos de reformulação da cidade de Bilbao e tem 29.000 m² de área construída.

Fig. 58 Terminal do Aeroporto de Sondika

Fig. 59 Terminal do Aeroporto de Sondika

O significado da beleza.

No livro *Razon y ser de los tipos estructurales*, Eduardo Torroja Miret entremeia conceitos claríssimos a respeito do comportamento dos mais diversos sistemas estruturais com os belíssimos desenhos dos arquitetos G. Echegaray e M.Barbero, e com alguns textos escritos de forma extremamente inspirada como aquele em que ele se refere ao significado de algumas obras de arte :

“ Porque não se pode esquecer que um dos encantos da beleza consiste precisamente em não derivar, obrigatória e dedutivamente, dos processos lógicos. Podemos encontrar leis gerais que todo Artista carrega em seu coração; porém, nunca suficientes para determinar a produção artística como consequência obrigatória de um sistema de equações. Nesse caso, o problema queda-se indeterminado.

À figura feminina não basta cumprir todos os cânones estabelecidos pelas medidas e proporções perfeitas apontadas pelos eruditos, se lhe falta a personalidade encontrada no brilho inteligente do seu olhar e na expressão dinâmica do seu sorriso.

Fig. 60 Victoria de Samotracia

Da mesma maneira à toda e qualquer obra é necessário personalidade.

É inútil sobrecarrega-la de regras e regrinhas ou buscar somente justificativas relacionadas à sua resistência e funcionalidade.

A Victoria de Samotracia não poderá nunca voar, porque é de feita de pedra,e porque a superfície de suas asas é aerodinamicamente insuficiente para tanto; todavia, em ruínas como se encontra, sem asas nem braços, nem cabeça, será sempre um verdadeiro compendio de todos os sonhos de superação e predomínio dos idéias mais elevados sobre a matéria !!!!”

Em vista das razões apontadas por Torroja, um ponto parece claro como o cristal, adquirindo uma importância e um significado tão grandes, que pode ser colocado como uma das diretrizes do pensamento que norteou a redação desta Tese:

Em momento algum duas coisas deverão ser esquecidas :

1. Sempre e em qualquer circunstância deverá estar assegurado ao Artista o seu direito de expressão, desde que presentes na arquitetura do edifício e na sua estrutura, a beleza simples e natural das obras que se eternizaram desde os primórdios da História da Humanidade.

Para tanto, como diz Salvadori, “a separação entre a tecnologia e a arte é desnecessária e incorreta porque uma não é inimiga da outra... em nenhum lugar, isso é mais verdadeiro do que na arquitetura e na engenharia, um casamento onde a ciência e a beleza se combinam para satisfazer a algumas das necessidades físicas e espirituais básicas da Humanidade”.⁹¹

2. Por mais aprimorados e evoluídos que sejam os meios de concepção, representação do espaço e sua solução técnica, jamais a estrutura deverá ser pensada como simples suporte da forma arquitetônica pelas razões explicitadas no parágrafo acima.

Sua importância (da estrutura) é muito grande para que as questões técnicas fiquem relegadas a um plano secundário. A torre Eiffel, símbolo de Paris, não faz nenhuma concessão à decoração e, no entanto sua importância não só como obra de arquitetura, mas como elemento componente e enriquecedor da paisagem é inegável.

A concepção arquitetônica e estrutural integradas, conferem ao edifício homogeneidade e adequação à função, porque, se é destinado ao homem, deverá ser construído de forma a satisfazer seus ideais mais elevados, oferecendo abrigo, conforto e segurança a quem dele se utiliza.

⁹¹ SALVADORI, M. **Porque os edifícios ficam de pé**. Martins Fontes. São Paulo. 2006. pág. 343.

Espero que as modernas tendências não determinem uma volta a um passado distante, quando não se atribuía a devida importância à solução estrutural, não por falta de intuição, mas sim de conhecimento.

Voltando a citar Eladio Dieste:

“O uso sábio, humano e imaginativamente rico do espaço, produz uma intensa felicidade...”

Estou de pleno acordo.

As lições da Natureza

“ Muitos já tentaram definir o poder absoluto da Natureza.

Alguns o veneram como Deus, outros o chamam verdade, outros o convertem em filosofia pela qual tentam sondar suas verdades mais profundas.

Tais tentativas de defini-lo são apenas esforços para escapar aos seus efeitos.

Todas as forças da Ciência tem sido incapazes de conquistá-la, pois ela é demasiadamente mística, vasta, poderosa, e está intensamente presente em tudo à nossa volta como o peixe que, embora viva na água não se dá conta dela. E nós, tão completamente mergulhados em suas bênçãos estamos, que até tendemos a esquecer que ela existe.. .”

Sensei Koichi Tohei.

O texto, escrito por um Grande Mestre de Aiki Do (Arte Marcial do Japão) ilustra um pouco do raciocínio análogo às imagens deste capítulo. Estamos tão completamente mergulhados nas bênçãos da Natureza que às vezes a esquecemos por completo ...

Todavia, *Mater et Magistra*, ela nos fornece lições valiosíssimas, em se tratando principalmente da forma de alguns de seus elementos e da maneira como resistem à ação da gravidade.

Arquitetura Orgânica.

A Arquitetura Orgânica não é propriamente uma corrente nova e contestadora do chamado movimento moderno. É algo tão vivo e exuberante quanto a Natureza e, segundo David Pearson, “não se trata de um movimento em uma só direção, mas algo diverso de tudo que é convencional, contraditório e mercurial.”⁹²

Na seqüência Pearson afirma: “a arquitetura orgânica está enraizada na paixão pela vida, pela Natureza e pelas formas naturais, e está saturada da vitalidade do mundo natural com suas formas biológicas e respectivos processos.

Enfatizando a beleza e a harmonia, suas formas curvilíneas tão cheias de expressão são simpáticas ao nosso corpo, à nossa mente e espírito. Dentro de uma obra construída a partir de uma arquitetura organicista, nos sentimos melhor e mais livres.

O fato é que a vertente arquitetônica que utiliza a linguagem do ângulo reto marca registrada do Século XX, é um reflexo dos valores racionalistas próprios e característicos da Sociedade Industrial. A geração pós industrial está acordando para um mundo novo, que vai buscar no passado os ecos de uma antiga e sapientíssima visão. A volta do desenho orgânico simboliza ao mesmo tempo a liberdade do novo pensar e a viva expressão da esperança em um futuro melhor.”⁹³

E concordando com os princípios que definem a relação íntima entre a resistência e a forma, mais adiante escreve: “utilizando o princípio da resistência pela forma, as superfícies curvas tipo arcos, abóbadas, cúpulas e esferas, são mais fortes, mais eficientes e mais econômicas do que as estruturas retilíneas. Os materiais estruturais, tanto os antigos quanto os atuais, podem ser usados nas formas orgânicas.

⁹² PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 8.

⁹³ PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 8.

As recentes estruturas leves formadas por tirantes com cobertura de fiber teflon, imitam a solução das tendas dos índios norte americanos, enquanto que estruturas de superfície curva voltam-se agora na direção de uma sabedoria vernacular antiqüíssima.

E como uma onda que arrebenta [the breaking wave], união do desenho orgânico com o manejo sustentável , este novo e excitante paradigma varrerá o pó secular da superfície do globo mudando para melhor a arquitetura e o design do Século XXI.”⁹⁴

Devo citar Gaudi como o maior dos Arquitetos Organicistas, para quem a linha reta pertencia aos homens e a curva a Deus.⁹⁵

Fig 61 Casa Milá

Suas obras, onde encontramos cabeças de lagartos e muito mais coisas do gênero, expressam claramente essa linha de pensamento como a Casa Milá situada em Barcelona e declarada pela Unesco Patrimônio Cultural da Humanidade.

Outros arquitetos seguiram a mesma linha de Gaudi como o americano Frank Lloyd Wright, para muitos, o verdadeiro “Pai” da Arquitetura Organicista e um dos maiores arquitetos de todos os tempos. Wright era também palestrante, escritor e professor. Um de seus alunos, Bruce Goff, é autor de uma obra muito interessante: trata-se de um volume em espiral que envolve um mastro central de onde pendem os tabuleiros dos pisos como se fossem bandejas.

Foi analisada pelo AIA (Instituto de Arquitetos Americanos) da seguinte forma :

⁹⁴ PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 9.

⁹⁵ PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 34.

Fig. 62 Bavinger House

“A casa projetada por uma mente tão livre e desimpedida quanto a paisagem das pradarias americanas, ergue-se em espirais alegres contra o fundo azul do céu de Oklahoma, brotando do terreno em homenagem à integração perfeita do espírito humano com a Natureza, unidos por sua arquitetura.”⁹⁶

É preciso, entretanto, prestar um pouco de atenção para não confundir a Arquitetura Orgânica com o Movimento recente denominado Desconstrutivismo, que se baseia na assimetria e na desorganização das formas, já analisado nesta Tese, e cujos principais expoentes como vimos, são P.Eisenman, F.O.Gehry, D.Libeskind, R.Koolhaas e Z.Hadid. As diretrizes desse Movimento são totalmente diferentes dos princípios seguidos pela Escola Organicista.

⁹⁶ PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 39.

Algumas obras da linha “organicista”

Flynn McCone Residence

Daniel Liebermann

Local : Estados Unidos

Data : 1889

Embryonic House

Javier Senosiain e Luis Raul Enriquez Montiel

Local : México

Data : 1992

Hussain-Doshi Gufa

Balkrishna Doshi

Local : Índia

Data : 1993

Truss Wall House

Eisaku Ushida and Kathryn Findlay

Local : Japão

Data : 1993

Soft and Hairy House

Eisaku Ushida & Kathryn Findlay

Local : Japão

Data : 1994

Uchino Community Center

Shoei Yoh

Local : Japão

Data : 1995

Comparações entre estruturas naturais e estruturas de alguns edifícios.

Fig. 63 Montanha

Fig. 64 Complexo Gizé

Montanha x Complexo Gizé

Local: Egito

Fig. 65 Croqui do autor

Fig. 66 HSBC Hong Kong

Ilustração da estrutura de uma árvore com suas raízes tronco e copa, e a estrutura de um Edifício alto, cujas fundações estão para a supra estrutura como as raízes estão para a árvore. A forma dos galhos obedece à uma Lei Universal que determina uma espessura maior no engaste com o tronco do que na ponta em balanço.

Fig. 67 Croqui do autor

Fig. 68 Ascot Racecourse (Inglaterra, 2006)

Fig. 69 Teia de aranha

Fig. 71 Estruturas de membrana : Imagens geradas por computador.

Fig. 70 Teia de aranha

Fig. 72 Igreja Batista Central de Fortaleza

Comparação entre a teia de aranha e a estrutura formada por cabos e membranas da Igreja Batista Central de Fortaleza.

Projeto : Arq° N.Issa e Cálculo Estrutural do Eng° Ruy M. Pauletti

Fig. 73 Concha

Fig. 74 Auditório Elis Regina

Concha nervurada na praia x estrutura em forma de folha poliédrica do Auditório Elis Regina, uma das obras do complexo de Edifícios do Parque Anhembi em São Paulo.

Projeto : Arq° Miguel Juliano e Silva & Arq° Jorge Wilhelm e Cálculo Estrutural do Escritório Julio Kassooy & Mario Franco.

Fig. 75 Ovo

Ovo x Estrutura em casca. Palácio das Artes
Ibirapuera - São Paulo

Fig. 76 Palácio das Artes

Projeto : Oscar Niemeyer, Zenon Lotufo, Hélio Uchôa e Eduardo K. de Mello

Fig. 77 Tatu

Fig. 78 Residência Noah's Ark

Carapaça de tatu x cobertura de residência Noah's Ark (Arca de Noé)

Local: Califórnia

Projeto: Michael Carmichael

Fig. 79 Comparação da rosa e o Museu Guggenheim de Bilbao

Botão de rosa x “pétalas” do Museu Guggenheim de Bilbao com revestimento de placas de titânio

Projeto: Frank O. Gehry

Fig. 80 TWA

Fig. 81 Águia

Terminal de transportes da TWA em N.York x águia levantando vôo

Projeto : Eero Saarinen

Fig. 82

Fig. 83 The Eden Project

Fig. 84 The Eden Project

Bolhas x The Eden Project

Projeto: Nicholas Grimshaw

Conclusões

O objetivo principal da minha Dissertação de Mestrado, o entendimento das questões conceituais ligadas à concepção estrutural antes da quantificação através dos modelos matemáticos, necessários, porém colocados como efeito e não causa dos fenômenos porque a matemática não explica o comportamento físico, somente o descreve,⁹⁷ tornou-se um pré-requisito impossível de ser ignorado quando do lançamento das premissas iniciais ligadas à hipótese a ser comprovada através desta Tese : a resistência da forma à luz da produção contemporânea.

Muitos autores enfatizaram por diversas vezes a necessidade de a Humanidade estender uma ponte entre a intuição e o conhecimento, em nome do progresso que deverá sempre existir voltado para a construção de um mundo mais sadio, mais humano e mais justo.

É evidente que não me atrevo a discordar de afirmação tão pertinente e verdadeira. Todavia, a revolução digital, fenômeno recente, acabou por modificar significativamente não somente os processos de produção de uma arquitetura que se apresenta a cada dia mais bela e mais acolhedora, mas a própria arquitetura. Em decorrência disso, os meios de se estruturar corretamente edifícios de formas cada vez mais inusitadas e complexas, auxiliados por programas de computadores capazes de permitir a visualização e a resolução de qualquer modelo, acabaram por se alterar também. Mas, uma questão importantíssima não se pode ignorar: **a forma da estrutura esteve, está e estará sempre intimamente ligada à forma arquitetônica e vice versa.**

⁹⁷ SALVADORI, Mario. Estructuras para arquitectos. Ed. La Isla Buenos Aires 1966. Cap. 13 pg. 373.

Faço uso das sapientíssimas palavras de Mario Salvadori e de Eduardo Torroja Miret na conclusão deste trabalho, porque elas refletem de maneira categórica e transparente o meu pensamento:

“a morfologia da estrutura está intimamente ligada ao seu processo construtivo e também ao material utilizado para sua execução, e durante a feitura do projeto, não se deve nunca separar tais elementos uns dos outros.

O acerto do conjunto de todos esses fatores durante a concepção e ao longo dos primeiros esboços da solução da estrutura, determina o êxito da mesma e a razão de ser do projeto e até de um projetista; porque a criatividade destinada à resolução de qualquer problema, tem sido e continuará sendo a característica essencial dos verdadeiros arquitetos e engenheiros de todos os tempos!!!!..⁹⁸

“O especialista em estruturas e o arquiteto deverão sempre utilizar todos os meios ao seu alcance, para uma melhor compreensão, entendimento e colaboração recíproca”.

Que o técnico colabore com o artista para a maior glória da única das artes tecnológicas : a Arquitetura !!!”⁹⁹

⁹⁸ TORROJA Y MIRET . Razon y ser de los tipos estructurales Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 16 pg 308

⁹⁹ SALVADORI, Mario. Estructuras para arquitectos. Ed. La Isla Buenos Aires 1966. Cap. 13 pg. 374.

Glossário

Abóbada	Estrutura de superfície curva gerada pelo deslocamento de um arco
Agregado graúdo	Um dos componentes do concreto. Pedra.
Agregado Miúdo	Idem. Areia.
Anel de Compressão	Anel situado na extremidade mais alta de uma cúpula, que trabalha submetido à compressão.
Anfiteatro	Construção de planta circular ou oval tendo no centro uma arena.
Apoio	Ponto, superfície ou massa que suporta um peso.
Aqueduto	Estrutura construída pelos Romanos destinada ao transporte de água.
Arco	Elemento estrutural curvo com a concavidade voltada para baixo.
Arco Parabólico.	Arco de eixo igual à parábola.
Argamassa (arquitetura)	Mistura de areia, pedra, cimento e água.
Articulação	Ligação entre dois elementos que permite o giro entre eles.
Atirantado	Suspenso por tirantes.
Barragens	Estruturas maciças destinadas a contenção de um grande volume de água.
Cabo	Elemento estrutural linear contido no plano, desde que suspenso em suas extremidades.
Caixão Perdido	Laje oca com forma interna de madeira.
Canelura	Reentrância da coluna grega.

Casca	Denominação genérica para estruturas auto portantes de superfície curva.
Catenária	Curva para baixo formada pelo cabo sujeito ao peso próprio.
Cimbramento	Escoramento.
Cimento	Pó resultante da mistura de calcáreo, argila e xisto, ligante da pasta que envolve a armadura.
Coluna	Pilar cilíndrico.
Compressão	Tensão que causa redução no comprimento do eixo longitudinal de uma peça estrutural.
Concreto Armado	Técnica construtiva que utiliza a mistura de agregados graúdos e miúdos, cimento e água, envolvendo a armadura de aço.
Concreto Protendido	Concreto armado submetido à compressão prévia.
Conóide	Superfície curva gerada a partir da seção longitudinal de um cone.
Contraventamento	Sistema de amarração de estrutura de pórticos destinado a resistir a solicitações horizontais.
Cromlech	Menires dispostos em círculo.
Croqui	Esboço feito antes do ante projeto.
Cúpula	Estrutura de superfície curva gerada pelo giro do arco.
Dintel	Verga superior da porta ou da janela.
Dúctil	Material que admite deformações sem correr risco de rompimento
Duto	Espaço vertical destinado a passagem de tubulações ou ventilação.
Engaste	Ligação rígida.
Estaiadas	Estruturas presas a um pilar por meio de estais.
Estrutura	Conjunto de elementos resistentes responsáveis pela estabilidade do edifício.

Exoesqueleto	Estrutura colocada do lado de fora do edifício.
Ferrocimento	Malhas finas de aço superpostas pulverizadas com argamassa de areia e cimento, sem o agregado graúdo.
Flexão	Deformação do eixo longitudinal de uma peça.
Força Cortante.	Esforço solicitante que causa o corte ou cisalhamento de um elemento estrutural.
Fundações	Parte da estrutura encarregada de transferir a carga do edifício para o terreno.
Funicular	Forma assumida pelo cabo sujeito a um carregamento.
Gabião	Estrutura maciça de pedra envolvida por um engradado metálico de malha geralmente flexível.
Geodésica	Estrutura esférica utilizada pela primeira vez pelo arquiteto americano Buckminster Fuller.
Gótico	Arquitetura medieval cujos elementos característicos são o arco ogival e o arco botante.
Grelha	Entramado formado por nervuras ortogonais.
Higroscópico	Capaz de absorver água.
Hiperbolóide	Superfície de revolução gerada pelo giro de uma barra.
Hiperestática	Estrutura com n° abundante de vínculos onde os elementos transmitem entre si esforços de flexão.
Hipogeu	Sepulcro cravado na rocha
Isostática	Estrutura que dispõe do n° mínimo de vínculos necessários à manutenção da sua estabilidade.
Laje	Elemento estrutural plano. O mesmo que chapa.
Mastabas	Construções menores do que as pirâmides destinadas à mesma finalidade.
Membrana	Superfície flexível capaz de trabalhar somente à tração
Menir	Bloco de pedra de forma alongada cravado no solo.
Mísula	Elemento de uma estrutura com dimensões alargadas no apoio.

Momento Fletor	Esforço resultante do produto de uma força pela distância ao ponto de aplicação.
Muralha	Estrutura maciça de grande altura e comprimento.
Nervura	Conjunto de vigas paralelas associadas a uma laje.
Parabolóide	Forma espacial com duas curvas opostas.
Pênsil	Estrutura suspensa por tirantes verticais a um cabo preso em suas extremidades.
Pilar	Elemento estrutural vertical.
Piloti	Pilares dispostos no pavimento térreo sem as vedações das paredes.
Pirâmide	Construção egípcia de grande porte, que trabalha exclusivamente à compressão.
Pórtico	Sistema estrutural contido no plano, formado por uma viga apoiada em dois pilares, com cargas igualmente contidas no plano.
Românico	Estilo medieval que antecede o Gótico.
Sapata	Um dos tipos de fundação rasa.
Taipa	Técnica construtiva que utiliza a argila e a madeira.
Tenda	Estrutura formada por membranas e estais presos a um mastro central.
Tesoura	Sistema estrutural triangular indeformável em madeira ou aço.
Tijolo	Produto cerâmico de forma retangular provavelmente o elemento construtivo mais antigo.
Tirante	Elemento estrutural linear que trabalha a tração, não necessariamente flexível.
Torção	Esforço causado por momentos normais ao eixo da peça, capaz de causar o giro da seção da mesma.
Toróide	Sólido gerado pelo deslocamento do círculo em torno de um ponto não necessariamente tangente a ele.

Tração	Tensão paralela ao eixo longitudinal de uma barra, que causa alongamento da mesma.
Treliça	Estrutura plana formada pela associação de barras horizontais apoiadas em barras diagonais devidamente articuladas.
Viga	Elemento estrutural linear que trabalha apoiado em pelo menos uma de suas extremidades.
Zigurate	Templo Babilônico de forma piramidal construído em adobe.

Lista dos desenhos e imagens

Introdução

Fig. 1: **Gênios da Pintura**. Abril Cultural

Fig. 2: TIETZ Jürgen. **História de la arquitectura del siglo XX**. Baelona: Könemann. 1999. p. 64.

Fig. 3: MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro : Ao Livro Técnico S/A. 1980. p. 171.

Fig. 4: VASCONCELOS, Augusto Carlos de, CARRIERI, Renato, **A Escola Brasileira do Concreto Armado**. São Paulo: Axis Mundi, 2005. p. 142.

Fig. 5: NERVI JR., Pier Luigi. DESIDERI, Paolo. POSITANO, Giuseppe. **Pier Luigi Nervi**. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. p. 50.

Capítulo 1

Fig. 1: Foto do autor : EEPG Jardim Cruzeiro - Mauá / SP. Projeto do Autor.
Fundação para o Desenvolvimento da Educação Governo do Estado de SP - 1998.

Fig. 2: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 98

Fig. 3: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 98

Fig. 4: Foto do autor.

Fig. 5: Foto do autor.

Fig. 6: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 99

Fig. 7: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 99

Fig. 8: Fundação Vilanova Artigas. **Vilanova Artigas**. São Paulo:1997. p. 100

Fig. 9: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 99

Fig. 10: Foto do autor

Fig. 11: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 100

Fig. 12: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.298. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 13: Foto do autor.

Fig. 14: Desenho do Autor

Fig. 15: Desenho do Autor

Fig. 16: Desenho do Autor

Fig. 17: TOSCANO, João Walter. **João Walter Toscano**. São Paulo: Unesp, 2002. p. 98

Fig. 18: Desenho do Autor

Fig. 19: Foto do Autor

Fig. 20: VASCONCELOS, A. C. de. **O Concreto no Brasil**. São Paulo: Pini, 1992. V.1: Recordes-Realizações-História

Fig. 21: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.288. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 22: CHING, Francis D. K. **Dicionário Visual de Arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 2000. p. 103 e desenho do autor.

Fig. 23: Desenho do Autor . CHING, Francis D. K. **Dicionário Visual de Arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 2000. p. 103

Fig. 24: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001.
p.246. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 25: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001.
p.246. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 26: Desenho do Autor

Fig. 27: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London:
Mitchell Beazley. 2004. p.16.

Fig. 28: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London:
Mitchell Beazley. 2004. p.14.

Capítulo 2

Fig. 1: Jornal da USP nº 765 de 29.05 a 04.06.2006.

Fig. 2: NIEMEYER, Oscar. **Museu de Niterói**. Rio de Janeiro: Editora Revan, 1997. p. 20.

Fig. 3: OTTO, Frei. **Finding Form**. Munich: Edition Axel Menges, 1995. p. 37.

Fig. 4: Desenho do autor.

Fig. 5: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003.
p.4. Título original: **The annotated arch**. Copyright 2001. John Boswell Management, Inc.

Fig. 6: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.22.

Fig. 7: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001.
p.186. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 8: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.35.

Fig. 9: Desenho do autor

Fig. 10: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997.
p.97.

Fig. 11: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003.
p.14.

Fig. 12: Desenho do autor

Fig. 13: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.110.

Fig. 14: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.110.

Fig. 15: Desenho do autor

RISEBERO, Bill. **Historia Dibujada de la Arquitectura Occidental**. Madrid: Hermann Blume, 1982. p.12

Fig. 16: MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980. p. 46.

Fig. 17: Desenho do autor

TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales**. Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 12 p. 208.

Fig. 18: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003. p.49.

Fig. 19: Site. www.pointinternet.pds.hu/touristinfo/free_wallpapers_2/France_Paris-NotreDame_02.jpeg

Fig. 20: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.160.

Fig. 21: Desenho do autor

Fig. 22: Desenho do autor

Fig. 23: RISEBERO, Bill. **Historia Dibujada de la Arquitectura Occidental**. Madri: Hermann Blume, 1982. p.100.

Fig. 24: MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro : Ao Livro Técnico S/A. 1980. p. 111.

Fig. 25: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003. p.57.

Fig. 26: **Paris Ile de France**. Paris : A.Leconter Editor. p.47.

Fig. 27: NUTTGENS, Patrick. **The Story of Architecture**. Singapore. Phaidon, 1997. p.256.

Fig. 28: Desenho do autor. MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro : Ao Livro Técnico S/A. 1980. p. 162.

Fig. 29: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003. p.98.

Fig. 30: STRICKLAND, Carol. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003. p.148.

Fig. 31: BUILDING CONTRACTORS SOCIETY JAPAN. **BCS PRIZE WINNING WORKS**. Japan: Chuo-ku, 1965. p.123.

Fig. 32: Desenho do autor

Capítulo 3

Fig. 1: Desenho do autor

Fig. 2: Desenho do autor

Fig. 3: STUNGO, Naomi. **Wood New Directions in Design and Architecture**. San Francisco: Chronicle Books, 2001. p. 88.

Fig. 4: Desenho do autor

Fig. 5: Foto cedida pelo professor doutor Carlos Aberto Coelho.

Fig. 6: Desenho do autor

Fig. 7: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.247. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 8: Desenho do autor

Fig. 9: Desenho do autor

Fig. 10: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.247. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona

Fig. 11: Desenho do autor

Fig. 12: Site. http://www.my-two-cents.de/images/fotoserien/berlinfahrt_06-2004/source/45.html

Fig.13: Site.http://www.my-two-cents.de/images/fotoserien/berlinfahrt_06-2004/source/45.html

Fig. 14: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.235. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 15: ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001. p.247. Título original: **Tragsysteme**. Copyright 1997. Gustavo Gili – Barcelona.

Fig. 16: Desenho do autor

Fig. 17: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 9.

Fig. 18: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 7.

Fig. 19: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 8.

Fig. 20: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 18.

Fig. 21: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 98.

Fig. 22: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 200

Fig. 23: CARRIERI, Renato. **Concepção Estrutural, um Guia para Estudantes de Arquitetura**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. FAUUSP [2001]. p. 63

Fig. 24: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 34, 58 e 60.

Fig. 25: BERGER, Horst. **Light Structures**. Berlim: Birkhäuser Verlag, 1996. p 36 e 37.

Fig. 26: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.10.

Fig. 27 BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.12.

Fig. 28: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 16.

Fig. 29: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.13

Fig. 30: Desenhos do autor. Fonte: EPC (Engenharia Projeto Consultoria Ltda). **Pontes Rodoviárias Metálicas**. Parte I. Introdução ao Projeto e Cálculo. Brasília. 1989.

Fig. 31: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 23.

Fig. 32: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p25.

Fig. 33: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 39.

Fig. 34: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 31.

Fig. 35: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 53.

Fig. 36: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 55.

Fig. 37: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 63.

Fig. 38: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.59.

Fig. 39: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 75.

Fig. 40: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.88.

Fig. 41: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 73.

Fig 42: WILLENSKY, Elliot. NORVAL, White. **AIA Guide to New York City**. New York: HBJ. 1988. p. 63.

Fig. 43: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 77.

Fig. 44: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 76.

Fig. 45: Desenhos do Autor. Fonte: SALVADORI, M. **Por que os edifícios ficam de pé**. SP: M. Fontes Ed. Ltda. 2006. Cap.9 pag. 170-171.

Fig. 46: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 79.

Fig. 47: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.74.

Fig. 48: WELLS, Matthew. **30 Bridges**. Londres, 2002. p. 26.

Fig. 49: WELLS, Matthew. **30 Bridges**. Londres, 2002. p. 27.

Fig. 50: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.97.

Fig. 51: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.96.

Fig. 52: Imagem cedida pelo arquiteto J. R. Soutelo.

Fig. 53: Imagem cedida pelo arquiteto J. R. Soutelo.

Fig. 54: GRAF, Bernard. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. p. 91.

Fig. 55: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.104.

Fig. 56: TORROJA Y MIRET . **Razon y ser de los tipos estructurales**. Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja. 2000. Cap. 14 p. 260.

Capítulo 4

Fig. 1: MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980. p. 179.

Fig. 2: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 55.

Fig. 3: NERVI JR., Pier Luigi. DESIDERI, Paolo. POSITANO, Giuseppe. **Pier Luigi Nervi**. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. p. 87.

Fig. 4: NERVI JR., Pier Luigi. DESIDERI, Paolo. POSITANO, Giuseppe. **Pier Luigi Nervi**. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. p. 87.

Fig. 5: <http://www.arch.columbia.edu/Projects/Courses/Image.schemata/torroja2main.html>

Fig. 6: TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. p 43.

Fig. 7: <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s00000003>

Fig. 8: <http://madrid1936.es/universitaria/imagestranvia/tranvia.jpg>

Fig. 9: http://ociocaballo.com/imagenes3/hipodromo_001.jpg

Fig. 10: TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. p 3.

Fig. 11: http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Viaducto_madrid.JPG

Fig. 12: TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. p 72.

Fig. 13: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/STRUCTI/WEEK4/st4.06.jpg>

Fig. 14: <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002127>

Fig. 15: TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. p 60.

Fig. 16:
http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://static.flickr.com/67/168531414_5cf32c0ac6.jpg&imgrefurl=http://bolance.blogspot.com/2006/06/puente-eduardo-torroja-y-miret.html&h=375&w=500&sz=175&hl=pt-BR&start=2&tbnid=Ffa2bge55NBB8M:&tbnh=98&tbnw=130&prev=/images%3Fq%3Dtorroja%26gbv%3D2%26svnum%3D10%26hl%3Dpt-BR

Fig. 17: TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. p 158 e 159.

Fig. 18: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio**. Montevideo. 1996. p. 58.

Fig. 19: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio**. Montevideo. 1996. p. 60.

Fig. 20: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 61.

Fig. 21: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 61.

Fig. 22: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 63.

Fig. 23: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 62.

Fig. 24: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 150.

Fig. 25: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 154.

Fig. 26: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 154.

Fig. 27: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 159.

Fig. 28: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 161.

Fig. 29: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 167

Fig. 30: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 44.

Fig. 31: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 45.

Fig. 32: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 45.

Fig. 33: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 89.

Fig. 34: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 91.

Fig. 35: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 136.

Fig. 36: Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Comisariado y dirección : A.J.Torrecillas. **Dieste, Eladio.** Montevideo. 1996. p. 136.

Fig. 37: Foto do autor

Fig. 38: XAVIER, Alberto, LEMOS, Carlos, CORONA, Eduardo. **Arquitetura Moderna Paulistana.** São Paulo: Pini, 1983. p. 27.

Fig. 39: Foto do autor.

Fig. 40: VASCONCELOS, Augusto Carlos de, CARRIERI, Renato, **A Escola Brasileira do Concreto Armado.** São Paulo: Axis Mundi, 2005. p. 75.

Fig. 41: VASCONCELOS, Augusto Carlos de, CARRIERI, Renato, **A Escola Brasileira do Concreto Armado.** São Paulo: Axis Mundi, 2005. p. 76.

Fig. 42: VASCONCELOS, Augusto Carlos de, CARRIERI, Renato, **A Escola Brasileira do Concreto Armado.** São Paulo: Axis Mundi, 2005. p. 76.

Fig. 43: CUITO, A., SOTO, P. **Guggenheim.** Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. p. 48.

Fig. 44: CUITO, A.. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. p. 97.

Fig. 45: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 84.

Fig. 46: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 105.

Fig. 47: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 146.

Fig. 48: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 139

Fig. 49: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 158.

Fig. 50: VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. p. 159.

Fig. 51: MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980. p. 183.

Fig. 52: JODIDIO, P. **Architecture now!** Paris. Taschen. 2003. p.201.

Fig. 53: JODIDIO, P. **Architecture now!** Paris. Taschen. 2003. p.204.

Fig. 54: NIEMEYER, O. **Minha arquitetura 1937 - 2004**. Rio de Janeiro: Revan, 2004. 405 p. 123

Fig. 55: NIEMEYER, O. **Minha arquitetura 1937 - 2004**. Rio de Janeiro: Revan, 2004. 405 p. 124

Fig. 56: BROWN, David J. **Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature**. London: Mitchell Beazley. 2004. p.147.

Fig. 57: JODIDIO, P. **Building a New Millennium**. Köln. Taschen. 2000. p.146.

Fig. 58: CUITO, A.. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. p. 159.

Fig. 59: CUITO, A.. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. p. 162.

Fig. 60: **Paris Ile de France**. Paris : A.Leconter Editor. p.13.

Fig. 61: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 35.

Fig. 62: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 38.

Fig. 63: <http://blogwindows.files.wordpress.com/2007/02/montanha.jpg>

Fig. 64: <http://www.plenarinho.gov.br/noticias/imagens/piramides-de-gize.jpg>

Fig. 65: Desenho do autor.

Fig. 66: http://www.earchitect.co.uk/hong%20kong/jpgs/hong_kong_bank_foster_ianlambot7.jpg

Fig. 67: Desenho do autor

Fig. 68: SHEARD, R. **The Stadium Architecture for the New Global Culture.** Singapore. Periplus. Pg. 68, 70, 71.

Fig. 69: BERGER, H. **Light Structures – Structures of Light.** Berlin. Birkhäuser Verlag. 1996. p. 60.

Fig. 70: BERGER, H. **Light Structures – Structures of Light.** Berlin. Birkhäuser Verlag. 1996. p. 60.

Fig. 71: BERGER, Horst. **Light Structures.** Berlin: Birkhäuser Verlag, 1996. p 34.

Fig. 72: Foto cedida pelo professor doutor Ruy M. Pauletti

Fig. 73: <http://maisquepalavras.blogs.sapo.pt/arquivo/f89.jpg>

Fig. 74: Foto do autor.

Fig. 75: <http://www.alcatrazes.org.br/home/textos/defesa/ovo.jpg>

Fig. 76: Foto do autor.

Fig. 77: <http://www.animatedfx.net/creatureimages/armadillo-01.jpg>

Fig. 78: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 49.

Fig. 79: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 53.

Fig. 80: Foto do autor

Fig. 81: <http://www.sobreasaguas.com.br/aguia/aguia26k.jpg>

Fig. 82: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 60.

Fig. 83: JODIDIO, P. **Architecture now!** Paris. Taschen. 2003. p.201.

Fig. 84: PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. Pg. 187.

Citações bibliográficas fundamentais para o estudo e a pesquisa.

Bibliografia básica

1. ABRAHÃO, C. **Lajes Retangulares de Edifícios**. Mogi das Cruzes: Édile, 1980. 93 p.
2. BAHAMÓN, A. **The Magic of Tents Transforming Space**. N. York. Harper Collins Publ. 2004. 173 p.
3. BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço**. São Paulo: Pini, 1998. 489 p.
4. BENTON, W. (editor). **Enciclopédia Britânica**. V. 4: Bridges. 1965. 979 p.
5. BERGER, H. **Light Structures – Structures of Light**. Berlin. Birkhäuser Verlag. 1996. 185 p.
6. BILLINGTON, D. P. **Robert Maillart's Bridges**. N. Jersey : Priceton University Press. 1979. 146 p.
7. BILLINGTON, D. P. **The Tower and the Bridge**. N. Jersey : Priceton University Press. 1983. 306 p.
8. BOGEA, M. LOPES J. M. A. REBELLO, Y. C. P. **Arquiteturas & Estruturas: Pontes em arco**, São Paulo, S.P. AU, São Paulo: abr.-mai. 1999. v.83, p.55.
9. BOTELHO, M. H. C. **Concreto Armado, Eu te amo**. São Paulo: Edgar Blücher, 1983. 362 p.
10. BROWN, D. J. **Bridges. Three thousand years of defying Nature**. London: Octopus Publishing Group Ltd. 1993. 176 p.
11. CARRIERI, R. **Concepção estrutural, um guia para estudantes de arquitetura**. Dissertação de Mestrado – FAUUSP. 2001. 297 p.
12. CHARLESON, A.W. **Structure as Architecture**. Oxford.: Elsevier. 2005. 228 p.
13. CHING, F. D. K. **Dicionário Visual da Arquitetura**. São Paulo. M.Fontes. 2000. 319 p.
14. CHOISY, A. **Historia de la Arquitectura**. Buenos Aires: Victor Leru, 1951. 754 p.
15. CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. DIRECCIÓN GENERAL DE ARQUITECTURA Y VIVIENDA. **Eladio Dieste**. Montevideo. 1996. 306 p.
16. CUITO, A. SOTO, P. **Guggenheim**. Kliczkowski Publisher. Madrid. 2001. 213 p.

17. DIAS, L. A. de M. **Aço e Arquitetura**. São Paulo: Zigate, 2001. 173 p.
18. DIAS, L. A. de M. **Edificações de aço no Brasil**. São Paulo: Zigate, 1993. 203 p.
19. DIAS, L. A. de M. **Estruturas de aço**. São Paulo: Zigate, 1997. 159 p.
20. DINIS, H. **Estabilidade Despertando a Intuição**. São Paulo. Plêiade. 1999. 230 p.
21. DOCZI, G. **O poder dos limites**. São Paulo: Mercuryo, 1990. 149 p.
22. DUPRÉ, J. **Bridges** : N.York: Black Dog & Leventhal Publishers. 1997. 128 p.
23. EGGEN, A. P. SANDAKER, B. N. **Steel Structure, and Architecture**. Nova Iorque: Whitney, 1995. 256 p.
24. ENGEL, H. **Sistemas de estruturas**. São Paulo: Hemus, 1981. 273 p.
25. GRAEFF, E. A. **Arte e Técnica na formação do Arquiteto**. São Paulo: Studio Nobel: Fundação Vilanova Artigas, 1995. 142 p.
26. GRAF, B. **Bridges that changed the World**. Munich: Prestel-Verlag. 2000. 127 p.
27. HODGKINSON, A. **Estructuras**. [s.l.] H. Blume, [19--]. 432 p.
28. JODIDIO, P. **Architecture now!** Paris. Taschen. 2003. 575 p.
29. JODIDIO, P. **Building a New Millennium**. Köln. Taschen. 2000. 553 p.
30. KÜHL, B. M. **Arquitetura do Ferro e Arquitetura Ferroviária em São Paulo**. São Paulo: Ateliê Editorial, 1998. 436 p.
31. L'HERMITE, R. **Ao pé do muro**. Belo Horizonte: Senai, [197-]. 173 p.
32. MACDONALD J. A. **Structure & Architecture**. Oxford : Architectural Press. 2001. 151 p.
33. MANSELL, G. **Anatomia da Arquitetura**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980. 190 p.
34. MARGARIDO, A. F. **Fundamentos de Estruturas**. São Paulo: Zigate, 2001. 334 p.
35. MARGARIDO, A.F., SIMÕES, J.R.L. **Uso do aço na Arquitetura – Módulo I e II**. CursoFUPAM, patrocínio COSIPA – USIMINAS, out.1998, São Paulo.

-
36. MOLITERNO, A. **Caderno de Estruturas em alvenaria e concreto simples**. São Paulo: Edgard Blücher, 1955. 374 p.
37. MORELLI, W. F. **Curso de Sistemas Estruturais**. São Paulo: SASP-SP, 1982.
38. MONZILLO, L. de O. **O desenvolvimento das estruturas arquitetônicas do Século XX** Dissertação de Mestrado – FAU MACKENZIE. 1998. 224 p.
39. NASH, W. A. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 521 p.
40. NERVI, L. P. DESIDERI, P. POSITANO, G. **Pier Luigi Nervi**. Estudio paperback. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. 242 p.
41. OLIVA, W. M. & SILVA, Luís F. A. **Cascas de concreto armado. Teoria da Membrana**. São Paulo, S.P. Revista Politécnica, São Paulo, abr./jun. 1953. 59 p.
42. OTTO, F. & RASCH, B. **Finding Form**. Munich. 1992. 239 p.
43. PAULETTI, R. M. de O. **Evolução das Tensoestruturas Parte I - Primórdios das Tenso estruturas & Evolução das Pontes suspensas**. São Paulo. BT/PEF/ 9915 E.P.U.S.P. 1999.
44. PFEIL, W. **Concreto armado**. Vol. I Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1984. 224 p.
45. PFEIL, W. **Estruturas de Aço**. Livros Técnicos e Científicos Editora.
46. PFEIL, W. **Estruturas de Madeira**. 5ª edição. Rio de Janeiro. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
47. PIANCA, J. B. **Manual do Construtor**. Porto Alegre: Globo, 1955. Vol. I ao VI.
48. POLILLO, A. **Considerações sobre o ensino de estruturas nos cursos de formação de Arquitetos**. Rio de Janeiro: Sedegra-rio, 1968. 108 p.
49. POWELL & MOORE. **Structure, Space and Skin**. London : Phaidon. 1992. 255p.
50. REBELLO, Y.C.P. **Estruturas de aço, concreto e madeira : atendimento da expectativa dimensional**. Zigurate Editora e Comercial Ltda. São Paulo. 2005. 370 p.
51. REBELLO, Y.C.P. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura**. São Paulo. Zigurate Editora e Comercial Ltda. São Paulo. 2000. 271 p.
52. REBELLO, Y.C.P. **Contribuição ao ensino de estrutura nas escolas de arquitetura**. Dissertação de Mestrado – FAUUSP. 1993. 287 p.
53. REBELLO, Y.C.P. **Uma proposta de ensino da concepção estrutural**. Tese de Doutorado – FAUUSP. 1999. 615 p.

54. RICARDO O. G. S. **Teoria das Estruturas**. São Paulo: McGraw-Hill, EDUSP, 1978. 670 p.
55. ROIG, J. **Nuevos puentes**. Barcelona: Gustavo Gili, 1996. 192 p.
56. ROSSO, T. **Racionalização da construção**. São Paulo: FAU USP, 1980. 300 p.
57. SALVADORI, M. **Why Buildings Stand Up**. New York, 2002. 323 p.
58. SALVADORI, M, & HELLER, Robert. **Le Estructture in Architettura**. Milão: Etas Kompass, 1964. 387 p.
59. SALVADORI, M, & HELLER, Robert. **Estructuras para Arquitectos**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1966. 374 p.
60. SANTOS REIS, F. dos. **As nossas pontes de concreto armado**. Rio de Janeiro : Livraria Scientifica Brasileira. 1924. 168 p.
61. SCHODEK, D. L. **Structures**. New Jersey: Hall Career & Tecnology, 1992. 557 p.
62. SERAPHIM, J. H. C. **As Estruturas na prática da Arquitetura**. Apostila do curso de Sistemas Estruturais da Faculdade Anhembí-Morumbi. São Paulo. V.I 238 p. V.II 315 p.
63. SILVA, D. M. & SOUTO, A. K. **Estruturas. Uma abordagem Arquitetônica**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. 156 p.
64. SILVA, S. F. **Zanine Sentir e Fazer**. Rio de Janeiro: Agir, 1995. 144 p.
65. SLESSOR, C. **Eco-Tech**. Londres, 2001. 192 p.
66. SOUTELLO, J. R. G. **Apostila de Estruturas**. Apostila do curso de Sistemas Estruturais da FAU-SANTOS, [198-], São Paulo.
67. STUNGO, N. **Frank Ghery**. Carlton Books Limited. 1999. 80 p.
68. STUNGO, N. **Wood**. São Francisco: Chronicle Books, 2001. 240 p.
69. TAUIL, C. A., RACCA, C. L. **Alvenaria Armada**. São Paulo: Projeto, 1981. 119 p.
70. TORROJA, E. **Razon y ser de los tipos estructurales**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Costrucion y del Semento, 1960. 403 p.
71. TORROJA, E. **The structures of Eduardo Torroja**. USA: Dodge Corporation, 1958. 198 p.
72. TOSCANO, João Walter. **João Walter Toscano**. São Paulo: Unesp, 2002. 186 p.

73. UNIVERSITY OF CHICAGO/OXFORD/CAMBRIDGE/LONDON/TORONTO. **Encyclopaedia Britannica**. Chicago, London, Toronto, Geneva, Sidney, Tokyo. William Benton Publisher. Vol. 1 a Vol. 23. 1965.
74. VAN BRUGGEN, C. **Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao**. Solomon R. Guggenheim Foundation. N. York. 1997. 207 p.
75. VASCONCELOS, A. C. CARRIERI, Renato, **A Escola Brasileira do Concreto Armado**. São Paulo: Axis Mundi, 2005. 207 p.
76. VASCONCELOS, A. C. de. **Estruturas Arquitetônicas**. São Paulo: Studio Nobel, 1991. 115 p.
77. VASCONCELOS, A. C. de. **O Concreto no Brasil: Recordes-Realizações-História**. São Paulo: Pini, 1992. v.1. 277 p.
78. VASCONCELOS, A. C. de. **O Concreto no Brasil: Pré-fabricação, monumentos, fundações**. São Paulo: Studio Nobel, 2002. 350 p.
79. VASCONCELOS, A.C. de. **O Concreto no Brasil: Professores-Cientistas-Técnicos**. São Paulo: Pini, 1992. v.2. 213 p.
80. VASCONCELOS, A. C. de. **Pontes Brasileiras**. São Paulo: Pini, 1993. 614 p.
81. XAVIER, Alberto, LEMOS, Carlos, CORONA, Eduardo. **Arquitetura Moderna Paulistana**. São Paulo: Pini, 1983. 251 p.
82. WELLS, M. **30 Bridges**. Londres, 2002. 192 p.
83. **Edifícios de pequeno porte estruturados em aço**. Belo Horizonte: USIMINAS-SIDERBRÁS, 1990. 60 p.
84. **O aço na construção**. Curso de atualização realizado pela COSIPA, mai. 1994, São Paulo. Não paginado.
85. WILBY, C.B. **Concrete dome roofs**. Longman Scientific & Technical, 1993.

Bibliografia complementar

1. ACAYABA, S.F. Arquitetura Moderna Brasileira. Ed. Projeto.
2. ARGAN, G. C. Projeto e destino. São Paulo: Ática, 2001.
3. ARTIGAS, V. Caminhos da Arquitetura. Ciências Humanas.
4. BAKER, G. H. Le Corbusier: Uma análise da forma. São Paulo: Martins Fontes, 1998.
5. BENÉVOLO, L. História da Arquitetura Moderna e História do Urbanismo. Perspectiva.
6. BLAKE, P. Os Grandes Arquitetos: Le Corbusier e o domínio da forma. Rio de Janeiro: Record, 1966. V. 1.
7. BLAKE, P. Os Grandes Arquitetos: Mies van der Rohe e o domínio da estrutura. Rio de Janeiro: Record, 1966. V. 2.
8. BLAKE, P. Os Grandes Arquitetos: Frank Lloyd Wright e o domínio do espaço. Rio de Janeiro: Record, 1966. V. 3.
9. BLUME, H. Historia Dibujada De La Arquitectura Occidental. Madri. 1982.
10. BRUAND, Y. Arquitetura Contemporânea no Brasil. São Paulo: Perspectiva. 1991.
11. CHING, F. D. K. Arquitetura: Forma, Espaço e Ordem. São Paulo: Martins Fontes, 1998.
12. CONSIGLIERI, V. A Morfologia da Arquitetura 1920-1970. Lisboa, Estampa, 1994. (2 vols.)
13. CORONA, E. Oscar Niemeyer: uma lição de arquitetura. São Paulo: FUPAM, 2001.
14. CORONA, E. LEMOS, Carlos. Dicionário da Arquitetura Brasileira. Edart Liv.
15. COSTA, L. Sôbre Arquitetura. Porto Alegre: Imprensa Universitária, 1962. V. I.
16. DIVERSOS, Panorama da Arquitetura. Brasil: Fundo de Cultura, 1964.
17. ECO, U. Como se faz uma tese. Perspectiva.
18. GIEDION, S. Espaço, Tempo e Arquitetura. São Paulo : Martins Fontes, 2004.

19. GÖSSEL, P. LEUTHÄUSER, G. **Arquitectura no Século XX**. Köln: Taschen, 1996.
20. GROPIUS, W. **Bauhaus: Novarquitectura**. Perspectiva.
21. HOLANDA, S. B. **Raízes do Brasil**. Rio de Janeiro: José Olympo, 1979.
22. LE CORBUSIER. **Maneiras de Pensar o Urbanismo**. Perspectiva.
23. LE CORBUSIER. **Os três estabelecimentos Humanos**. Perspectiva.
24. LE CORBUSIER. **Planejamento Urbano**. Perspectiva.
25. LE CORBUSIER. **Por uma Arquitetura**. São Paulo: Perspectiva / Edusp. 1973.
26. NIEMEYER, O. **As curvas do tempo** Rio de Janeiro: Revan. 1998.
27. NIEMEYER, O. **Minha arquitetura 1937 - 2004**. Rio de Janeiro: Revan, 2004. 405 p.
28. NIEMEYER, O. **Museu de Arte Contemporânea de Niterói**. Rio de Janeiro: Revan, 1997. 80p.
29. NUTTGENS, P. **The Story of Architecture**. Londres, 2001.
30. PEARSON, D. **New Organic Architecture – The Breaking Wave** University of California Press. Berkeley and Los Angeles. 2001. 223 p.
31. REIS Fº, N. G. **Quadro da Arquitetura no Brasil**. Perspectiva.
32. RICHARDSON, P. **XS: Grandes ideias para pequenos edifícios**. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.
33. RISEBERO, B. **Historia Dibujada de la Arquitectura Occidental**. Londres: H. Blume, 1979. Traduzido por Rafael Fontes. Título original: **The Story of Western Architecture**, Copyright 1979 H. Press Limited - London.
34. SAIA, L. **Morada Paulista**. Perspectiva.
35. SHEARD, R. **The Stadium Architecture for the New Global Culture**. Singapore. Periplus. 208 p.
36. SNYDER, J. C., CATANESE, A. **Introdução à Arquitetura**. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
37. STRICKLAND, C. **Arquitetura Comentada**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003.
38. TIETZ Jürgen. **História de la arquitectura del siglo XX**. Bcelona: Könemann. 1999. 119 p.

39. TOYNBEE, A. **A Humanidade e a mãe Terra**. Nova York: Oxford University Press. 1976.
40. WILLENSKY, E. WHITE, N. **AIA Guide to New York City**. Nova Iorque: HBJ, 1988.
41. XAVIER, A. LEMOS, C. CORONA, E. **Arquitetura moderna paulistana**. São Paulo: Pini, 1983.
42. XAVIER, A. BRITTO, A. NOBRE, A. L. **Arquitetura moderna no Rio de Janeiro**. São Paulo: Pini: Fundação Vilanova Artigas; Rio de Janeiro: RIOARTE, 1991.
43. ZAMBONI, O. E. **História e Teoria da Arquitetura e do Urbanismo**. Apostila para o Curso de Arquitetura da Faculdade e Urbanismo Anhembí Morumbi.
44. ZANETTINI, S. **O Ensino de Projeto na Área de Edificação**. São Paulo: FAUUSP, 1980.
40. ZEVI, B. **Saber ver a Arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 1994.
41. **Gênios da Pintura**. Abril Cultural
42. **Paris Ile de France**. Paris : A.Leconter Editor. 95 p.