



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



MODELOS DE TORRES EM PERFIS TUBULARES PARA RADIO, TV E TELEFONIA UTILIZANDO A TEORIA DA SEMELHANÇA

Outubro de 2004

Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

**MODELOS DE TORRES EM PERFIS TUBULARES PARA
RADIO, TV E TELEFONIA UTILIZANDO A TEORIA DA
SEMELHANÇA.**

Autor: Eduardo Cunha Castanheira

Orientador: Henor Artur Souza.
Francisco de Assis das Neves.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, outubro de 2004

1	Castanheira, Eduardo Cunha.
C346m	Modelos de torres em perfis tubulares para radio, TV e telefonia
	utilizando a teoria da semelhança. [manuscrito]. / Eduardo Cunha Castanheira. – 2004.
	xvi, 165f: il. color., graf. , tabs.
	Orientador: Prof. Dr. Henor Artur Souza.
	Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Neves.
	Área de concentração: Engenharia Civil.
	Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola	de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

MODELOS DE TORRES EM PERFIS TUBULARES PARA RADIO, TV E TELEFONIA UTILIZANDO A TEORIA DA SEMELHANÇA.

Autor: Eduardo Cunha Castanheira

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 29 de outubro de 2004, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Henor Artur de Souza (UFOP) (Orientador)

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP) (Coorientador)

Prof. Dr. João Batista Marques de Souza Junior (UFOP) (Examinador Interno)

Profª. Dra. Eleonora Sad de Assis (UFMG) (Examinadora convidada)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Lauro Alvarenga Castanheira e Eunice Rosa Cunha Castanheira, que com sensibilidade e sabedoria ajudaram a construir minha base para enfrentar a vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto e aos professores do mestrado em Construções Metálicas pela oportunidade de aprendizado e de crescimento profissional.

Ao meu orientador Henor Artur de Souza, que além de me guiar no processo de pesquisa da minha dissertação se tornou meu amigo.

Ao meu co-orientador Francisco de Assis das Neves, que me ajudou muito na parte mais abstrata do meu trabalho, fazendo o link final com a teoria da semelhança.

Ao Unicentro Izabela Hendrix, especialmente ao Diretor do Curso de Arquitetura Professor Renato César José de Souza, que se empenhou muito para ajudar o grupo de professores durante todo o período do mestrado.

Ao colega e amigo Arquiteto Ezequiel Mendonça Rezende, que sempre me socorreu nos apertos com o micro.

Ao amigo Wellington Luis de Carvalho, que me acolheu em Ouro Preto e participou dos vários momentos de ansiedade anteriores às provas e exercícios, e me levou a vivenciar um pouco mais a cidade de Ouro Preto.

Aos meus colegas “arquitetos professores”, que também estavam comigo nesta empreitada. “Os amigos da VAN”.

Ao colega Wellington Luis Assis Pereira, que com muita didática me ajudou nos cálculos.

À Deise Lustosa, minha companheira de estudos madrugada afora.

Ao estagiário de Engenharia Marcelo da Fonseca, pela elaboração dos gráficos

RESUMO

A presença de vários elementos verticais na natureza e objetos arquitetônicos também verticais construídos pelos homens desde a antiguidade, mostra como eles sempre foram extremamente importantes na sinalização de algum tipo de informação seja ela de aspecto simbólica ou na transmissão de informações. Neste trabalho com o levantamento destas manifestações verticais que aparecem ao longo dos tempos nas diversas partes do mundo, constrói-se um repertório estético/funcional a ser incorporado aos novos objetos arquitetônicos verticais, que se manifestam sob variadas formas de torres para transmissão de informações ou sinais de rádio, TV, telefonia, como também servindo de marcos simbólicos nas paisagens urbanas e rurais. Para tal estudo, foi usado também o conceito da Teoria da Semelhança como formulação do método aproximado para que na análise e verificação do modelo reduzido os resultados pudessem ser extrapolados para projetos padrão. De posse destes estudos, chega-se a parâmetros construtivos, funcionais, normativos e estéticos para novos projetos de torres metálicas em perfis tubulares. Como a demanda para torres de rádio, TV e telefonia tem crescido rapidamente em todos os lugares, interferindo drasticamente na imagem das cidades e do campo, acredita-se que este estudo possa contribuir na obtenção de novos projetos de torres mais elaborados. Projetos estes, que respondam às novas tecnologias, às novas necessidades dos usuários e aos novos valores estéticos e simbólicos contemporâneos, como também minimizem o impacto visual no ambiente onde estão inseridas.

Palavra-Chave: Torres, Concepção estrutural, Perfis tubulares metálicos, Teoria da semelhança.

ABSTRACT

The presence of various vertical elements in nature and of vertical architectonic objects built by men since antiquity indicates that verticality has always been extremely important in signaling information. This information may be of a symbolic or practical condition, such as transmission of information. This work discusses some of these vertical manifestations throughout time in various parts of the world, with the objective of constructing an aesthetic-functional repertory that may be applied to new vertical architectonic objects, particularly towers for transmitting information or radio, television and telephone signals. It also views these towers as symbolic signposts of urban and rural landscapes. To achieve its goal, this study used the theory of similitude to create an approximate method that enables the application of the analysis and verification of a reduced model to standard projects. These studies make it possible to arrive at constructive, functional, normative and aesthetic parameters for new projects of tubular profile metal towers. With the widespread increase in the demand for radio, television and telephone towers, this work contributes to the design of more elaborate projects, responding to new technologies, new consumer necessities as well as new aesthetic and symbolic values. It also aims to decrease the visual impact of these towers in the contexts where they are inserted.

Keywords: Towers, Structural conception, Tubular profile metal, Theory of similitude.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia de trabalho	2
1.4 Estrutura do Trabalho	3
CAPÍTULO II	4
2 TORRES	4
2.1 A evolução histórica da torre de Babel à torre de Santiago Calatrava	4
2.2 O aspecto simbólico das estruturas e dos elementos verticais	19
2.3 As funções das torres	25
2.4 A compatibilização dos serviços nas torres	48
2.5 A legislação de implantação de torres	51
CAPÍTULO III	56
3 A TIPOLOGIA ESTRUTURAL DAS TORRES	56
3.1 Considerações iniciais	56
3.2 Estabilização	58
3.2.1 Análise Estática e Dinâmica da Estrutura Metálica	58
3.2.2 Ação do Vento	62
3.3 A geometria da construção	64
3.4 Tipos de sistemas de estabilização de edifícios	65
3.4.1 Quadro contraventado	65
3.4.2 Contraventamentos por diagonais	66
3.4.3 Contraventamentos em “X”	66

3.4.4	Contraventamentos em “K”	68
3.4.5	Contraventamentos em Diamante	68
3.4.6	Outros Contraventamentos	68
3.4.7	Quadro rígido	68
3.4.8	Parede de cisalhamento	69
3.4.9	Núcleo de concreto	71
3.4.10	Pisos suspensos	74
3.4.11	Treliças alternadas	74
3.4.12	Sistemas associados	74
3.4.13	Sistemas tubulares de contraventamento	74
3.4.14	Sistemas estaiados	76
3.4.15	Outrigger	76
CAPITULO IV		80
4	TEORIA DA SEMELHANÇA	80
4.1	Considerações Iniciais	80
4.2	Geração dos Modelos Segundo uma Abordagem Numérica-Computacional	82
4.3	Conceitos Envolvidos na Análise Dimensional e Teoria da Semelhança	85
4.3.1	Homogeneidade Dimensional	87
4.3.2	Matriz Dimensional	87
4.3.3	Semelhança física e modelos	88
4.3.4	Fatores de Escala	89
4.4	Descrição geral dos Parâmetros do Problema para a Estrutura de Torre	92
4.5	Formulação e Resolução Completa do Problema	95
4.5.1	Abordagem do problema do fluxo de vento com a estrutura	96
4.5.2	Geração dos Fatores de Escala	99
4.6	Geração dos Modelos a Partir dos Fatores de Escala (Modelos Qualitativos)	105
CAPÍTULO V		112
5	PROJETO DA TORRE	112
5.1	Concepção	112
5.2	Diretrizes e parâmetros relevantes para projeto de torres	125
5.3	Torres em perfis tubulares	132
5.4	Parâmetros dimensionais relevantes	134
CAPÍTULO VI		135

6	CONCLUSÕES	135
6.1	Conclusões finais	135
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
	ANEXO I	145
	ANEXO II	148
	ANEXO III	157
	Resultados Iniciais	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Rochas Milho Verde	4
Figura 2.2 Dedo de Deus	5
Figura 2.3 Torre de Babel.....	6
Figura 2.4 Construção da Torre de Babel.....	6
Figura 2.5 Desenho reconstituído do Farol de Alexandria.....	7
Figura 2.6 Forte de Qaítbey.....	7
Figura 2.7 Zigurate.	8
Figura 2.8 Taj Mahal	9
Figura 2.9 Torre da Giralda	9
Figura 2.10 Torre de Pizza Fachada e Planta.	10
Figura 2.11 Vista Torre de Pizza	10
Figura 2.12 Torre Eiffel.....	11
Figura 2.13 Torre Eiffel.....	11
Figura 2.14 Detalhes da torre de Berlim	12
Figura 2.15 Construção da torre de Berlim	13
Figura 2.16 Detalhes da torre Kuala Lumpur	13
Figura 2.17 Desenho comparativo de várias torres.	14
Figura 2.18 Desenho comparativo de várias torres.	15
Figura 2.19 Escultura luminosa numa praça no centro financeiro de Nova York.....	19
Figura 2.20 Escultura de Joan Miro em Barcelona	20
Figura 2.21 Escultura de madeira, de José Bento.....	20
Figura 2.22 Tensegrity tower	21
Figura 2.23 Imagens do belvedere.....	22
Figura 2.24 Torre do Campus UFMG	24
Figura 2.25 Igreja São Francisco de Assis	25
Figura 2.26 Cidade antiga e do Futuro	26
Figura 2.27 Thames water tower	27
Figura 2.28 Antena TV Globo.....	28
Figura 2.29 Antena Rede Tv São Paulo	28
Figura 2.30 Torres no Centro empresarial de Nova York.....	28

Figura 2.31 Torre Expo 98 Lisboa.....	29
Figura 2.32 Torres de Sinalização para aviões no Lax Airport Los Angeles.....	29
Figura 2.33 Torre de Controle - Sondica Aeroporto de Bilbao- Espanha.....	30
Figura 2.34 Torre central de equipamentos telefônicos	31
Figura 2.35 Torre de Brasília.....	31
Figura 2.36 Antenas em Juiz de Fora	32
Figura 2.37 Torre de caixa água no Japão.....	33
Figura 2.38 Watts Tower	34
Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas	35
Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades européias.....	37
Figura 2.41 Olympic Games Tend	40
Figura 2.42 Edifício Operadora Vivo.....	41
Figura 2.43 Torre restaurante <i>Kobe Poter Tower</i>	41
Figura 2.44 Torre de Tóquio Nara Tower.	42
Figura 2.45 Sombra produzida pela torre.	42
Figura 2.46 NHK Nagano Station	43
Figura 2.47 NHK Nagano Station	43
Figura 2.48 Freedom tower	44
Figura 2.49 Freedom tower	44
Figura 2.50 Torre da cidade de Barueri.....	45
Figura 2.51 CN Tower.....	46
Figura 2.52 Tokyo Tower.....	47
Figura 2.53 Torre de Santiago de Compostela	47
Figura 2.54 Torre da cidade de Juiz de Fora	50
Figura 2.55 Torre de transmissão de telefonia Celular.Av. Bernardo Monteiro, BH.	52
Figura 2.56 Torres de transmissão de telefonia Celular - Catas Altas - MG.....	55
Figura 2.57 Torres de transmissão em Parati.	55
Figura 3.1 Torre de telecomunicações em espiral.	56
Figura 3.2 Art Tower Mito , Arquiteto Arata Isozaki.	57
Figura 3.3 Pórtico engastado	59
Figura 3.4 Deslocamento.....	59
Figura 3.5 Flexão.....	59
Figura 3.6 Deslocamento.....	60

Figura 3.7 Pórtico com contraventamento.....	60
Figura 3.8 Pórtico com ligações articuladas.....	60
Figura 3.9 Pórtico com ligações articuladas e com contraventamento.....	61
Figura 3.10 Estabilidade estrutural.....	62
Figura 3.11 Ação do vento	62
Figura 3.12 Rugosidade do terreno.....	63
Figura 3.13 Geometrias e perfis de seções	64
Figura 3.14 Contraventamento	65
Figura 3.15 Edifício residencial em Bruxelas, Bélgica. Arq. M. Roggen / F.Liénard	67
Figura 3.16 Ed. Administrativo, São Francisco, USA. Arq. Skidmore, Owings & Merrill.....	67
Figura 3.17 Paredes de cisalhamento	70
Figura 3.18 Paredes de cisalhamento e núcleos estabilizadores.....	71
Figura 3.19 Núcleos de concreto	72
Figura 3.20 Sears Tower - Chicago.....	75
Figura 3.21 Ponte de Alamillo, Sevilha.....	76
Figura 3.22 Comportamento de uma viga em balanço sob carregamento lateral.....	77
Figura 3.23 <i>Outrigger</i> sob ação de um carregamento lateral. Diagrama de momentos.....	77
Figura 3.24 <i>Outrigger</i> com viga em balanço.....	78
Figura 3.25 Raumfachwewrk – system, Krupp Montal.....	79
Figura 3.26 Exemplos de torres.....	79
Figura 4.1 - Vista no plano das torres: protótipo e modelos	83
Figura 4.2 - Relações de ajuste entre o protótipo e o modelo	84
Figura 4.3 – Passos para aplicação da análise dimensional.....	91
Figura 4.4 – Esquema da torre analisada.....	92
Figura 4.5 – Ilustração dos três modelos de torre gerados com os fatores de escala.	106
Figura 4.6 – Razão entre os deslocamentos obtidos para os modelos de 80 e 120 m.	109
Figura 4.7 – Razão entre os esforços obtidos para os modelos de 80 e 120 m.	110
Figura 5.1 Torre de Iluminação	112
Figura 5.2 - Torre de Iluminação.....	113
Figura 5.3 - Torre Skylon	114
Figura 5.4 - Mastro da bandeira, Praça da Bandeira, Belo Horizonte.....	115
Figura 5.5 - Detalhes construtivos de torre de luz.....	116
Figura 5.6 - Torre de transmissões Olimpíadas de Barcelona.....	117

Figura 5.7 - Torre de transmissões Olimpíadas de Barcelona.....	117
Figura 5.8 - Desenhos da Torre de Monjuic.....	118
Figura 5.9 - Torre do Milenium.....	119
Figura 5.10 - Desenhos de Calatrava.....	120
Figura 5.11 - Formas da natureza.....	122
Figura 5.12 - Cactos.....	122
Figura 5.13 - Palácio do Doges.....	123
Figura 5.14 - Edifício em Nova York.....	124
Figura 5.15 - London Bridge Tower.....	125
Figura 5.16 - Desenhos esquemáticos.....	126
Figura 5.17 - Elevação torre.....	126
Figura 5.18 - Torre em Belo Horizonte.....	126
Figura 5.19 - Etapas de implantação de uma torre.....	127
Figura 5.20 - Planta de implantação de torre.....	128
Figura 5.21 - Torres metálicas.....	129
Figura 5.22 - Desenho de Plataformas de descanso.....	130
Figura 5.23 - Desenho de Plataformas de descanso.....	131
Figura 5.24 - Exemplos de torres com <i>outrigger</i>	131
Figura 5.25 - Elevação de torre.....	133
Figura 5.26 - Planta de locação das antenas na torre.....	133
Figura 5.27 - Detalhes e ligações.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Leis da ANATEL.....	53
Tabela 4.1 - Matriz dimensional do problema.....	97
Tabela 4.2 – Numeração e coordenadas dos nós.....	107
Tabela 4.3 – Forças nodais aplicadas	107
Tabela 4.4 – Incidência e as áreas adotadas	108

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O avanço na área de telecomunicações deu um salto muito grande nos últimos anos. Ele veio acompanhado pelo aparecimento de uma série de torres para antenas que, segundo cálculos aproximados, somam mais de 300.000 unidades em todo o território nacional. Estas torres foram incorporadas à paisagem urbana e rural sem que tivesse sido feito qualquer estudo tanto das suas localizações quanto de regulamentação, normalização e fiscalizações pela ANATEL que é o órgão federal responsável pelo controle das telecomunicações.

A ANATEL não podendo impedir o acesso à comunicação em nenhum local do território nacional, não consegue fiscalizar de forma efetiva, causando um enorme descumprimento e atendimento às normas. Desta forma foram aparecendo inúmeras torres no alto dos edifícios, em praças, nas Serras, nos adros das igrejas, interferindo de forma drástica na imagem urbana, nas áreas rurais e nos ambientes com patrimônio histórico e natural. Convém lembrar que o aparecimento destas torres veio se juntar às já existentes de rádio, TV, etc.

O grande número de torres deu-se pela falta de observância à legislação na exigência de compartilhamento das torres por diversas operadoras de telefonia móvel. Outro fator não considerado é o desenho destas torres, que em nenhum momento foi submetido a análises estéticas, funcionais e sendo desconsiderado por completo sua implantação e a imagem urbana ou rural geradas.

Encontra-se uma variedade de torres de telefonia móvel, de rádio e televisão que são implantadas diariamente em diversos pontos do território nacional. Percebe-se que não existem torres que tenham sido elaboradas pensando-se no compartilhamento de empresas e principalmente no seu aspecto estético. O que prevalece é o menor custo e o maior número de antenas implantadas a fim de proporcionar maior atendimento das diversas

empresas concorrentes. Percebe-se uma proliferação de torres, a grande maioria em perfis leves e de muito mau gosto.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

. Estudar os diversos tipos de torres para telefonia celular e outros equipamentos com o objetivo de desenvolver um projeto utilizando perfis tubulares.

. Definir parâmetros para projeto de torre, a partir de um modelo, utilizando a teoria da semelhança e que permita a execução de modelos iguais para diversos tamanhos de torres.

. Buscar um desenho mais elaborado, sob o ponto de vista estético e funcional, para as torres em perfis metálicos tubulares.

1.3 Metodologia de trabalho

Para se alcançar os objetivos propostos as seguintes etapas foram realizadas:

a) Levantamento de dados sobre a história das torres;

b) Compartilhamento de usos e legislação;

c) Levantamento de esforços e definição de perfis;

d) Estudo da teoria da semelhança;

e) Definição dos parâmetros mais relevantes, a partir do estudo das diferentes torres existentes e suas funções e da aplicação da teoria da semelhança.

f) Definição das etapas de projeto, observando-se os parâmetros mais relevantes analisados.

1.4 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 faz-se um levantamento histórico de diversos modelos de torres que foram construídas desde a antiguidade até os dias atuais. É mostrado um levantamento dos diversos usos das torres e dos seus sistemas construtivos. Faz-se uma análise do aspecto simbólico que os elementos verticais exercem sobre as construções elaboradas pelo homem, a possibilidade de compartilhamento de empresas e usos nas torres e, por fim, uma análise e revisão das normas e legislações (urbanas, de saúde entre outras) existentes. Todas as informações servem como subsídio para o embasamento conceitual, teórico, estético e funcional para a elaboração do projeto.

No capítulo 3 apresenta-se o estudo da teoria da semelhança e suas implicações para o estudo específico das torres metálicas.

No capítulo 4 são estudadas as tipologias estruturais das torres, os esforços que atuam em suas estruturas e a definição dos materiais a serem utilizados no projeto.

No capítulo 5 apresentam-se os parâmetros de desenvolvimento para projetos de torres.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 TORRES

2.1 A evolução histórica da torre de Babel à torre de Santiago Calatrava

A presença dos elementos verticais na natureza sempre foi referência para o homem tanto sob o aspecto simbólico, como referencial de localização, de sinalização, de domínio de lugar e utilizado como mirante para controle. Algumas formações rochosas como as encontradas em Milho Verde, Minas Gerais (FIG. 2.1), referenciam o lugar dando-lhe um aspecto mítico e caracterizam a redondeza. Outras formas como o Dedo de Deus (FIG. 2.3), criam referencial de longa distância.

A percepção destas possibilidades fez com que o homem construísse vários tipos de estruturas verticais como suporte para a transmissão de algum tipo de sinal, seja de comunicação (antenas, campanários, etc), de controle, domínio e simbólicos.



Figura 2.1 Rochas Milho Verde

Fonte – Foto de Castanheira, 2003



Figura 2.2 Dedo de Deus

Fonte – Foto de Castanheira, 2003

Em tempos imemoriais, num vale da Mesopotâmia, os clãs dos descendentes dos filhos de Noé, Sem, Cam e Jafé, em sua marcha para o Oriente, se encontraram e puseram a construir uma enorme torre, a torre de Babel. Empilharam, para tanto, milhares de tijolos, colando-os uns sobre os outros, com betume, para fazer com que um dia o seu ápice penetrasse nos céus. Provavelmente a intenção deles era agradecer à divindade por terem escapado ao terrível dilúvio que tudo arrasara em tempos remotos. Mas não foi assim que Jeová entendeu. Não viu aquele colosso se erguer no meio do nada como um possível agrado a ele, mas sim como prova da soberba dos homens. Queriam rivalizar-se com Ele. Resolveu intervir. Desceu em meio aos construtores e num gesto Dele todos começaram a dizer palavras em línguas diferentes. Ninguém mais se entendeu (FIG. 2.3 e 2.4).

Tamanha foi a desavença entre os humanos, que cada grupo resolveu partir para um canto distinto da Terra. Desse desentendimento de Jeová com os homens teriam nascido as confusões que conhecemos e que padecemos. Um Deus que temia a força daqueles a quem dera vida, agora os enfraquecia pela eternidade afora, dando um idioma diferente a cada um deles. Foi certamente pensando nisso que Jean Jacques Rousseau, no seu *Ensaio sobre*

a *Origem das Línguas*, afirmou que elas nasceram das paixões (dos rancores herdados dos tempos da Torre de Babel) e não das necessidades. Ou, como ele mesmo sentenciou, "não é a fome ou a sede, mas o amor, o ódio, a piedade, a cólera que lhes arrancaram as primeiras vozes... para repelir um agressor injusto, a natureza impõe sinais, gritos e queixumes."

Desde então, tudo levava a crer que inúmeras tentativas de reunir a humanidade, seja em que projeto for, redundavam em fracasso. Neste tempo todo, não faltaram profetas, nem poetas, conquistadores ou estadistas, filósofos gregos ou humanistas renascentistas, racionalistas ou revolucionários, messias de toda a ordem, que não tentassem reparar o estrago feito por Jeová nas antigas terras da Babilônia, e fazer com que a humanidade reencontrasse uma maneira de falar a mesma língua, ou pelo menos se sentasse ao redor da mesa e, mesmo por sinais, tentasse recuperar o entendimento perdido pelos tataranetos de Noé. E eles foram inúmeros.



Figura 2.3 Torre de Babel
Pintura de Pieter Brueghel (1565)

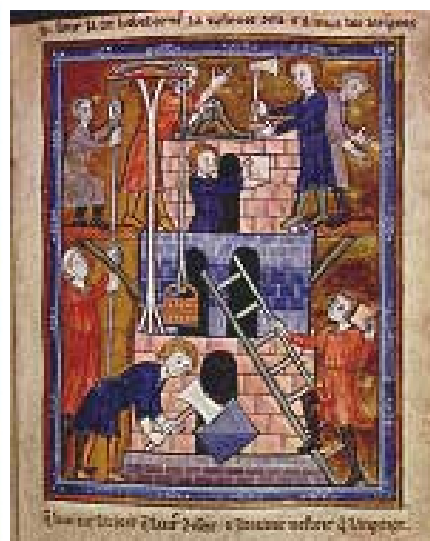


Figura 2.4 Construção da Torre de Babel

Fonte: terra, 2003.

Na antiguidade, quando o grande arquiteto Sóstrato de Cnido projetou e construiu um gigantesco farol na superfície rochosa da ilha de Faros, deixou em uma de suas paredes a seguinte inscrição: "Sóstrato de Cnido, aos protetores divinos, pela salvação das pessoas que demandam o mar". Na verdade, essas palavras sintetizam a função do célebre farol de

Alexandria (FIG 2.5), precursor dos inúmeros faróis que hoje se espalham por todo o mundo, indicando ininterruptamente o rumo aos navios. Considerada uma das sete maravilhas do mundo antigo, esse enorme farol encontrava-se desaparecido nas profundezas do mar Mediterrâneo desde o terremoto que assolou a ilha de Faros em 1303.



Figura 2.5 Desenho reconstituído do Farol de Alexandria
Fonte: Revista Geografica Universal (Julho 1980)

Ainda nos dias atuais arqueólogos e mergulhadores trabalham em conjunto em busca de elementos arquitetônicos e outras provas que permitam uma nova e mais real reconstituição do Farol. O farol foi tão bem construído que suas fundações foram usadas na estrutura do forte Qaitbey (FIG.2.6).



Figura 2.6 Forte de Qaitbey.
Fonte: Revista Geográfica Universal (Julho 1980)

Os zigurates (FIG. 2.7) eram um dos elementos mais característicos da antiga Mesopotâmia. Em muitas cidades, o templo do Deus tutelar compreendia um zigurate que constava de uma série de plataformas sobrepostas em cima das quais havia um templo. A planta era semelhante em todos eles, com uma base retangular, três escalinatas que se cruzavam em ângulo reto e que conduziam ao templo altar.

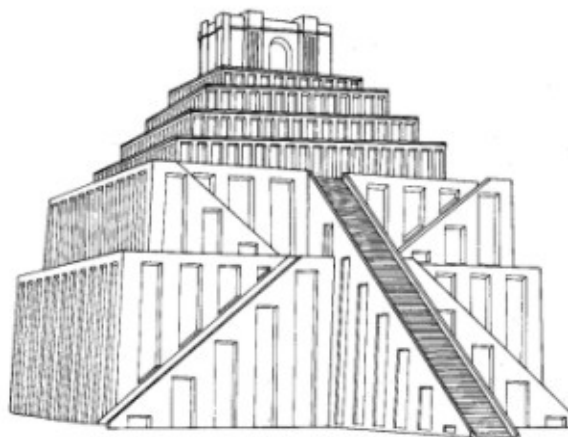


Figura 2.7 Zigurate.

Fonte: História das Artes, 1978.

O historiador grego Heródoto dizia que ali se celebravam as núpcias sagradas de uma sacerdotisa com Deus (que talvez estivesse representado na pessoa do rei) num ritual destinado a assegurar a prosperidade futura do país.

O maior cartão postal da Índia (FIG. 2.8), o Taj Mahal, é uma homenagem do Imperador Shah Jahan à sua mulher, Muntaz. O monumento representa uma das mais famosas histórias de amor de todos os tempos. Este mausoléu em mármore branco foi construído pelo Imperador à sua esposa, que morreu ao dar a luz ao seu 14º filho, em 1630. O Taj Mahal levou 16 anos para ser construído entre os anos 1632 e 1648, ocupando o trabalho de 20 mil homens. Seu arquiteto foi o iraniano Isa Khan. Os materiais foram trazidos de todo o país e do exterior, transportados por mais de mil elefantes. A construção apresenta sete minaretes de 50 m de altura ao redor do mausoléu e definindo um eixo de acesso à entrada do minarete.

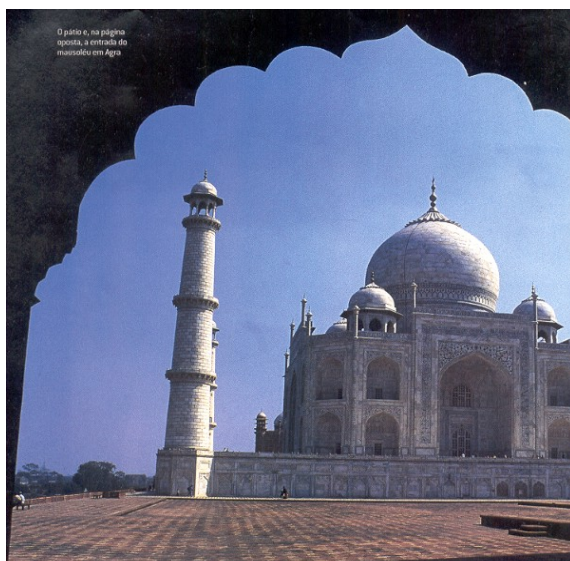


Figura 2.8 Taj Mahal

Fonte: Revista Viagem e Turismo (Novembro 2002).

A Torre da maior catedral gótica da Europa, Torre da Giralda (FIG. 2.9) construída entre os anos de 1401 e 1520 na cidade de Sevilha na Espanha, por ter sido anteriormente minarete de uma mesquita, denota influência da arquitetura árabe na região sul da Espanha. Do alto da torre tem-se uma visão de 360° de toda a planície do Rio Guadalquivir, importante acesso de ouro e mercadorias.



Figura 2.9 Torre da Giralda

Fonte: Foto de Castanheira, (1987).

A Torre de Pizza (FIG. 2.10 e 2.11) é circular em estilo românica com 15,85 m de diâmetro e altura de 40 m, construída em 1174 para ser o campanário da catedral de Pizza, na Itália. A estrutura é constituída por uma série de colunas externas conectadas por arcos que circundam por duplos corredores.

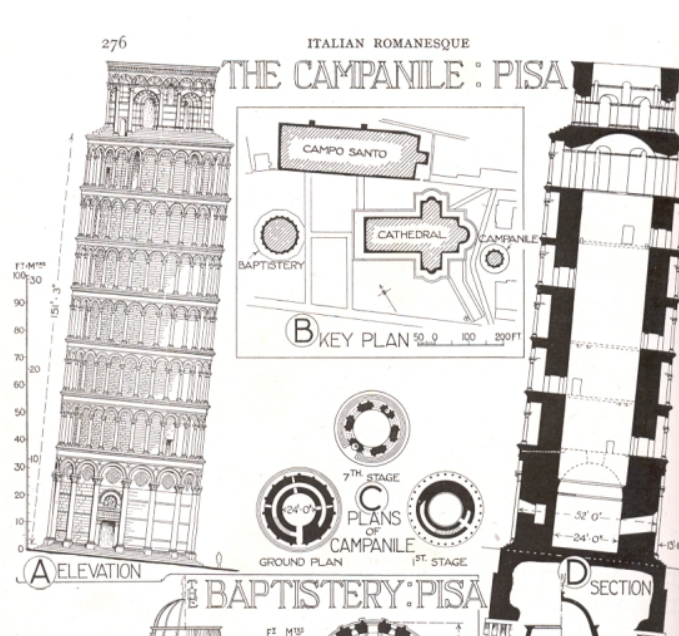


Figura 2.10 Torre de Pizza Fachada e Planta.

Fonte: Fletcher (1950, p. 276)

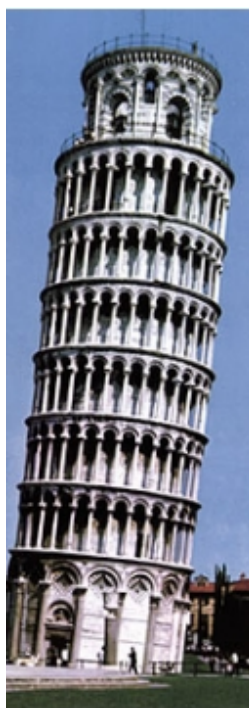


Figura 2.11 Vista Torre de Pizza

Fonte: Foto de Araujo (1984)

A Torre Eiffel, projeto do arquiteto Gustave Eiffel (FIG.2.12 e 13), foi construída em 1889 em comemoração ao centenário da Revolução Francesa. Foi construída em aço marcando a introdução de um novo material na construção civil. Sua altura chega a 300 m e foi a maior estrutura do mundo até 1930. A torre Eiffel reflete o puro espírito humanista da época, da escalada ao céu sem nenhum outro propósito a não ser permitir a subida das pessoas para se ter uma visão do entorno.



Figura 2.12 Torre Eiffel.

Fonte: Hervé, 1945.



Figura 2.13 Torre Eiffel.

Fonte: toure-eiffel, 2003.

A história da torre de televisão de Berlim (FIG. 2.14) está diretamente ligada com a situação da divisão da Alemanha em duas partes e da divisão da cidade de Berlim. Ela foi

construída em 1969, tornando-se símbolo político e arquitetônico (FIG.15) A torre tem 32 m de diâmetro na base, possui 2 elevadores e tem um observatório a 203,78 m de altura. O topo da torre está a 368,03 m.



Figura 2.14 Detalhes da torre de Berlim

Fonte :wriegels, 2003.



Figura 2.15 Construção da torre de Berlim

Fonte : wriegels, 2003.

A torre de Menara Kuala Lumpur (FIG. 2.16), construída na Malásia possui estrutura em concreto e é a mais alta torre de telecomunicações do Sul do leste asiático. Com 421 m de altura é a terceira mais alta do mundo, ficando atrás somente para a CN Tower (553 m) em Toronto no Canadá, a OstanKino Tower (537 m) em Moscou e a Shanghai Tower (450 m) em Shanghai.

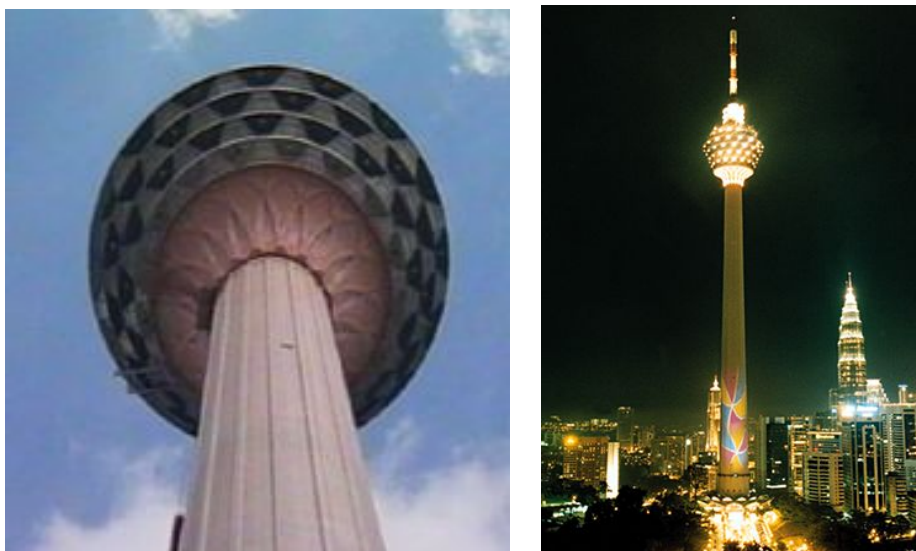


Figura 2.16 Detalhes da torre Kuala Lumpur

Fonte: menaraki, 2003.

A sua arquitetura foi projetada pelo arquiteto Kumpulan Senireka em 1996. Está localizada no coração do triângulo de ouro do epicentro do centro empresarial e econômico

da cidade de Kuala Lumpur. Sua arquitetura reflete a herança dos países Islâmicos nos detalhes da escrita Árabe e nos motivos florais, abstratos e clássicos da arte islâmica. Possui cinco seções básicas: base de fundação, edifício turístico, o fuste da torre, o coração da torre e o mastro da antena. Numa altura de 282 m está localizado o restaurante com capacidade para 250 pessoas. O acesso é feito por elevadores de alta velocidade com capacidade para 21 pessoas ou por 360 degraus de escada. Abaixo do restaurante está localizado um mirante com 150 poltronas.

Como a arquitetura sempre foi um dos recursos preferidos pelos seres humanos para marcar sua passagem pelo planeta, todas as grandes civilizações ergueram obras colossais como símbolos de poder e riqueza. A lista, que começa pela torre de Babel, passa pelas pirâmides, os jardins da Babilônia, as catedrais da idade média, entre outras.

Várias cidades continuam a construir seus monumentos, como se pode observar no caso das Petronas Towers em Kuala Lumpur, projeto do arquiteto César Pelli, capital da Malásia. São duas torres em concreto que roubaram da Sears Tower em Chicago, nos Estados Unidos, a condição de o edifício mais alto do mundo (FIG. 2.17). O conjunto de escritórios possui 450 m de altura. As torres gêmeas da Malásia são o símbolo do poderio econômico dos chamados “Tigres Asiáticos”.

Outros projetos estão para ser inaugurados e serão mais altos que as Petronas Tower; são eles Chongqing Tower na China com 468 m e a Millennium Tower no Japão com 800. m.



Figura 2.17 Desenho comparativo de várias torres.

Fonte: Revista Veja (Fevereiro de 1996)

Na (FIG. 2.18) são mostradas as mais altas estruturas do mundo, sejam elas torres de transmissão, comemorativas, de escritórios, observatórios, chaminés.

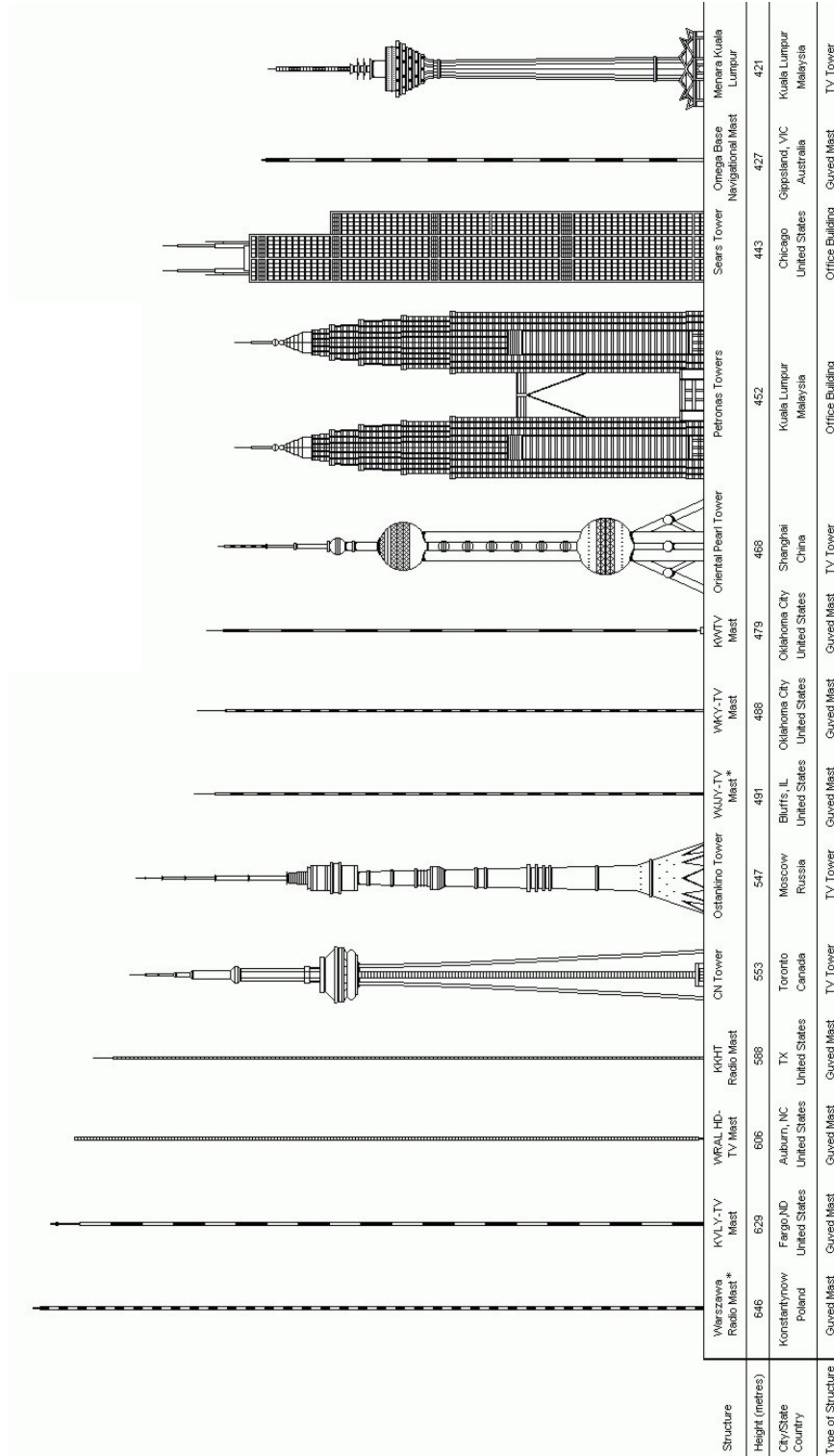


Figura 2.18 Desenho comparativo de várias torres.

Fonte: /members, 2003

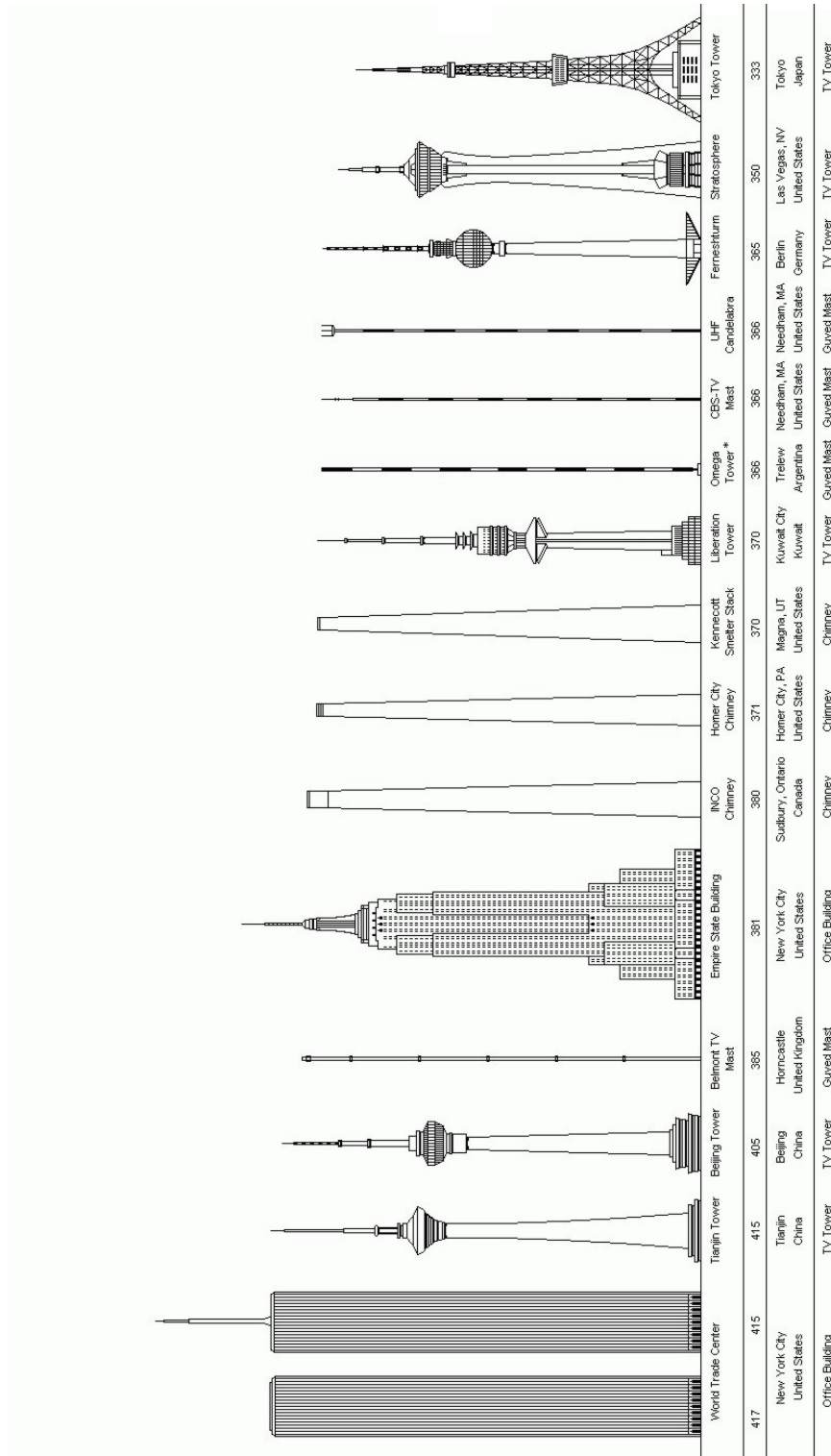


Figura 2.18 Desenho comparativo de várias torres.

Fonte: /members, 2003

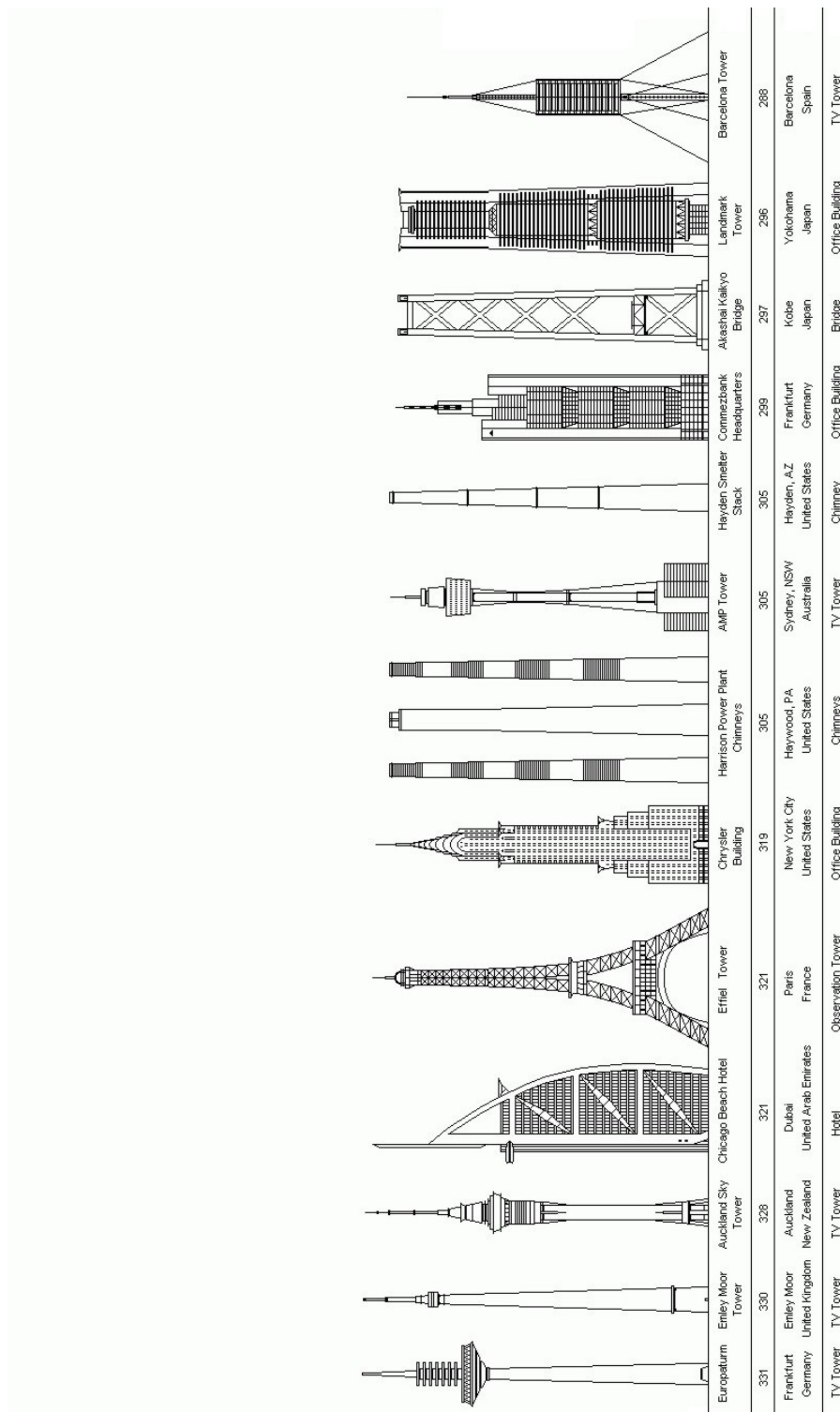


Figura 2.18 Desenho comparativo de varias torres.

Fonte: /members, 2003

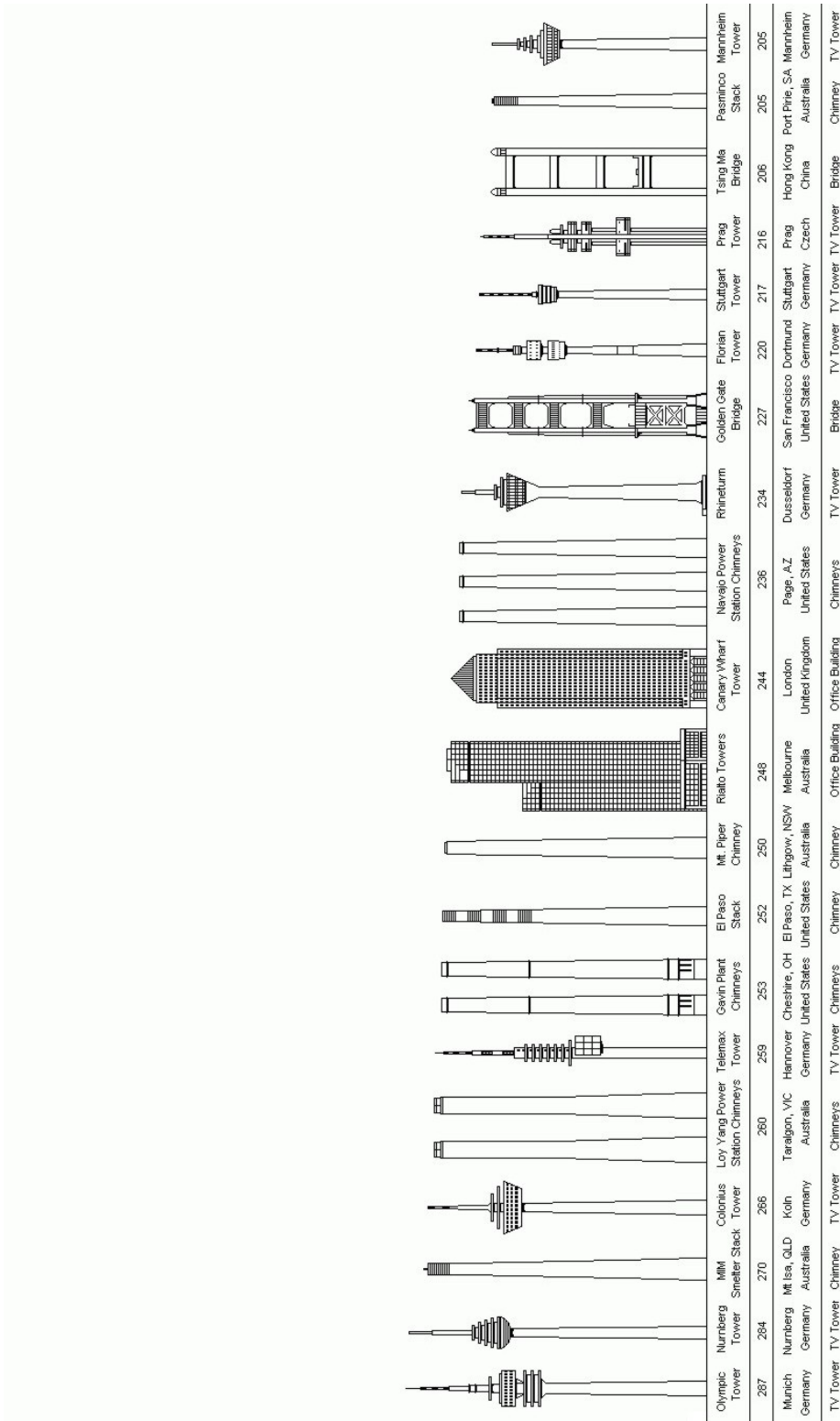


Figura 2.18 Desenho comparativo de várias torres.

Fonte: /members, 2003

2.2 O aspecto simbólico das estruturas e dos elementos verticais

A torre, na expressão do artista, tem o aspecto simbólico como mais importante que o aspecto tecnológico. São exemplos dessas características a Torre de Babel, Colossos de Rhodes, Pirâmides do Egito, Templos Maias (México), Kutub Minar na Índia.

Nas áreas urbanas o ego, a competição, os fatores sociais e econômicos levam a valorização de determinadas áreas. O urbanismo atual é plurifuncional e procura atuar em zonas concretas através de uma produção tecnológica mais avançada, fomentando o conhecimento e a cultura frente ao deterioramento dos antigos tecidos industriais centrais. A localização de elementos escultóricos (FIG. 2.19, 2.20) criam ambiências específicas para o encontro das pessoas e definem espaços simbólicos nas cidades.



Figura 2.19 Escultura luminosa numa praça no centro financeiro de Nova York

Fonte: Broto, 2002.



Figura 2.20 Escultura de Joan Miro em Barcelona

Fonte: Vivas, 1973.

A idéia da verticalidade está presente nas esculturas em madeira do artista plástico mineiro José Bento Chaves (FIG. 2.21). O artista denomina suas esculturas de “torres” explorando diversas formas dos elementos verticais.



Figura 2.21 Escultura de madeira, de José Bento.

Fonte: catálogo do artista, 1997.

Uma outra obra de arte verticalizada é aquela criada pelo artista plástico Kenneth Snelson (1927). A escultura intitulada *Tensegrity Tower* (1968) (FIG. 2.22), localizada no Museu Kröller – Müller em Otterloo, Holanda. A escultura mostra a definitiva elegância das formas estruturais eficazes. Ele utiliza tubos de aço tensionados por cabos.

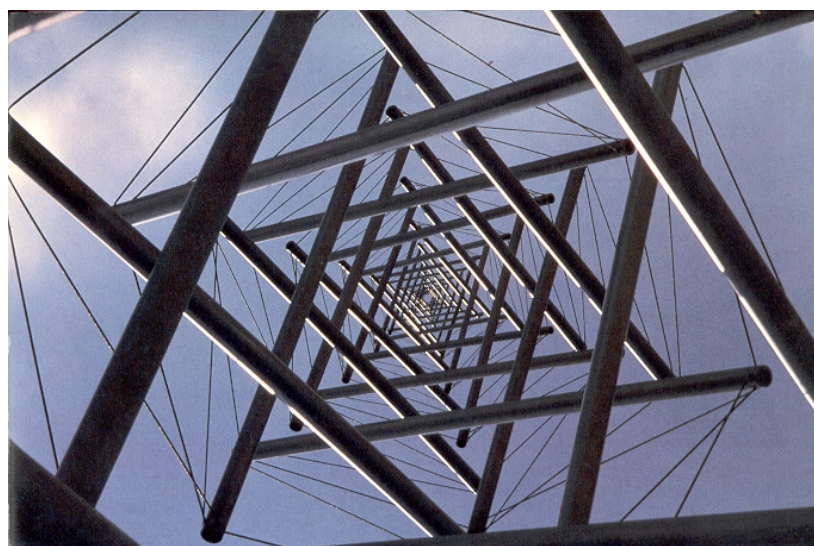
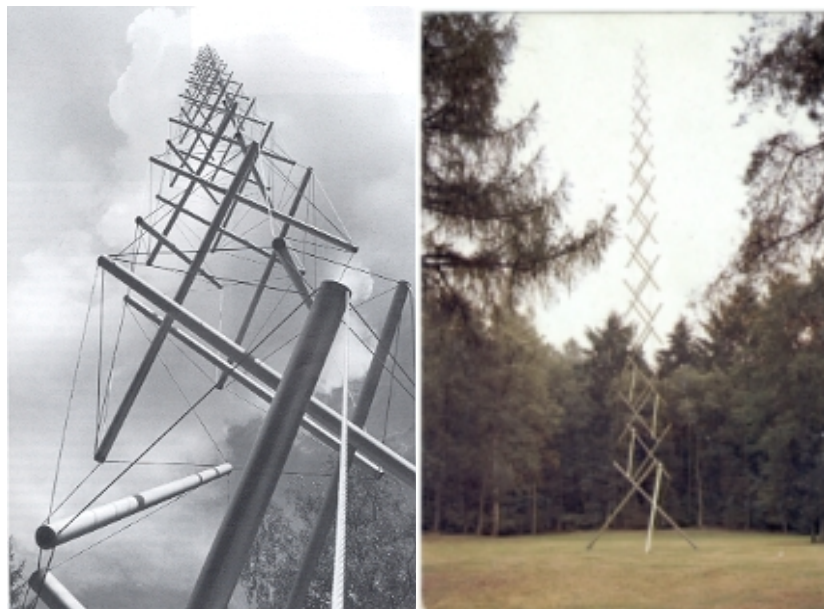


Figura 2.22 Tensegrity tower

Fonte: Kurokawa, 1993.

O Belvedere (FIG. 2. 23) se levanta aos pés do *World Financial Center* de Nova York ao sul de Manhattan. Está cercado de água em dois de seus lados com vistas do rio Hudson, a Ilha de Ellis, a Estátua da Liberdade e a costa de Nova Jersey. Este espaço dirige

o trânsito comercial do residencial da área de Bathery Park. Este pequeno Parque está entre edifícios enormes e estabelece conexões ao invés de provocar conflitos. O parque foi desenhado como uma pedra angular de enlace entre o contexto urbano existente e a paisagem. Duas torres de ferro desenhadas por Martin Puryear se mostram como referência mais expressiva do projeto sobre a borda do rio.



Figura 2.23 Imagens do belvedere

Fonte: Broto, 2002.



Figura 2.23 Imagens do belvedere

Fonte: Broto, 2002.

O aspecto simbólico muitas vezes se confunde com a imagem que o objeto construído está inserido. No campus da UFMG no ano de 2002 apareceu da noite para o dia uma enorme árvore que agride a paisagem do campus. A espécie da subdivisão

gymnospermae que não é característica da região confronta-se de forma brutal com as espécies da subdivisão *angiospermae* típicas do local.

Na verdade viu-se tratar de uma torre de antena de telefonia transvertida de pinheiro importado da Argentina (FIG. 2.24). O objeto além de gosto estético duvidoso tem a forma que nada tem a ver com a função. A torre camuflada teve sua aprovação pelo Conselho Municipal de Meio Ambiente (COMAM) mostrando que tais aprovações deveriam ser largamente debatidas pelas comunidades diretamente próximas e profissionais de áreas diversas.



Figura 2.24 Torre do Campus UFMG

Fonte: Foto de Castanheira,2003.

A tentativa de objetos “semelhantes” poderia no caso específico ter sido inspirada por exemplo com a palmeira imperial (FIG.25), como a que se encontra no adro da Igreja de São Francisco na cidade de São João Del Rei.



Figura 2.25 Igreja São Francisco de Assis

Fonte: Foto de Castanheira,2003.

2.3 As funções das torres

Os elementos verticais sempre existiram incorporando diversas funções que foram variando em função do tempo e das necessidades humanas. Pode-se observar na antiguidade as cidades com suas torres que geralmente marcavam as igrejas e palácios. A verticalização não existia enquanto uma imagem futurista (FIG.2.26) nos dá uma visão onde prevalecem as torres sejam de edifícios e ou equipamentos necessários à vida urbana.

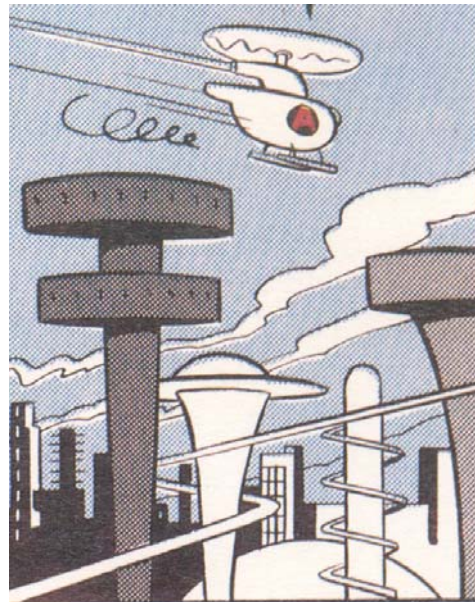


Figura 2.26 Cidade antiga e do Futuro

Fonte: A arquitetura na História em Quadrinhos, 1985.

Pode-se listar diversas torres com funções diferenciadas, entre elas a torre de água *The Thames Water Tower* (FIG. 2.27) desenhada pelo arquiteto Brookes Stacy Randall em 1992. É um monumento comemorativo aos feitos da engenharia e se trata de um barômetro público gigante concebido por Damien O'Sullivan e Tania Doufa do Royal College of Art, com uma altura de 16 m.

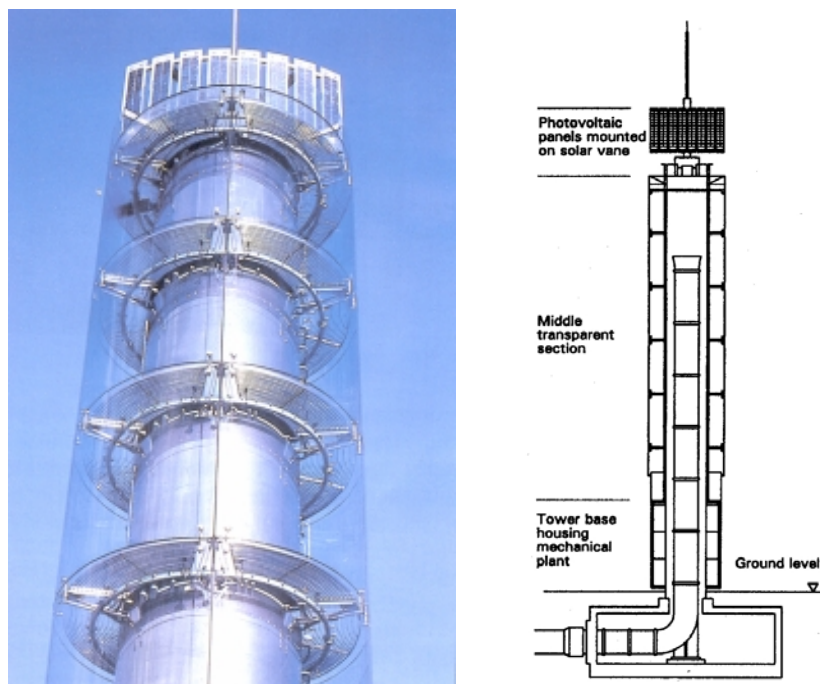


Figura 2.27 Thames water tower

Fonte: Baddoo et al, 1997

Outros exemplos são as antenas da TV Globo São Paulo (FIG.2.28), antena Rede TV São Paulo (FIG. 2.29) entre outras localizadas no topo dos grandes e altos edifícios da avenida Paulista na cidade de São Paulo. Estas antenas marcam a paisagem urbana no ponto mais alto da cidade. São iluminadas à noite com efeitos especiais de maneiras diferenciadas para identificação de seus proprietários. A Antena da TV Gazeta tem incorporado um sistema de luzes coloridas que informam a previsão do tempo para o dia seguinte. Estas antenas representam o poderio das empresas de televisão.



Figura 2.28 Antena TV Globo



Figura 2.29 Antena Rede Tv São Paulo

Fonte: Revista Iluminação Brasil, 1991

As torres no centro empresarial de Nova York (FIG.2.30), Estados Unidos, além de criar ambiência ao parque, mostram também a valorização turística e artística que a cidade incorpora em suas intervenções urbanas. Este espaço é utilizado por todos que trabalham nesta área. É o ponto de partida para os barcos que levam à estatua da Liberdade e à ponte que liga Nova Jersey.



Figura 2.30 Torres no Centro empresarial de Nova York

Fonte: Broto, 2002.

Outra torre construída com o projeto do Arquiteto espanhol Santiago Calatrava é a torre para sinais de transmissão de rádio e TV para a Expo 98 (FIG. 2.31), realizada em Lisboa Portugal. A torre aproveitou uma antiga torre de petróleo da refinaria Petrogal. O arquiteto incorporou elementos em estrutura metálica desfazendo todo o caráter de caixa d'água.



Figura 2.31 Torre Expo 98 Lisboa
Fonte: Revista Espaço D, 2001.

Com função bastante diferente das torres anteriores citadas, no aeroporto de Los Angeles, Estados Unidos, foram usadas diversas torres iluminadas (FIG. 2.32) que direcionam o pouso e a decolagem de aviões.



Figura 2.32 Torres de Sinalização para aviões no Lax Airport Los Angeles
Fonte: Tzonis , 2002.

Outro projeto de torre com função semelhante do arquiteto Santiago Calatrava, é a torre de comando para o aeroporto da cidade de Bilbao (FIG.2.33). A construção desta torre mostra o quanto a cidade tem investido em projetos arrojados no período de 1990 a 2000 acarretando numa melhoria urbana e o aumento do turismo na cidade.



Figura 2.33 Torre de Controle - Sondica Aeroporto de Bilbao- Espanha

Fonte: Tzonis, 2002.

Um projeto para torre de transmissão (FIG. 2.34) e central de equipamentos telefônicos, no morro de Santa Tereza, zona Sul de Porto Alegre, projeto do arquiteto Flavio Lemberg, transformou-se em marco urbano. Com o desenvolvimento do projeto, a estrutura ganhou escritórios e áreas de treinamento. A empresa percebeu a oportunidade de transformar o edifício em marco urbano, reforçando sua presença na região. A torre de transmissão tem 95 m de altura e está situada no eixo da composição geométrica do edifício. Ela possui cinco plataformas de concreto com balanços de 4 m. Quatro dessas plataformas foram criadas para a colocação das antenas de transmissão. A quinta localizada em nível intermediário, é fechada com caixilho inclinado, configurando um mirante. À noite, as luzes coloridas destacam, no *skyline* da cidade, a torre futurista, que, por seu porte, desenho e iluminação, permite a visualização do conjunto mesmo a longa distância.

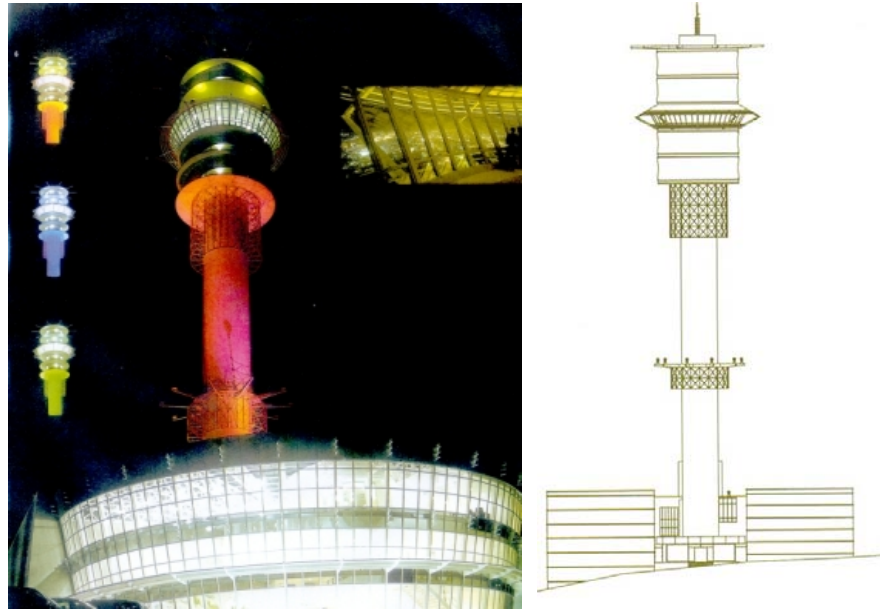


Figura 2.34 Torre central de equipamentos telefônicos

Fonte: Revista Projeto Design, maio 2001.

A torre que acolhe as antenas de TV e rádio de Brasília (FIG. 2.35) é um símbolo na capital do país. A torre localiza-se no eixo monumental proposto pelo arquiteto Lúcio Costa. O plano piloto é formado por dois eixos imaginários perpendiculares: eixo rodoviário e eixo monumental. O eixo rodoviário foi arqueado de acordo com a topografia local. Na estrutura da torre são incorporadas, além das antenas, uma plataforma que serve de mirante para a cidade implantada no planalto central.



Figura 2.35 Torre de Brasília

Fonte: Foto de Castanheira, 2003.

Num dos pontos mais altos da cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais encontra-se uma edificação moderna (FIG. 2.36) que servia de estação de Radio da cidade. Hoje o local está sofrendo uma transformação, pois existem várias antenas de rádio e televisão. O local é privilegiado com uma bela vista da cidade e ponto de lazer para a população. O projeto prevê a compatibilização das antenas e a restauração da edificação com a criação de uma praça mirante.



Figura 2.36 Antenas em Juiz de Fora

Fonte: Foto de Castanheira, 2002.

Na cidade de Miyagi-gun no Japão em 1994 o arquiteto Shoichi Hariu projetou uma torre *Composite Sports Garden of Miyagi Water Tower* para a caixa d'água (FIG. 2.37) com altura de 27,6 m. A torre apresenta uma estrutura em aço para suportar 150 toneladas de água. Sua base é reforçada com concreto.

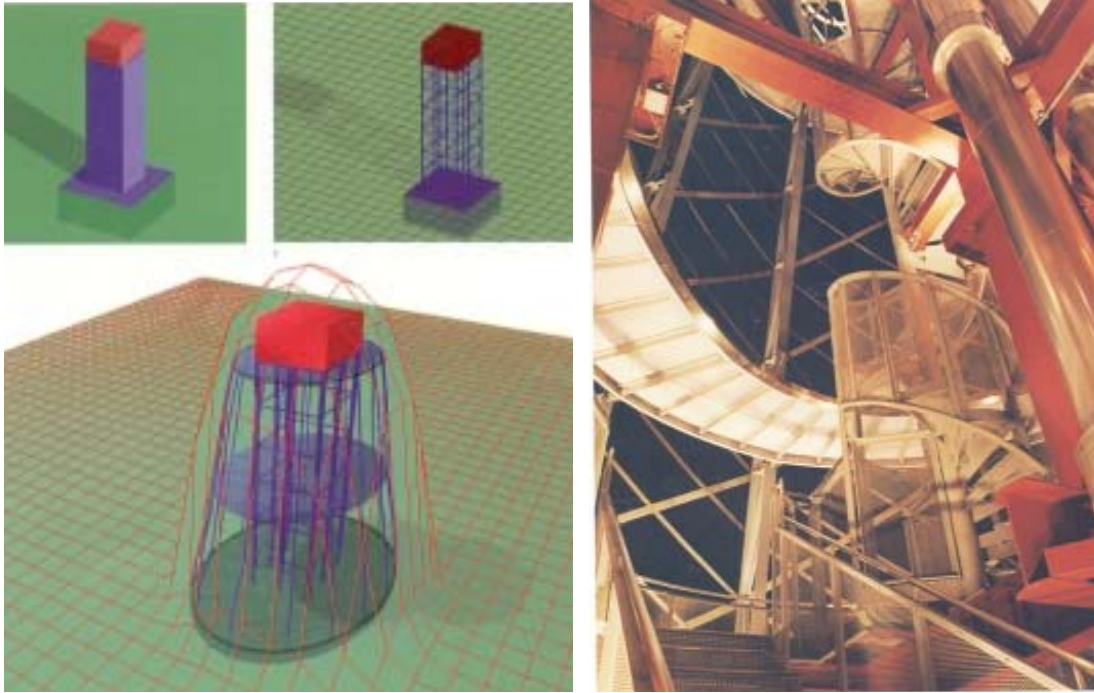


Figura 2.37 Torre de caixa água no Japão

Fonte:: Kurokawa, 1993.

Como uma criação meramente artística e idiossincrática o arquiteto Simon Ródia, em 1921, criou e construiu a Watts Tower (FIG. 2.38) na cidade de Los Angeles, California - EUA. A torre monumento era em concreto e aço em estilo exuberante urbano vernacular. Em 1955 foi demolida. Esta torre representava a fantástica fantasia artística do artista que acrescentou à espiral uma haste com uma malha colorida e decorada com conchas marinhas e fragmentos quebrados de louça e garrafas.

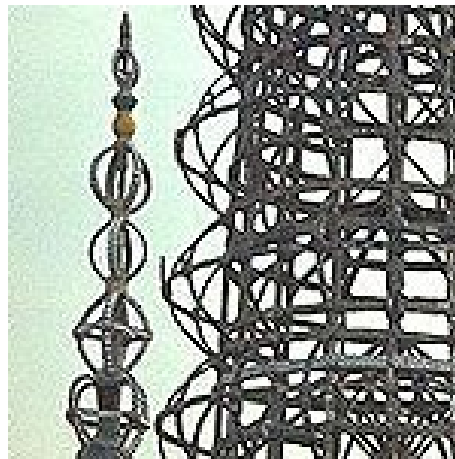


Figura 2.38 Watts Tower

Fonte: Great building, 2003

Sempre por ocasião das Olimpíadas são construídas junto às Vilas Olímpicas torres para transmissão de TV, rádio e telefone. De acordo com os projetos as torres sempre marcam o *sky Line* das vilas olímpicas. As torres sempre passam a ser um símbolo da Olimpíada (FIG.2.39).



(a) Düsseldorf



(b) Dortmund



(c) Köln

Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas

Fonte: wriegels, 2003.



(d) Hamburg



(e) Frankfurt Am Main



(f) Stuttgart

Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas

Fonte: wriegels, 2003.



(g) Mannheim



(h) Nürnberg



(i) Dresden

Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas

Fonte: wriegels,2003



(j) Berlin 2



(k) München

Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas

Fonte: wriegels,2003.



(l) Berlin 1

(m) Hanover 1

(n) Hanover 2

Figura 2.39 Exemplos de torres utilizadas nas Vilas Olímpicas

Fonte: wriegels,2003.

Na (FIG. 2.40) mostram-se outros vários modelos de torres existentes na Europa e Austrália.



(a) Emley Moor G.B (JK)

(b) Kuopio SF (BB)

(c) Prag

Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades europeias

Fonte: wriegels,2003.



(d) Rotterdam NL



(e) Tampere SF

(e) Wien A

Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades europeias

Fonte: wriegels,2003.



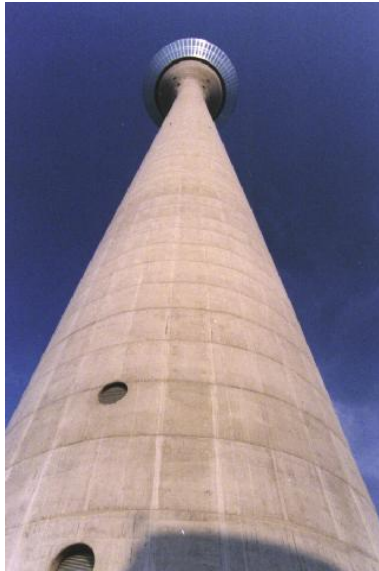
(f) Auckland NZ (ES)



(g) Sydney AUS(ES)

Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades europeias

Fonte: wriegels,2003.



Düsseldorfer Rheinturm

Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades europeias

Fonte: wriegels,2003.

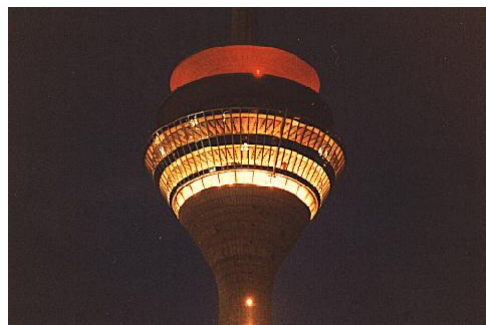


Figura 2.40 Exemplo de torres em várias cidades europeias

Fonte: wriegels,2003.

Em Berlim, na Alemanha, em 1972, foi construída junto a vila Olímpica ao lado da *Olympic Games Tent*, com projeto de Gunter Behnisch em Munich, a torre (FIG. 2.41) para transmissão dos jogos Olímpicos.



Figura 2.41 Olympic Games Tend

Fonte: greatbuildings, 2003.

Projetada por Edo Rocha, em 2001, e concluída em 2003 (FIG.2.42) a sede da operadora de telefonia celular Vivo e sua torre de 105 m de altura tornaram-se um marco visual nas imediações da ponte do Morumbi, em São Paulo. O prédio de seis pavimentos é dividido em dois blocos revestidos por aço inoxidável com acabamentos fosco e polido. Antes que o edifício fosse construído, a união de sete empresas de telefonia móvel, entre elas a própria Telesp, resultou na *joint venture* Vivo, liderada pelos grupos Portugal Telecom e Telefônica Móviles. A mudança implicou alterações no desenho das fachadas, para que ela passasse a expressar a imagem da companhia recém formada. O nome Vivo deu a idéia de usar material reflexivo, que desse vida à edificação e espelhasse movimentos e cores do entorno, como se fosse um caleidoscópio. O revestimento brilhante e a torre com 105 m de altura, dá suporte a equipamentos de telefonia celular e são os responsáveis pelo impacto visual do edifício a marca Vivo é grafada com *leds* nas quatro cores da logomarca da empresa. Até 40 m de altura, ela é feita de concreto moldado *in loco* revestido por aço inoxidável. A partir dessa altura foi executada com estrutura de aço pintado, formando anéis que simbolizam as ondas de transmissão de sinais de telefonia celular.



Figura 2.42 Edifício Operadora Vivo
Fonte:Revista Projeto Design,dez.2003.

Na cidade de Kobe no Japão foi construída uma torre em estrutura metálica, *Kobe Poter Tower* (FIG. 2.43) que serve de restaurante.



Figura 2.43 Torre restaurante *Kobe Poter Tower*
Fonte Kurokawa, 1993.

Outra torre construída entre as cidades de Tóquio e Nara (FIG. 2.44) é a *Tóquio Nara Tower*. Em uma das suas idéias teóricas a torre representa e interpreta o estado de desenvolvimento dos arranha céus dos arredores. Sua principal característica são os jardins verticais suspensos em espirais ao redor da estrutura central. “Estes jardins do céu” são parques recreativos compensando a falta deles pela ocupação excessiva ao seu redor. A posição dos diversos pisos desenha uma sombra no chão à maneira de um relógio solar (FIG.2.45).

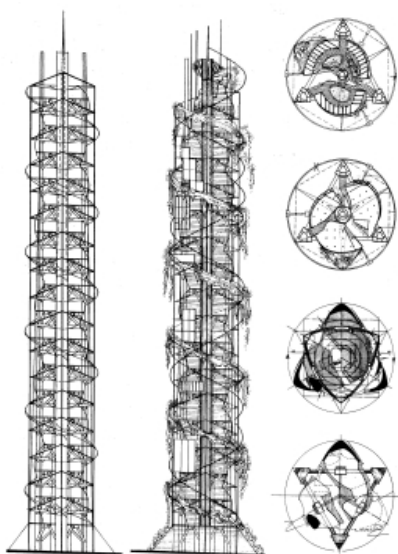


Figura 2.44 Torre de Tóquio Nara Tower.

Fonte: Kurokawa,1993

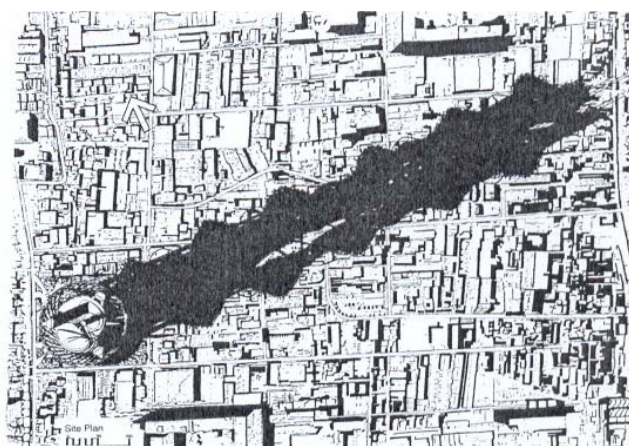


Figura 2.45 Sombra produzida pela torre.

Fonte: Kurokawa,1993

Ainda no Japão a Torre da NHK Nagano Station (FIG. 2.46, 2.47) na cidade de Nagano, foi concebida pelos arquitetos da MIKAN arquitetos associados em 1997. A torre

com 60 m de altura acoplada aos escritórios da empresa serve de suporte para aos diversos equipamentos de transmissão e referencia-se na paisagem urbana.

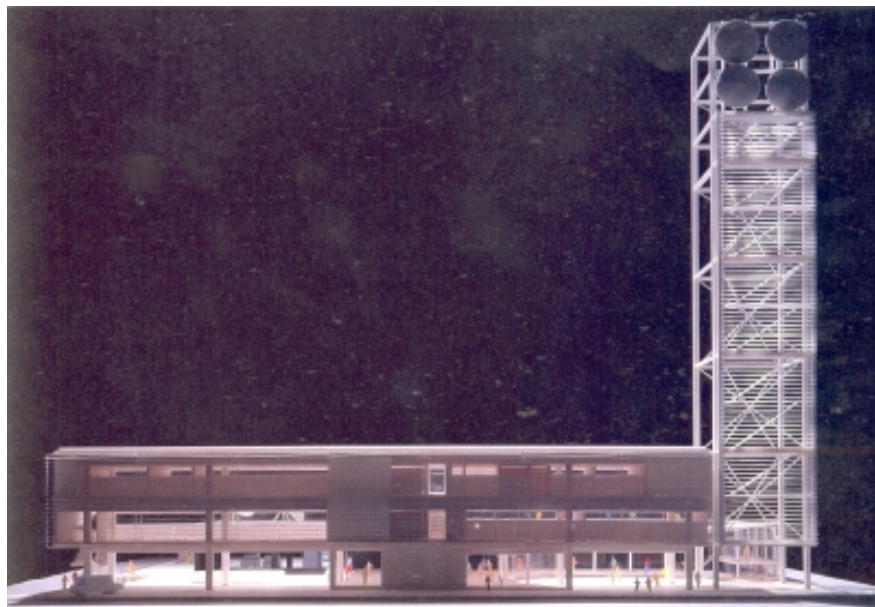


Figura 2.46 NHK Nagano Station

Fonte: Kurokawa,1993



Figura 2.47 NHK Nagano Station

Fonte: Kurokawa,1993

Após o atentado de 11 de setembro que destruiu as torres gêmeas do *World Trade Center* na região do Wall Street em Nova York, foi elaborado um concurso para projetos que poderiam ser feitos no local. No primeiro momento foi colocado um foco de luz muito potente que traçava no céu duas torres de luz. Hoje já se conhece o projeto que irá ser construído no local. O projeto escolhido são as torres *Freedom*, com 540 m de altura, do arquiteto Daniel Libeskind (FIG.2.48, 2.49) que simulou diversas vistas da nova torre. A idéia da não construção das mesmas torres foi abandonada em função do aspecto simbólico exercido pelos edifícios altos, assim como pela necessidade de viabilização e o uso da estrutura urbana no entorno destes edifícios.



Figura 2.48 Freedom tower

Fonte: renewny, 2003.



Figura 2.49 Freedom tower

Fonte: renewny, 2003.

Concreto e metal marcam, com jogos de luz, a cidade de Barueri na grande São Paulo. A torre construída foi o monumento do cinquentenário do município em 1999. A torre está localizada à beira da rodovia que dá acesso à cidade (FIG. 2.50). O projeto dos arquitetos Mário Biselli e Paola Biselli foi inaugurado em 2000. A torre passou a ser o maior ponto de referência na paisagem da cidade industrial da zona oeste de São Paulo, à beira da rodovia Castelo Branco. Inspirados nos faróis de sinalização que orienta os navegantes, os autores tomaram como ponto de partida a idéia de uma torre bem iluminada que pudesse ser vista a longa distância, assinalando, assim, a localização da cidade. O projeto consta de uma simples torre de caixa d'água em concreto pré-moldado, com 25 m de altura e 2 m de diâmetro, porém valorizada pela plasticidade das chapas de aço perfuradas, com cantos que nunca encostam, mas formam quatro fachadas diferentes e semitransparentes. Durante o dia a torre reflete o brilho do sol, mas é à noite, quando as lâmpadas se acendem automaticamente, que ela assume seu papel de monumento, revelando os efeitos luminotécnicos proporcionados pelos canhões de luz e anéis de néon instalados por dentro e fora das faces metálicas, impondo a visualização de sua geometria.

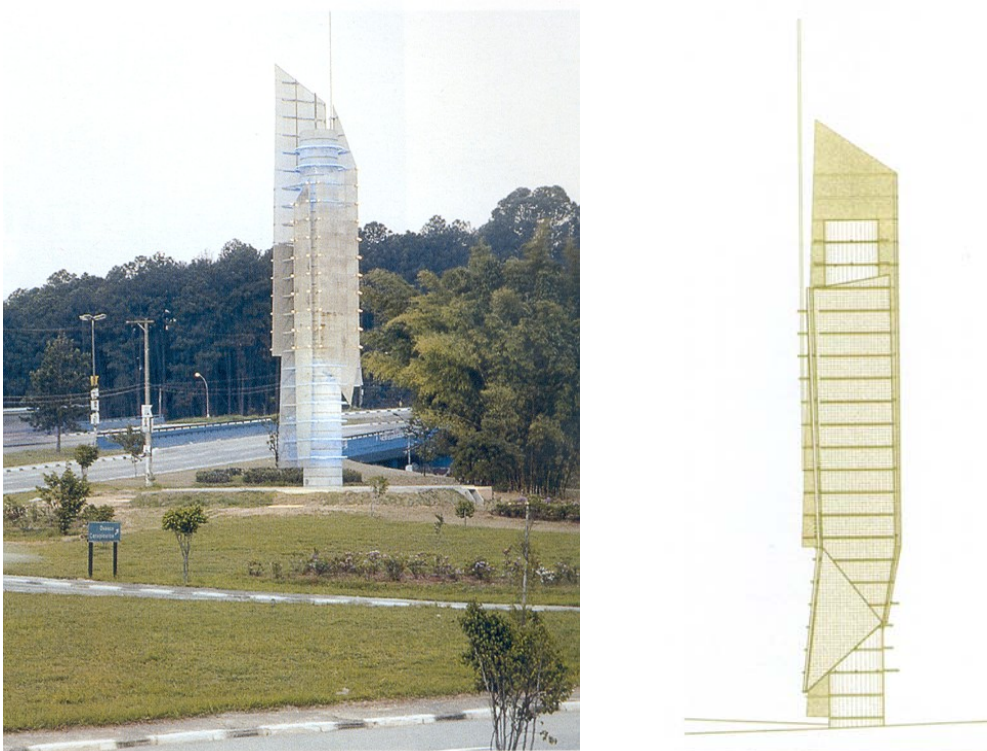


Figura 2.50 Torre da cidade de Barueri

Fonte: Revista Projeto Design, maio de 2001

Construída em 1976 pela Canadian National Railways a CN Tower (FIG. 2.55) tinha o objetivo de receber antenas de transmissão de rádio e TV. Hoje é também utilizada como atração turística, com acesso ao mirante. Está localizada na cidade de Toronto no Canadá. A torre possui 553 metros de altura, sendo mais alta que vários edifícios e torres de todo o mundo.



Figura 2.51 CN Tower

Fonte: Prospecto de visita, 1997.

A torre da cidade de Tóquio (FIG. 2.56) foi construída como uma cópia da Torre Eiffel de Paris. Além de receber todas as antenas de TV e rádio da cidade, serve de mirante. Está localizada no centro da cidade e cria muito contraste com o restante da cidade, que não é muito verticalizada.



Figura 2.52 Tokyo Tower
Fonte: Prospecto de visita, 1999.

Outra Torre de transmissão muito diferente é a da cidade de Santiago de Compostela na Espanha (FIG. 2.57) projeto do arquiteto Norman Foster. A torre foi concebida como uma plataforma acima das árvores.



Figura 2.53 Torre de Santiago de Compostela
Fonte: Bohigas et al, 1991.

2.4 A compatibilização dos serviços nas torres

Uma metrópole se define por seus contrastes. Segundo o cineasta Wenders (2003), “Uma cidade inesquecível é um acervo de imagens”. O que fazer para que esta imagem não se torne caótica e degradada? Deve-se nos projetos de intervenções e operações urbanas visionárias e futuristas contemplar a preocupação com o ecossistema, a qualidade de vida, a fantasia e a racionalização, em busca de novas alternativas tecnológicas e fontes de energia.

O tema da V Bienal de Arquitetura em São Paulo no ano de 2003, foi o de discutir uma melhor qualidade urbana, social e ambiental, para as pessoas que vivem nas grandes metrópoles. O tema discutiu também as possibilidades do atendimento aos desafios de ordem ecológica, recursos e fontes de energia, degradação e violência urbana, como fator de saída para uma cidade possível.

A maioria das propostas de operações urbanas indica, em síntese, pontos comuns:

- Uma mistura de espaços e equipamentos verticais e horizontais, interligando o novo e o tradicional;
- Intervenções pontuais, funcionando como pontos de irradiação para a qualificação e valorização de espaços urbanos degradados. Como por exemplo, a vila olímpica em Monjuic na cidade de Barcelona;
- Criação de espaços e equipamentos diversificados para atividades culturais, de lazer e comerciais;
- Ênfase em áreas verdes, privilegiando os espaços de circulação para pedestres e ciclistas;
- Ação de parcerias plurais, com iniciativa privada, profissionais multidisciplinares,

a administração pública e a comunidade local;

Uma das idéias a ser perseguida e muito difundida hoje para uma cidade possível é a compartilhamento e infra-estrutura de redes de telecomunicações como solução para minimização dos impactos de radiações como de elementos estranhos na paisagem. Neste sentido deve ser feito um trabalho de integração da comunidade, comunicação com os clientes, escolha de mão de obra especializada e definir os custos de operação. A ANATEL, órgão regulador das telecomunicações no Brasil, não incentiva a regulamentação para a compatibilização de torres de transmissão, o que diminuiria substancialmente o número de torres para antenas de telefonia móvel e fixa. A concorrência atual das diversas companhias telefônicas fez crescer muito rapidamente o número das antenas colocadas, na maioria das vezes, em locais nobres da cidade e muito perto umas das outras.

As secretarias de meio ambiente e patrimônio ficam impotentes frente à demanda das empresas e da própria população, que eventualmente aluga espaços dentro de propriedades particulares (no alto de edifícios, quintais, adros de igrejas, etc.) e acabam autorizando a colocação de tais antenas. As empresas, na busca de uma maior cobertura para agregar novos habilitados, não vêem limites para a instalação das antenas.

Como o custo da construção das torres é alto as empresas não disponibilizam o compartilhamento da torre, mesmo sabendo que tal custo poderia ser rateado e que o diferencial que pode existir como atrativo de novos habilitados é, sim, a diferenciação de tarifas e promoções, já que a cobertura acaba sendo a mesma para todas as empresas.

Apesar das dificuldades, as populações, órgãos de classe e os representantes dos governos que dirigem as cidades podem solicitar e exigir espaços tratados com dignidade e apropriados para o uso da comunidade. Projetos existem, como a proposta de colocação de uma única torre de transmissão no mirante da cidade de Juiz de Fora (FIG.2.51) em substituição às várias torres existentes. Como a implantação das torres de transmissão normalmente localiza-se em áreas elevadas, em função de melhor sinal, a compatibilização poderia proporcionar antenas maiores e mais elaboradas, permitindo um melhor sinal e a despoluição visual das cidades.



Figura 2.54 Torre da cidade de Juiz de Fora

Fonte: Foto de Castanheira, 2002.



Figura 2.51 Torre da cidade de Juiz de Fora

Fonte: Foto de Castanheira, 2002.

2.5 A legislação de implantação de torres

Já foi comprovado que o impacto da instalação das torres de transmissão de telefonia móvel e fixa nas áreas urbanas é muito maior que o da propagação de ondas eletromagnéticas não ionizantes emitidas pelas antenas. No Brasil, hoje, existem mais de 200.000 estações de radio e telefonia. Para a implantação de torres para antenas devem ser feitos estudos de avaliação do local (locais longe de hospitais, escolas, creches, asilos), limites de exposição e o efeito térmico das torres. As normas restritivas que definem a quantidade de radiação emitida pelas antenas seguem critérios dados segundo as normas de organismos internacionais NBC-Canada (1980), BOCA(1984), SBC(1985), UBC(1985), ANSI(1982).

A descoberta de áreas sombreadas ou sem cobertura definem uma área chamada *site*. O estudo chamado de *cell planning* é o primeiro passo dado para detectar a necessidade da instalação de uma nova torre, os ângulos, alturas e tipos de antenas (TDMA ou GSE). Este estudo considera a demanda para antenas transmissoras, retransmissoras, a altitude da área e a existência ou não de torres no local para possível compartilhamento. Feito este primeiro estudo, é encaminhado então para a segunda fase chamada, de *Site Investigation*, que consiste em descobrir o melhor local para a implantação da torre de transmissão, seja em local comprado ou alugado (solo ou cobertura de edifícios). Escolhido o *site*, passa-se à escolha do melhor equipamento que atenda à demanda, podendo ser: torre, poste, mastro (acima de edifícios) ou cavalete (pequena torre). Só aí, o projeto de implantação dos equipamentos será submetido às legislações municipais e ao COMAR (Conselho do Ministério da Aeronáutica) que define cores das torres e a necessidade ou não de balizadores luminosos.

A ANATEL, que é órgão regulador, normatizador e fiscalizador ao atendimento às normas de limites de exposição e parâmetros físicos de instalação de torres, não consegue fiscalizar todas as antenas, e muitas vezes, permite a construção em locais sem nenhum estudo de impacto visual e aprovação pela comunidade local, como acontece na avenida Bernardo Monteiro, em Belo Horizonte (FIG. 2.52).



Figura 2.55 Torre de transmissão de telefonia Celular. Av. Bernardo Monteiro, BH.

Fonte: Foto de Castanheira, 2000.



Figura 2.52 Torre de transmissão de telefonia Celular. Av. Bernardo Monteiro, BH.

Fonte: Foto de Castanheira, 2000.

O local, situado numa região tradicional do bairro Floresta, possui várias casas remanescentes da primeira metade do século XX, correspondendo ao início de ocupação

pela classe média. O canteiro central desta avenida é bastante largo e poderia ser destinado ao lazer da população, tão carente de espaços públicos dotados de infraestrutura de lazer. Atualmente, encontra-se bastante degradado ocupado durante o dia por lavadores de carros e no período da noite abandonado. A degradação do local decorre em grande parte por causa dos diversos equipamentos e construções instaladas que geram espaços escuros, sujos e pouco atrativos.

A ANATEL, a nível nacional estipula algumas leis e resoluções que governam a implantação de torres (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Leis da ANATEL

Nº da lei ou resolução	Data	Conteúdo
Lei nº 9.472	16/07/1997	Lei geral de telecomunicações LGT
Lei nº 9.691	22/07/1998	Altera a tabela de valores da taxa de fiscalização da instalação TFI
Lei nº 9.986	18/07/2000	Dispõe sobre a gestão de recursos humanos das agências reguladoras e dá outras providências
Resolução nº199	16/12/1999	Aprova o regulamento para arrecadação de receitas do fundo de fiscalização das telecomunicações FISTEL- Apresenta consolidação das alterações introduzidas pela legislação na tabela de valores da taxa de fiscalização da instalação por estação
Lei nº5.070	07/07/1996	Cria o fundo de fiscalização das telecomunicações FISTEL
Lei nº9.998	17/08/2000	Institui o fundo de universalização dos serviços de telecomunicações FUST
Lei nº 10.052	28/11/2000	Institui o fundo para o desenvolvimento tecnológico das telecomunicações FUNTTEL
Decreto nº3.624	05/10/2000	Dispõe sobre a regulamentação do serviços de telecomunicações FUST

Fonte: Diário Oficial da União, 2003.

No município de Belo Horizonte, além das normas nacionais ditadas pela ANATEL, a implantação de torres deve ser submetida ao licenciamento ambiental em três etapas.

A primeira etapa consiste na LP (licença prévia) onde é feito o EIA-RIMA (Estudo de impacto ambiental, Relatório de impacto ambiental) para que, através da Secretaria de Meio Ambiente, possa ser submetido à apreciação por diversos órgãos (BH TRANS,

Secretaria de Cultura, COPASA e a própria sociedade). Com estas manifestações em audiência pública é feita então a liberação pelo COMAM (Conselho Municipal de Meio Ambiente) da licença prévia. Na maioria das vezes a licença vem acompanhada de condicionantes ambientais e deve atender à lei municipal nº 7.277 de 1997, o decreto nº 10.889 de 30 de novembro de 2001 e as deliberações Nº 35,37 e 38 de 2001. Na segunda etapa é feito o PCA (Plano de Controle Ambiental) que é o desenvolvimento do projeto. Por fim na terceira etapa é feita a LO (Licença de Operação) que se resume, em última instância, na verificação correta da implantação.

Em Belo Horizonte, como forma de incentivo ao compartilhamento de torres, a empresa que usa uma torre já implantada é submetida somente ao LI (Licença de Implantação e à LO (Licença de Operação), para isto fazendo, então, o RCA (Relatório de Controle Ambiental). Esta medida, na realidade, não conseguiu incentivar o compartilhamento, já que na concorrência das operadoras o principal trunfo é a sua área de abrangência.

A associação Brasileira de Normas Técnicas também apresenta outras normas que devem ser seguidas, como a NBR 6323:1988, NBR6120: 1980, referentes à ação do vento e atuação de cargas respectivamente. Devem ser observadas as reduções de riscos elétricos nas torres, bem como a descarga elétrica sofrida nas torres urbanas, onde então deve ser usada a blindagem para ondas planas. Na maioria das vezes o aterramento para proteção de raios utilizados nas torres não é suficiente para proteger a estrutura de um edifício que não esteja aterrado adequadamente para este fim, já que a implantação de torres no alto destes edifícios potencializa a possibilidade de raios, sendo estes mais perigosos que as radiações planas.

As normas de local e entorno, proporção e os detalhes de fixação, e a tentativa de se evitar a descaracterização do edifício, devem ser sempre contempladas. Outras formas de camuflar os efeitos do impacto visual das torres são constantemente utilizadas, como esconder ou tentar a camuflagem com árvores. Estas soluções nem sempre são adequadas e sim satisfatórias para a especulação econômica.

A interferência das Prefeituras, principalmente nas cidades históricas, (FIG. 2.53) deveria contemplar de maneira mais enfática os aspectos em relação à liberação e à regulamentação na permissão da locação de torres. Na grande maioria das vezes as torres causam impactos visuais ao patrimônio histórico e ambiental.



Figura 2.56 Torres de transmissão de telefonia Celular - Catas Altas - MG.

Fonte: Foto de Castanheira, 2002.

Na entrada da cidade histórica de Parati, no Estado do Rio de Janeiro, se depara com um conjunto de antenas (FIG. 2.54) agrupadas em uma área na principal avenida de acesso à cidade. Nota-se a falta de respeito à legislação e também em relação ao impacto visual. Mesmo estando fora do perímetro tombado pelo patrimônio histórico, as antenas estão localizadas no perímetro de preservação ambiental da Serra do Mar. A existência de várias antenas é necessária para cobrir as áreas de abrangência. O compartilhamento permitiria a redução de pelo menos 1/4 ou mais de torres, já que também poderiam ser incorporadas antenas de rádio e TV.



Figura 2.57 Torres de transmissão em Parati.

Fonte: Foto de Castanheira, 2004.

CAPITULO III

3 A TIPOLOGIA ESTRUTURAL DAS TORRES

3.1 Considerações iniciais

As cidades contemporâneas cresceram verticalmente, atingindo grandes densidades demográficas e oferecendo aos seus cidadãos uma maior quantidade de serviços e conforto, de maneira a proporcionar o maior bem estar possível. Tornam-se necessários estádios, grandes estações, grandes teatros, torres de transmissão, etc. As grandes estruturas tornam-se o símbolo dos tempos atuais. O avanço tecnológico avassalador vem impulsionando todos os setores das comunicações e das construções nas cidades. Este avanço acarreta de maneira especial as áreas da engenharia e arquitetura estético-estrutural, fazendo com que as construções das edificações tornem-se cada vez mais suntuosas, ecléticas, grandiosas e sofisticadas (FIG.3.1).



Figura 3.1 Torre de telecomunicações em espiral.

Fonte: Eekhout, 1980.

O arquiteto, sendo o planejador que concretiza idéias, associando estética, segurança, conforto e funcionalidade, assume uma responsabilidade muito grande com tudo isso. Ele faz com que a estrutura incorpore papel fundamental nos elementos componentes que contribuem para a existência da forma material das edificações.

A estrutura é uma necessidade da arquitetura. A exigência de conhecimento estrutural, quanto à extensão e conteúdo da forma, faz do arquiteto um especialista com uma visão abrangente, obrigando-o ao conhecimento em cada um dos campos especializados, de modo a permitir um mínimo de discernimento na análise da forma-espço, tanto nos aspectos funcionais quanto estéticos da obra, como também, e principalmente, nos aspectos técnico-estruturais. Um exemplo é o da Art Tower Mito, do arquiteto Arata Isozaki, (ROBBIN,1996) onde a forma da torre consiste na repetição das faces do tetraedro regular permitindo uma aparência externa de uma tripla espiral (FIG. 3.2).

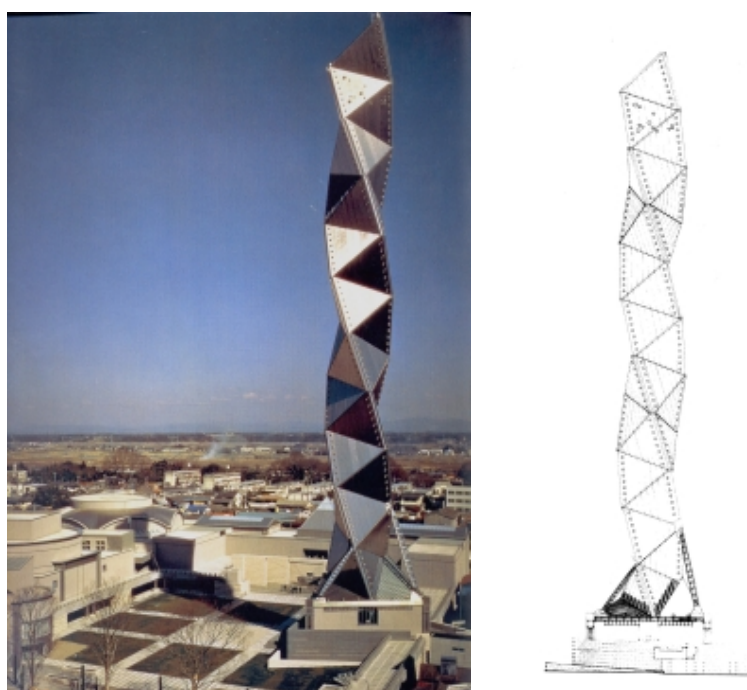


Figura 3.2 Art Tower Mito , Arquiteto Arata Isozaki.

Fonte: Robbin ,1996

Admitindo-se que a essência de um projeto estrutural seja o desenvolvimento de um sistema de forma material que conduz as forças para certas direções, transferindo-as para as fundações com o máximo de estética, eficiência material e mínima obstrução de espaço interior, é necessário um conhecimento bastante consistente dos esforços estruturais que se desenvolvem, de uma maneira geral, os quais são antagônicos à estética e à funcionalidade.

O profissional tem toda a liberdade de idéias e métodos, porém, mesmo com os avanços tecnológicos atuais, um perigo pode surgir que são as limitações técnicas, que na

maioria das vezes correspondem à solução da estabilidade estrutural. As principais finalidades a serem atingidas são o conhecimento sobre as relações entre cargas aplicadas aos corpos deformáveis, constituídos por um certo material, e as deformações neles resultantes; desenvolver uma compreensão completa das relações entre cargas aplicadas a um corpo deformável e as tensões provocadas no corpo; desenvolver uma percepção clara das relações entre as tensões e as deformações, com o objetivo de encontrar as dimensões necessárias para que certo material seja capaz de suportar uma determinada carga, com as tensões e as deflexões predeterminadas.

3.2 Estabilização

Não se pode confundir resistência com estabilidade, evidentemente que uma construção precisa ser resistente e estável. Assim pode-se dizer que resistência é a capacidade das peças de resistir aos esforços solicitantes sem se deformar excessivamente e estabilidade é a capacidade das peças e das ligações entre elas de não se deslocarem excessivamente. Posto isto, a continuidade deste capítulo contemplará os sistemas de estabilização vertical, enfocando as diferentes formas de que se pode lançar mão para estabilizar verticalmente uma construção, seja fazendo uso dos chamados contraventamentos, ou através da rigidez das ligações entre as peças (vigas e colunas), chamadas ligações rígidas ou por outros elementos que possam ser incorporados na concepção do projeto como tirantes ou a utilização de *outriggers*.

Como os projetos que utilizam a estrutura metálica, estão mais susceptíveis ao efeito dos esforços horizontais provocados pelo vento, podem-se integrar diversas soluções.

3.2.1 Análise Estática e Dinâmica da Estrutura Metálica

A ação do vento, que é uma carga dinâmica tratada como estática, bem como as cargas provocadas pela frenagem e aceleração de veículos em garagens de edifícios, provoca ação horizontal longitudinal e transversal necessitando algumas providências no sentido de estabilizar o conjunto estrutural. Estas cargas tornam-se mais acentuadas ainda em edifícios garagem, em galpões industriais e hangares que contém pontes rolantes. Neste

momento do projeto é preciso uma análise ampla envolvendo os diversos sistemas de estabilização, adotando a melhor forma de estabilizar o conjunto, levando-se em conta não só os aspectos técnicos, mas também econômicos e arquitetônicos.

No campo da estática (estabilidade) das construções podem-se analisar alguns sistemas estruturais simples, mas que por extensão de raciocínio podem ser ampliados para sistemas mais complexos. Considere, por exemplo, o pórtico mostrado na (FIG. 3.3). Pergunta-se: este pórtico está estabilizado? Por quê?

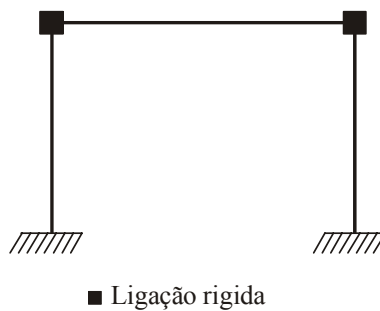


Figura 3.3 Pórtico engastado

Sim, está. Trata-se de um pórtico hiperestático com grau de hiperestaticidade igual a 3, em que a estabilidade seria dada pela rigidez das ligações entre as peças (colunas e vigas) associada com a inércia relativa entre estas peças. Por tratar-se de um pórtico deslocável o conjunto rigidez das ligações mais inércia relativa das peças são responsáveis pelo maior ou menor deslocamento conforme seja maior ou menor o grau de rigidez das ligações e a inércia relativa (FIG. 3.4 e 3.5).

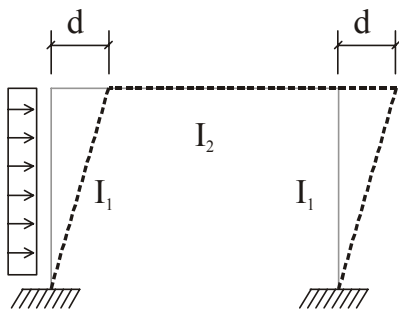


Figura 3.4 Deslocamento

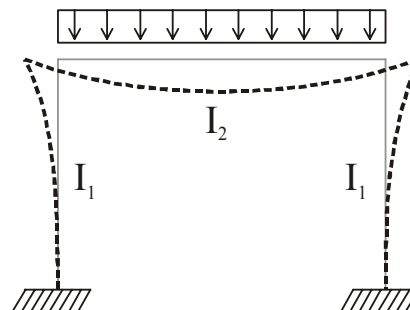


Figura 3.5 Flexão

Continuando a análise, considere agora o pórtico apresentado na (FIG.3.6).

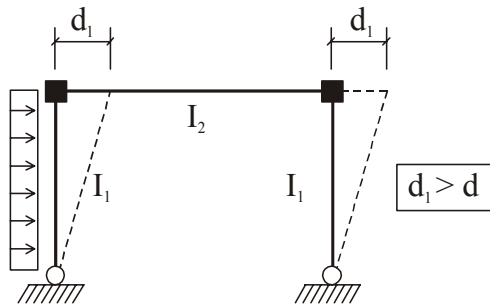


Figura 3.6 Deslocamento

Este pórtico continua hiperestático, agora com apenas um grau de liberdade. Isto quer dizer que ele se tornou mais deslocável.

O que acontece se for colocado um contraventamento neste pórtico? (FIG. 3.7).

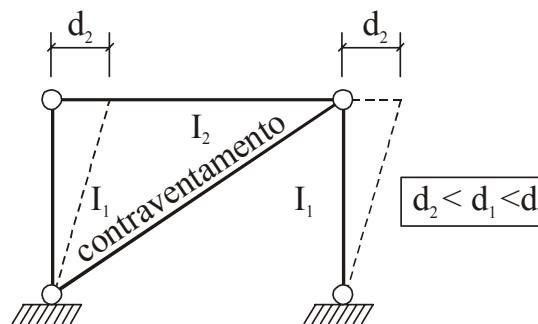


Figura 3.7 Pórtico com contraventamento.

A presença da peça de contraventamento impediu que o deslocamento do pórtico atingisse o valor de d_1 . Continuando esta análise, veja um pórtico conforme o mostrado na (FIG. 3.8).



Figura 3.8 Pórtico com ligações articuladas.

Esta estrutura é hipostática, isto é, é uma estrutura instável. É o tipo de modelo estrutural que a engenharia não pode adotar, pois a estrutura fica sujeita ao colapso. Colocando-se uma peça de contraventamento a estrutura volta a ser estável, mesmo tendo as ligações articuladas (FIG. 3.9).

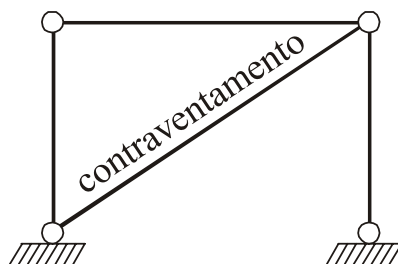


Figura 3.9 Pórtico com ligações articuladas e com contraventamento.

Com isto, pode-se refletir sobre a eficiência do contraventamento, tanto para o caso do pórtico engastado (FIG.3.3) quanto para o pórtico todo articulado (FIG. 3.8). Para o primeiro o contraventamento diminui o deslocamento, e no segundo estabiliza o pórtico.

Precisa-se estar atento aos deslocamentos, primeiramente por causa da segurança da estrutura. Deslocamentos excessivos fazem a estrutura se comportar “sofrendo” efeitos de segunda ordem, já que a estrutura não tem comportamento de conjunto numa edificação. Ela trabalha com outros materiais como concreto (laje), alvenarias, vidros, etc., que não aceitam deslocamentos, que para a estrutura até seriam toleráveis.

Diversas maneiras podem ser adotadas para estabilizar verticalmente uma edificação. Saindo de uma estrutura simples como as mostradas nos dois casos anteriores e trabalhando com uma estrutura tri-dimensional, têm-se outras formas de estabilizar este conjunto. Como ilustração mostra-se uma deformação (exagerada) do “esqueleto” estrutural de uma edificação (FIG. 3.10). Para que ela não deforme ou que deforme dentro de um certo limite, têm-se alguns mecanismos de estabilização além dos quadros rígidos e dos contraventamentos já explicados.

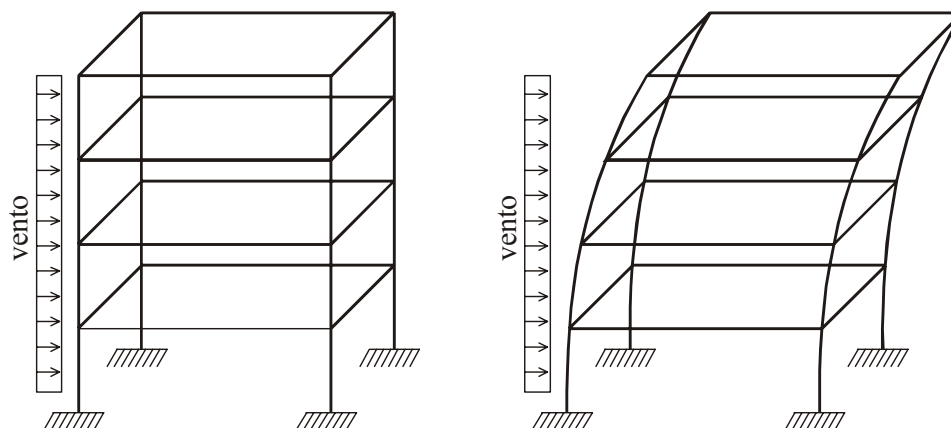


Figura 3.10 Estabilidade estrutural

3.2.2 Ação do Vento

A ação do vento gera sobre elementos verticais (FIG. 3.11) deformações e momentos. A ação do vento em uma construção é dinâmica e influenciada por fatores como o relevo, a rugosidade do terreno, as construções adjacentes, a forma da construção, a sua esbeltez e as aberturas existentes (Hart e Sontag, 1976).

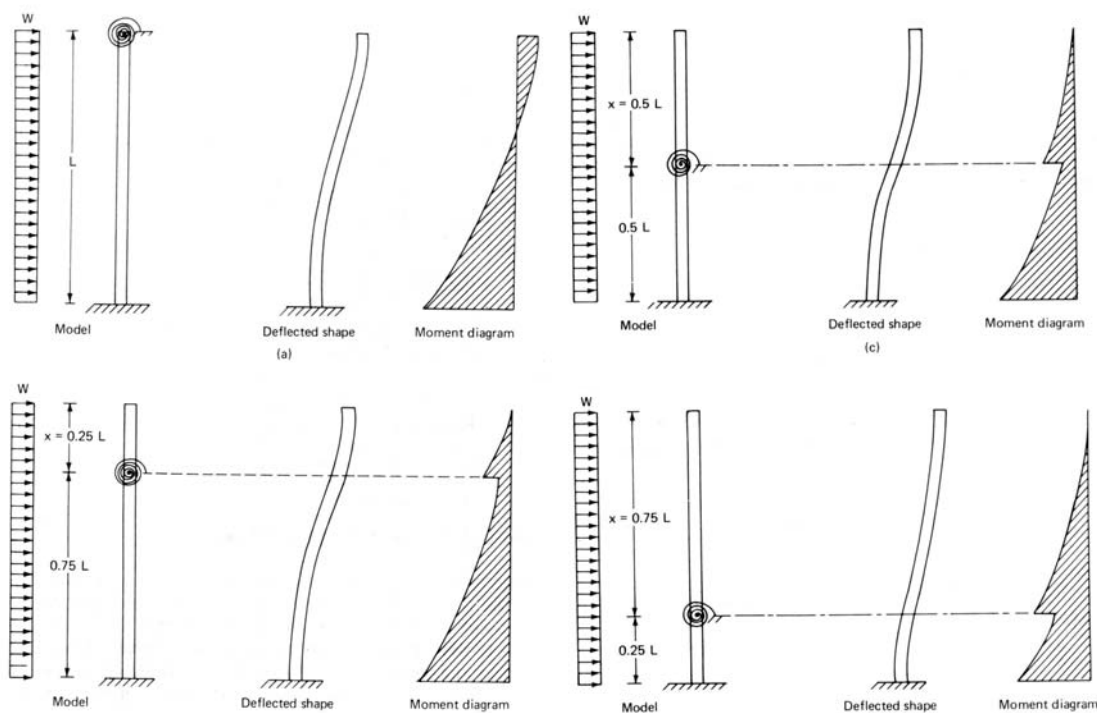


Figura 3.11 Ação do vento

Fonte: Hart & Sontag, 1976

Na (FIG.3.12) mostram-se as curvas da velocidade do vento sobre terrenos com diferentes graus de rugosidade para valores máximos de 160 km / hora.

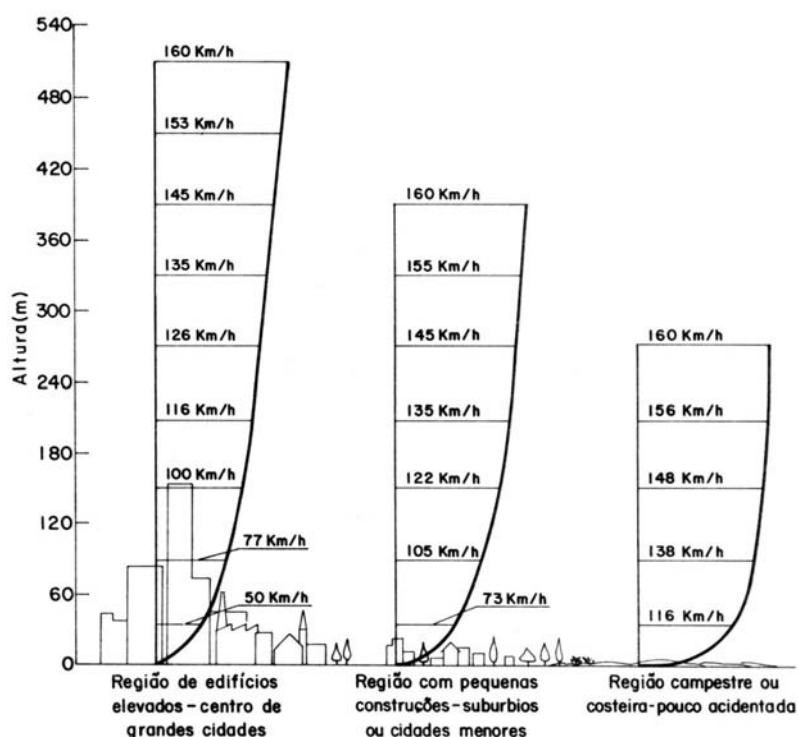


Figura 3.12 Rugosidade do terreno

Fonte: Hart & Sontag. 1976

A rugosidade (atrito) da superfície do solo, que provoca um efeito de frenagem no escoamento, faz variar gradativa e verticalmente a velocidade média do vento (camada limite atmosférica), como conseqüência de fenômenos térmicos e dinâmicos, resultantes da interação da massa de ar em movimento com a rugosidade do solo e dos elementos construídos, traduzindo-se tal variação como escoamento turbulento, acima do qual atinge-se o nível do escoamento livre, que se desenvolve no topo da camada limite atmosférica e independe das condições locais. Observa-se que esta camada limite atmosférica atinge espessura mais elevada quando se têm áreas significativamente adensadas com elementos construídos altos. As velocidades são maiores nas cotas mais baixas da camada limite atmosférica, para aquelas regiões com superfície de menor rugosidade.

3.3 A geometria da construção

A forma geométrica da edificação ou da estrutura é um fator que interfere na definição das ações de compressão e tração. Na (FIG. 3.13) mostram-se formas retangulares, triangulares e ovais, algumas seções abertas e fechadas.

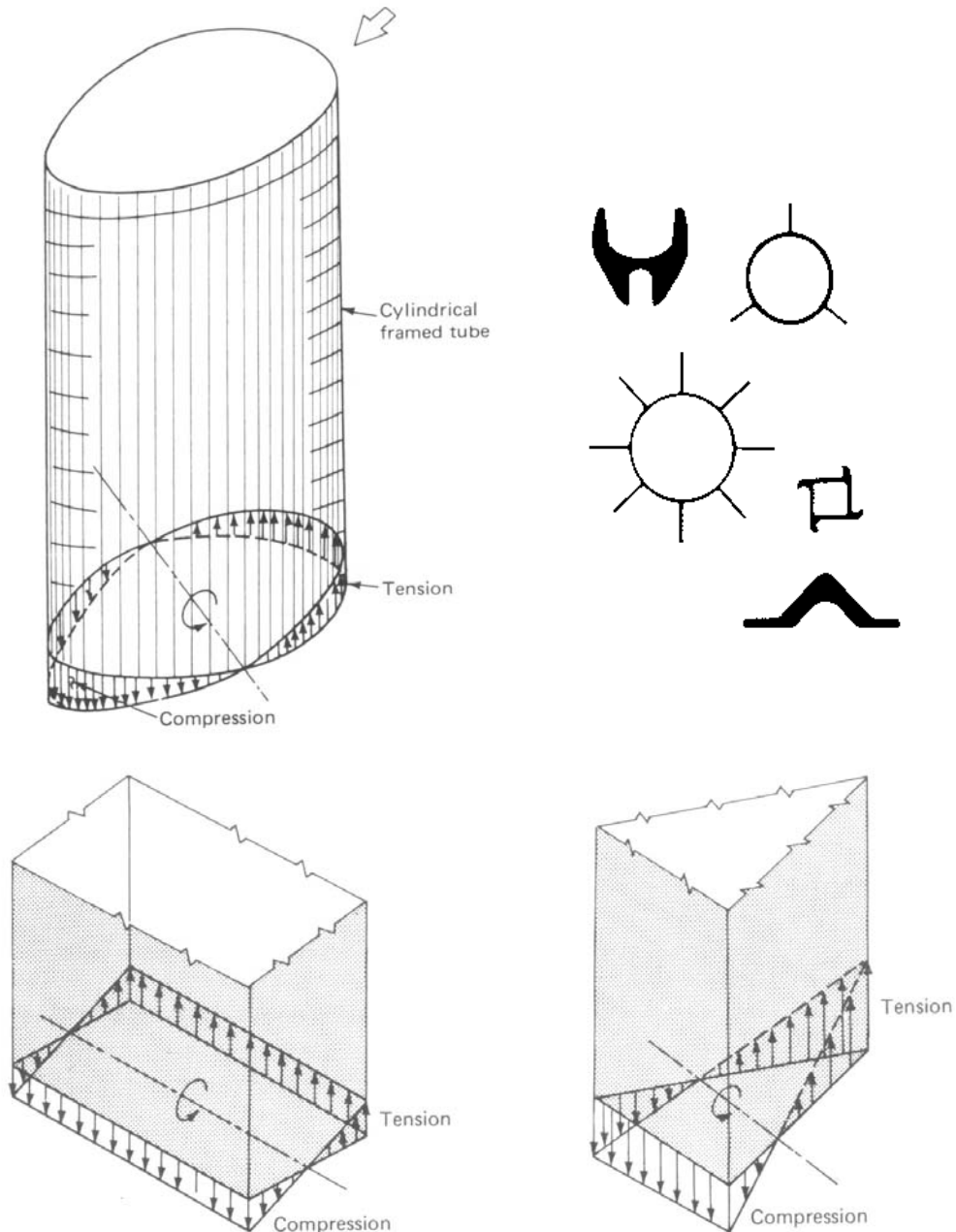


Figura 3.13 Geometrias e perfis de seções

Fonte: Hart & Sontag. 1976

3.4 Tipos de sistemas de estabilização de edifícios

Podem-se enumerar as diversas maneiras de estabilizar verticalmente edifícios: quadro rígido, quadro com contraventamento, paredes de cisalhamento, núcleos de concreto, pisos suspensos, treliças alternadas, sistema tubular.

3.4.1 **Quadro contraventado**

Os quadros contraventados são também denominados contraventamentos em treliça, devido à utilização em diagonais (FIG. 3.14). Devem ser dispostos em função dos espaços internos dos edifícios, geralmente em torno das caixas de escada e elevadores, buscando não criar obstruções nos vãos de esquadrias e ou passagens.

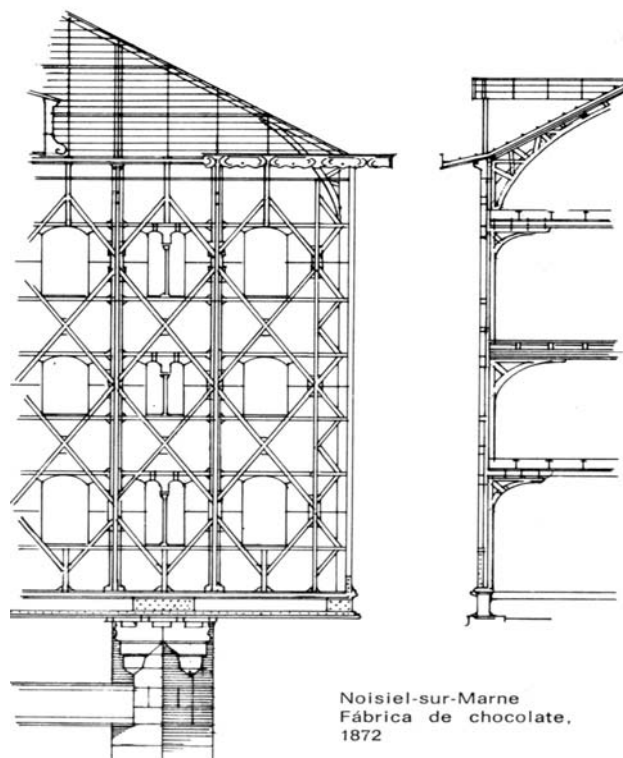


Figura 3.14 Contraventamento

Fonte: Hart & Sontag. 1976

Os quadros contraventados são mais econômicos e eficazes. Se as lajes trabalharem com diafragmas horizontais rígidos, não será necessário enrijecimento para todos os quadros pois as mesmas funcionam como contraventamento horizontal. Apresentam as

seguintes vantagens:

- Resultam em edifícios mais leves, portanto mais econômicos;
- O controle dos deslocamentos é obtido pela deformação à tração e compressão das barras, conseguindo-se assim, pequenos deslocamentos mesmo com estruturas mais leves;
- As ligações, por serem rotuladas, são de concepção e execução mais simples;
- As colunas são mais leves, pois são dimensionadas apenas à compressão, sendo solicitadas predominantemente por cargas axiais;
- Os comprimentos de flambagem são inferiores ou iguais à altura do andar;
- Existem diversas tipologias.

Por estas vantagens, podem ser a solução mais indicada para edifícios de até 40 pavimentos. Como desvantagens os quadros contraventados têm: Interferência dos elementos diagonais nas circulações internas ou na colocação de esquadrias nas fachadas.

3.4.2 Contraventamentos por diagonais

Trata-se de estabilizar os painéis através de suas diagonais que podem, inclusive, estar posicionadas em níveis e alinhamentos diferenciados. Neste arranjo, as forças axiais nas colunas, geradas pelas cargas horizontais serão significativamente menores. Esta diagonal, entretanto, deverá ser dimensionada para trabalhar tracionada ou comprimida, ocasionando seções com maior inércia nas peças.

3.4.3 Contraventamentos em “X”

Solução mais utilizada na prática. Estando as diagonais posicionadas em sentidos contrários, podem ser dimensionadas para resistir somente aos esforços de tração e cortantes, resultando em peças mais esbeltas e, portanto mais leves (FIG.315, 3.16).

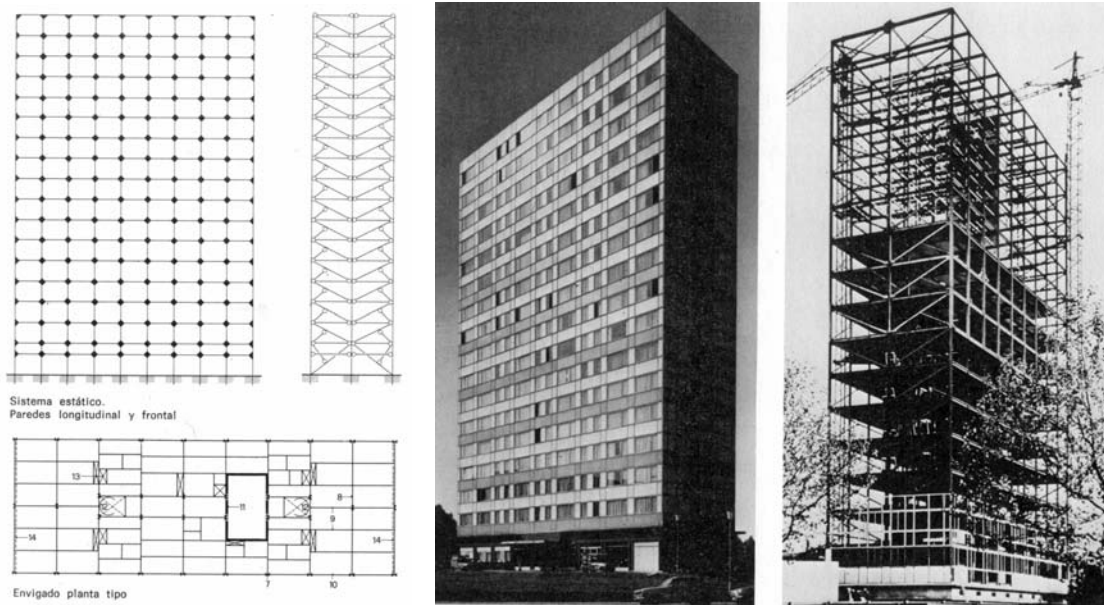


Figura 3.15 Edificio residencial em Bruxelas, Bélgica. Arq. M. Roggen / F.Liénard
 Fonte: Hart & Sontag, 1976.

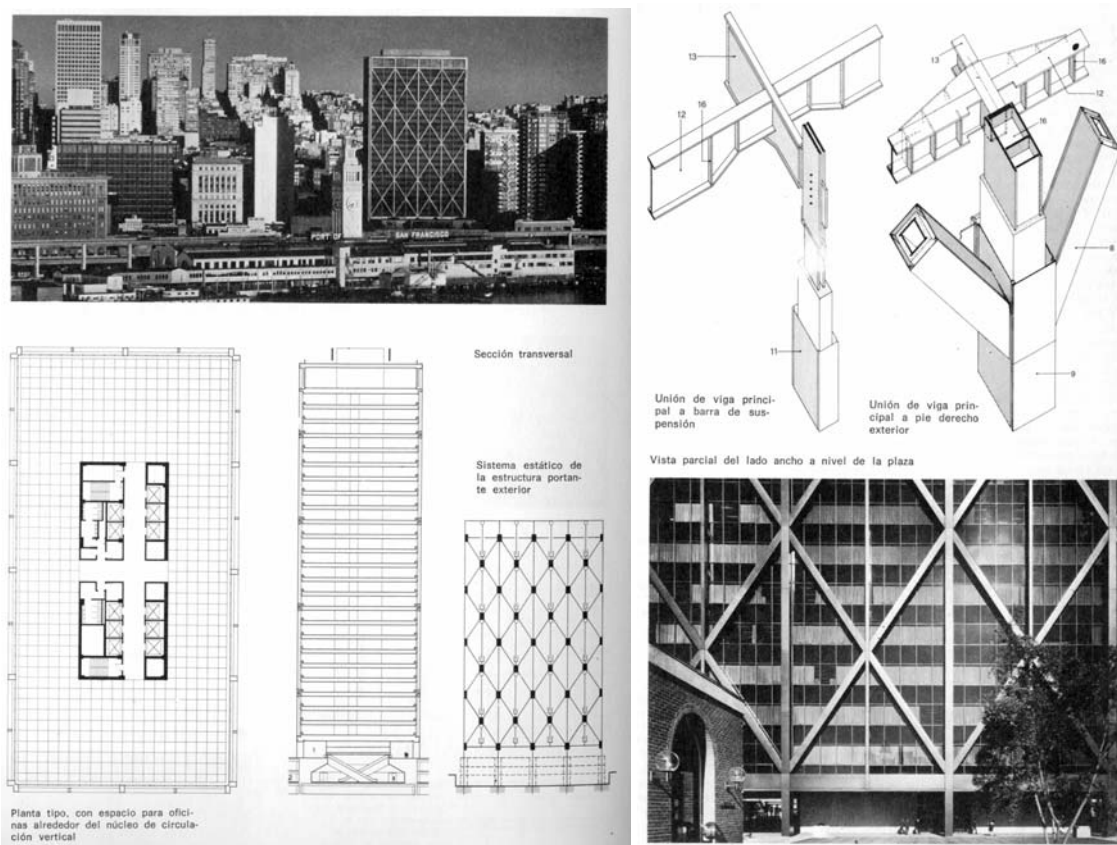


Figura 3.16 Ed. Administrativo, São Francisco, USA. Arq. Skidmore, Owings & Merrill.
 Fonte: Hart & Sontag, 1976.

3.4.4 Contraventamentos em “K”

São adaptáveis à locação mais conveniente dos vãos em planos de fachada ou internamente. Nos contraventamentos em “K” as diagonais podem ser projetadas para resistirem às cargas transmitidas pelas vigas, funcionando como um apoio central.

3.4.5 Contraventamentos em Diamante

É bastante utilizado no caso em que são necessários grandes vãos de janelas que impeçam a utilização de “X” ou “K”, mais comuns. Podem apresentar problemas de formação de rótula plástica no centro dos vãos de vigas ou colunas, caso haja flambagem em uma de suas diagonais.

3.4.6 Outros Contraventamentos

Podem ter ainda contraventamentos em mão francesa, com diagonais excêntricas, dependendo das condições de projeto, ou ainda, associação de diagonais e mão francesa. Este último, tendo no vértice da mão francesa uma ligação rígida, possibilitando maior dissipação de energia, sendo usado principalmente em lugares sujeitos à possibilidade de abalos sísmicos.

3.4.7 Quadro rígido

Os quadros rígidos são quadros que resistem às cargas laterais através da rigidez de suas ligações. Usualmente nos edifícios concebem-se quadros com nós rígidos em uma direção ficando a estabilidade na outra direção garantida através de outros tipos de contraventamentos. Para ser considerada rígida, uma ligação viga-pilar deve suportar o momento último da viga, o esforço cortante correspondente e manter o ângulo inicial praticamente inalterado.

Os quadros rígidos apresentam as seguintes vantagens:

- Possui maior ductilidade, sendo mais adequados em regiões sujeitas a abalos

sísmicos;

- Oferece maior flexibilidade para abertura de vãos e modificações futuras em projetos;
- Apresentam maior estabilidade estrutural durante a montagem;

Por outro lado, apresentam as seguintes desvantagens:

- Exigem maior trabalho de detalhamento, fabricação e montagem;
- As colunas são significativamente mais pesadas, porque além da compressão, devem ser dimensionadas também para resistir a esforços de flexão. Esta situação é mais complexa principalmente em edifícios com altura superior a dez pavimentos, quando aumentam os deslocamentos laterais e os efeitos de segunda ordem (efeitos P-delta);
- Conseqüentemente, é um sistema caro comparado a outros, sendo inclusive onerosa sua fabricação e montagem, não sendo recomendado para edificações acima de 30 pavimentos.

3.4.8 Parede de cisalhamento

A rigidez vertical dos pórticos pode ser aumentada através de paredes de concreto armado ou alvenaria estrutural construídas no vão entre vigas e colunas de cada nível do pórtico. Uma parede armada de cisalhamento pode substituir uma linha inteira de colunas em um edifício.

As paredes de cisalhamento podem fazer parte de um núcleo de serviços ou escadas. São usualmente contínuas do topo até a base à qual são unidas rigidamente comportando-se de maneira similar ao engastamento de uma viga. Suporta simultaneamente cargas gravitacionais o que facilita para eliminar os esforços de flexão e tração causados pelas cargas laterais.

As paredes de cisalhamento podem ser planas, mas freqüentemente são usadas as formas “L”, “T” ou “U”, devendo ser localizadas adequadamente para aumentar a rigidez à flexão em todo o conjunto, (FIG. 3.17). Estas paredes apresentam as seguintes

observações:

- Podem causar impedimentos na circulação interna dos edifícios ou limitar aberturas de vãos nas fachadas;
- Devem ser rigorosamente aprumadas;
- Devem ser executadas numa rapidez compatível com a montagem da estrutura metálica.

Além disso, devem ser observadas as seguintes considerações:

- Podem mudar de comprimento e espessura à medida que um edifício aumenta de altura;
- O edifício pode ficar sujeito à torção se sua disposição não estiver simétrica em relação à forma do edifício, criando diferença de posicionamento entre o centro de gravidade e o centro de cisalhamento.

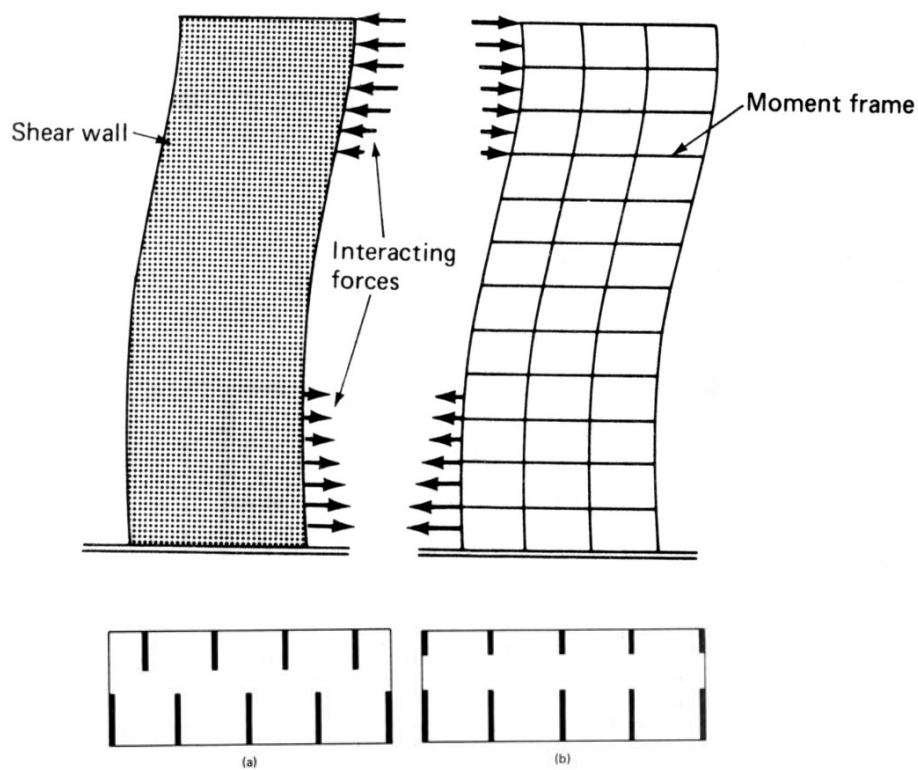


Figura 3.17 Paredes de cisalhamento

Fonte: Hart & Sontag, 1976.

3.4.9 Núcleo de concreto

Esta solução torna-se mais econômica para edifícios mais altos e localizam em geral onde são projetadas torres, escadas e fossos de elevadores, a estrutura do núcleo configura-se como uma torre tubular de concreto que proporciona rigidez por absorver ações horizontais. Preferencialmente, este núcleo deveria coincidir com o centro geométrico do edifício, considerando-o com capacidade para absorver todas as cargas laterais do sistema. A estrutura em aço seria então responsabilizada apenas pelas cargas verticais.

Em edifícios de maior altura este núcleo pode não ser suficiente para absorção de cargas laterais. Neste caso, deve-se procurar o enrijecimento através da combinação de outros elementos ou sistemas de estabilização comportando-se de uma maneira similar a uma viga em balanço, tendo muitas vezes o comportamento similar a uma viga de seção aberta e paredes finas, submetidas a forças torcionais que induzem ao empenamento das paredes devido ao bi-momento. Torna-se importante uma análise mais refinada quando o sistema estrutural assim o exigir (FIG. 3.18).

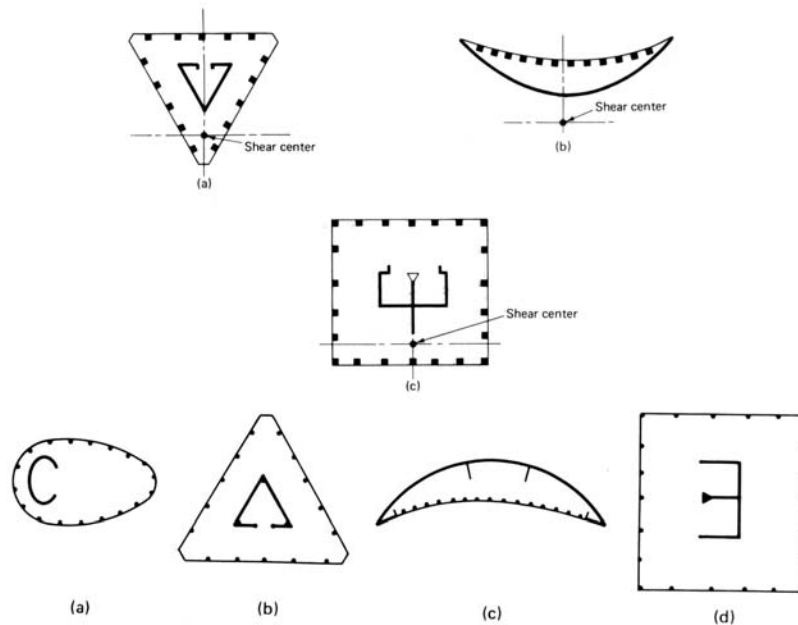


Figura 3.18 Paredes de cisalhamento e núcleos estabilizadores

Fonte: Hart & Sontag, 1976.

Na FIG 3.19, apresentam-se alguns sistemas estruturais com núcleo de concreto.

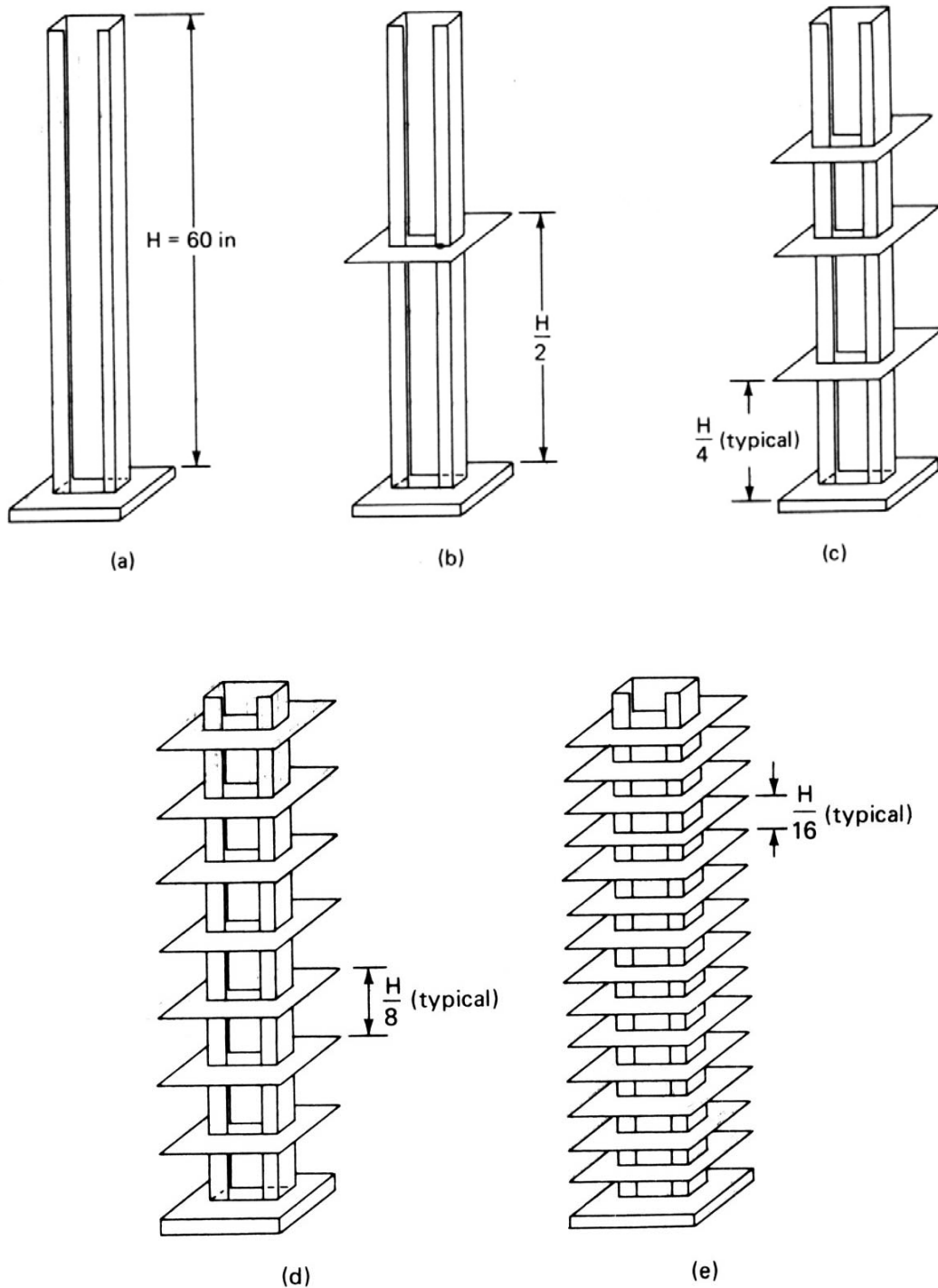


Figura 3.19 Núcleos de concreto

Fonte: Hart & Sontag, 1976.

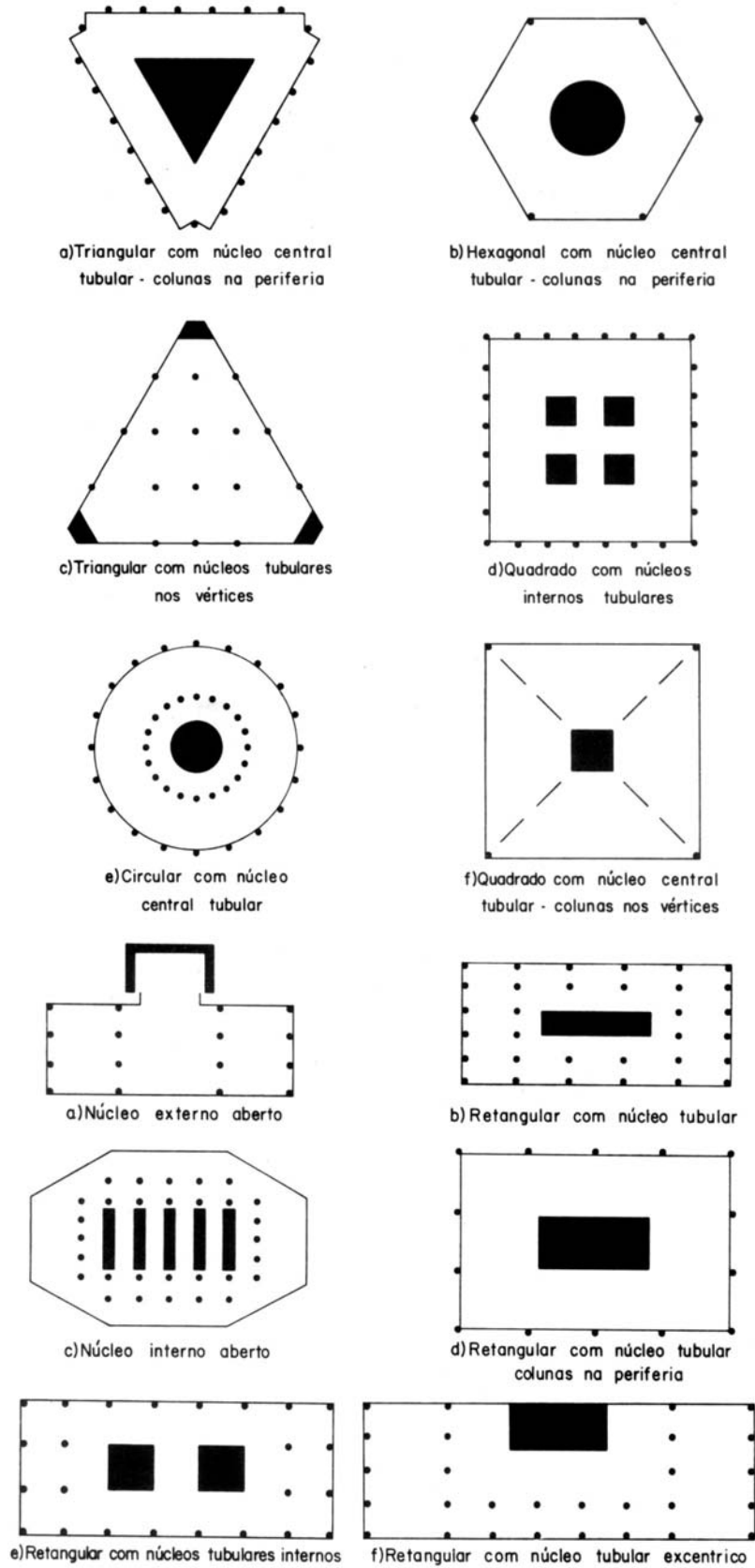


Figura 3.19 Núcleos de concreto

Fonte: Hart & Sontag, 1976.

3.4.10 Pisos suspensos

Estruturas com pisos suspensos constam basicamente do núcleo central, geralmente de concreto e dos pisos apoiados internamente no núcleo e externamente em tirantes. Dentro do núcleo ficam geralmente as circulações verticais (escadas, elevadores, *shafts* com tubulações, etc.).

Os tirantes são fixados nas vigas em console no topo do núcleo que tem aí também toda a parte de fundações. A transmissão das cargas horizontais para o núcleo é feita através das lajes. Construções deste tipo são mais baixas não ultrapassando em geral a 12 pavimentos.

3.4.11 Treliças alternadas

Nos sistemas de treliças alternadas o enrijecimento transversal é conseguido com treliças da altura do pé direito havendo em geral um pavimento treliçado, outro não. Os pisos se apóiam alternadamente na corda superior e inferior da treliça. Todas as colunas se situam na periferia, permitindo boa flexibilidade no planejamento interno dos edifícios.

3.4.12 Sistemas associados

Pode-se associar sistemas de estabilização em paralelo, em série ou de forma aleatória com o objetivo de aumentar a rigidez do edifício em questão e conseqüentemente diminuir os deslocamentos. Como exemplos tem-se:

- sistemas de quadro rígido com paredes de cisalhamento e os
- sistemas de treliças horizontais com paredes de cisalhamento ou núcleos contraventados.

3.4.13 Sistemas tubulares de contraventamento

Trata-se de um dos mais eficientes sistemas de contraventamento para edifícios de grande altura (40 a 110 andares). Este sistema é, portanto utilizado nos maiores edifícios

do mundo e aproveitam a propriedade do tubo fechado de parede delgada de apresentar rigidez à flexão e à torção com economia máxima de material. Diversas são as formas de obter o comportamento tubular e a escolha do tipo mais adequado a um determinado projeto irá depender das condicionantes de projeto. Podem-se usar sistemas de tubo aporticado com ou sem contraventamento externo em diagonal, tubo treliçado com colunas próximas umas das outras no perímetro da edificação, com ou sem núcleo resistente.

A última evolução no sistema de contraventamento tubular é o chamado tubo Multi Celular, utilizado no edifício *Sears Tower* de 109 andares em Chicago, EUA (FIG. 3.20). Nesta concepção o tubo exterior é enrijecido em duas direções por tubos anexos formando assim um conjunto de tubos. Estes tubos individuais possuem uma grande rigidez própria e independente dos demais, portanto podem ser agrupados em qualquer configuração ou sofrerem uma descontinuidade em qualquer nível.

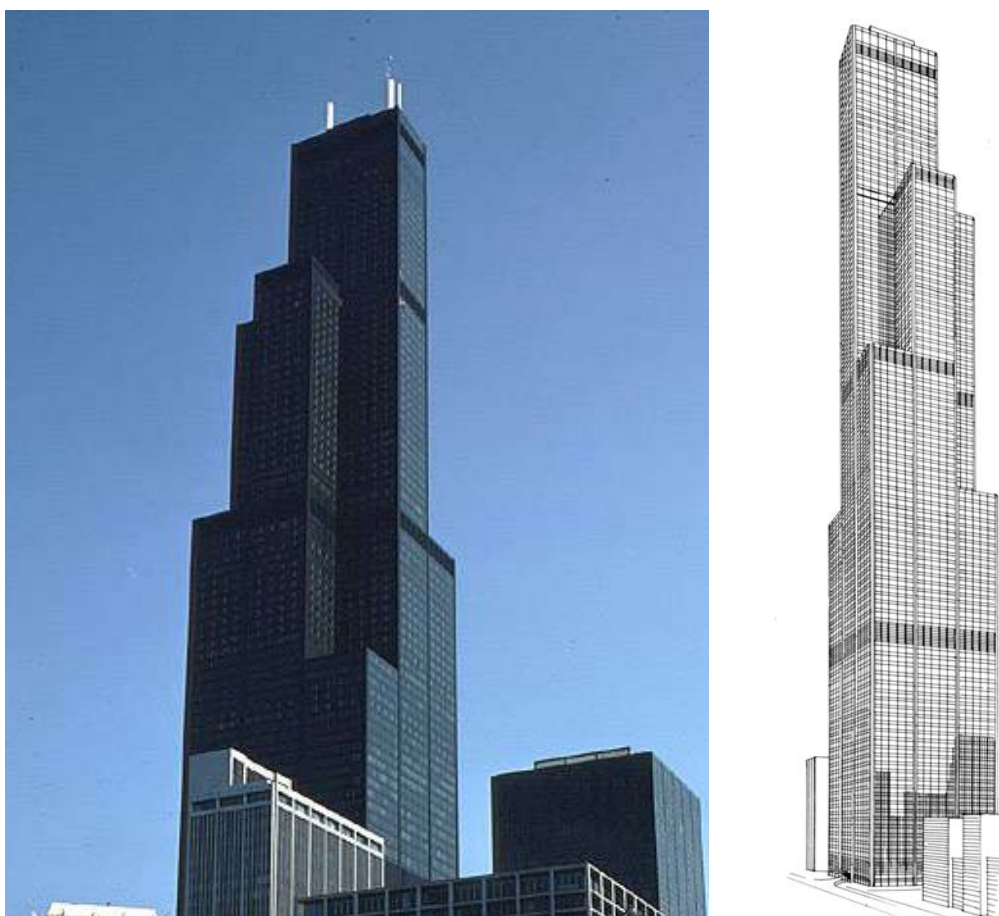


Figura 3.20 Sears Tower - Chicago

Fonte: Hart & Sontag, 1976.

3.4.14 Sistemas estaiados

Os sistemas de estabilização que utilizam esteios são bastante econômicos para torres, tendo o inconveniente de ser necessário uma grande área para a fixação das estais, na ordem de dez vezes a área daquele utilizado em uma estrutura auto-portante de mesma altura. As torres estaiadas (FIG.3.21) são constituídas por um corpo metálico esbelto de mastro, fixo por estais ao longo de sua extensão. As estais são constituídas por cordoalhas de aço fixadas ao longo do mastro da estrutura e as fundações laterais de ancoragem.



Figura 3.21 Ponte de Alamillo, Sevilha

Fonte: Helfenstein, 1992

3.4.15 Outrigger

Para a melhorar a eficiência dos sistemas verticais mais altos tem sido empregado um sistema de treliças horizontais chamadas *outriggers*, rigidamente ligadas ao sistema de contraventamento, posicionado no núcleo do edifício, cuja função é transmitir às colunas externas da edificação, através de rótulas, parte da “responsabilidade” de resistir às cargas laterais. Na FIG.3.22, mostra-se a ação de um *outrigger* em uma estrutura com contraventamento em “X”, onde se observa que, quando o contraventamento vertical tende a fletir sob a ação do carregamento lateral o *outrigger* resiste, transmitindo esforços axiais às colunas exteriores (tração a barlavento e compressão a sotavento), introduzindo uma

redução no momento fletor que solicita o contraventamento, o que também acarreta economia na fundação. Ao introduzir esforços axiais nas colunas externas, o *outrigger* pode provocar, entretanto, a necessidade de um grande aumento das seções transversais das colunas a sotavento, anteriormente submetidas apenas às cargas de origem gravitacional. Esse esforço adicional pode ser distribuído às demais colunas situadas na fachada em que se encontra ligada ao *outrigger*, utilizando-se de um sistema composto por treliças horizontais, situadas nas fachadas e ao mesmo nível do *outrigger*. Este sistema de cintamento é chamado de *belt-truss* e está esquematizado na FIG. 3.23.

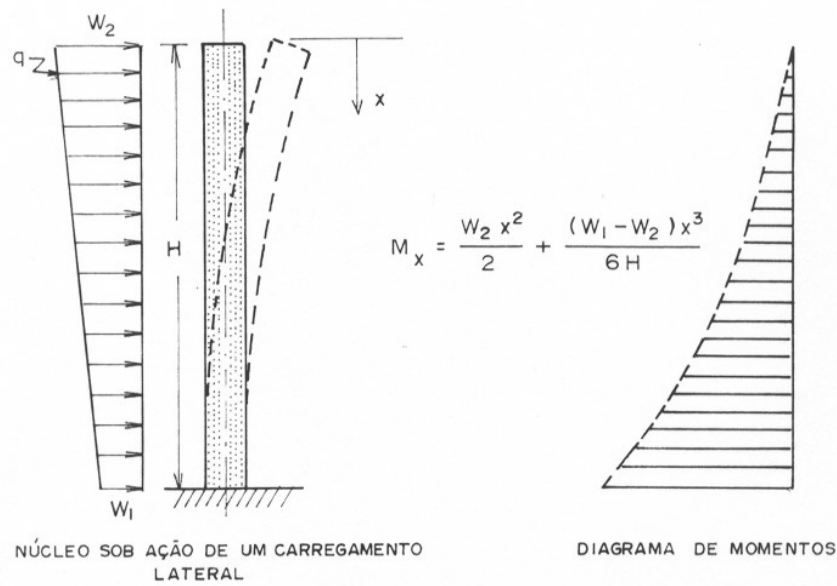


Figura 3.22 Comportamento de uma viga em balanço sob carregamento lateral

Fonte: Ribeiro, 1990

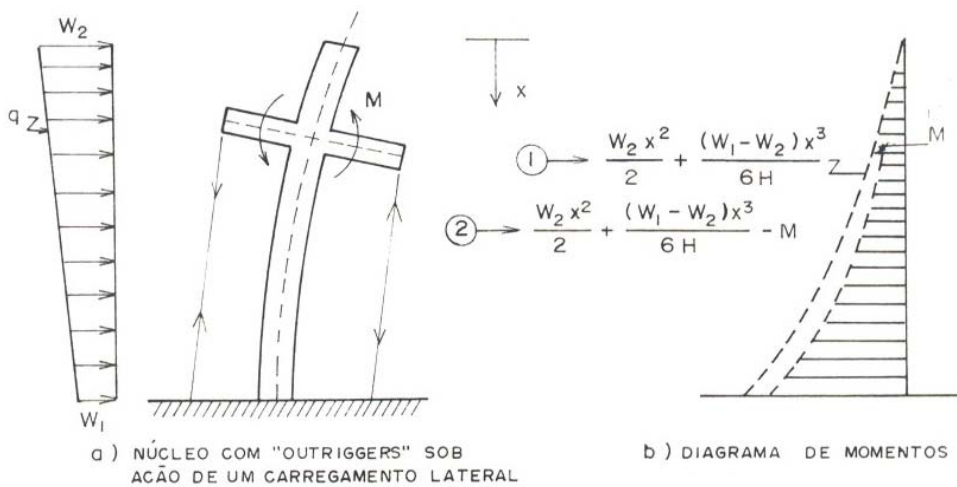


Figura 3.23 *Outrigger* sob ação de um carregamento lateral. Diagrama de momentos.

Fonte: Ribeiro, 1990

Devido à pequena parcela de contribuição do modo cortante na deflexão lateral de um sistema de contraventamento em treliça sob a ação de cargas laterais, pode-se considerar que o comportamento deste sistema é análogo ao de uma viga em balanço, de inércia equivalente à do contraventamento vertical (FIG. 3.24).

Com esta idealização o *outrigger*, funcionando como uma alavanca engastada na viga em balanço, tem seu engaste obrigado a acompanhar a rotação da seção do núcleo, promovendo o aparecimento de esforços axiais nas colunas exteriores. Por sua vez esses esforços introduzem impedimento à livre rotação do núcleo na seção onde se engasta o *outrigger*, de forma a produzir a máxima redução do deslocamento de topo da estrutura, bem como seus efeitos em termos de distribuição de momentos fletores no núcleo e de introdução de cargas axiais nas colunas situadas nas fachadas da edificação.

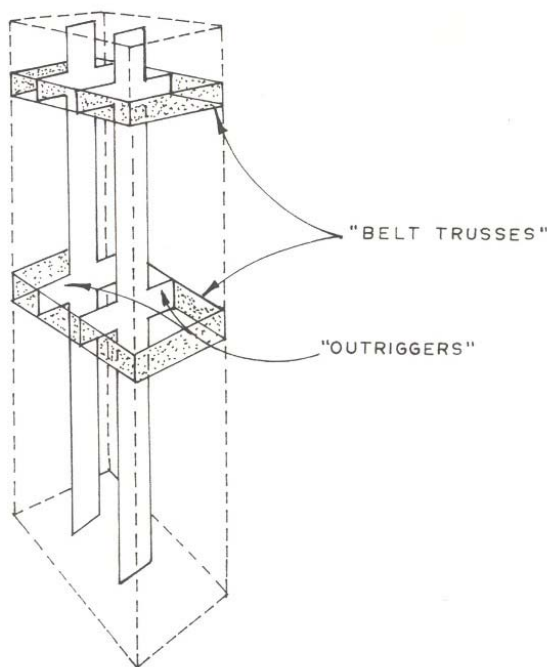


Figura 3.24 *Outrigger* com viga em balanço

Fonte: Ribeiro, 1990

Em alguns casos uma plataforma pode exercer o papel de outrigger (FIG.3.25).

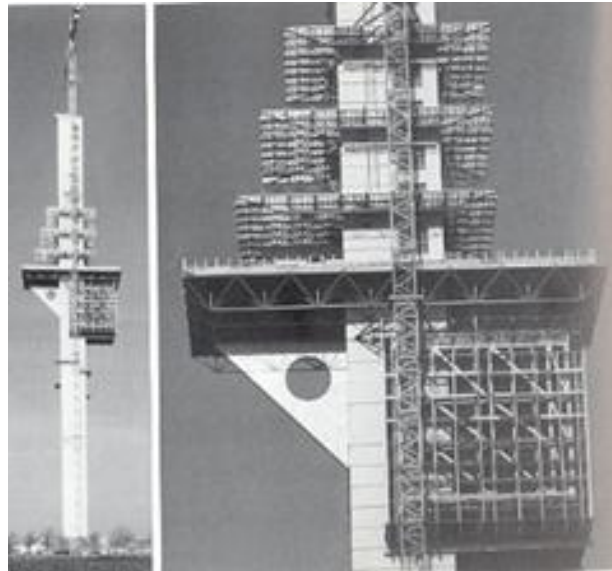


Figura 3.25 Raumfachwerk – system, Krupp Montal

Fonte: Blanc et al, 1987

Na FIG.3.26 mostram-se alguns exemplos de torres onde elementos de composição e funcionais exercem papel fundamental na estabilização da torre.



Figura 3.26 Exemplos de torres

Fonte: metálica, 2004

CAPITULO IV

4 TEORIA DA SEMELHANÇA

4.1 Considerações Iniciais

A seguir é feita uma explanação do que consiste e envolve a análise dimensional no que diz respeito aos conceitos teóricos envolvidos e dos teoremas que são empregados. Mais adiante se fará menção novamente a esses conceitos, só que de uma forma mais detalhada.

A análise dimensional é uma ferramenta matemática, freqüentemente aplicada na física, química e na engenharia com o objetivo de simplificar um problema através da redução do número de variáveis intervenientes no problema para um número menor de parâmetros essenciais. Os sistemas para os quais esses mesmos parâmetros são comuns são chamados similares ou semelhantes e não têm de ser estudados separadamente (eles são equivalentes para os propósitos da equação, e o analista experimental que deseja determinar a forma da equação, pode escolher o sistema mais conveniente). A análise dimensional, em termos gerais, pode ser aplicada para as mais variadas áreas da ciência.

A dimensão de uma quantidade física é o tipo de unidade necessária para expressá-la. Por exemplo, a dimensão de uma velocidade é distância/tempo e a dimensão de uma força é massa x distância x tempo². Na mecânica, toda dimensão pode ser expressa em termos de comprimento, tempo e massa, ou alternativamente, em termos de força, comprimento e massa. Dependendo do problema, pode ser vantajoso escolher um ou o outro conjunto de unidades fundamentais. Toda unidade é um produto (possivelmente, fracional) de potências das unidades fundamentais, e as unidades formam um grupo sob multiplicação. Na sua forma primitiva, a análise dimensional é usada para verificar a correção das deduções algébricas: em toda expressão de significado físico, somente as quantidades de mesma dimensão podem ser adicionadas ou subtraídas. Portanto, os dois lados de qualquer equação devem ter a mesma dimensão.

A redução de variáveis mencionadas acima usa o teorema de Buckingham ou

teorema dos Números π , como também é muito conhecido. Este teorema descreve como toda equação com significado físico, envolvendo n variáveis, pode ser equivalentemente reescrita como uma equação de $n-r$ parâmetros adimensionais, onde r é o número de unidades fundamentais usadas. Além disso, e o mais importante, ele fornece um método para calcular estes parâmetros adimensionais a partir das variáveis dadas, mesmo se a forma da equação ainda for desconhecida (CARNEIRO,1993).

O teorema dos números π usa álgebra linear: o espaço, de todas as possíveis unidades físicas, pode ser visto como um espaço vetorial sobre o conjunto dos números racionais, quando se representa a unidade como o conjunto dos expoentes necessários para as unidades fundamentais com uma potência zero, se a unidade fundamental particular não estiver presente. A multiplicação de unidades físicas é então representada pela adição vetorial dentro desse espaço vetorial. O algoritmo do teorema dos números π é essencialmente um processo de eliminação de Gauss Jordan realizada neste espaço vetorial (LANGHAAR, 1951; CARNEIRO, 1993; SIMITSES, 2001; FRIEDMAN, 2004; UNGBHAKORN E SINGHATANADGID, 2003; REZAEPAZHAND E SIMITSES, 1996; WU ET AL., 2202; ALVES ET AL., 2003).

A análise dimensional e a teoria da semelhança são aplicadas nas mais variadas áreas do conhecimento devido a um ou vários, entre outros, motivos enunciados a seguir (TROITSKY, 1988):

- Quando se necessita de uma avaliação experimental extensiva devido às características especiais de determinados materiais compósitos avançados, para os quais não se tem uma base de dados experimental.
- É uma ferramenta de projeto direta, a qual considera a inovação da forma estrutural, o tipo de estrutura proposta, além dos aspectos arquitetônicos e estéticos.
- O modelo físico de escala real, ao contrário do modelo matemático, é mais que uma estrutura análoga. Ela pode copiar as guias de rigidez de forma e a continuidade de membros estruturais adjacentes. Para se fazer essas incorporações no modelo matemático, ainda se depara com um certo grau de dificuldade.

- Muitas vezes é desejável se ter uma verificação independente da solução matemática do problema, principalmente naqueles projetos nos quais estão envolvidas parcelas vultosas de dinheiro e interferem vários fenômenos que, mesmo com o desenvolvimento atual de técnicas computacionais, ainda não se tem como levar em conta todas as variáveis importantes de forma realística.

Na maior parte das vezes, a análise dimensional e a teoria da semelhança são aplicadas com o objetivo de gerar modelos reduzidos, sobre os quais são estudados os fenômenos físicos para os quais se deseja descobrir as relações existentes entre os parâmetros intervenientes. Desta maneira, os resultados obtidos para o modelo reduzido, baseado na teoria da semelhança, são extrapolados para os sistemas similares (semelhantes), especialmente grandes, de forma a prever o seu comportamento. Embora na sua grande parte os modelos sejam reduzidos, existe a possibilidade de serem gerados modelos maiores do que o protótipo.

Na seção seguinte é apresentada a idéia básica do procedimento que será adotado neste trabalho na aplicação da teoria da semelhança, diferindo daquele procedimento que normalmente é adotado e encontrado em trabalhos técnico-científicos.

4.2 Geração dos Modelos Segundo uma Abordagem Numérica-Computacional

O que se pretende aqui é aplicar a análise dimensional e a teoria da semelhança para geração de modelos em escalas maiores, partindo-se de um dado protótipo bem estudado.

Essa nova abordagem, como falado acima, consiste em se trabalhar com um modelo numérico-computacional como sendo o protótipo e extrapolar os resultados obtidos para modelos em escalas maiores. Esses modelos em escalas maiores seriam, assim, semelhantes às estruturas reais para as quais se quer ter os valores dos parâmetros, estruturais ou não, como partida de projeto. Esse procedimento é muito parecido com aqueles utilizados nas redes neurais e na otimização e poderia ser usado como uma forma alternativa àqueles.

Na realidade, todo o procedimento de resolução para geração dos números π e a partir deles, a geração dos fatores de escala, é idêntico ao processo clássico empregado na aplicação da análise dimensional. Todos esses passos envolvidos para resolução do problema serão detalhadamente mostrados nas seções seguintes. Aqui, por enquanto, serão descritos uma idéia básica e os possíveis passos necessários para aplicação do processo.

Na figura 4.1 são apresentadas três torres, uma delas, a menor, como sendo o protótipo e as outras duas, os modelos gerados a partir desse protótipo.

Supõe-se que a estrutura designada de protótipo tenha sido projetada dentro dos padrões normativos, podendo ter sido inclusive checado a partir de um modelo reduzido experimentado em laboratório.

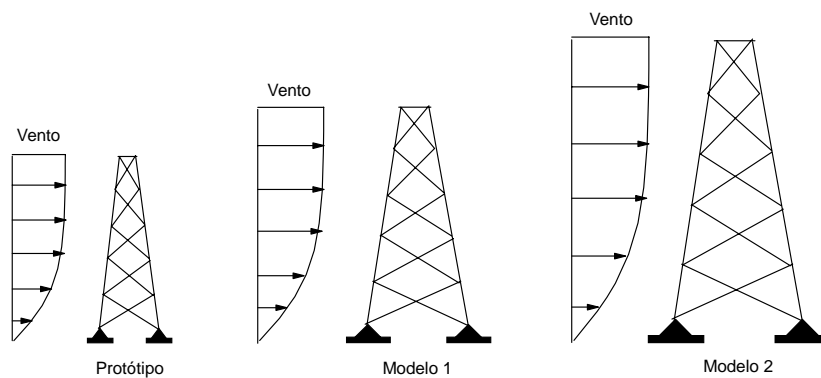


Figura 4.1 - Vista no plano das torres: protótipo e modelos

O que se pretende é que tendo sido esse protótipo bem projetado e dimensionado, inclusive podendo-se levar em consideração aspectos de natureza estética, que o mesmo sirva de modelo de referência para que os parâmetros importantes de projeto possam ser extrapolados para outras estruturas semelhantes em escalas maiores (nada impedindo que sejam menores), tirando partido das relações geradas entre o protótipo e o modelo segundo o atendimento às condições de semelhança (homogeneidade).

Sendo assim, quando for necessário projetar estruturas maiores semelhantes àquela do protótipo, tirar-se-ia partido das relações geradas entre o protótipo e esse modelo, em termos dos fatores de escala gerados, e ter-se-ia os parâmetros de partida dessa nova estrutura, ou seja, os parâmetros a serem usados no pré-projeto. Na figura 4.2 mostra-se o

processo de interação que seria necessário para descobrir as relações finais, que melhor representem a semelhança entre protótipo/modelo, uma vez que foram gerados os fatores de escala.

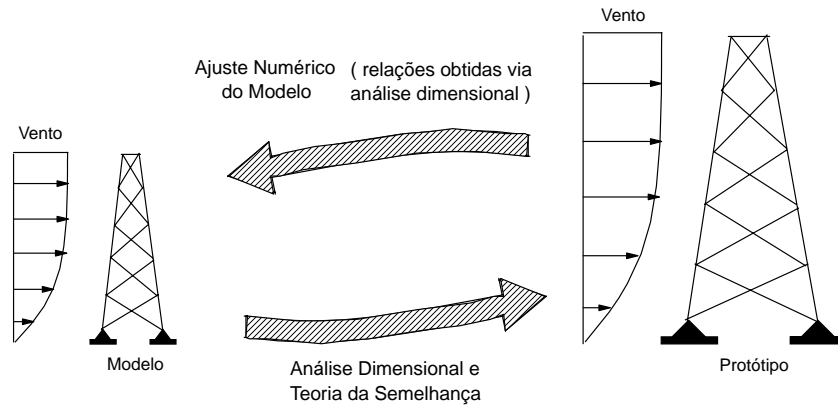


Figura 4.2 - Relações de ajuste entre o protótipo e o modelo

Tem-se, portanto, um procedimento numérico onde o protótipo, que serve de referência, passa a ser o “modelo reduzido”, é numericamente analisado e as previsões numéricas são tratadas como se fossem resultados experimentais. Os fatores de escala são então usados para prever o comportamento de protótipos em escalas maiores. Finalmente, é realizada uma simulação computacional via método dos elementos finitos no protótipo para comparar os resultados obtidos com aqueles previstos a partir da aplicação dos fatores de escala, a fim de verificar a validade ou não da previsão feita. Desse modo, pode-se comparar os valores obtidos para as seções transversais, esforços nos elementos, etc. com aqueles obtidos via fatores de escala. O procedimento constitui-se, assim, num processo iterativo onde os resultados da análise numérica podem ser usados tanto para ajustar os fatores de escala obtidos via teoria da semelhança, quanto para verificar se os parâmetros inicialmente determinados são de fato aqueles essenciais para descrever o fenômeno que se quer estudar.

Deve-se esclarecer que o método convencional de geração dos números π e dos fatores de escala, como se encontra nas seções seguintes, se constitui num procedimento facilmente implementado, de forma que se pode determinar a influência de determinados parâmetros no fenômeno em questão de forma rápida.

Uma questão que deve ser averiguada diz respeito ao limite de aplicação do fator de escala. Ou seja, qual seria o limite para aplicação do fator de escala sem que se gerem estruturas mais caras?

Para se tirar alguma conclusão mais elaborada da abordagem descrita acima para geração dos modelos, seria necessário que se aprofundasse os estudos iniciais contidos neste trabalho. A idéia inicial, e que pode ser executada em outros trabalhos, era dimensionar uma estrutura de torre com seção transversal tubo-circular e analisar o seu comportamento via simulação computacional. Uma vez que as etapas de análise e dimensionamento da torre, assim como de geração dos números π e dos fatores de escala, sejam realizadas de forma automática via computador, pode-se gerar vários resultados e tirar as devidas conclusões. Logo, o que se apresenta neste trabalho, na seção 4.7 são resultados iniciais ou preliminares da aplicação da idéia descrita, constituindo-se, assim, numa exploração mais qualitativa.

4.3 Conceitos Envolvidos na Análise Dimensional e Teoria da Semelhança

Um projeto de engenharia será tanto mais seguro, quanto mais se aproximar da realidade o esquema adotado para prever o comportamento da estrutura. O método analítico consiste em utilizar uma lei geral que permita efetuar previsões dos valores da grandeza, dentro de uma precisão desejada. A Lei de Newton, a Lei de Ohm, as fórmulas de flexão simples constituem exemplos deste primeiro meio de previsão. Todo projeto de arquitetura e engenharia comporta a previsão do comportamento de um sistema a ser construído pelo homem no qual ele vai interferir e usufruir. Pode-se dizer que o ato de projetar é, muitas vezes, confundido com o ato de prever o comportamento de todo o sistema a ser construído. Quando um objeto arquitetônico é projetado (qualquer elemento projetado que tem interferência na paisagem urbana ou rural e que é utilizado para determinado fim pelo homem), é feito um dimensionamento da estrutura do objeto a partir do cálculo das tensões induzidas pelos esforços solicitantes, em decorrência do carregamento atuante. Estes cálculos consideram também a geometria do objeto. O cálculo é feito comparando-se essas tensões com determinados valores críticos ou de ruptura pré-estabelecidos. Desta forma, o objeto arquitetônico será tanto mais seguro quanto mais o modelo adotado se aproximar da realidade.

A tendência geral no progresso científico é o de ampliar cada vez mais a gama de aplicações do método analítico. Quando se conhece perfeitamente a lei que rege um determinado fenômeno físico, pode-se empregar tal método.

Hoje, com o desenvolvimento na pesquisa das formas e soluções técnicas arquitetônicas, torna-se necessário levar em conta que estes métodos comportam certas limitações. Em primeiro lugar, se a grandeza, cujos valores se querem prever, depende de duas outras grandezas, o número de observações necessárias para estabelecer a lei de previsão pode ser muito elevado e exigir análise muito cuidadosa.

O método empírico consiste em construir o sistema de alguma maneira e prever o comportamento futuro a partir de observações apoiadas na hipótese de que as características essenciais não se alterarão. Consta-se logo que tal método não é conveniente para sistemas de grande porte, de grande custo ou complexidade. É particularmente inconveniente para os sistemas que se modificam quando o homem age sobre eles, de modo que a previsão realmente importante a ser feita não é a do funcionamento do sistema em estado natural, mas sim a intervenção humana.

O terceiro método de previsão consiste em recorrer a observações efetuadas em outro sistema, que se comporte de modo semelhante ao sistema cujo comportamento se quer prever, mas que apresente menores dimensões, no qual seja mais fácil introduzir modificações ou variar sob controle os valores das grandezas a serem consideradas. Chama-se protótipo o sistema cujo comportamento se quer prever. O modelo é o sistema a partir do qual se efetuam as previsões válidas para fins de engenharia. A semelhança significa que:

- O mesmo fenômeno, pondo em jogo as mesmas grandezas regidas pela lei física, se passa nos dois sistemas considerados (o protótipo e o modelo);
- Para cada categoria de grandeza existem relações constantes, bem conhecidas e independentes dos valores absolutos da grandeza em questão, entre os valores nos modelos e os valores que ocorrerão no protótipo.

4.3.1 Homogeneidade Dimensional

O princípio da homogeneidade dimensional decorre da condição de que toda equação, ou de um modo geral, toda relação funcional que exprima matematicamente uma lei natural ou um processo físico, deve ser invariante relativamente a qualquer mudança do sistema de unidades empregado. Portanto, este princípio consiste em que as relações entre grandezas físicas não dependem do sistema de unidades adotado. Toda equação matemática que descreva um fenômeno físico deve ser necessariamente homogênea (CARNEIRO, 1993).

Demonstra-se que toda equação que descreva um processo físico, na qual figurem n parâmetros característicos, pode ser reduzida a uma equação com $n-r$ parâmetros adimensionais, sendo r o número de unidades fundamentais básicas necessárias para descrever o fenômeno. Os parâmetros adimensionais são produtos de potência dos n parâmetros originais e são conhecidos como **números π** . O número r de unidades fundamentais é igual ao posto da matriz dimensional. Esse teorema é conhecido como “teorema de π ” ou de Vaschy-Buckingham.

4.3.2 Matriz Dimensional

O conjunto dos parâmetros do problema físico pode ser apresentado em um quadro, em forma de matriz, chamada matriz dimensional. Esta matriz é constituída por “expoentes de dimensão”, sendo suas linhas correspondentes às unidades fundamentais, e suas colunas aos parâmetros característicos do problema.

Os parâmetros que figuram nas equações podem ser:

- Variáveis dimensionais (ex: comprimento, tempo, etc.);
- Constantes físicas universais dimensionais (ex: constante de gravitação);
- Constantes físicas específicas dimensionais (ex: módulo de elasticidade, viscosidade cinemática, etc.);
- Constantes físicas específicas adimensionais (ex: coeficientes de Poisson);
- Variáveis adimensionais:
 - variáveis do tipo ângulos, deformação específica, etc;

- fatores de forma: relações entre grandezas de um mesmo tipo, escolhendo-se uma delas como “grandeza representativa”.

Pode-se descrever também a variação contínua de uma grandeza, considerando, em lugar de fatores de forma discretos, funções de forma, expressas em forma adimensional.

4.3.3 Semelhança física e modelos

Para que um modelo possa representar o protótipo, isto é, para que os resultados obtidos em ensaios com modelos possam ser estendidos aos protótipos é preciso que haja semelhança, a começar pela semelhança geométrica. Em princípio todos os números π , fatores de forma e funções de forma devem ter no modelo o mesmo valor que apresentam no protótipo.

As condições de semelhança geralmente incluem três tipos: a semelhança geométrica, a cinemática e a dinâmica.

1. Semelhança Geométrica – fisicamente significa que a forma e as dimensões dos corpos sejam semelhantes, ou seja, que as dimensões do protótipo e do modelo se relacionam através do fator de escala geométrico. Matematicamente, significa que a relação entre os comprimentos do protótipo e do modelo é uma constante.
2. Semelhança Cinemática – fisicamente, significa que deve haver semelhança geométrica dos escoamentos dos fluidos, os quais se encontram tanto no protótipo como o modelo, ou seja, deve-se ter a mesma distribuição de velocidades, com características de turbulência semelhantes. Matematicamente, significa que a relação entre os módulos das velocidades, para o protótipo e modelo, deve ser uma constante.
3. Semelhança Dinâmica – fisicamente, significa que deve haver semelhança entre as forças que atuam no protótipo e no modelo. Matematicamente, quer dizer que a relação entre as forças que atuam no protótipo e no modelo é uma constante.

Quando não é viável respeitar todas as condições de semelhança física, pode-se

atender de modo rigoroso às que tem maior importância no fenômeno considerado. As que têm papel secundário são desconsideradas, ou respeitadas apenas de modo aproximado. Dessa maneira, diz-se que existe semelhança física incompleta ou relaxada. Em muitos casos introduzem-se distorções, isto é, adotam-se no modelo escalas diferentes para grandezas de um mesmo tipo: as conseqüências destas distorções devem ser cuidadosamente analisadas, para evitar erros de interpretação dos resultados. Em muitos casos, a distorção é imposta por razões de ordem prática quando da construção dos modelos (CARNEIRO, 1993; LANGHAAR, 1951; SIMITSES, 2001; FRIEDMAN, 2004; UNGBHAKORN E SINGHATANADGID, 2003; REZAEPAZHAND E SIMITSES, 1996; WU ET AL., 2002; ALVES ET AL., 2003).

É muito difícil reproduzir no modelo todas as condições impostas pela semelhança física. Galileu, que foi pioneiro na teoria da semelhança física, já mostrava que a simples semelhança geométrica em problemas de resistência das estruturas é insuficiente: se os materiais do protótipo e do modelo forem o mesmo, as forças de gravidade serão reproduzidas em escala diferente da escala das resistências. Um modelo reduzido em que tais forças são significativas poderá representar comportamento satisfatório, e o protótipo não. A dificuldade é tanto maior quanto mais complexo o processo físico, e a análise dimensional, além de orientar o modo como devem ser executados os modelos, passa a ter como papel principal o de advertir contra conclusões simplistas, revelando as grandes discrepâncias que podem existir entre o comportamento do modelo e do protótipo.

4.3.4 Fatores de Escala

Os modelos matemáticos ou teóricos e modelos análogos estão fora do domínio da análise dimensional. Se dois processos físicos são semelhantes, é possível prever o comportamento de um deles quando é conhecido o comportamento do outro. Na experimentação por meio de modelos, os dois processos físicos semelhantes são o protótipo e seu modelo; neste caso, utiliza-se o modelo por ser mais fácil ensaiá-lo em laboratório do que ensaiar diretamente o protótipo. Em geral os modelos são em escala geométrica reduzida, mas há casos em que se adotam modelos maiores que os protótipos. A primeira condição para a semelhança física é a semelhança geométrica, mas esta não é suficiente: um modelo não é simples maquete.

Na experimentação com modelos define-se como fator de escala a relação entre a magnitude da grandeza no modelo e no protótipo; se o modelo é reduzido, a escala geométrica é menor que a unidade. Em geral a escala é apresentada como fração tendo a unidade como numerador, e designada com símbolo K ou λ .

$$K_x = \lambda_x = \frac{X_m}{X_p} = \frac{1}{\frac{X_p}{X_m}} = 1 \quad (4.1)$$

Para que haja semelhança física, é condição necessária e suficiente que todos os números II e fatores de forma tenham os mesmos valores nos dois processos.

Designa-se por $\Pi_{i,m}$ os números II do modelo, e por $\Pi_{i,p}$ os números correspondentes do protótipo. Para que haja semelhança física é necessário que

$$\Pi_{i,m} = \Pi_{i,p}, \quad \text{com } i=1, (n-r) \quad (4.2)$$

Ou seja,

$$(\text{fatores de forma})_m = (\text{fatores de forma})_p;$$

Com essa constatação de que não basta a simples semelhança geométrica para que dois processos ou sistemas físicos tenham comportamento semelhante, Galileu colocou-se claramente como pioneiro da teoria da semelhança física, já pressentida pelo arquiteto Vitruvius ao afirmar, no início da era cristã, que “há algumas coisas que, quando aumentadas, imitando pequenos modelos, são efetivas; outras coisas não admitem modelos” (CARNEIRO,1993).

O parâmetro adimensional $\Pi_2 = \gamma/l/\tau_k$, designado como *número de Galileu*, onde γ representa o peso, l representa um comprimento característico e τ representa a tensão cisalhante, desempenha papel muito importante nos problemas estáticos de mecânica dos corpos deformáveis, submetidos ao campo gravitacional existente na superfície da Terra. Mede de um certo modo a influência do peso próprio, que cresce com as dimensões do corpo mais rapidamente que a resistência. Galileu demonstrou que se todas as dimensões de corpo forem multiplicadas por um mesmo número, mantendo-se a semelhança geométrica, o peso próprio do corpo cresce com o cubo dessa escala geométrica, ao passo

que sua capacidade resistente cresce apenas com seu quadrado. Assim, o corpo maior tem menos capacidade de resistir a forças aplicadas, relativamente ao seu peso próprio, que o corpo menor, e existe um tamanho limite, para o qual o corpo resiste apenas ao seu peso próprio. O modo de evitar esse enfraquecimento relativo seria executar o corpo grande com um material de maior resistência ou menor peso específico.

Na figura 4.3 apresentam-se os passos que devem ser seguidos para aplicação da análise dimensional. Todos esses passos serão descritos de forma detalhada nas seções seguintes, através da dedução dos parâmetros adimensionais de acordo com a formulação do problema proposto. Generalizando, um fenômeno físico pode ser representado por números π , fatores de forma e funções de forma, todos adimensionais. Existem outros procedimentos que podem ser empregados para geração dos números π , diferentes do empregado via análise dimensional, que são enunciados a seguir:

- Por meio das várias leis físicas que governam o problema;
- Por meio das equações de movimento.

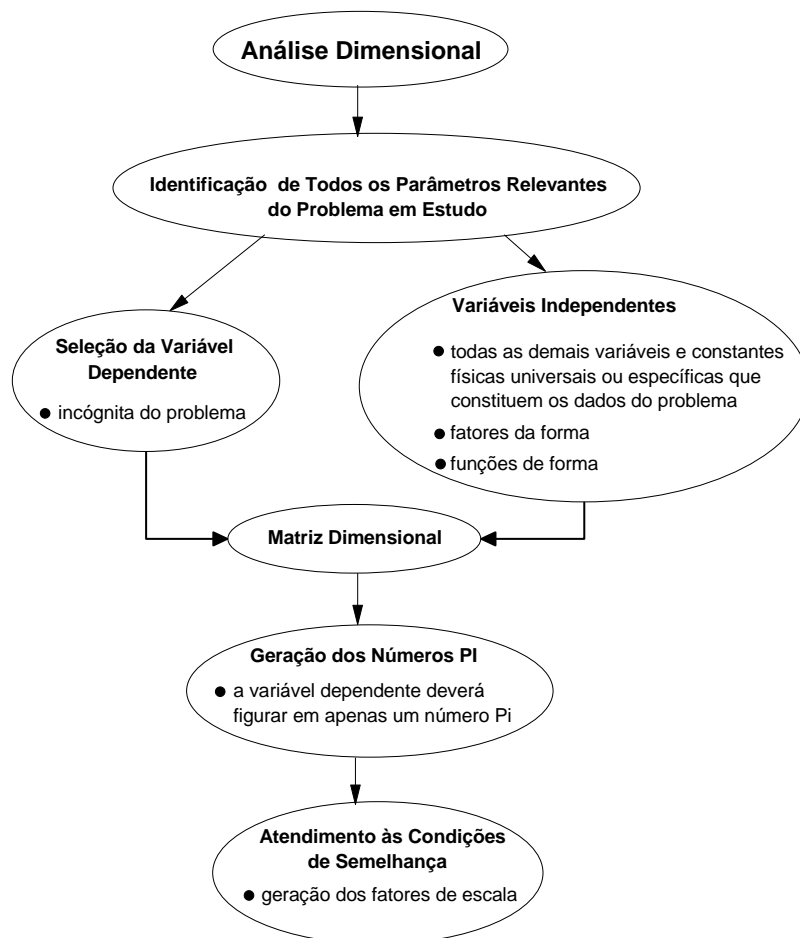


Figura 4.3 – Passos para aplicação da análise dimensional

Os autores Ungbhakorn e Singhatanadgid (2003) comentam em seu trabalho que a aplicação da teoria da semelhança, via análise dimensional, às soluções das equações diferenciais de movimento ao invés de ser aplicada diretamente às equações diferenciais de movimento, complica o processo de obtenção dos fatores de escala e limita a aplicabilidade do conceito da teoria da semelhança, porque alguma forma aproximada ou exata das soluções analíticas deve ser obtida antes da transformação de semelhança ser aplicada. Comentam também que o método é mais fácil e mais direto quando comparado com aquele da análise dimensional convencional (SIMITSES E REZAEPAZHAND, 1997). Além disso, afirmam, os fatores de escala obtidos são únicos, porque vêm diretamente das equações diferenciais de movimento. Isto de fato é verdade. Porém, é preciso que se considere que nem sempre se conhecem as equações diferenciais de movimento para descrição de um dado fenômeno físico. Neste caso, esse procedimento via equações diferenciais de movimento perde em generalidade, o que não ocorre com a análise dimensional convencional (LANGHAAR, 1951).

No Anexo I apresenta-se a aplicação da Teoria da Semelhança para outros tipos de problemas encontrados na engenharia.

4.4 Descrição geral dos Parâmetros do Problema para a Estrutura de Torre

A seguir, são apresentados os vários parâmetros que podem ser levados em consideração, dependendo do problema que se quer estudar. Muitos desses problemas podem ser abordados simultaneamente. Na figura 4.4 ilustra-se a descrição do problema, representado a torre submetida à ação do vento.

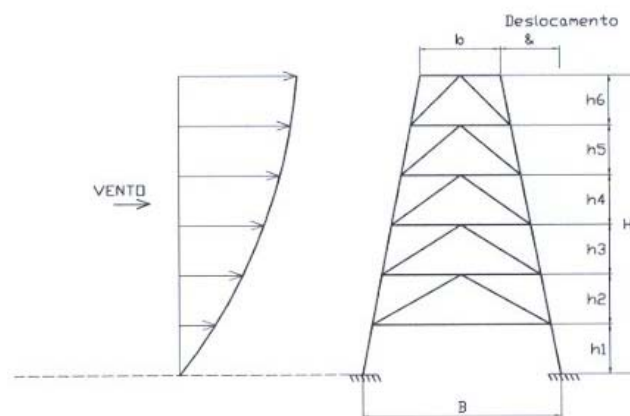


Figura 4.4 – Esquema da torre analisada.

Supõe-se que as barras são tubulares, como será visto na geração dos modelos. A força de arrasto é dada por:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \cdot c_D \cdot A = \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \cdot c_D \cdot D \cdot l \quad (4.3)$$

onde l é o comprimento característico e D o diâmetro do tubo .

As principais ações atuantes são a força do vento, o peso próprio e as cargas das antenas. Têm-se assim os seguintes parâmetros:

- σ_{lim} (limite de tensão) – F/A – ruptura do material.
- λ_{lim} (índice de esbeltez) – flambagem (local, global)
- Largura da base – B
- Largura do topo – b
- Comprimento dos módulos – h_1, h_2, \dots, h_n
- Altura da torre – H
- Diâmetro do perfil tubular – D
- Comprimento da barra - $\ell_{b1}, \ell_{b2}, \dots, \ell_{bn} \Rightarrow$ este pode ser o comprimento característico.
- Densidade do ar - ρ_{ar}
- Coeficiente de arrasto – C_D
- Velocidade do vento – V
- Área de projeção perpendicular à ação do vento $A = l_b \cdot D$
- μ_a = viscosidade do ar
- Densidade do material do tubo – ρ_m
- Módulo de elasticidade do material – E
- Ângulo de incidência do vento – α
- Aceleração da gravidade – g
- Deslocamento horizontal no topo da estrutura - δ

Todos esses parâmetros podem ser colocados numa forma mais organizada, relacionando-se aqueles referentes ao vento, à estrutura, às constantes físicas universais, às

constantes físicas específicas, dados adimensionais e os vários fatores de forma e funções de forma.

O problema físico/estrutural que rege o fenômeno da ação do vento sobre a torre, juntamente com a ação do peso próprio da estrutura, pode ser posto da seguinte maneira:

1. Determinar a relação da força devido ao vento com a estrutura, ou seja, com os elementos componentes da estrutura;
2. Determinar a relação que existe entre essa força e os esforços (tensões) e deslocamentos que surgem na estrutura;
3. Determinar a relação entre a força devido ao peso próprio da estrutura e os esforços (tensões) e deslocamentos que surgem na estrutura;
4. Determinar a relação entre a frequência de vibração da estrutura e os parâmetros considerados.

Do problema (1) sabe-se que:

$$F_{vento} = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot v^2 \cdot c_D \cdot A = 1/2 \cdot \rho_{ar} \cdot v^2 \cdot c_D \cdot D \cdot l_b \quad (4.4)$$

onde ρ_{ar} é densidade do ar; v é a velocidade básica do vento; C_D é o coeficiente de arrasto e A é a área de obstrução do vento (área da projeção perpendicular à ação de vento), dada por,

$$A = \ell_b \cdot D, \quad (4.5)$$

sendo ℓ_b o comprimento da barra e D o diâmetro do tubo.

Para o problema (2) sabe-se que, considerando a estrutura com comportamento elástico linear, a força atuante está relacionada com a rigidez e os deslocamentos por:

$$K \cdot \mathbf{u} = F_{vento} \quad (4.6)$$

onde K é a matriz de rigidez da estrutura. Os coeficientes desta matriz são dados em função dos parâmetros da estrutura (E , I , L , etc). Ainda, \mathbf{u} representa o vetor dos deslocamentos e

F_{vento} o vetor de forças. Este vetor contém as componentes correspondentes às parcelas de atuação do vento sobre cada elemento estrutural.

Do problema (3) tem-se que:

$$K.u = F_{pp} \quad (4.7)$$

onde F_{pp} é o vetor de forças devido à ação do peso próprio da estrutura. O peso próprio de um dado elemento da estrutura tubular é dado por:

$$P_{próprio} = \gamma.V = \gamma.A.l_b = (\rho.g) \left[\frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \right] l_b \quad (4.8)$$

sendo γ o peso específico do material (peso/vol.); ρ a densidade específica do material (massa/vol.); g a aceleração da gravidade; l_b o comprimento da barra; D_{ext} o diâmetro externo e D_{int} o diâmetro interno.

Do problema (4) sabe-se que:

$$f_n = f(K, M) \quad (4.9)$$

ou seja, a frequência natural da estrutura é função da sua distribuição de rigidez e massa. Portanto, função da densidade do material, do módulo de elasticidade e de fatores de forma.

4.5 Formulação e Resolução Completa do Problema

A análise dimensional é subordinada às teorias físicas, e não estas àquelas. Em conseqüência, para dar o primeiro passo na formação de um conjunto complexo de números II é necessário organizar uma lista de todos os parâmetros que devem figurar no problema estudado, tomando-se como base a observação e a experiência. A aplicação da análise dimensional exige, portanto, um conhecimento físico qualitativo muito claro da natureza do fenômeno estudado, embora não pressuponha o conhecimento prévio das relações funcionais que o representem matematicamente.

Outra regra básica consiste em que, entre as variáveis só uma seja a variável dependente, isto é, a incógnita do problema. Todas as outras variáveis devem ser variáveis independentes, constituindo, com as constantes físicas, os dados do problema. A lista estabelecida em conformidade com as regras anteriores conterà n parâmetros, isto é, a variável dependente e mais $(n-1)$ variáveis independentes e constantes físicas.

A formação de um conjunto de $(n-r)$ números II é iniciada com a escolha, dentro de lista dos n parâmetros do problema, de r parâmetros que, por terem dimensões independentes entre si, poderiam ser adotados como nova base no caso de uma mudança de base. De um modo geral r é o posto da matriz dimensional correspondente aos n parâmetros do problema, igual ou inferior ao número de linhas da matriz dimensional. Na maioria dos casos é igual ao número de grandezas fundamentais do sistema de medidas adotadas, relacionadas com o fenômeno, isto é, igual ao número de linhas da matriz dimensional. Reservam-se as r primeiras colunas da matriz dimensional para as grandezas determinantes e a última para a variável dependente.

No Anexo II apresenta-se uma abordagem que serve para mostrar determinados conceitos que surgem quando da aplicação da análise dimensional, além de serem apresentados todos os passos que devem ser seguidos para a obtenção dos números π . Serve ainda para ilustrar que se deve prestar atenção nos parâmetros a serem considerados de acordo com o tipo de fenômeno que se deseja estudar. No caso, como se verá na abordagem do problema do fluxo de vento com a estrutura, o que se pretende investigar é o fenômeno de interação fluido/estrutura, devido à ação do vento. Portanto, a variável dependente deve ser a força do vento.

4.5.1 Abordagem do problema do fluxo de vento com a estrutura

A resolução do problema do fluxo de vento com a estrutura, descrita nesta abordagem tem como referência àquele que é apresentado em (ALVES et al., 2003), no qual o procedimento é aplicado para geração de um modelo reduzido a ser ensaiado em laboratório, constando dos cabos condutores e da torre de transmissão.

Retomando o problema da interação do fluxo do vento com a torre, têm-se os

seguintes parâmetros:

- Variável dependente:

A variável de controle será a força do vento atuante na estrutura.

- Força do vento na estrutura: $[F_v] = LMT^{-2}$

- Variáveis independentes:

- Velocidade básica do vento: $[V_v] = LM^0T^{-1}$

- Densidade do ar: $[\rho_{ar}] = L^3MT^0$

- Viscosidade do ar: $[\mu_{ar}] = L^{-1}MT^{-1}$

- Dimensão característica da estrutura: $[L_c] = LM^0T^0$

- Massa por unidade de comprimento da estrutura: $[m] = L^{-1}MT^{-1}$

- Constante física específica

- Módulo de elasticidade da estrutura: $[E] = L^{-1}MT^{-2}$

- Constante física universal

- Aceleração da gravidade: $[g] = LM^0T^{-2}$

- Dado adimensional:

- Ângulo de incidência do vento (grandeza adimensional): α

Além dos vários fatores de forma já mencionados, juntamente com alguma função de forma (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Matriz dimensional do problema.

	L_s	V_v	ρ_{ar}	μ_{ar}	m	E	g	F_v
L	1	1	-3	-1	-1	-1	1	1
M	0	0	1	1	1	1	0	1
T	0	-1	0	-1	0	-2	-2	-2
Expoentes do número π	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8

O número π é expresso por:

$$\pi = L_s^{\alpha_1} \cdot V_v^{\alpha_2} \cdot \rho_{ar}^{\alpha_3} \cdot \mu_{ar}^{\alpha_4} \cdot m^{\alpha_5} \cdot E^{\alpha_6} \cdot g^{\alpha_7} \cdot F_v^{\alpha_8} \quad (4.10)$$

Seguindo o procedimento apresentado no Anexo I, os expoentes do número são obtidos a partir da solução do sistema de equações a seguir.

$$\alpha_1 + \alpha_2 - 3\alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 = 0 \quad (4.11 \text{ a})$$

$$\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_8 = 0 \quad (4.11 \text{ b})$$

$$-\alpha_2 - \alpha_4 - 2\alpha_6 - 2\alpha_7 - 2\alpha_8 = 0 \quad (4.11 \text{ c})$$

O posto da matriz é igual a 3, logo, $n_\pi = 8 - 3 = 5$. Assim, os cinco números π serão obtidos a partir da solução do sistema de equações (4.11).

- Primeiro número π : π_1

$$\text{com } \alpha_8 = 1 ; \alpha_7 = \alpha_6 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$$

$$\text{de (4.11 b)} \rightarrow \alpha_3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = -1$$

$$\text{de (4.11 c)} \rightarrow -\alpha_2 - 2 \times 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -2$$

$$\text{de (4.11 a)} \rightarrow \alpha_1 - 2 + 3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = -2$$

$$\alpha_1 = -2 ; \alpha_2 = -2 ; \alpha_3 = -1 ; \alpha_8 = 1$$

$$\pi_1 = L_s^{-2} \cdot V_v^{-2} \cdot \rho_{ar}^{-1} \cdot F_v^1 = F_v / (\rho_{ar} \cdot L_s^2 \cdot V_v^2)$$

$$\therefore \boxed{\pi_1 = F_v / (\rho_{ar} \cdot L_s^2 \cdot V_v^2)}, \text{ que corresponde ao coeficiente do arrasto.} \quad (4.12a)$$

- Segundo número π : π_2

$$\text{com } \alpha_7 = 1 ; \alpha_8 = \alpha_6 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$$

$$\text{de (4.11 b)} \rightarrow \alpha_3 = 0$$

$$\text{de (4.11 c)} \rightarrow -\alpha_2 - 2 \times 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -2$$

$$\text{de (4.11 a)} \rightarrow \alpha_1 - 2 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 1$$

$$\alpha_1 = 1 ; \alpha_2 = -2 ; \alpha_3 = 0 ; \alpha_7 = 1$$

$$\pi_2 = L_s^1 \cdot V_v^{-2} \cdot g^1 = L_s \cdot g / V_v^2$$

$$\therefore \boxed{\pi_2 = L_s \cdot g / V_v^2}, \text{ que corresponde ao número de Froude.} \quad (4.12b)$$

- Terceiro número π : π_3

$$\text{com } \alpha_6 = 1 ; \alpha_8 = \alpha_7 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$$

$$\text{de (4.11 b)} \rightarrow \alpha_3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = -1$$

$$\text{de (4.11 c)} \rightarrow -\alpha_2 - 2 \cdot 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -2$$

$$\text{de (4.11 a)} \rightarrow \alpha_1 - 2 - 3 \cdot (-1) - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 0$$

$$\alpha_1 = 0 ; \alpha_2 = -2 ; \alpha_3 = -1 ; \alpha_6 = 1$$

$$\pi_3 = V_v^{-2} \cdot \rho_{ar}^{-1} \cdot E^1 = E/\rho_{ar} \cdot V_v^{-2}$$

$$\therefore \boxed{\pi_3 = E/(\rho_{ar} \cdot V_v^{-2})}, \text{ que corresponde à condição de semelhança elástica. (4.12c)}$$

- Quarto número π : π_4

$$\text{com } \alpha_5 = 1 ; \alpha_8 = \alpha_7 = \alpha_6 = \alpha_4 = 0$$

$$\text{de (4.11 b)} \rightarrow \alpha_3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = -1$$

$$\text{de (4.11 c)} \rightarrow -\alpha_2 = 0 \rightarrow \alpha_2 = 0$$

$$\text{de (4.11 a)} \rightarrow \alpha_1 - 3 \cdot (-1) - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = -2$$

$$\alpha_1 = -2 ; \alpha_2 = 0 ; \alpha_3 = -1 ; \alpha_5 = 1$$

$$\pi_4 = L_s^{-2} \cdot \rho_{ar}^{-1} \cdot m^1 = m/\rho_{ar} \cdot L_s^{-2}$$

$$\therefore \boxed{\pi_4 = m/(\rho_{ar} \cdot L_s^{-2})}, \text{ que corresponde à relação de massa (estrutura/fluido). (4.12d)}$$

- Quinto número π : π_5

$$\text{com } \alpha_4 = 1 ; \alpha_8 = \alpha_7 = \alpha_6 = \alpha_5 = 0$$

$$\text{de (4.11 b)} \rightarrow \alpha_3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = -1$$

$$\text{de (4.11 c)} \rightarrow -\alpha_2 - 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -1$$

$$\text{de (4.11 a)} \rightarrow \alpha_1 - 1 - 3 \cdot (-1) - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = -1$$

$$\alpha_1 = -1 ; \alpha_2 = -1 ; \alpha_3 = -1 ; \alpha_4 = 1$$

$$\pi_5 = L_s^{-1} \cdot V_v^{-1} \cdot \rho_{ar}^{-1} \cdot \mu_{ar}^1 = \mu_{ar}/\rho_{ar} \cdot L_s \cdot V_v^{-1}$$

$$\therefore \boxed{\pi_5 = \mu_{ar}/(\rho_{ar} \cdot L_s \cdot V_v^{-1})}, \text{ que corresponde ao número de Reynolds. (4.12e)}$$

4.5.2 Geração dos Fatores de Escala

Uma vez que os números π são gerados, passa-se ao atendimento das condições de semelhança. Atender às condições de semelhança significa dizer que todas os parâmetros

adimensionais relevantes devem ter os mesmos valores no modelo e no protótipo. Para que haja completa semelhança física entre um protótipo e seu modelo, é necessário que todos os números π tenham os mesmos valores em ambos.

Portanto, para que haja semelhança física entre o modelo e o protótipo é necessário que todos os números adimensionais relevantes sejam preservados (tenham os mesmos valores) entre o modelo e o protótipo. Em outras palavras, que:

$$\pi_{1,modelo} = \pi_{1,protótipo}; \quad \pi_{2,modelo} = \pi_{2,protótipo}; \quad \dots; etc \quad (4.13)$$

ou seja:

$$\pi_{i,modelo} = \pi_{i,protótipo}; \quad i=1,(n-r) \quad (4.14)$$

onde n é o número de variáveis independentes e r é o posto da matriz dimensional.

Chama-se fator de escala a relação entre a magnitude de uma grandeza no modelo e a magnitude correspondente do protótipo. Para se garantir as condições teóricas de semelhança física torna-se necessário obedecer simultaneamente a todos os números π . O atendimento a essas condições de semelhança vai gerar as relações de escala entre modelo/protótipo.

O fator de escala de uma quantidade f denominada K_f é a razão do valor de f no modelo pelo valor de f no protótipo, isto é:

$$K_f = \frac{f_m}{f_p} \quad (4.15)$$

Utilizando os números π obtidos anteriormente e cumprindo o atendimento às condições de semelhança, os seguintes fatores de escala são gerados:

i. Primeiro Número π

$$\pi_1 = \frac{F_v}{\rho_{ar} \cdot L_s^2 \cdot V_v^2} \quad (4.16)$$

como π_1 deve assumir o mesmo valor no modelo e no protótipo, tem-se de (4.14):

$$\frac{F_{v,m}}{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m}^2 \cdot V_{v,m}^2} = \frac{F_{v,p}}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p}^2 \cdot V_{v,p}^2} \quad (4.17)$$

ou,

$$\frac{F_{v,m}}{F_{v,p}} = \frac{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m}^2 \cdot V_{v,m}^2}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p}^2 \cdot V_{v,p}^2} \quad (4.18)$$

$$K_f = K_{\rho_{ar}} \cdot K_{L_s}^2 \cdot K_{V_v}^2 \quad (4.19)$$

onde:

$$K_f = \frac{F_{v,m}}{F_{v,p}}; K_{\rho_{ar}} = \frac{\rho_{ar,m}}{\rho_{ar,p}}; K_{L_s} = \frac{L_{s,m}}{L_{s,p}}; K_{V_v} = \frac{V_{v,m}}{V_{v,p}} \quad (4.20)$$

ii. Segundo Número π

$$\pi_2 = \frac{L_s \cdot g}{V_v^2} \quad (4.21)$$

De (4.14). obtém-se:

$$\frac{L_{s,m} \cdot g_m}{V_{v,m}^2} = \frac{L_{s,p} \cdot g_p}{V_{v,p}^2} \quad (4.22)$$

ou,

$$\frac{L_{s,m} \cdot g_m}{L_{s,p} \cdot g_m} = \frac{V_{v,m}^2}{V_{v,p}^2} \quad (4.23)$$

$$K_{L_s} \cdot K_g = K_{V_v}^2 \quad (4.24)$$

onde

$$K_g = \frac{F_{g,m}}{F_{g,p}} \quad (4.25)$$

como $K_g = 1$, já que $g_m = g_p$, fica-se com:

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \quad (4.26)$$

ou,

$$K_{Vv} = \sqrt{K_{Ls}} \quad (4.27)$$

iii. Terceiro Número π

$$\pi_3 = \frac{E}{\rho_{ar} \cdot Vv^2} \quad (4.28)$$

De (4.14) obtém-se:

$$\frac{E_m}{\rho_{ar,m} \cdot V_{v,m}^2} = \frac{E_p}{\rho_{ar,p} \cdot V_{v,p}^2} \quad (4.29)$$

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{\rho_{ar,m} \cdot V_{v,m}^2}{\rho_{ar,p} \cdot V_{v,p}^2} \quad (4.30)$$

ou ainda:

$$K_E = K_{ar} \cdot K_{Vv}^2 \quad (4.31)$$

como

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \quad (4.26)$$

$$K_{\rho_{ar}} = 1 \quad (4.32)$$

Então:

$$K_E = K_{Ls} \quad (4.33)$$

onde:

$$K_E = \frac{E_m}{E_p} \quad (4.34)$$

iv. **Quarto Número π**

$$\pi_4 = \frac{m}{\rho_{ar} \cdot L_s^2} \quad (4.35)$$

De (4.14) tem-se:

$$\frac{m_m}{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m}^2} = \frac{m_p}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p}^2} \quad (4.36)$$

$$\frac{m_m}{m_p} = \frac{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m}^2}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p}^2} \quad (4.37)$$

ou,

$$K_m = K_{\rho_{ar}} \cdot K_{L_s}^2 \quad (4.38)$$

Como:

$$K_{\rho_{ar}} = 1 \quad (4.32)$$

Fica-se com:

$$K_m = K_{L_s}^2 \quad (4.39)$$

onde:

$$K_m = \frac{m_m}{m_p} \quad (4.40)$$

v. **Quinto Número π**

$$\pi_5 = \frac{\mu_{ar}}{\rho_{ar} \cdot L_s \cdot V_v} \quad (4.41)$$

De (4.14) tem-se:

$$\frac{\mu_{ar,m}}{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m} \cdot V_{v,m}} = \frac{\mu_{ar,p}}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p} \cdot V_{v,p}} \quad (4.42)$$

$$\frac{\mu_{ar,m}}{\mu_{ar,p}} = \frac{\rho_{ar,m} \cdot L_{s,m} \cdot V_{v,m}}{\rho_{ar,p} \cdot L_{s,p} \cdot V_{v,p}} \quad (4.43)$$

ou ainda:

$$K_{\mu_{ar}} = K_{\rho_{ar}} \cdot K_{Ls} \cdot K_{Vv} \quad (4.44)$$

como:

$$K_{\rho_{ar}} = 1 \quad (4.32)$$

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \quad (4.26)$$

Fica-se com:

$$K_{\mu_{ar}} = K_{Ls} \cdot K_{Ls}^{\frac{1}{2}} \quad (4.45)$$

$$K_{\mu_{ar}} = K_{Ls}^{\frac{3}{2}} \quad (4.46)$$

onde:

$$K_{\mu_{ar}} = \frac{\mu_{ar,m}}{\mu_{ar,p}} \quad (4.47)$$

De:

$$K_f = K_{\rho_{ar}} \cdot K_{Ls}^2 \cdot K_{Vv}^2 \quad (4.19)$$

com

$$K_{\rho_{ar}} = 1 \quad (4.32)$$

e

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \quad (4.26)$$

Fica-se com:

$$K_f = K_{Ls} \cdot K_{Ls}^2 \quad (4.48)$$

$$K_f = K_{Ls}^3 \quad (4.49)$$

Assim têm-se os seguintes fatores de escala:

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \text{ ou } K_{Vv} = \sqrt{K_{Ls}} \quad (4.26)$$

$$K_f = K_{Ls}^3 \quad (4.49)$$

$$K_E = K_{Ls} \quad (4.33)$$

$$K_m = K_{Ls}^2 \quad (4.39)$$

$$K_{\mu_{ar}} = K_{Ls}^{\frac{3}{2}} \quad (4.46)$$

No Anexo III apresentam-se os resultados iniciais ou preliminares da aplicação da idéia descrita neste trabalho, constituindo-se, assim, numa exploração mais qualitativa, precisando evidentemente ser mais bem explorada. São apresentados vários gráficos obtidos segundo uma variação paramétrica envolvendo todos os números π .

4.6 Geração dos Modelos a Partir dos Fatores de Escala (Modelos Qualitativos)

A partir dos fatores de escala obtidos, foram gerados os três modelos ilustrados na figura 4.5 para análise computacional. Pretende-se aqui verificar se os valores obtidos via simulação computacional estão de acordo com aqueles previstos a partir da aplicação da teoria da semelhança, através dos fatores de escala. Assim, a partir do modelo de 40 m de altura, servindo como referência, foram gerados os outros dois, de 80 m e 120 m. Logo, os fatores de escala adotados correspondem respectivamente a $K_L = 2$ e $K_L = 3$.

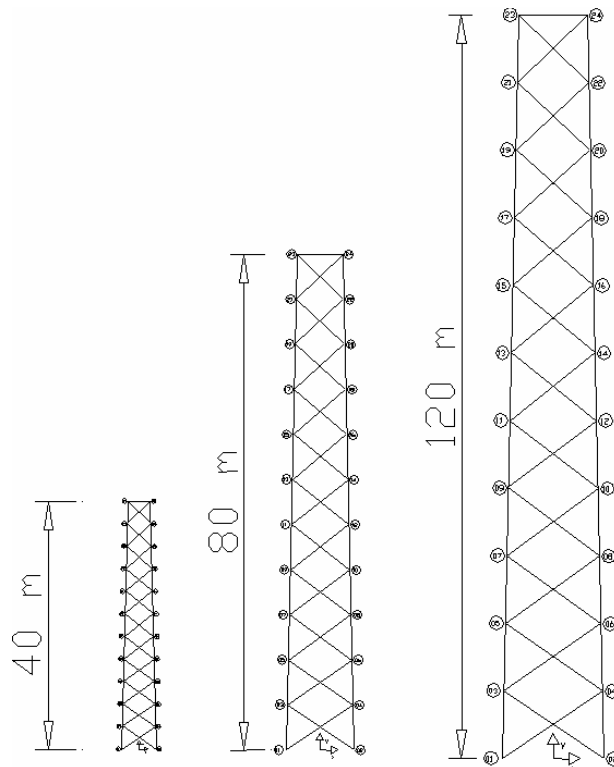


Figura 4.5 – Ilustração dos três modelos de torre gerados com os fatores de escala.

O modelo de referência foi discretizado com elemento de treliça plana, sendo adotados somente dois tipos de seções transversais: uma área A_1 para as pernas e uma área A_2 para os elementos cruzados. Essa simplificação é para que se possa avaliar, como o já mencionado, os resultados mais sob uma forma qualitativa. As coordenadas, incidências, áreas e forças aplicadas para o modelo de referência (modelo com 40 m.de altura) estão apresentadas nas tabelas 4.3, 4.4.e 4.5. As forças do vento foram calculadas assumindo-se uma variação linear com a altura. Todos os valores calculados para geração dos modelos de 80 e 120 m foram obtidos a partir daqueles valores que se encontram nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, levando-se em conta os respectivos fatores de escala.

Todas as análises dos modelos partiram de um modelo que possuía as seguintes características:

- Altura (Comprimento característico - L_s) = 40 m
- Largura = 5,5 m.

As coordenadas dos pontos nodais são apresentadas nas tabelas 4.3, 4.4, e 4.5.

Tabela 4.2 – Numeração e coordenadas dos nós

Nó	X	Y
	40 m	
1	-2,73	0,00
2	2,73	0,00
3	-2,64	3,64
4	2,64	3,64
5	-2,55	7,27
6	2,55	7,27
7	-2,45	10,91
8	2,45	10,91
9	-2,36	14,55
10	2,36	14,55
11	-2,27	18,18
12	2,27	18,18
13	-2,22	21,82
14	2,22	21,82
15	-2,18	25,45
16	2,18	25,45
17	-2,09	29,09
18	2,09	29,09
19	-2,00	32,73
20	2,00	32,73
21	-1,91	36,36
22	1,91	36,36
23	-1,82	40,00
24	1,82	40,00

Tabela 4.3 – Forças nodais aplicadas

Nó	Força
1	0
3	0,2
5	0,35
7	0,5
9	0,7
11	0,9
13	1,05
15	1,25
17	1,45
19	1,6
21	1,8
23	2

Tabela 4.4 – Incidência e as áreas adotadas

Elemento	Nó Inicial	Nó Final	D _e (m)	D _i (m)	A (m ²)
1	1	3	0,0267	0,0237	0,000119
2	1	4	0,02	0,017	8,72E-05
3	2	3	0,02	0,017	8,72E-05
4	2	4	0,0267	0,0237	0,000119
5	3	5	0,0267	0,0237	0,000119
6	3	6	0,02	0,017	8,72E-05
7	4	5	0,02	0,017	8,72E-05
8	4	6	0,0267	0,0237	0,000119
9	5	7	0,0267	0,0237	0,000119
10	5	8	0,02	0,017	8,72E-05
11	6	7	0,02	0,017	8,72E-05
12	6	8	0,0267	0,0237	0,000119
13	7	9	0,0267	0,0237	0,000119
14	7	10	0,02	0,017	8,72E-05
15	8	9	0,02	0,017	8,72E-05
16	8	10	0,0267	0,0237	0,000119
17	9	11	0,0267	0,0237	0,000119
18	9	12	0,02	0,017	8,72E-05
19	10	11	0,02	0,017	8,72E-05
20	10	12	0,0267	0,0237	0,000119
21	11	13	0,0267	0,0237	0,000119
22	11	14	0,02	0,017	8,72E-05
23	12	13	0,02	0,017	8,72E-05
24	12	14	0,0267	0,0237	0,000119
25	13	15	0,0267	0,0237	0,000119
26	13	16	0,02	0,017	8,72E-05
27	14	15	0,02	0,017	8,72E-05
28	14	16	0,0267	0,0237	0,000119
29	15	17	0,0267	0,0237	0,000119
30	15	18	0,02	0,017	8,72E-05
21	11	13	0,0267	0,0237	0,000119
22	11	14	0,02	0,017	8,72E-05
23	12	13	0,02	0,017	8,72E-05
24	12	14	0,0267	0,0237	0,000119
25	13	15	0,0267	0,0237	0,000119
26	13	16	0,02	0,017	8,72E-05
27	14	15	0,02	0,017	8,72E-05
28	14	16	0,0267	0,0237	0,000119
29	15	17	0,0267	0,0237	0,000119
30	15	18	0,02	0,017	8,72E-05
31	16	17	0,02	0,017	8,72E-05
32	16	18	0,0267	0,0237	0,000119
33	17	19	0,0267	0,0237	0,000119
34	17	20	0,02	0,017	8,72E-05
35	18	19	0,02	0,017	8,72E-05
36	18	20	0,0267	0,0237	0,000119
37	19	21	0,0267	0,0237	0,000119
38	19	22	0,02	0,017	8,72E-05
39	20	21	0,02	0,017	8,72E-05
40	20	22	0,0267	0,0237	0,000119
41	21	23	0,0267	0,0237	0,000119
42	21	24	0,02	0,017	8,72E-05
43	22	23	0,02	0,017	8,72E-05
44	22	24	0,02	0,017	8,72E-05
45	23	24	0,0267	0,0237	0,000119

Na figura 4. 6 mostra-se a razão entre os deslocamentos obtidos para os modelos de 80 m e 120 m a partir do modelo de 40 m. Para a geração dos modelos de 80 m e 120 m utilizou-se um fator de escala K_{Ls} igual a dois e três, respectivamente. Para as áreas das seções (diâmetros), utilizou-se também escala igual a K_{Ls} , ou seja $K_{Ls} = 2$ e $K_{Ls} = 3$.

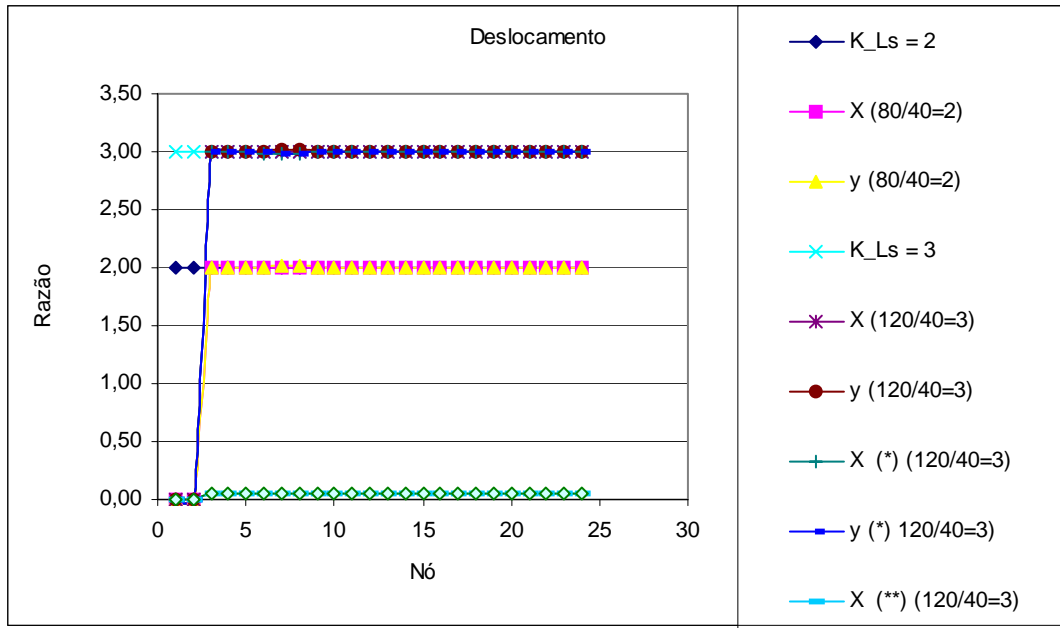


Figura 4.6 – Razão entre os deslocamentos obtidos para os modelos de 80 e 120 m.

Na geração da forças utilizou-se $K_F = K_{Ls}^3$ que resulta num $K_F = 8$ e $K_F = 27$, respectivamente para os modelos de 80 m e 120 m, figura 4.7, Eq. (4.49). Para o fator de escala, associado ao módulo de elasticidade, segue-se a relação dada pela Eq. (4.33). Desse modo, tem-se $E_{80} = 2 \cdot E_{40}$ e $E_{120} = 3 \cdot E_{40}$.

A curva inferior, mostrada no gráfico da figura 4.6 sobre a linha de razão nula, foi obtida utilizando-se um fator de escala igual a três para a geração da torre de 120 m a partir da torre de 40 m (relação indicada por (*) na simbologia dos gráficos). Este fator foi aplicado nas coordenadas dos pontos nodais e nos diâmetros das barras. No entanto, neste caso, adotou-se $E_{120} = E_{40}$ e forças $F_{120} = F_{40}$, como relações associadas ao módulo de elasticidade e força. Estes resultados são apresentados nos gráficos da figura 4.8. Na geração das razões indicadas (**) na simbologia dos gráficos, mostrados nas figuras 4.6 e 4.8, adotou-se $F_{120} = 27 \cdot F_{40}$, que obedece a Eq. (4.49) e para o módulo de elasticidade $E_{120} = E_{40}$, que não obedece a Eq. (4.33).

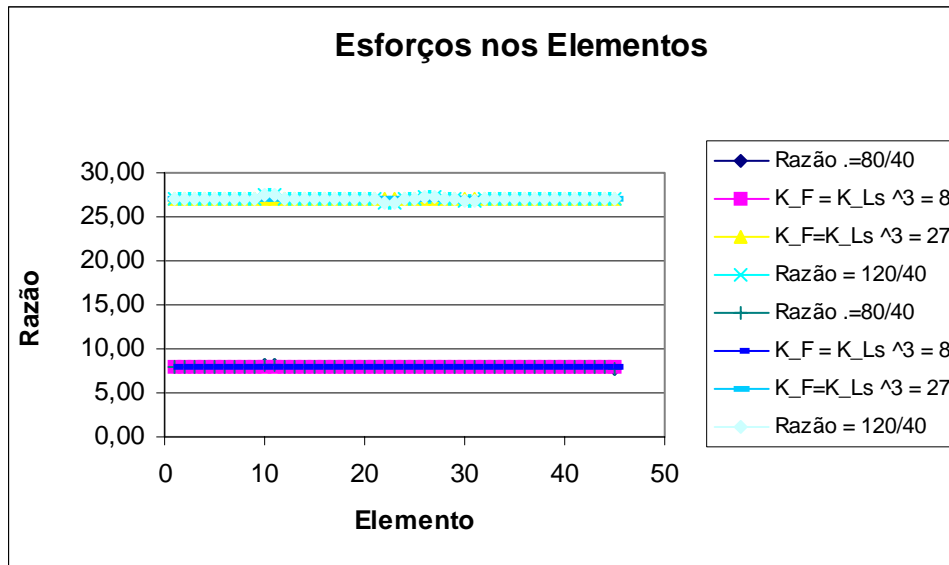


Figura 4.7 – Razão entre os esforços obtidos para os modelos de 80 e 120 m.

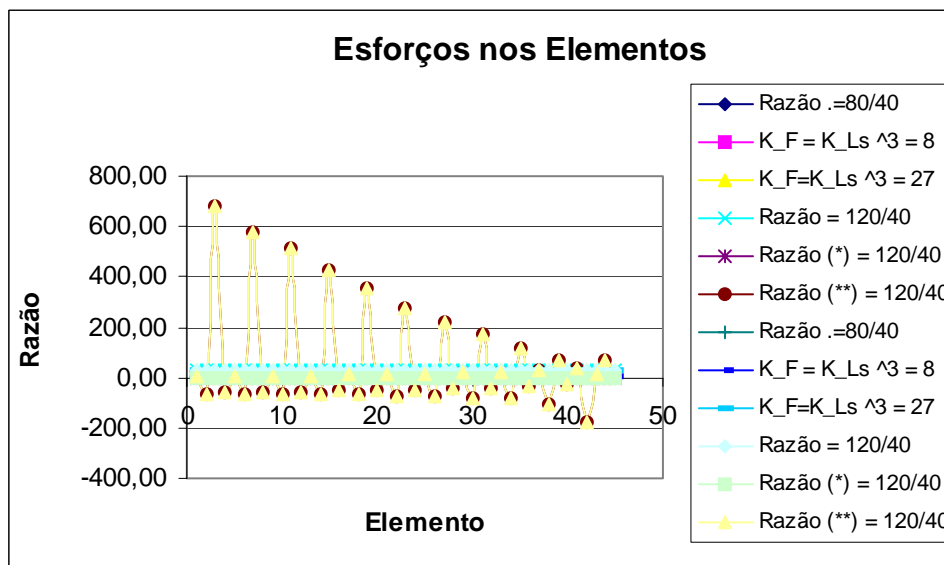


Figura 4. 8 – Razão entre os resultados obtidos para os esforços.

Analisando os resultados mostrados nas figuras 4.6 e 4.7, percebe-se que os mesmos estão de acordo com a previsão segundo a teoria de semelhança. Ou seja, os deslocamentos seguem a escala de geometria, portanto, os valores obtidos para os modelos de 80 e 120 m. são exatamente duas e três vezes aqueles encontrados para o modelo de referência. Para os esforços normais obtidos, verifica-se o mesmo, ou seja, os valores dos

mesmos seguem a escala de geometria ao cubo, como encontrado. Vale lembrar que as forças aplicadas também seguiram essa mesma escala

Observa-se que quando não se obedece a igualdade de todos os números π no modelo e no protótipo, os resultados obtidos, como mostrados na figura 4.8, para os modelos via simulação computacional, não seguem as relações de escala.

Os resultados obtidos para os modelos de 80 e 120 m via simulação computacional estão de acordo com aqueles que deveriam ocorrer segundo a previsão aplicando os fatores de escala. Deve-se mencionar aqui que foi adotada uma semelhança completa, o que na realidade quase nunca se consegue atender. Ou seja, todos os números π são exatamente os mesmos no modelo e protótipo. Portanto, tem-se que os modelos não estão com o mesmo módulo de elasticidade, o que não está de acordo com a idéia descrita neste trabalho. Nada impede, portanto que se gere modelos distorcidos.

CAPÍTULO V

5 PROJETO DA TORRE

5.1 Concepção

Um atributo comum da Moderna Arquitetura é a expressão de sua estrutura. A estrutura muitas vezes é o elemento identificador e simbólico que os edifícios apresentam. Em todos os casos, é importante uma junção entre os elementos estruturais, seus pontos de trama, com pormenorizado detalhamento da fundação e dos encaixes. Como exemplo, tem-se o projeto desenvolvido para a torre de iluminação (FIG.5.1) da Ponte Palmer em Couneuve, projeto do Arquiteto Marc Mimram, de 1993, com altura de 49 m e 50 luminárias, pesando 60 toneladas de aço.



Figura 5.1 Torre de Iluminação

Fonte:metalica,2004

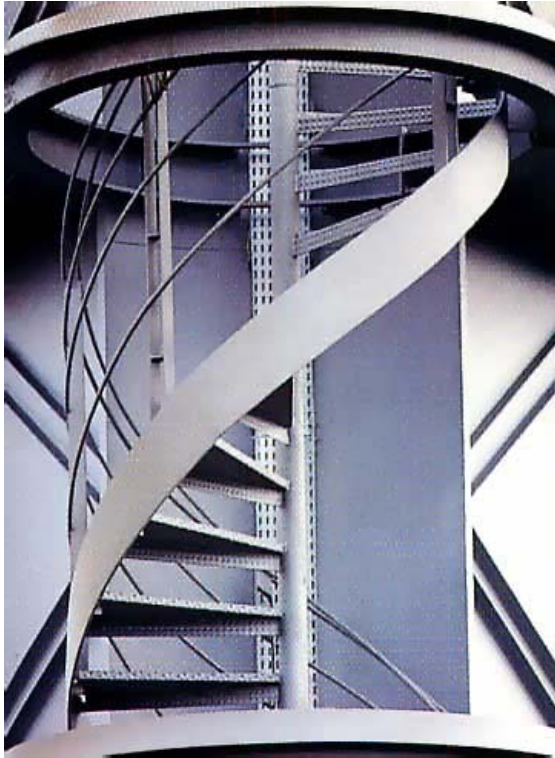


Figura 5.2 - Torre de Iluminação
Fonte:metálica, 2004

Os arquitetos e os engenheiros têm estado fascinados com as oportunidades de *design* destas estruturas e de seus detalhes. Isto tem colaborado para o desenvolvimento de uma linguagem comum apropriada à Arquitetura na moderna sociedade. A tecnologia das estruturas tem contribuído para a criatividade das formas artísticas, adicionando um aspecto mágico aos edifícios. O desenvolvimento histórico mostra que o desenho das estruturas em aço está continuamente mostrando inovações tecnológicas e econômicas, possibilitando estruturas delicadas que enriquecem o espaço arquitetônico. Para o projeto da torre The Skylon em Londres, de 1951, os Arquitetos Powel e Moya (FIG. 5.2) se inspiraram na estrutura de um inseto.



Figura 5.3 - Torre Skylon

Fonte: Robbin, 1996

Os elementos destas estruturas são os definidores da sua fabricação e montagem. Pode-se observar esta tendência no projeto do mastro da Bandeira do Brasil situado na praça da Bandeira em Belo Horizonte, construído por volta de 2000, onde foi usada uma estrutura metálica tubular com chapas de aço perfuradas definindo planos. O projeto mostra alguns equívocos construtivos e de concepção, independentes da qualidade estética e funcional (FIG.5.3) do projeto. A solução para a base do mastro é pouco elaborada, apoiando-se em laje de concreto, suspensa por duas vigas metálicas apoiadas nas laterais

em um grande arrimo de um talude artificial. Nota-se também a falta de um requinte maior na definição de local para acessório do tipo refletor de luz. O mastro ainda possui 2 tirantes de cabo de aço nas laterais.



Figura 5.4 - Mastro da bandeira, Praça da Bandeira, Belo Horizonte.

Fonte: Foto de Castanheira, 2004

Os elementos estruturais hoje são definidos pelos seus significados, pela sua fabricação e por sua montagem rápida, propiciando o confronto direto: *design* arquitetônico X *design* estrutural X *design* industrial (FIG. 5.4).

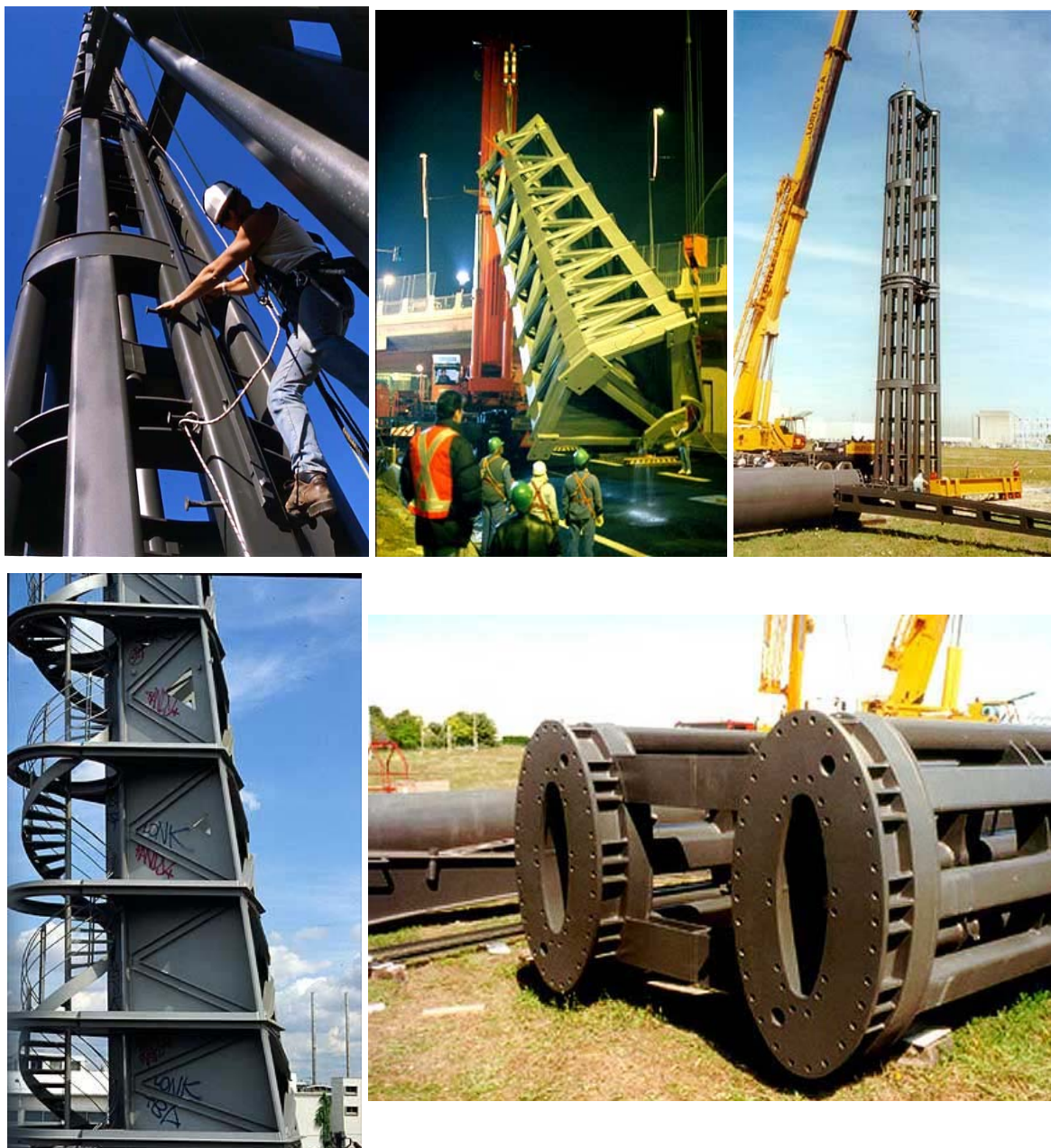


Figura 5.5 - Detalhes construtivos de torre de luz

Fonte:metálica, 2004

Pode-se citar o estudo comparativo das formas de diversas torres de transmissão, construídas para olimpíadas com as torres da Catedral de Barcelona do Arquiteto Antônio Gaudi (FIG.5.5). Este estudo foi feito pelo arquiteto Norman Foster na época da elaboração de seu projeto.

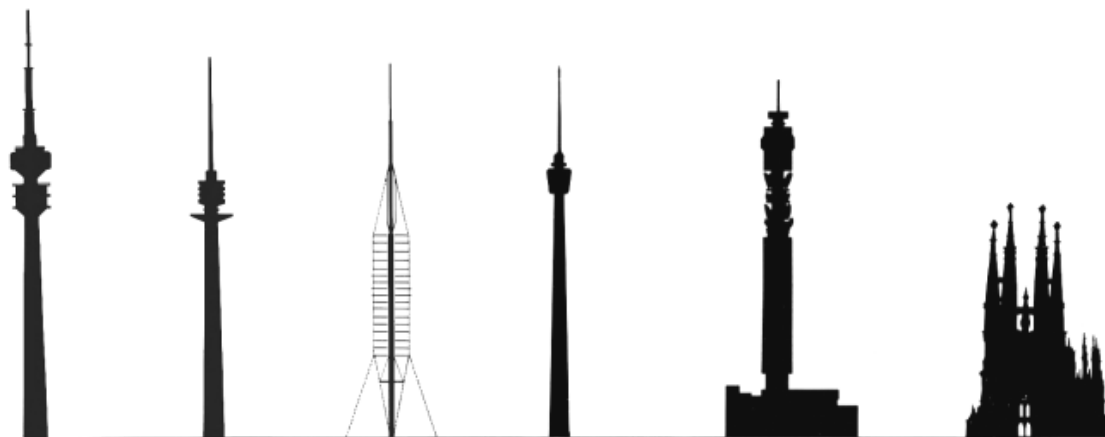


Figura 5.6 - Torre de transmissões Olimpíadas de Barcelona

Fonte: Bohigas et al, 1991.

Norman Foster criou a torre em aço para a transmissão das Olimpíadas de Barcelona (FIG. 5.6). A torre chamada de “*Collserola*” na cidade de Barcelona, na Espanha, foi construída em 1992. A estrutura de sustentação da torre é de concreto armado.

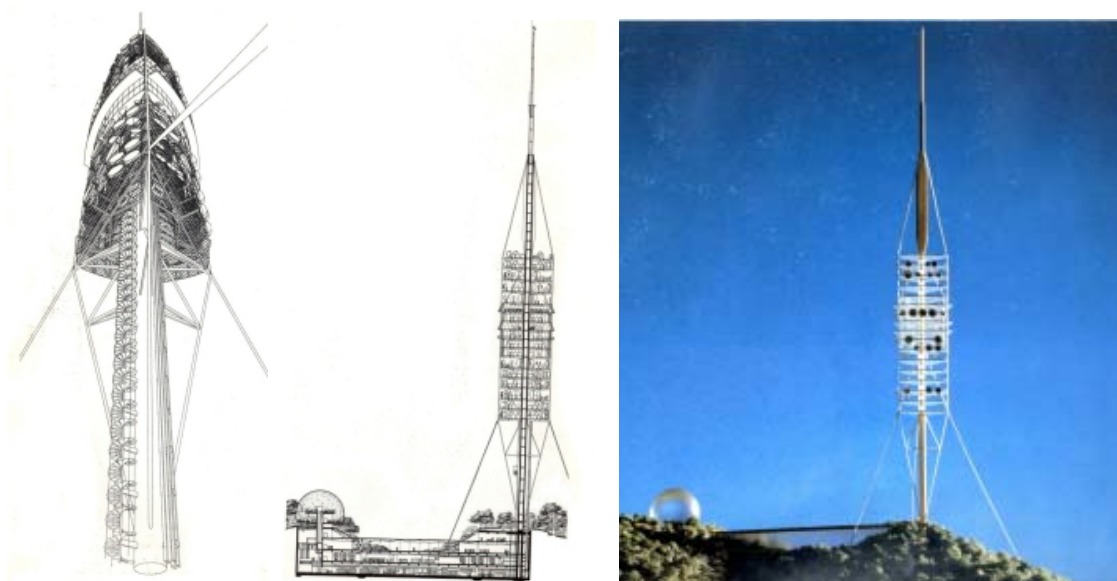


Figura 5.7 - Torre de transmissões Olimpíadas de Barcelona

Fonte: Bohigas et al, 1991.

A concepção de um projeto pode partir de vários temas e são inúmeras as fontes de inspiração para o projetista. O arquiteto espanhol Santiago Calatrava se inspira muitas vezes no corpo humano (FIG. 5.7) como, por exemplo, na torre *Monjuic Communications*, em Barcelona, Espanha.

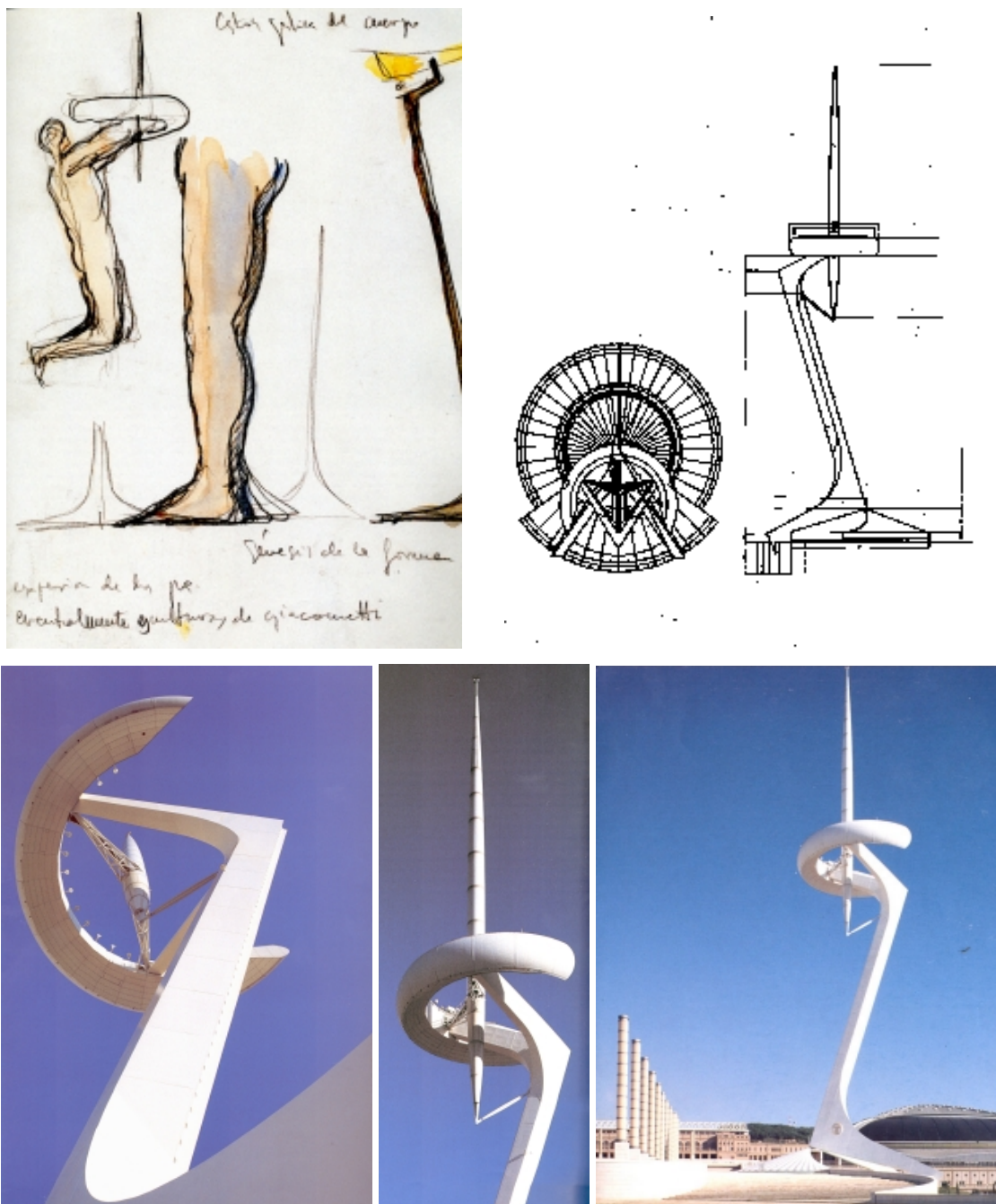


Figura 5.8 - Desenhos da Torre de Monjuïc

Fonte: Tzonis, 1999.

Por ocasião da passagem do milênio, foi construída em Londres, na região de Greenwich, em 1999, a torre *Tower of Babel Millennium Dome*, pelo arquiteto Mark Fisher (FIG. 5.9) em estrutura metálica. Existe um mecanismo retrátil na estrutura que foi usada como palco para diversas apresentações comemorativas na passagem do século.

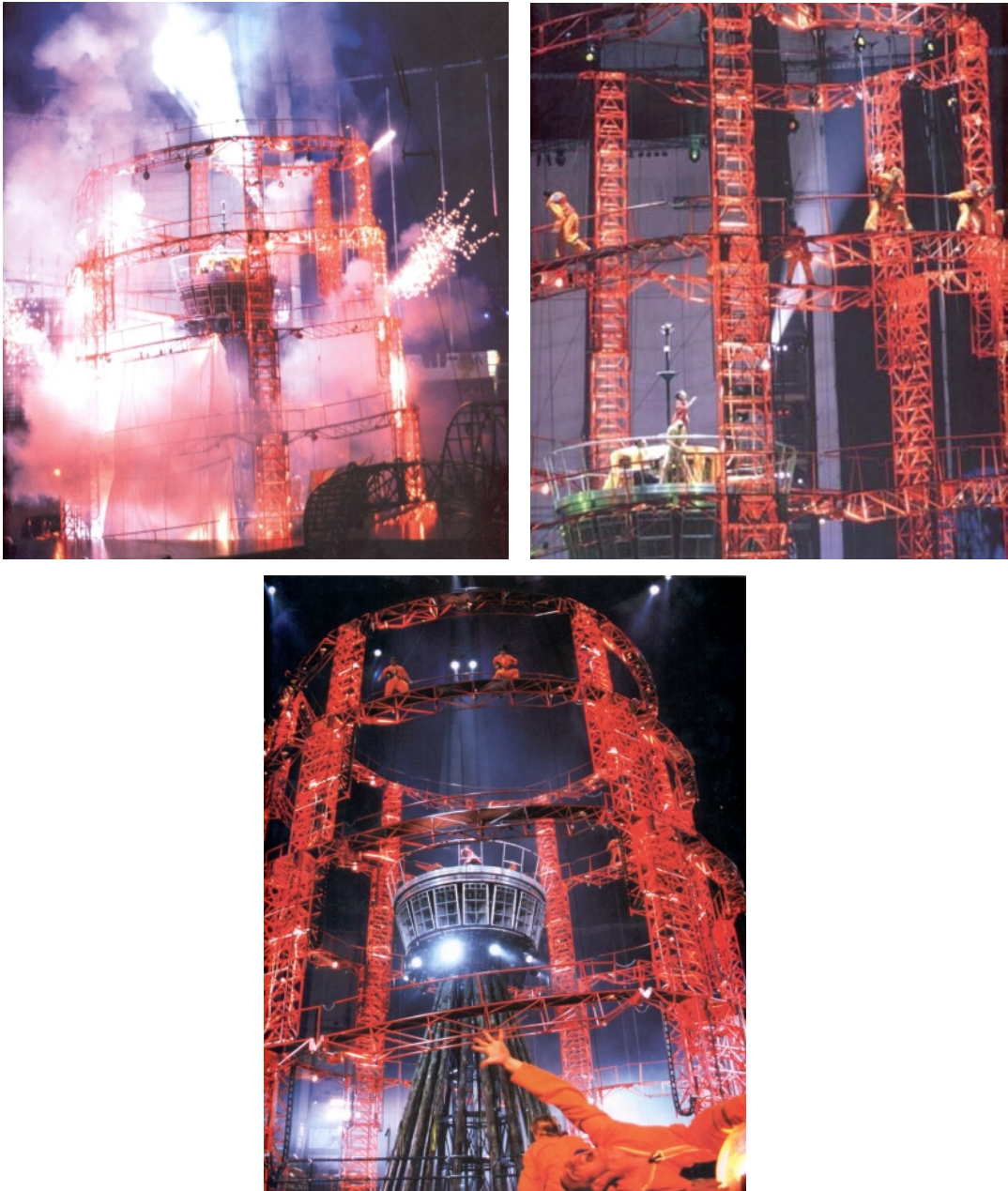


Figura 5.9 - Torre do Milenium

Fonte: Lyall, 2002.

Diversas ferramentas de representação gráfica são utilizadas para a concepção inicial de um objeto arquitetônico. O arquiteto espanhol Santiago Calatrava fez vários estudos em aquarela para a torre *Alicante Tower*, na Espanha (FIG. 5.9).

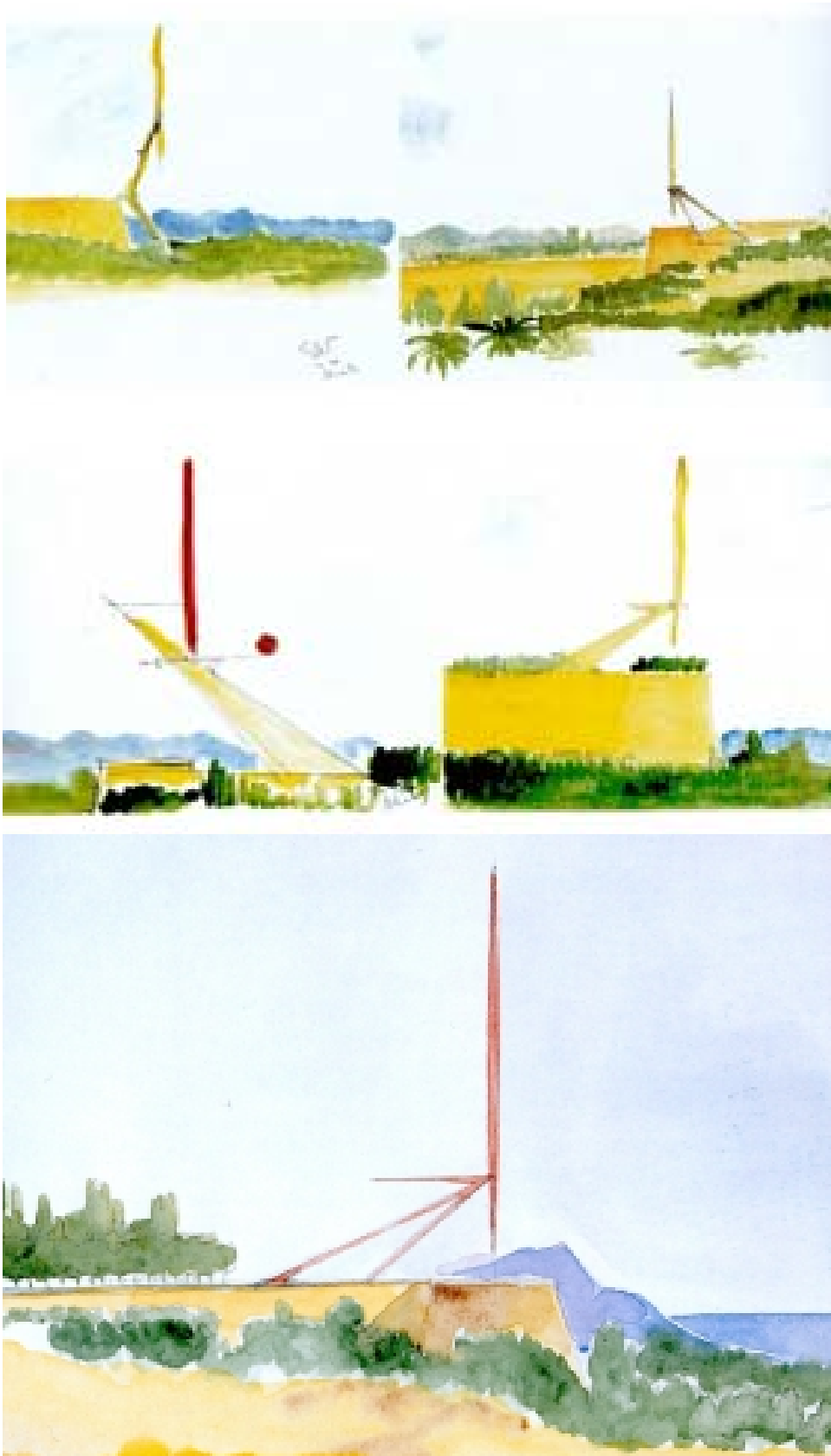


Figura 5.10 - Desenhos de Calatrava

Fonte: Tzonis, 1999.

A concepção da arquitetura moderna, segundo Charles Jencks (1978), centrava-se na incapacidade dos arquitetos do movimento moderno de falar a linguagem não verbal e procurar significados relacionados com o sentido do edifício em si mesmo. Jenks recorreu, então, à comparação entre a aparência externa de dois edifícios: um edifício para calefação central e uma capela, desenhados ambos por Mies Van der Rohe para o *Linois Institute of Technology*, de Chicago. Jenks achava-se incapaz de discernir qualquer diferença apreciável entre ambos, perguntando-se se esta confusão era atribuída pela desvalorização da religião ou a supervalorização do sistema de calefação central. Jenks não foi o único a criticar a abstração do movimento moderno pela sua aparente incapacidade de procurar uma mensagem simbólica.

Durante os anos setenta e oitenta, era habitual descrever a arquitetura moderna como inexpressiva e plana, alheia à complexidade e às contradições, como o título do livro de Robert Venturi, publicado em 1966. Durante os últimos vinte anos, a noção de que a arquitetura pode estender-se em grande medida como um sistema comunicativo, de um modo ou de outro, fazia com que o edifício devesse conter referências ou remeter-se a algo. A ilusão em essencial do contexto converteu-se no meio mais eficaz de legitimar a obra. Já na perspectiva pós moderna, a arquitetura se alimenta do contextualismo, onde a idéia de cada lugar apresenta um carácter específico, de acordo com sua situação geográfica e histórica.

Uma das metas da arquitetura consiste em revelar o espírito do lugar, evidenciando traços escondidos de sua implantação e história. Alguns arquitetos chegaram ao extremo de afirmar que o entorno arquitetônico era um ponto de referência essencial para a vida diária. Assim edifícios, espaços públicos, monumentos, bairros e cidades teriam a função de direção para certos indivíduos e também para comunidades inteiras. Outra fonte de inspiração na arquitetura contemporânea é a chamada arquitetura mimética que se inspira nas formas da natureza. Como exemplo, para um projeto de torre, pode-se remeter às diversas formas marinhas (FIG. 1.10) ou mesmo espécies vegetais (FIG. 5.11).

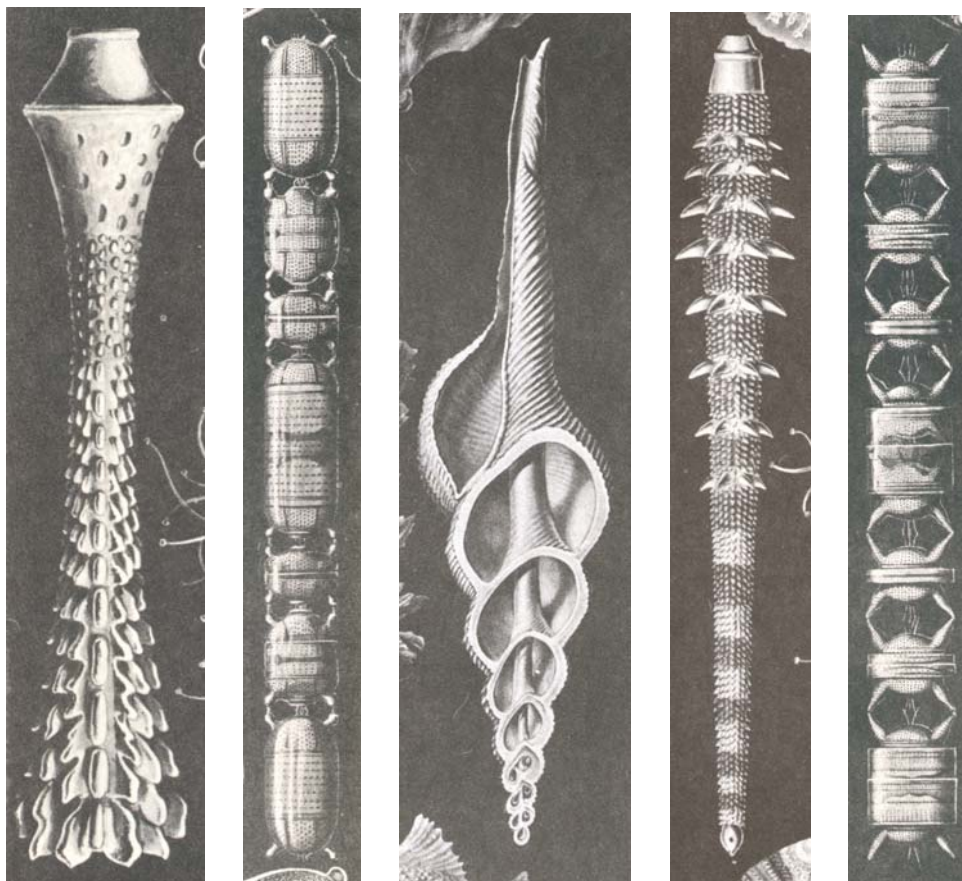


Figura 5.11 - Formas da natureza

Fonte: Arquivo de Desenhos de Formas Artísticas da Natureza, 1981.



Figura 5.12 - Cactus

Fonte: Foto de Castanheira, 2003.

Muitas vezes, a fonte de inspiração vem de edifícios já construídos e que adquirem uma nova releitura. O Palácio dos Doges com sua torre do Campanile (FIG. 5.12), localizado na Piazza de San Marco, parte central de Veneza, é a construção mais alta da cidade. Sua construção originalmente foi para servir de orientação às embarcações que se aproximavam da cidade. O campanário serviu de inspiração para o arquiteto Philip Johnson na concepção de um edifício em Nova York (FIG. 5.13).



Figura 5.13 - Palácio do Doges

Fonte: vitruvius, 2004.

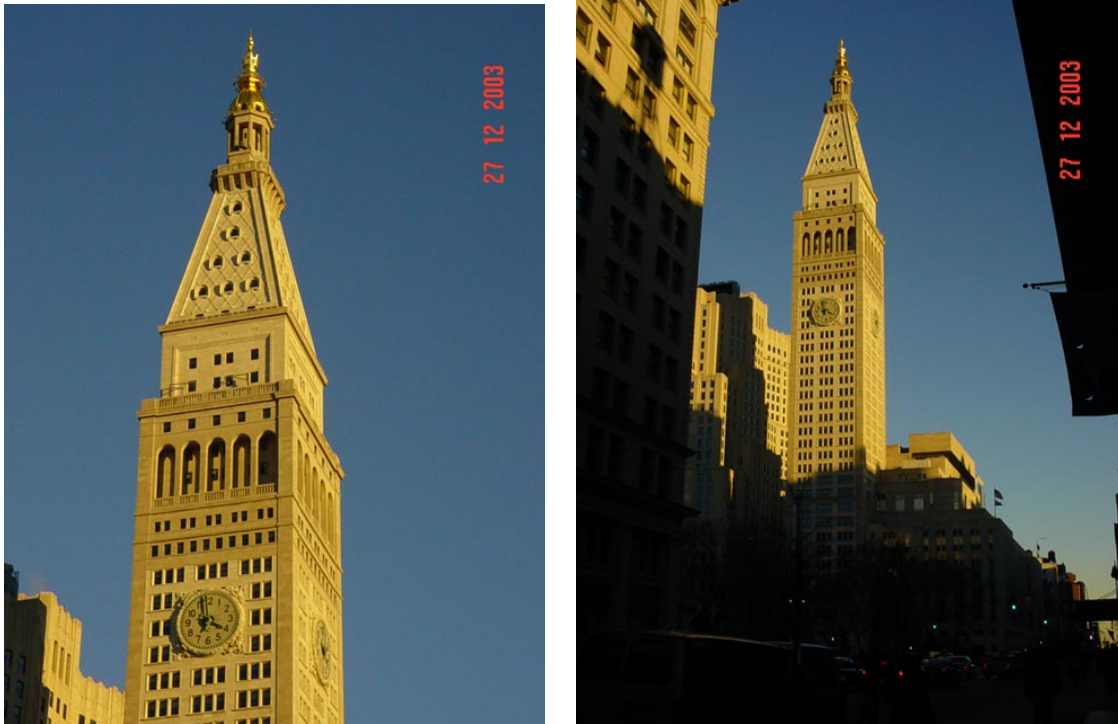


Figura 5.14 - Edifício em Nova York

Fonte: Foto de David Prado Machado, 2003.

Outro aspecto muito difundido nos dias atuais é a questão da sustentabilidade, como premissa de um bom projeto, dentro do conceito de preservação dos recursos naturais. Esta questão vem direcionando de forma bastante acentuada a concepção dos novos edifícios.

O projeto do arquiteto Renzo Piano para *London Bridge Tower* será construído com aplicação da sustentabilidade, com andares para o público providos de vistas da cidade de Londres. A torre estará ligada ao sistema de transporte com várias conexões para pedestres das áreas residenciais do sul e norte da cidade de Londres (FIG. 5.14). O projeto prevê uma grande praça, revitalizando as áreas de *St. Thomas* e *Joiner Streets* ao redor da *London Bridge* e também todas as ruas próximas ao rio, com parques incorporando um espaço de arte tecnológica e simbólica.

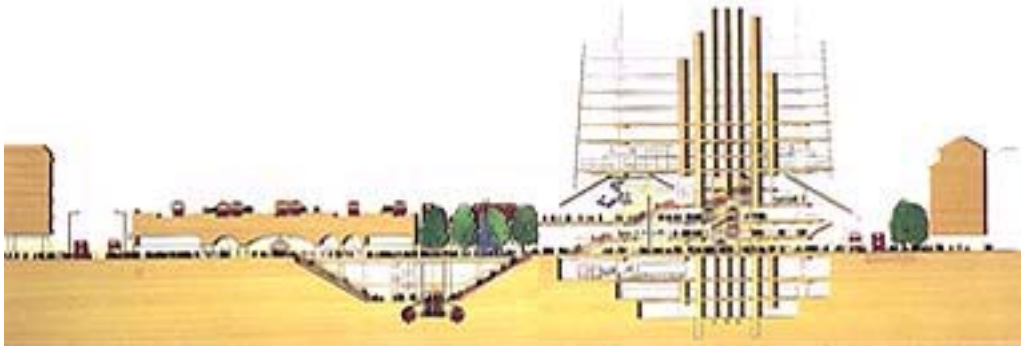


Figura 5.15 - London Bridge Tower

Fonte:bouwerwonen, 2004

5.2 Diretrizes e parâmetros relevantes para projeto de torres

Os primeiros estudos realizados para um projeto de torres podem partir de qualquer tipo de concepção. A pesquisa de modelos já existentes, construídos ao longo da história, pode levar a um partido semelhante ou uma releitura, sempre adaptando às novas tecnologias, às novas necessidades e aos novos valores estéticos (FIG 5.15). A inspiração pode vir da natureza através das formas, proporções, conteúdo simbólico, etc. Outra forma de iniciar um processo criativo pode vir a partir de necessidades técnicas ou de atendimento de determinadas solicitações. Para isto, então, o desenho e a construção de torres devem levar em consideração vários aspectos técnicos, construtivos, funcionais e estruturais.

Para desenhos de torres é necessário que haja acesso ao topo, seja para manutenção

ou para instalação de equipamentos. Este acesso normalmente é feito por escada, contendo patamares de descanso e plataformas de manutenção (FIG 5.16 e 5.17).

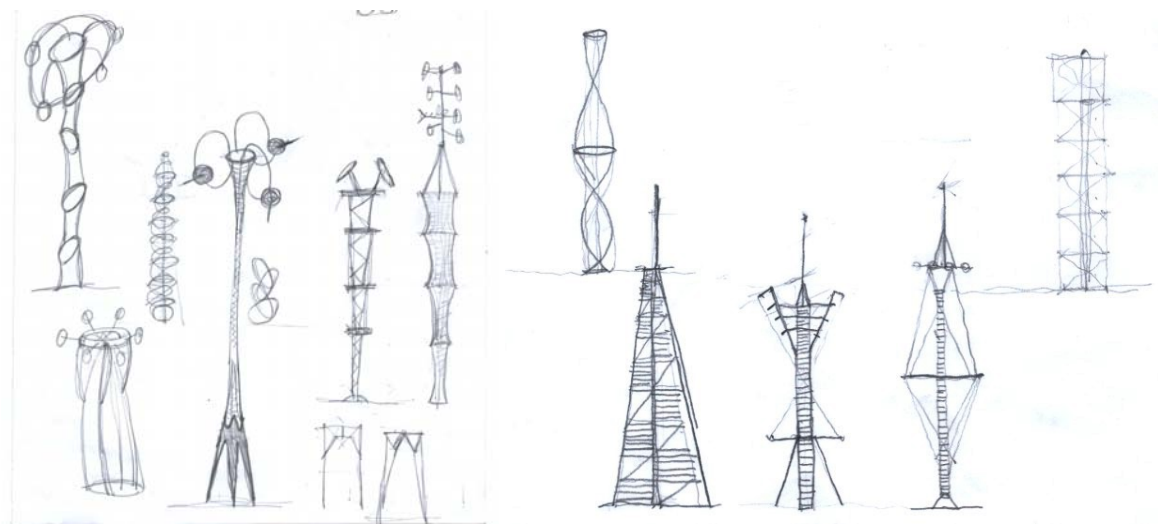


Figura 5.16 - Desenhos esquemáticos

Fonte: Desenhos de Castanheira, 2004

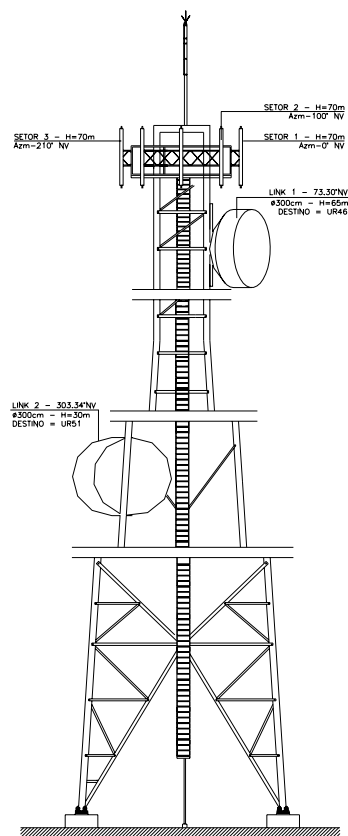


Figura 5.17 - Elevação torre

Fonte: TIM, 2003

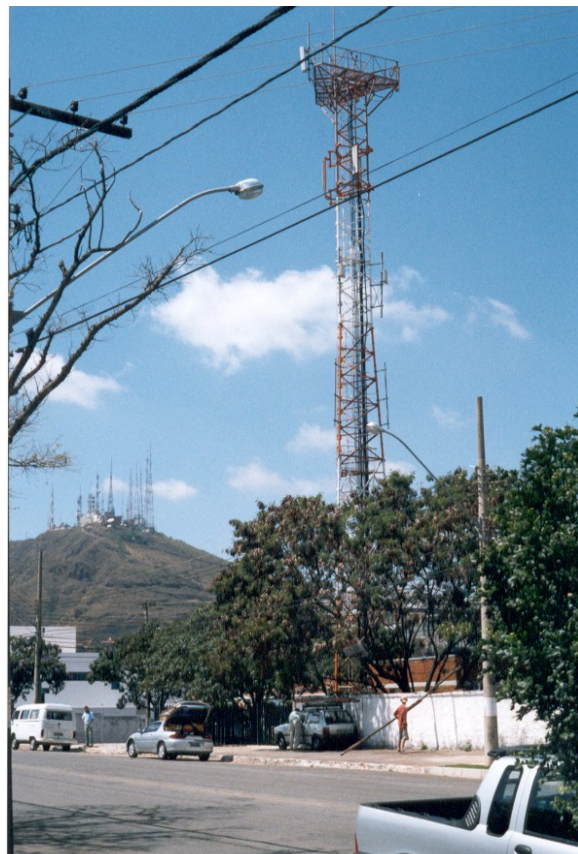


Figura 5.18 - Torre em Belo Horizonte

Fonte: Foto de Castanheira, 2004

Outros itens devem ser considerados, como a necessidade de galvanização das

peças, o que acarreta a necessidade de uma modulação de dimensões que possibilite este processo. Quanto ao local de sua instalação, devem ser considerados a necessidade de construção de fundações, locais para instalação de equipamentos na base e entrada de energia elétrica e aterramento, além de todo o espaço necessário por legislação ou necessidade de circulação ao redor da torre (FIG.5.18 e 5.19).



Figura 5.19 - Etapas de implantação de uma torre

Fonte: TIM, 2004.

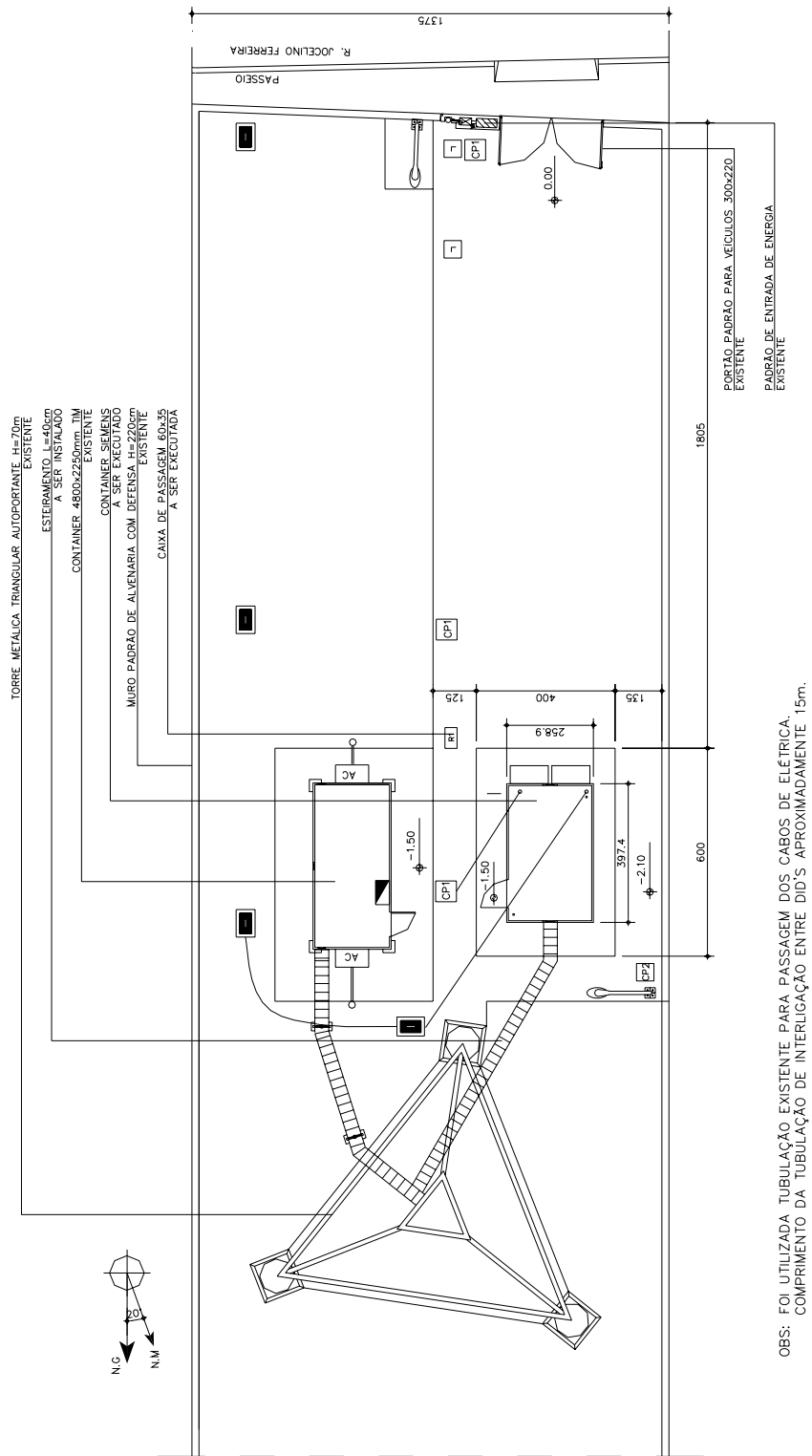


Figura 5.20 - Planta de implantação de torre

Fonte: TIM, 2004.

Em seguida, a partir da definição dos perfis utilizados, novos parâmetros vão se delineando em função da estrutura/estética. Normalmente as torres são construídas com chapas de perfis leves dobrados à frio (FIG 5.20) em sistemas treliçados ou tubulares.

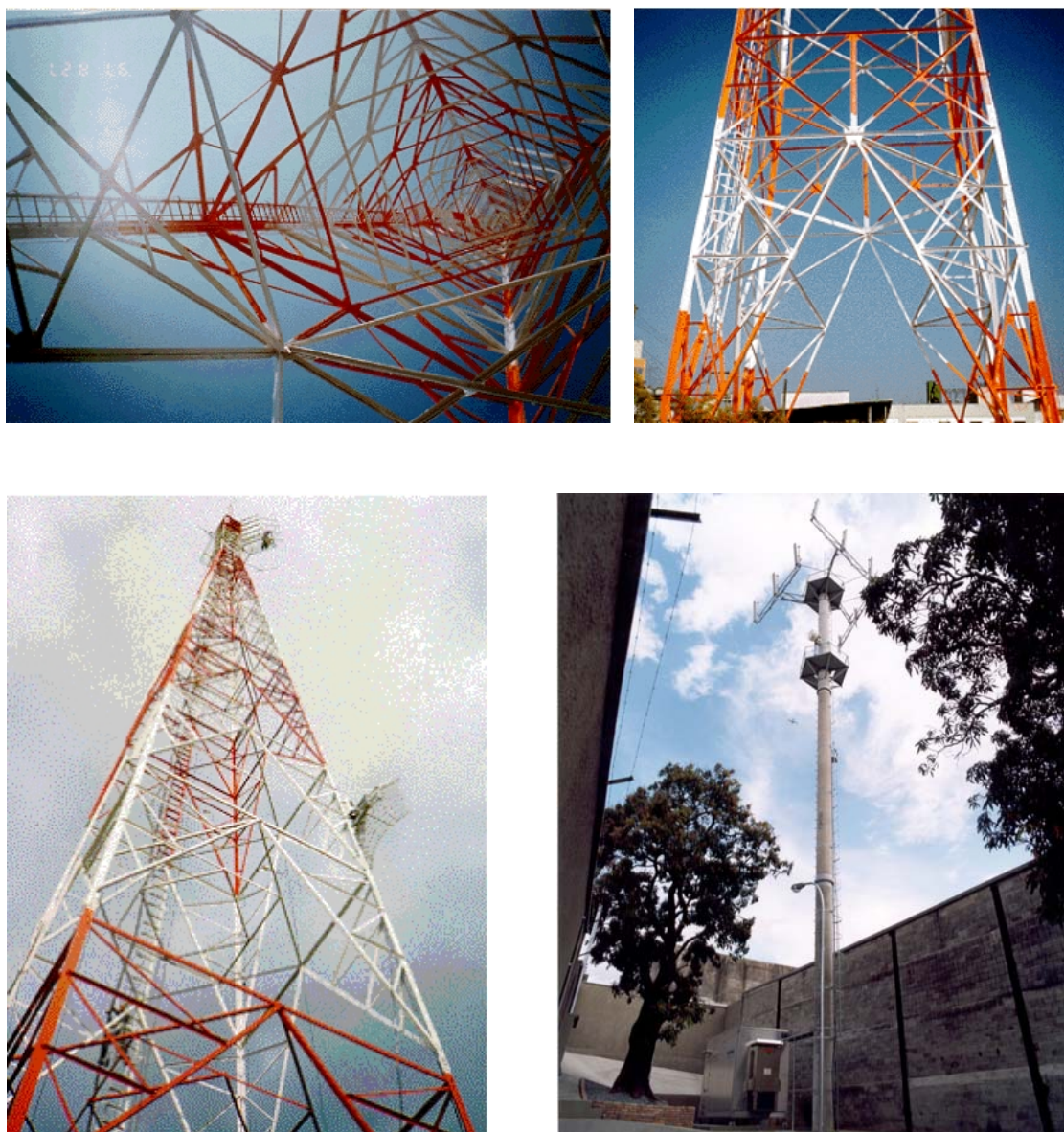


Figura 5.21 - Torres metálicas

Fonte: TIM , 2004.

Alguns elementos necessários na elaboração dos projetos de torres podem receber mais de uma função: técnica/funcional e estrutural. A descida do cabeamento do alto das torres pelo *Shafit*, como a própria escada, pode funcionar como um núcleo de estabilização vertical (FIG 5.21).

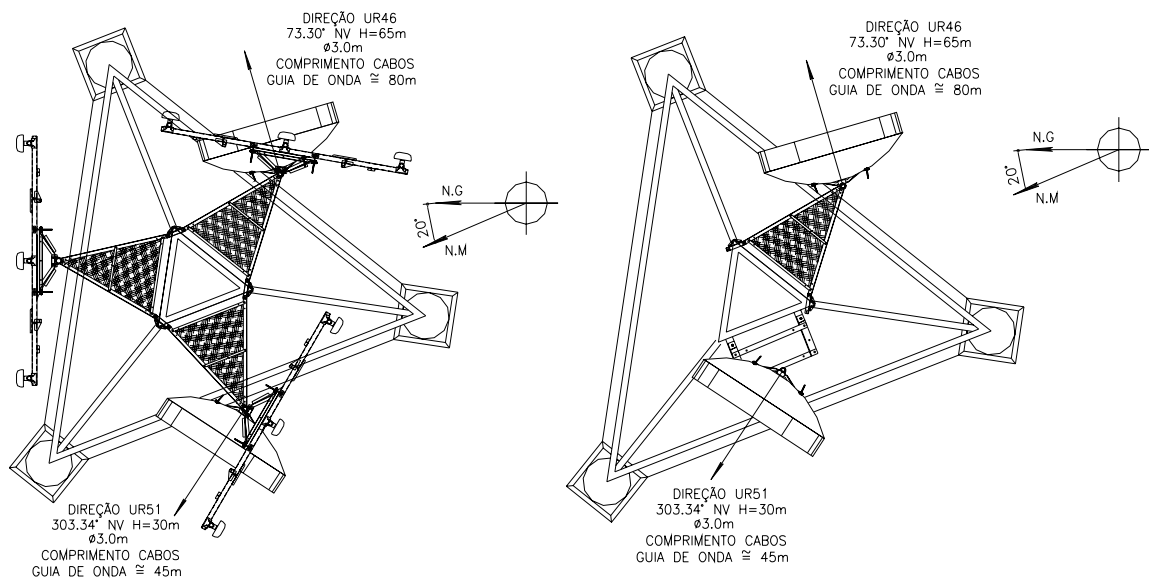


Figura 5.22 - Desenho de Plataformas de descanso

Fonte: TIM, 2004

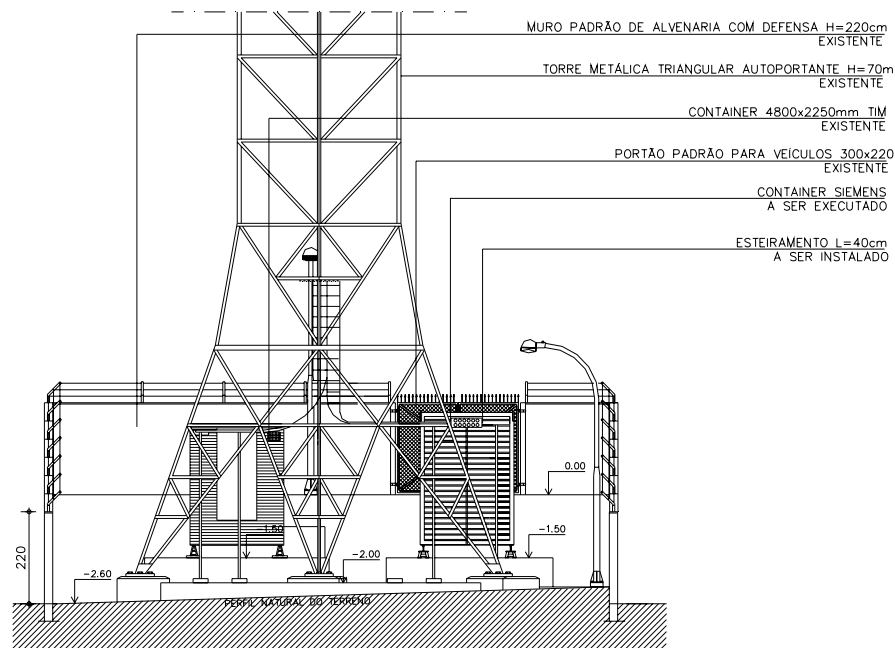


Figura 5.23 - Desenho de Plataformas de descanso

Fonte: TIM, 2004

A estabilização vertical pode ser feita por diversas outras formas diferentes das convencionais de contraventamento, como por exemplo, utilização dos *outrigger*, que deverão ser utilizados em função da altura das torres e das condições de vento (FIG 5. 22).



Figura 5.24 - Exemplos de torres com *outrigger*

Fonte:metálica, 2004.

As características e as propriedades dos perfis metálicos a serem utilizados na elaboração de projetos para torres, utilizando seções fechadas, sejam circulares, quadradas ou retangulares, já irão caracterizar a solução técnica a ser adotada.

5.3 Torres em perfis tubulares

Os perfis metálicos tubulares possuem um comportamento favorável à compressão e a cargas de torção ou esforços de tensão multi-axial. Estes perfis também apresentam menor superfície para combate a incêndio e ou pintura. Sua distribuição uniforme de massa em torno do seu centro gera baixo nível de tensões residuais. O uso de seções tubulares estruturais ajuda a reduzir o peso próprio da estrutura.

Para alcançar êxito em um projeto de torres, em perfis tubulares, tem-se de aliar também outros conceitos básicos, como a visão arquitetônica, a solução estrutural, o método construtivo e o processo de industrialização dos elementos construtivos. Outro aspecto importante a ser considerado é o dimensionamento dos elementos componentes para que possa existir o compartilhamento de diversas empresas de telefonia, televisão e rádio na mesma torre. As peças devem ser moduladas porque é necessária a galvanização e sua montagem, muitas vezes, ocorre em locais de difícil acesso (FIG 5.23). As torres também devem estar preparadas para possíveis alterações, quanto ao tipo de antenas que irão receber, em função do desenvolvimento de novas tecnologias e o direcionamento dos sinais em relação ao norte magnético (FIG 5.24).

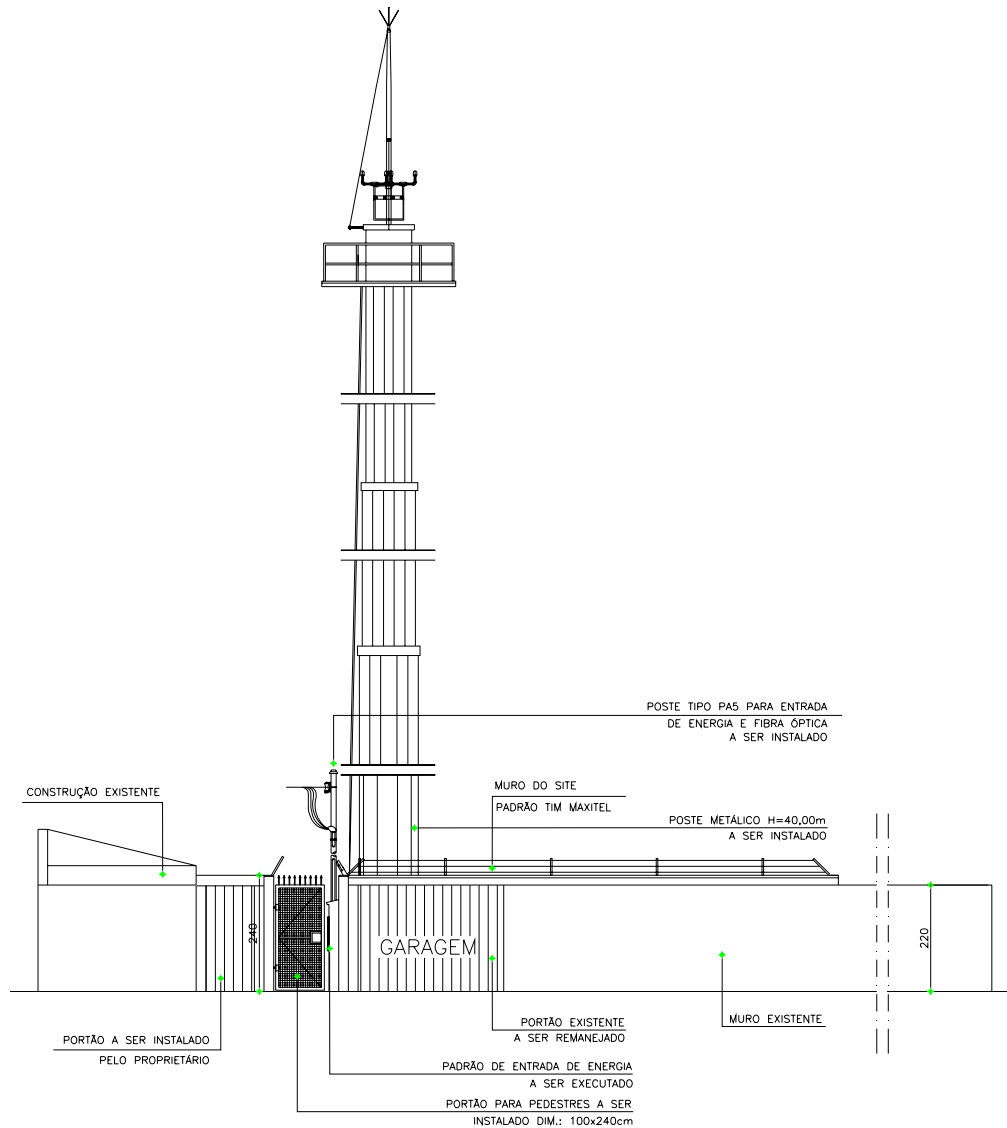


Figura 5.25 - Elevação de torre

Fonte: TIM, 2004

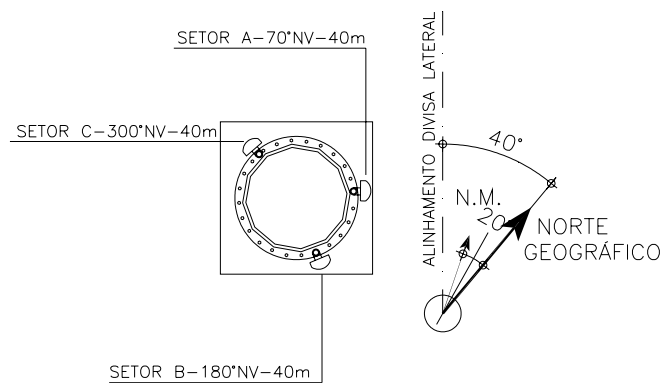


Figura 5.26 - Planta de locação das antenas na torre

Fonte: TIM, 2004

O acesso à manutenção e a instalação das diversas antenas deve ser fácil, possibilitando o direcionamento correto das antenas e fixação segura. Isto demanda um detalhamento específico dos encaixes e ligações (FIG. 5.25).



Figura 5.27 - Detalhes e ligações

Fonte: TIM, 2004

5.4 Parâmetros dimensionais relevantes

De acordo como o conceito da teoria de semelhança, tem-se que os parâmetros adimensionais relevantes devem ter os mesmos valores no modelo e no protótipo. Geralmente as condições de semelhança incluem a semelhança geométrica, a semelhança cinemática e a semelhança dinâmica. Considerando o problema de interação vento e estrutura da torre os parâmetros mais relevantes são a força e a velocidade do vento, as propriedades termofísicas do ar como massa específica e viscosidade, uma dimensão característica da estrutura da torre, o módulo de elasticidade e a massa específica do material a ser utilizado na estrutura da torre.

Assim, a partir dos números π obtidos e com o atendimento da condição de semelhança, geram-se os fatores de escala que possibilitam prever o comportamento estrutural da torre-protótipo. É de se esperar que num modelo para o qual os parâmetros estruturais relevantes estejam bem equacionados, o mesmo se verifique no modelo real semelhante. Assim, se o modelo-referência foi bem projetado, seja em termos de concepção estrutural ou arquitetônica, inclusive quanto aos aspectos estéticos/formais, haverá repetição do mesmo comportamento para o modelo real.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões finais

No momento presente a arquitetura, como atividade isolada, está morta. A arquitetura só subsiste quando integrada ao planejamento urbano no sentido mais amplo do termo, que compreende as mais diversas atividades. Só se pode entender a grande arquitetura de hoje em função de seu papel, integrado à paisagem, no todo urbano.

A complexidade é juntar o certo e o incerto lógico e o contraditório, e é a inclusão do observador na observação. A arquitetura contemporânea hesita entre a concepção de um projeto individual, que lança o nome do arquiteto a um primeiro plano absoluto, e o projeto de equipe, referindo a uma empresa, no qual o nome do principal responsável, por uma determinada realização, fica às vezes eclipsado. Outro aspecto é com relação ao processo da construção que não deve causar dúvidas quanto à sua finalidade. Muitas vezes o desejo de renunciar às concessões maiores, à fantasia e à liberdade de formas vêm de encontro a concretizar um monumento de extrema simplicidade, evocando a pureza geométrica.

Em um projeto de torre em perfis metálicos tubulares, tem-se de aliar os conceitos básicos como a visão arquitetônica, o aspecto simbólico, o aspecto funcional com a solução estrutural. Acredita-se que o compartilhamento nas torres, pelas diversas operadoras de telefonia, rádio e TV, em um projeto modulado e esteticamente mais elaborado, possa minimizar o seu impacto na paisagem urbana e/ou rural e diminuir o número de torres, tanto na paisagem urbana quanto na rural. Desse modo as torres possam ser implantadas com menos agressividade, fazendo-se valer da legislação existente e da preservação da imagem dos ambientes.

O conceito da teoria da semelhança se constitui num procedimento para que se determinem qualitativamente os parâmetros mais relevantes no dimensionamento de uma torre. Estas condições de semelhança devem observar a semelhança geométrica, a semelhança cinemática e a semelhança dinâmica. Quando não é viável respeitar todas as

condições de semelhança física, pode-se atender de modo rigoroso às que tem maior importância no fenômeno considerado. Neste caso, diz-se que existe semelhança física incompleta ou relaxada.

Para o problema associado à interação entre o vento e a estrutura, estudado neste trabalho, foram gerados segundo a teoria da semelhança os seguintes fatores de escala:

$$K_{Ls} = K_{Vv}^2 \text{ ou } K_{Vv} = \sqrt{K_{Ls}}$$

$$K_f = K_{Ls}^3$$

$$K_E = K_{Ls}$$

$$K_m = K_{Ls}^2$$

$$K_{\mu_{ar}} = K_{Ls}^{\frac{3}{2}}$$

Os fatores de escala obtidos garantem uma semelhança completa entre o modelo e o protótipo quando utilizados.

No entanto, na realidade esta semelhança completa quase nunca é atendida. Neste caso fala-se em semelhança incompleta ou modelos distorcidos.

Acredita-se que os parâmetros mais relevantes, para o projeto de uma torre, aqui mostrados por meio de uma avaliação qualitativa com o uso da teoria da semelhança, são a força e a velocidade do vento, as propriedades termofísicas do ar como massa específica e viscosidade, uma dimensão característica da estrutura da torre, o módulo de elasticidade e a massa específica do material a ser utilizado na estrutura da torre.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudo de inserção das torres metálicas, para a transmissão de sinais, nas paisagens urbana e rural;
- Desenvolvimento de projetos de torres metálicas mais compatíveis aos patrimônios artísticos e naturais;

- Estudo da viabilidade de compartilhamento de diversos serviços e diversas empresas num mesmo projeto de torre.

- Análise e dimensionamento de torres via simulação computacional, para uma avaliação global dos parâmetros relevantes;

- Desenvolvimento de um protótipo de torre em perfis metálicos tubulares, para a aplicação e validação da teoria da semelhança;

- Estudo de viabilidade de padronização de projeto e desenho de torres, em perfis metálicos, visando a minimização de custos e montagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros e catálogos

AÇOMINAS, **Edifícios de andares Múltiplos Coletânea Técnica do uso do aço.** Volume I, 1982. Editado pelo Aço Minas Gerais S. A, Belo Horizonte.

A Arquitetura na História em Quadrinhos. Martins Fontes Editora Ltda.120 p. 1985.

ALVES, N.K.C.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, c. Behavior of transmission lines submitted to wind load. In XXIV IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTACIONAL METHODS IN ENGINEERING. **Anais do CILAMCE2003**, Ouro Preto – MG, p. 1-10, 2003.

AMARAL, Otávio Campos do. **Estruturas isostáticas.** Belo Horizonte, 1974 – Edição do autor.

ARAUJO, Rogério. **Torre de Pizza, Itália, 1984.**1984.1 fotografia, p&b, 9x15cm.

BADDOO MA, Nancy; BURGAN, Rana; OGDEN, Raymond. **Architects' Guide to Stainless Steel – The steel construction institute.** BerKshire SCI PUBLICATION 179, 1997, 201p. ISBN 1 859420494

BIMETAL, **Solução em torres de energia e telecomunicações.** Catálogo da empresa, 2002

BLANC, Alan; MC EVOY, Michael; PLANK, Roger. **Architecture and Construction in Steel Londres, 1993**

BOHIGAS, Oriol; BUCCHANAN, Peter; LAMPUGNANI, Vittorio Magnago. **Barcelona- Arquitectura y cidade.** 1980-1992 GG Gustavo Gili.SA. 1991 ISBN 84-252-1454-8

Brasil, Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Regulamento. Brasília, Diário Oficial da União, agosto de 2003.

BROTO, Carles. **Nuevo paisajismo urbano.** Barcelona, 2000, Publisher: Arian Mostaedi. Páginas 11 a 17, 177 p. ISBN 84-95275 78-3

CARNEIRO, Fernando Lobo. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.** 2ª edição Editora UFRJ, 1996. 256p. ISBN – 857108.077.1

CHAVES, J.B. **Catálogo de exposição. 5 Artistas Mineiros** , Belo Horizonte , 1997.

CORBIOLI, Nanci – **Lisboa, onde o presente e o passado se encontram.** **Revista Espaço D.** Ano 4, nº4, p. 96 - 115

CURTO, Paolo de - **Farol de Alexandria, Enigma desvendado.** **Revista Geográfica Universal.** Julho de 1980, Bloch editores. p. 54 - 61. **Revista Geográfica Universal nº68.** Julho 1980, p 54 a 61 – Editora Bloch Ltda.

DIAS, Luís Andrade de Mattos - **Estruturas de aço, conceitos técnicas e linguagem.** São Paulo, Zigurate Editora, 160 p. ISBN 85-85570-02-4

EEKHOUT, Mick . **Tubular structures in Architecture** Genebra, Editado por CIDECT, 127p. ISBN 9075095260.

FLETCHER, Sir Banister. **A History of Architecture on the Comparative Method.** London: B. T. Batsford LTD. 1950. 1033 p.

FRIEDMANN, P.P. Aeroelastic scaling for rotary-wing aircraft with applications. **Journal of Fluids and Structures.** V. 19, p. 635-650, 2004.

GLANCEY, Jonathan. **A História da Arquitetura.** São Paulo, Editora PUC Rio, 2001 Edições Loyola ISBN- 85-15-02283-4 Dorling Kindersley limited, London, 2000, 240 p. ISBN-07513082102

GORGOLEWSKI, Mark. **The Role of Steel in Environmentally Responsible Buildings.**Berkshire, SCI Publication 174, 1999, 45 p.

Guia para Normalização de referências: NBR 6023:2002, UFES, Biblioteca Central 2004, ISBN 85-87106-31-7

HAECKEL Ernest Heinrich. **Arquivos de desenhos de formas artísticas da natureza –** Ediouro

HART, F. Henn; SONTAG, W, H. **El atlas de la construction metalica.** Barcelona, GG Gustavo Gili S.A., 1976, 371p.

HELFENSTEIN, Heinrich. **Ponte de Alamillo,** Sevilha, Espanha, 1992.1992 Postal.

HOLDEN, Robert. **Diseño del espacio público internacional.** Barcelona, GG Gustavo Gili S. A. 1996, 199 p. ISBN 84252-1703-2.

HERVÉ, Lucien. **Torre Eiffel,** Paris, França, 1945 .Postal.

Historia das Artes Tomo 1 , Brasil 1978, 300p. Salvat, ISBN 84-401-000-4

JENCKS, Charles. **Nuevos Caminos de la Arquitectura – Arquitectura 2000: Predicciones y Metodos.** Barcelona, Editorial Blume, 1978. ISBN 84-7031-231-6

JODIDIO, Philip. **Santiago Calatrava**. Barcelona, Taschen, 2001 ISBN 3-8228-5614-2

KUROKAWA, Kisho. **New Wave Japanese Architecture**. Inglaterra, Academy Editions, Ernst & Sohn, 1993, 300 p.

KÜHL, Beatriz Mugayar. **Arquitetura do ferro e Arquitetura ferroviária em São Paulo – Reflexões sobre a sua realização**. São Paulo, Ateliê Editorial, 1998, 436 p.

LANGHAAR, Henry L. **Dimensional Analysis and Theory of Models**. New York, Ed. John Wiley & Sons. Inc, 1951.

LYALL, Sutherland. **Máster of structure: Engineering today's innovative buildings**. Londres, Laurence King Publishing, 2002.223p. ISBN 1856692817

MACHADO, David Prado. **Edifício Nova York 2003, EUA**. 2003 1 foto p&b 9x12.

MOTTA, M Victor Freire. **Curso de Teoria da semelhança**. Porto Alegre, Edições URGs:Universidade Federal do Rio Grande do Sul,1972,154 p.

NOVAIS, Wanderlene Urbana. **Análise de Estruturas de Torres Metálicas Elevadas sob Carga Lateral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Construções Metálicas) Programa de Pós Graduação Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto,1998.

QUEIROZ, Gilson. **Elementos das estruturas de aço**. Imprensa Universitária, Belo Horizonte, MG, 1986. ISBN 85-85088-01-X

REBELLO, Yopanam Conrado Pereira. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo, Zigurate Editora, 2000, 271 p. ISBN 85-85570-03-2

Revista Iluminação Brasil nº27. Marcos Iluminados na Paisagem Noturna. Março/abril 1991, p. 4 a 14 - Editora Iluminação Brasil S/C Ltda.

Revista Projeto Design nº255. Simetria e Composição Radial Definem Projeto de Imagem Corporativa. Maio 2001, p. 73,74 e 75.

Revista Projeto Design nº286. Com revestimento metálico nas fachadas, conjunto ganha perfil *high-tech*. Dezembro 2003, p. 42 a 47.

Revista VEJA. Fevereiro de 1996. p.56 e57.

Revista Viagem e Turismo. Novembro de 2002

REZAEPAZHAND, J.; SIMITSES, g. J. Structural similitude for vibration response of laminated cylindrical shells with double curvature. **Composite Structures**. p. 195-200, 1996.

RIBEIRO, Luiz Fernando Loureiro. **Utilização de “Outrigger” em Edifícios Altos** - Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós Graduação Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1990. 126p.

ROBBIN, Tony **Engineering a New Architecture**. London; Yale University Press, 1996. 198 p.

SALOMAN, Dêlcio Vieira. **Como Fazer Uma Monografia**. Martins fontes, São Paulo, 1990.

SILVA, Daiçon Maciel da; SOUTO, Andre Kraemer. **Estruturas, uma Abordagem Arquitetônica**. Porto Alegre, Editora Sagra Luzzato – 2ª edição, 2000. 154p. ISBN 85-241-0562-3

SIMITSES, George J. Strucutural similitude for flat laminated surfaces. **Composite Structures**. V. 51, p. 191-194, 2001.

TARANATH, Bungale S.; **Structural Analysis and Design of Tall Buildings**. –Nova York, Hill international Editions – Civil engineering series, 1988.739p. ISBN – 0- 07-100350-9

TIM Operadora de telefonia movel, Cadernos de detalhes padrão da operadora, 2003.

TROITSKY, M.S. **Cable-Stayed Bridges**. Oxford, Second Edition, BSP Professional Books, 1988.

TZONIS, Alexander. **The poetics of movement Santiago Calatrava**. Nova York, Universe publishing, 1999.239p. ISBN 0-7893-0360-4

UNGBHAKORN, V.; SINGHATANADGID, P. **Similitude and Physical Modeling for Buckling and Vibration of Symmetric Cross-ply Laminated Circular Cylindrical Shells**. Journal of Composite Materials. V. 37, n. 19, p. 1697-1712, 2003.

VILLELE, JoãoBaptista. **Boletim UFMG – Cultura de aparências? Não obrigado**. p. 2. nov/2002.

VIVAS, Peres. **Escultura de Joan Miro 1973. Barcelona, Espanha. 1973**. Postal.

SME -Sociedade Mineira de Engenheiros. **V seminário Tecnológico. Torres de Telecomunicações impactos visuais, ambientais e na saúde**. 12 de dezembro de 2002 – Realização: Comissão técnica de telecomunicações e.

WOLF, José. **Revista Mais Arquitetura. À procura da cidade possível**. P. 08 e 09 outubro de 2003.

WU, Jia-Jang; CARTMELL, M.P.; WHITTAKER, A.R. **Prediction of the vibration characteristics of a full-size structure from those of a scale model.** *Computers & Structures*. V. 80, p. 1461-1472, 2002.

Endereços relacionados (www)

renewny -Arquitetura.

Disponível em <www.renewny.org> Acesso em 9 de mar.e 2003

vitruvius -Arquitetura.

Disponível em <www.vitruvius.com.Br > Acesso em 7 de set. de 2004.

Great building- Edifícios altos.

Disponível em <www.Great building.com/buidings/Watts_Towers.html> Acesso em 13 de set. de 2003.

Dinâmica- Estrutura metálica.

Disponível em <www.metálica.com.Br/pgdinamica/bin/pg.dinamicaphp?id> Acesso em 9 de fev.2004.

Wriegels- Estrutura metálica.

Disponível em <www.wriegels.net/tuerme/hoch.phtml> Acesso em 24 de out. de 2003.

Great building -Jogos Olímpicos.

Disponível em <www.Great building.com/buidings/Olympic Games Tend.html> Acesso em 13 de set. de 2003.

Anatel- Normas da Anatel.

Disponível em <www.anatel .com.Br> Acesso em 15 de abr. 2004.

bimetal -Produtos BIMETAL.

Disponível em <www.bimetal.eng.br> Acesso em 24 de out. de 2003.

berlinfernsehturm -Torres de Berlim.

Disponível em <www.berlinfernsehturm.de/engl/oshome-e.html> Acesso em 9 de mar.e 2003.

Bouwerwonen- Torre em Londres.

Disponível em <www.bouwerwonen.net/architectuur/special/bridgtower> Acesso em 13 de set. de 2004.

kiat - Torre na Malásia.

Disponível em <www.kiat.net/malaysia/kl/kltower.html> Acesso em 13 de set. de 2003.

macautourism - Torre de Macau.

Disponível em <www.macautourism.gov.mo> Acesso em 13 de set. de 2003.

members - Torres metálicas.

Disponível em <www.members.iinet.net.au/~paulkoh/tall.htm> Acesso em 13 de set. de 2003.

menarakl - Torre de Menara.

Disponível em <www.menarakl.com.my/> Acesso em 9 de mar.e 2003.

.

terra.-Torre de Babel

. Disponível em <<http://www.terra.com.br/voltaire/artigos/babel.htm-18k>> Acesso em 9 de mar.e 2003.

tour-eiffel -Torre Eiffel.

Disponível em <www.tour-eiffel.fr/>Acesso em 5 de jan. de 2003

warriortours -Torre de Shanghai.

Disponível em <[www.warriortours.com/cityguides/shanghai/tv tower.htm](http://www.warriortours.com/cityguides/shanghai/tv_tower.htm)> Acesso em 24 de out. de 2003.

ANEXOS

ANEXO I

Aplicação da Teoria da Semelhança para Outros Tipos de Problemas

A seguir são apresentados alguns tipos de problemas comuns de serem encontrados na engenharia, juntamente com os seus parâmetros que devem ser considerados para uma correta representação do problema em estudo.

Como já falado anteriormente, existem inúmeras aplicações da teoria da semelhança às mais variadas áreas da ciência. Nas referências (CARNEIRO, 1993, LANGHAAR, 1951, SIMITSES, 2001; FRIEDMAN, 2004; UNGBHAKORN E SINGHATANADGID, 2003; REZAEPAZHAND E SIMITSES, 1996; WU ET AL., 2002; ALVES ET AL., 2003) são encontradas várias aplicações da teoria da semelhança. Uma formulação completa do problema da geração de um modelo reduzido para uma ponte estaiada, incluindo os aspectos de construção do modelo e a questão do modelo distorcido, pode ser encontrada em TROITSKY,(1988). Os problemas a seguir são descritos a título de informação, a fim de que se tenha uma boa noção de como identificar os parâmetros que devem ser considerados na abordagem segundo a análise dimensional.

A.1 - Resistência das Estruturas

No problema de resistência das estruturas, em sua forma direta, a incógnita é o conjunto de forças aplicadas capazes de provocar sua ruína, ou o conjunto de forças a que o corpo pode resistir em condições normais de segurança. As forças são supostas proporcionais, podendo, portanto, ser o conjunto de forças representado por uma única força, escolhida como representativa.

Têm-se, assim, os seguintes parâmetros:

- Variável dependente
 - Força aplicada representativa F
- Variáveis independentes
 - Dimensão representativa ℓ
- Constantes físicas específicas
 - Tensão representativa (de ruptura ou de escoamento) σ_k
 - Peso específico. γ
- Fatores de forma
 - ℓ_i / ℓ ; a_i / ℓ

- Funções de forma
 - Os critérios da resistência
 - Equações definindo a geometria das partes curvas do corpo
- Constantes físicas adimensionais
 - Deformação específica de ruptura ou de escoamento
 - Coeficiente de *Poisson*.

As grandezas fundamentais da base são: L e F.

A.2 - Deformações dos Corpos.

A variável dependente será o deslocamento δ de um ponto do corpo, em uma dada direção. As forças aplicadas, representadas por F, serão dados do problema, isto é, variáveis independentes. Como, em geral, os deslocamentos são calculados na fase elástica, ou quase-elástica, do comportamento da estrutura, o material será caracterizado por seu módulo de elasticidade, E, em lugar da tensão característica σ_k , e por seu peso específico γ . As grandezas fundamentais são L e F.

A.3 - Vibrações Livres das Estruturas Elásticas.

No caso dos problemas dinâmicos da mecânica dos corpos deformáveis será necessário adotar a base LMT.

- Variável dependente
 - Um período natural de vibração T
- Variáveis independentes
 - Dimensão representativa ℓ
 - Amplitude inicial das vibrações δ_0
- Constantes físicas específicas
 - Massa específica ρ
 - Módulo de elasticidade E
 - Taxa de amortecimento (adimensional) ζ

- Fatores de forma
 - Fatores de forma geométricos

A.4 - Vibrações Forçadas

No caso de vibrações elásticas forçadas, o período T_0 e a amplitude F_0 da força excitadora periódica são dados do problema.

- Variável dependente.

Amplitude das vibrações forçadas	δ
----------------------------------	----------
- Variáveis independentes.

◦ Dimensão representativa	ℓ
◦ Período da força excitadora	T_0
◦ Amplitude da força excitadora	F_0
- Constantes físicas específicas.

◦ Massa específica	ρ
◦ Módulo de elasticidade	E
◦ Taxa de amortecimento (adimensional)	ζ
- Fatores de forma.
 - Fatores de forma geométricos

ANEXO II

Abordagem para obtenção dos números π .

Neste Anexo apresenta-se uma abordagem que serve para mostrar determinados conceitos que surgem quando da aplicação da análise dimensional, além de serem apresentados todos os passos que devem ser seguidos para a obtenção dos números π . Serve ainda para ilustrar que se deve prestar atenção nos parâmetros a serem considerados de acordo com o tipo de fenômeno que se deseja estudar. Os parâmetros usados nesta abordagem corresponderão essencialmente àqueles usados na abordagem que trata do fenômeno de interação fluido/estrutura. A diferença se deve à inclusão da variável dependente como sendo o deslocamento no topo da torre e considerando a força do vento como sendo uma variável independente.

Têm-se os seguintes parâmetros envolvidos:

- Parâmetros referentes ao vento
 - Força aplicada pelo vento na estrutura F
 - Velocidade básica do vento V
 - Densidade do ar ρ_{ar}
 - Viscosidade do ar μ_{ar}
- Parâmetros referentes à estrutura
 - Dimensão característica da estrutura L
 - Módulo de elasticidade da estrutura E
 - Massa por unidade de comprimento da estrutura m
- Dados adimensionais do problema
 - Ângulo de incidência do vento α
- Constantes físicas envolvidas
 - Aceleração da gravidade g

Estes parâmetros podem ser organizados como (CARNEIRO,1993): variável dependente, variáveis independentes (entre essas variáveis, têm-se: as grandezas determinantes, que podem ser adotadas como uma nova base, se for preciso e as grandezas diretrizes, entre elas a variável dependente, as constantes físicas específicas e as universais, os fatores de forma e as funções de forma).

Sendo assim, têm-se:

- Variável dependente

A variável é um deslocamento de controle da estrutura, δ . Pode-se adotar, alternativamente, a força aplicada pelo vento, F .

- Deslocamento no topo da estrutura

$$[\delta] = LM^0T^0 \quad (1)$$

- Variáveis independentes

- Força aplicada pelo vento na estrutura, F_v

$$[F_v] = LMT^{-2} \quad (2)$$

(se a variável dependente for δ , F_v não precisa ser considerada.)

- Velocidade básica do vento, V_v

$$[V_v] = LMT^{-1} \quad (3)$$

- Densidade do ar, ρ_{ar}

$$[\rho_{ar}] = L^3MT^0 \quad (4)$$

- Viscosidade do ar, μ_{ar}

$$[\mu] = L^{-1}MT^{-1} \quad (5)$$

- Dimensão característica da estrutura, L_c

$$[L_c] = LM^0T^0 \quad (6)$$

- Massa por unidade de comprimento da estrutura, m

$$[M] = L^{-1}MT^0 \quad (7)$$

- Constante física específica

- Módulo de elasticidade da estrutura, E

$$[E] = L^{-1}MT^{-2} \quad (8)$$

- Constante física universal:

- Aceleração da gravidade, g

$$[g] = LM^0T^{-2} \quad (9)$$

- Dado adimensional do problema

◦ Ângulo de incidência do vento (grandeza adimensional), α

- Vários fatores de forma

Tomando-se a dimensão característica da estrutura, L_c , como parâmetro característico, pode-se definir os seguintes fatores de forma:

◦ Razão entre a largura da base, B , e L_c . $\Rightarrow B/L_c$

◦ Razão entre a largura do topo, b e L_c . $\Rightarrow b/L_c$

◦ Razões entre os comprimentos dos módulos: h_1, h_2, \dots, h_n e L_c

$$h_1/L_c, h_2/L_c, \dots, h_n/L_c$$

◦ Razões entre os diâmetros dos tubos: D_1, D_2, \dots, D_n e L_c

$$D_1/L_c, D_2/L_c, \dots, D_n/L_c$$

Se a inclinação das pernas da torre for regida por uma função linear, $y = f(x)$, tem-se a seguinte função de forma:

$$\frac{y}{L_c} = \frac{f(x)}{L_c} \quad (10)$$

Na Tabela B.1 apresenta-se a matriz dimensional para o problema apresentado, que trata do fenômeno de interação fluido/estrutura.

Tabela B.1 – Matriz dimensional para o problema analisado.

	L	F _v	V _v	ρ _{ar}	μ _{ar}	m	E	g	δ
L	1	1	1	-3	-1	-1	-1	1	1
M	0	1	0	1	1	1	1	0	0
T	0	-2	-1	0	-1	0	-2	-2	0
Expoentes do número π	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	α ₈	α ₉

Escrevendo o número π como produtos de potência, envolvendo os parâmetros característicos do problema, tem-se:

$$\pi = L^{\alpha_1} \cdot F_v^{\alpha_2} \cdot V_v^{\alpha_3} \cdot \rho_{ar}^{\alpha_4} \cdot \mu_a^{\alpha_5} \cdot m^{\alpha_6} \cdot E^{\alpha_7} \cdot g^{\alpha_8} \cdot \delta^{\alpha_9} \quad (11)$$

A dimensão do número π é dada, escrevendo-se os parâmetros do problema em função das grandezas fundamentais:

$$[\pi] = (L^1 M^0 T^0)^{\alpha_1} \cdot (L^1 M^1 T^{-2})^{\alpha_2} \cdot (L^1 M^0 T^1)^{\alpha_3} \cdot (L^{-3} M^1 T^0)^{\alpha_4} \cdot (L^{-1} M^1 T^{-1})^{\alpha_5} \cdot (L^{-1} M^1 T^0)^{\alpha_6} \cdot (L^{-1} M^1 T^{-2})^{\alpha_7} \cdot (L^1 M^0 T^{-2})^{\alpha_8} \cdot (L^1 M^0 T^0)^{\alpha_9} \quad (12)$$

ou, ainda:

$$[\pi] = L^{\alpha_1} \cdot L^{\alpha_2} \cdot M^{\alpha_2} \cdot T^{-\alpha_2} \cdot L^{\alpha_3} \cdot M^{-\alpha_3} \cdot L^{-3\alpha_4} \cdot M^{\alpha_4} \cdot L^{-\alpha_5} \cdot M^{\alpha_5} \cdot T^{\alpha_5} \cdot L^{-\alpha_6} \cdot M^{\alpha_6} \cdot L^{-\alpha_7} \cdot M^{\alpha_7} \cdot T^{-2\alpha_7} \cdot L^{\alpha_8} \cdot T^{-2\alpha_8} \cdot L^{\alpha_9} = L^0 M^0 T^0 \quad (13)$$

já que o número π é adimensional.

Da igualdade anterior se estabelece um sistema de equações, equacionando-se os coeficientes obtidos para as grandezas fundamentais. Sendo assim, tem-se, para L:

$$L^{\alpha_1} \cdot L^{\alpha_2} \cdot L^{\alpha_3} \cdot L^{-3\alpha_4} \cdot L^{-\alpha_5} \cdot L^{-\alpha_6} \cdot L^{-\alpha_7} \cdot L^{-\alpha_8} \cdot L^{-\alpha_9} = L^0 \quad (14)$$

ou

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + -3\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_9 = 0 \quad (15)$$

Observe que está equação corresponde à soma dos coeficientes da primeira linha da matriz dimensional multiplicados pelos seus respectivos expoentes do número π . Portanto, o sistema de equações, envolvendo os expoentes do número π , pode ser obtido a partir da matriz dimensional do problema. A solução do sistema fornecerá os valores dos α_s , incógnitas do problema.

Escrevendo o sistema de equações a partir da matriz dimensional, tem-se:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + -3\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_9 = 0 \quad (16 a)$$

$$\alpha_2 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 = 0 \quad (16 \text{ b})$$

$$-2\alpha_2 - 3\alpha_3 - \alpha_5 - 2\alpha_7 - 2\alpha_8 = 0 \quad (16 \text{ c})$$

A quantidade de números π , necessários para descrever o problema, é dado por:

$$n_\pi = \text{número de parâmetros} - \text{posto da matriz dimensional}$$

O posto da matriz dimensional (ou da matriz associada ao sistema de equações homogêneas) é dado por:

$$A_\pi = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & -3 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 0 & -1 & 0 & -2 & -2 & 0 \end{vmatrix}$$

O posto da matriz é $A_\pi = P(n_\pi) = 3$, logo, $n_\pi = 9 - 3 = 6$. Portanto, tem-se seis números π , os quais são obtidos a partir da solução do sistema de equações acima. Sendo n (número de incógnitas = 9) maior que o número de equações (igual a 3), o sistema de equações é indeterminado. De acordo com a álgebra Linear, existem $(n-r)$ soluções linearmente independentes, onde r é o posto da matriz dimensional.

O procedimento geralmente adotado, para se obter um conjunto de soluções linearmente independentes, consiste em atribuir sucessivamente a cada incógnita excedente um valor arbitrário (geralmente, o valor unitário), fazendo ao mesmo tempo todas as demais incógnitas excedentes iguais a zero.

B.1 Geração dos seis números π

Adotando o procedimento acima, determinam-se as seis soluções que formam um conjunto linearmente independente, cada uma delas correspondendo a um número π .

- Primeiro número π : π_1
com $\alpha_9 = 1$; $\alpha_8 = \alpha_7 = \alpha_6 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$ e
de (16 b) $\rightarrow \alpha_2 = 0$

de (16 c) $\rightarrow -3\alpha_3 = 0 \rightarrow \alpha_3 = 0$

de (16 a) $\rightarrow \alpha_1 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = -1$

$\alpha_1 = -1 ; \alpha_2 = 0 ; \alpha_3 = 0 ; \alpha_9 = 1$

$\pi_1 = L^{-1} \cdot \delta^1 = \delta/L \therefore \boxed{\pi_1 = \delta/L}$

- Segundo número π : π_2

com $\alpha_8 = 1 ; \alpha_9 = \alpha_7 = \alpha_6 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$

de (16 b) $\rightarrow \alpha_2 = 0$

de (16 c) $\rightarrow -3\alpha_3 - 2 \times 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = -2/3$

de (16 a) $\rightarrow \alpha_1 = -2/3 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = -1/3$

$\alpha_1 = -1/3 ; \alpha_2 = 0 ; \alpha_3 = -2/3 ; \alpha_8 = 1$

$\pi_2 = L^{-1/3} \cdot V_v^{-2/3} \cdot g^1 = g / (L^{1/3} \cdot V_v^{2/3}) \therefore \boxed{\pi_2 = g / (L^{1/3} \cdot V_v^{2/3})}$

- Terceiro número π : π_3

com $\alpha_7 = 1 ; \alpha_9 = \alpha_8 = \alpha_6 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$

de (16 b) $\rightarrow \alpha_2 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -1$

de (16 c) $\rightarrow -2 \cdot (-1) - 3\alpha_3 - 2 = 0 \rightarrow \alpha_3 = 0$

de (16 a) $\rightarrow \alpha_1 - 1 - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 2$

$\alpha_1 = 2 ; \alpha_2 = -1 ; \alpha_3 = 0 ; \alpha_7 = 1$

$\pi_3 = L^2 \cdot F_v^{-1} \cdot E^1 = L^2 / (E \cdot F_v) \therefore \boxed{\pi_3 = L^2 / (E \cdot F_v)}$

- Quarto número π : π_4

com $\alpha_6 = 1 ; \alpha_9 = \alpha_8 = \alpha_7 = \alpha_5 = \alpha_4 = 0$

de (16 b) $\rightarrow \alpha_2 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -1$

de (16 c) $\rightarrow -2 \cdot (-1) - 3\alpha_3 = 0 \rightarrow \alpha_3 = 2/3$

de (16 a) $\rightarrow \alpha_1 - 1 + 2/3 - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 4/3$

$\alpha_1 = 4/3 ; \alpha_2 = -1 ; \alpha_3 = 2/3 ; \alpha_6 = 1$

$\pi_4 = L^{4/3} \cdot F_v^{-1} \cdot V_v^{2/3} \cdot m^1 \therefore \boxed{\pi_4 = m \cdot V_v^{2/3} \cdot L^{4/3} / F_v}$

- Quinto número π : π_5

com $\alpha_5 = 1 ; \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_8 = \alpha_9 = 0$

de (16 b) $\rightarrow \alpha_2 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -1$

$$\text{de (16 c)} \rightarrow -2 \cdot (-1) - 3\alpha_3 - 1 = 0 \rightarrow \alpha_3 = 1/3$$

$$\text{de (16 a)} \rightarrow \alpha_1 - 1 + 1/3 - 1 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 4/3$$

$$\alpha_1 = 4/3 ; \alpha_2 = -1 ; \alpha_3 = 1/3 ; \alpha_4 = 1$$

$$\pi_5 = L^{4/3} \cdot F_v^{-1} \cdot V_v^{1/3} \cdot \mu_a^1 \therefore \boxed{\pi_5 = L^{4/3} \cdot V_v^{1/3} \cdot \mu_a / F_v}$$

- Sexto número π : π_6

$$\text{com } \alpha_4 = 1 ; \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_8 = \alpha_9 = 0$$

$$\text{de (16 b)} \rightarrow \alpha_2 + 1 = 0 \rightarrow \alpha_2 = -1$$

$$\text{de (16 c)} \rightarrow -2 \cdot (-1) - 3\alpha_3 = 0 \rightarrow \alpha_3 = 2/3$$

$$\text{de (16 a)} \rightarrow \alpha_1 - 1 + 2/3 - 3 = 0 \rightarrow \alpha_1 = 10/3$$

$$\alpha_1 = 10/3 ; \alpha_2 = -1 ; \alpha_3 = 2/3 ; \alpha_4 = 1$$

$$\pi_6 = L^{10/3} \cdot F_v^{-1} \cdot V_v^{2/3} \cdot \rho_{ar}^1 \therefore \boxed{\pi_6 = L^{10/3} \cdot V_v^{2/3} \cdot \rho_{ar} / F_v}$$

Os números π obtidos podem ser manuseados de forma a se obter um conjunto de números π de utilização mais cômoda ou de sentido físico mais visível. Sejam $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ o primeiro conjunto dos números π obtidos. Um novo conjunto de números π pode ser obtido, substituindo um, ou vários, ou até todos eles, empregando-se qualquer operação abaixo.

i) $\pi_i^{\alpha_i}$

ii) $\pi_1^{\alpha_1} \cdot \pi_2^{\alpha_2} + \dots \pi_r^{\alpha_r}$

iii) $\pi_1^{\alpha_1} \cdot \pi_2^{\alpha_2} + \dots \pi_r^{\alpha_r}$

iv) $\pi_1 + \alpha_1$

v) $\pi_i \alpha_i$

Por exemplo, o número $\pi_6 = 1/\pi_6$ se torna semelhante ao coeficiente de arrasto.

$$\pi_6 = 1/\pi_6 = F_v / (\rho_{ar} \cdot L^{10/3} V_v^{2/3})$$

É importante notar que as r (sendo $r =$ posto da matriz dimensional) grandezas determinantes estão associadas à submatriz, de ordem igual ao posto da matriz (que em geral corresponde às grandezas fundamentais) que possui determinante diferente de zero.

Nesse caso, as $r = 3$ grandezas determinantes combinadas devem conter as dimensões L, M e T (as grandezas fundamentais).

Por exemplo, os parâmetros L, F_v e V_v podem ser as grandezas determinantes, já que a submatriz associada a essas grandezas resulta num determinante diferente de zero.

$$\begin{array}{ccc} & L & F_v & V_v \\ \left| \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 \end{array} \right| & = & -1 \neq 0 \end{array}$$

Em geral, há mais de um grupo de r parâmetros que podem ser escolhidos como grandezas determinantes. A condição é que o determinante da submatriz dimensional associada seja diferente de zero.

Assim, uma outra possibilidade para as grandezas determinantes seriam os parâmetros L, V_v e ρ_{ar}

$$\left| \begin{array}{ccc} 1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{array} \right| = 1$$

É reservado às r primeiras colunas da matriz dimensional para as grandezas determinantes e a última para a variável dependente.

Na obtenção dos números π , os valores arbitrários estabelecidos para as variáveis excedentes podem ser escolhidos de modo a resultarem números π com sentido físico mais viável.

Quando na obtenção dos números π não resultam relações entre os parâmetros que tenham algum significado físico, ou os números π obtidos devem ser manuseados para se obterem novos números π com sentido físico, ou por outro lado, o problema não está bem formulado.

No problema anteriormente formulado, o fenômeno físico a ser descrito seria o da

interação do fluxo de vento com a torre. Neste caso, o deslocamento não deveria figurar. A variável dependente seria, então, a força do vento.

No caso de se estudar o problema de deformação da estrutura, o deslocamento num dado ponto da estrutura seria a variável dependente e a força do vento seria um dado do problema.

No caso de se estudar o problema de vibração livre ou de vibração forçada da torre, novos parâmetros intervenientes no fenômeno devem ser determinados, como já visto.

ANEXO III

Resultados Iniciais

Os resultados apresentados, neste Anexo, se referem a resultados iniciais ou preliminares da aplicação da idéia descrita neste trabalho, constituindo-se, assim, numa exploração mais qualitativa, precisando evidentemente ser mais bem explorada. São apresentados vários gráficos obtidos segundo uma variação paramétrica envolvendo todos os números π .

Com os números π gerados, pode-se representar o número π que contém a variável dependente como uma função dos outros números π obtidos. No caso em estudo, tem-se o número π_1 como o número que contém a variável dependente, a força do vento. Sendo assim, pode representar o fenômeno físico na sua forma adimensional na seguinte expressão:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \text{fatores de forma}) \quad (1)$$

ou

$$\frac{F_v}{\rho_{ar} \cdot L_s^2 \cdot V_v^2} = f\left(\frac{L_s \cdot g}{V_v^2}, \frac{E}{\rho_{ar} \cdot V_v^2}, \frac{m}{\rho_{ar} \cdot L_s^2}, \frac{\mu_{ar}}{\rho_{ar} \cdot L_s^2 \cdot V_v}, \text{fatores de forma}\right) \quad (2)$$

A forma da função **f** pode ser determinada experimentalmente em ensaios de laboratório ou por meio de experimentos computacionais.

Nas figuras C.1 a C.20 são apresentados os gráficos de todas as combinações envolvendo todos os números π obtidos. Através desses gráficos pode-se verificar como é que cada número π está variando um com relação ao outro. O mais importante é verificar a variação de π_1 com os outros quatro números π . Essas variações se encontram nas figuras C.1 a C.4. Todos os outros gráficos seguem a mesma lógica de variação. A variação foi produzida a partir da variação do comprimento característico, mantendo-se a velocidade do vento constante.

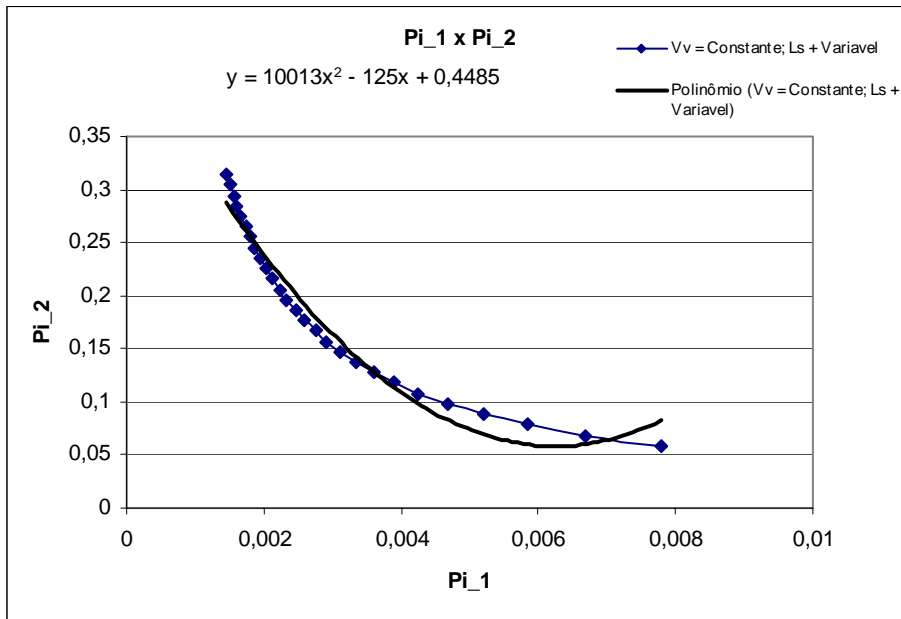


Figura C.1 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_2 (Nº de Froude).

Na Fig. C.1 mostra-se a relação entre o número π_1 , e o número π_2 , dados pelas equações (4.12a) e (4.12b). A curva é obtida mantendo-se a velocidade do ar constante e varia-se o comprimento característico. Observa-se que estes números π têm uma relação inversa. Isto ocorre por que o número π_2 é diretamente proporcional ao comprimento característico enquanto o número π_1 tem uma relação inversa com L_s .

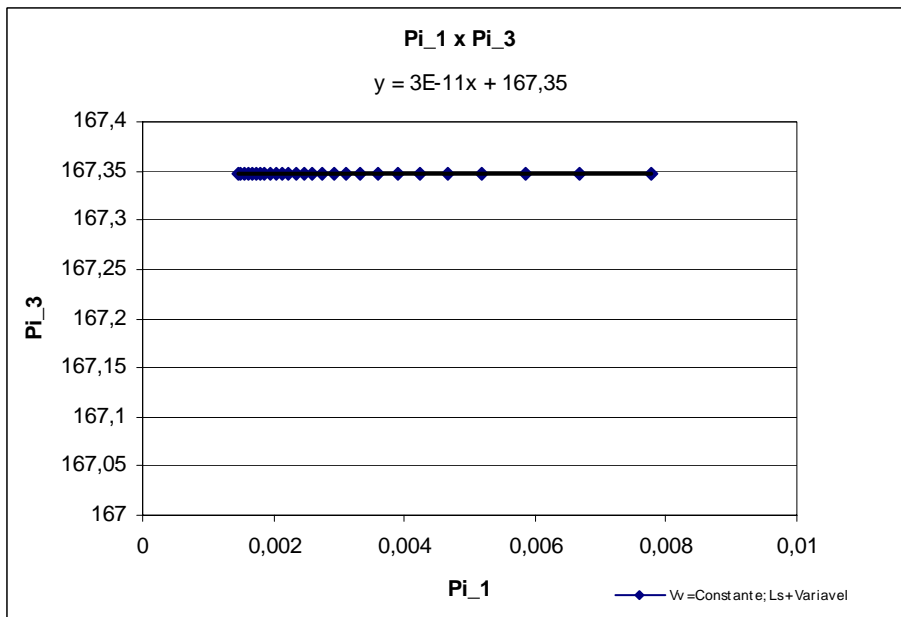


Figura C.2 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_3 (Semelhança Elástica) .

Nos gráficos mostrados nas Figs. C.2 a C. 9 utiliza-se o mesmo princípio, ou seja, mantém a velocidade do ar constante e varia-se o comprimento característico L_s . O número π_3 é independente de L_s , conforme eq. (4.12c), Fig. C.2. Já o número π_4 varia inversamente com L_s tendo uma variação direta com π_1 , Fig. C.3. De modo similar tem-se a relação entre π_1 e π_5 , Fig. C.4.

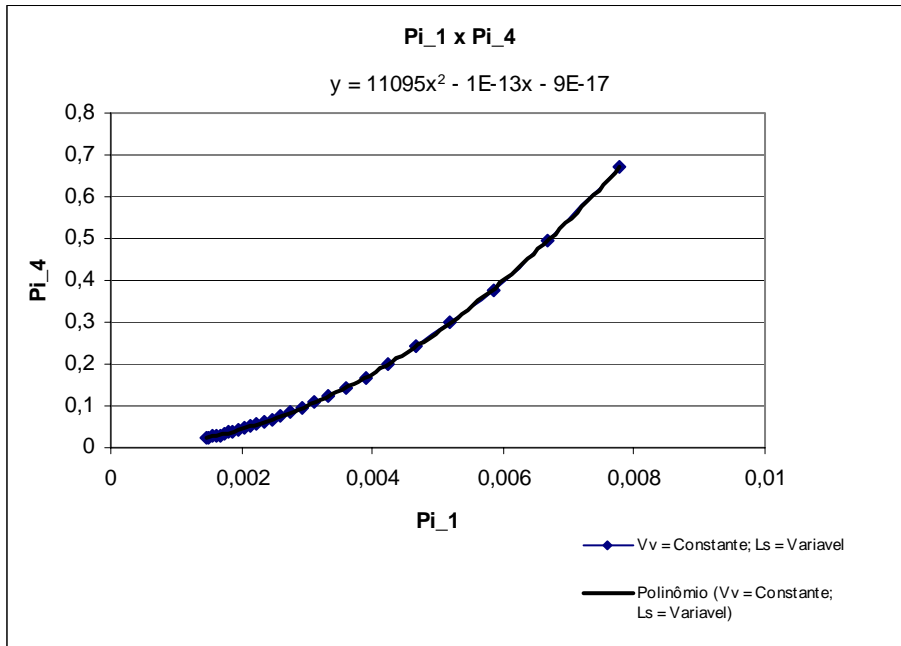


Figura C.3 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido) .

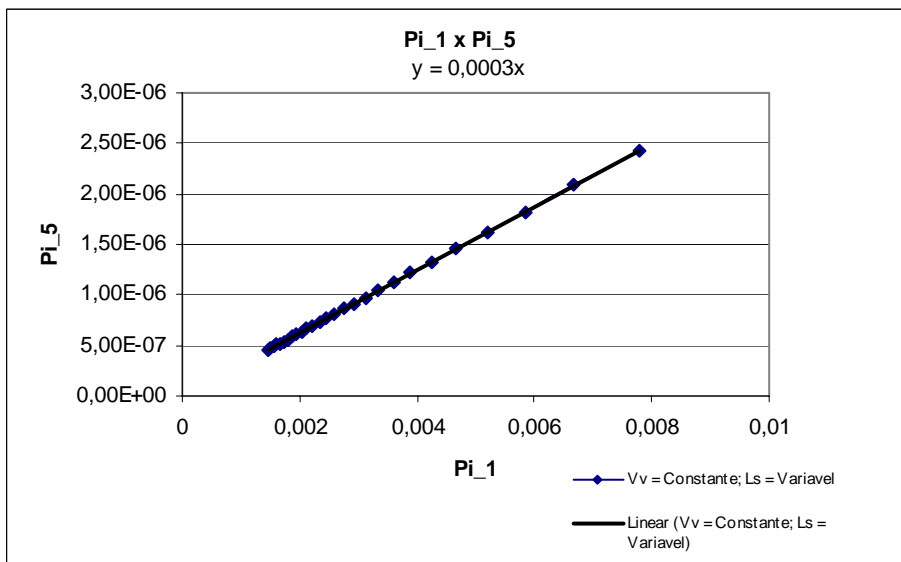


Figura C.4 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_5 (N° de Reynolds).

Na Fig. C. 3 mostra-se a relação entre π_1 e π_4 que são diretamente relacionados com a interação entre vento e estrutura. Observa-se que para uma dada velocidade do vento constante a influência do comprimento característico da torre é forte uma vez que interfere no coeficiente de arrasto.

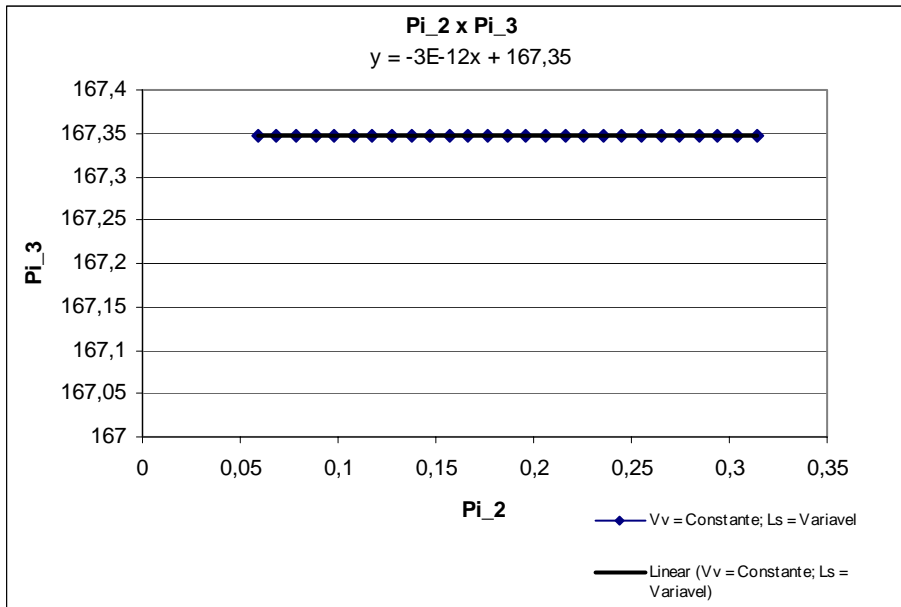


Figura C.5 - Variação de π_2 (Nº de Froude) em função de π_3 (Semelhança elástica).

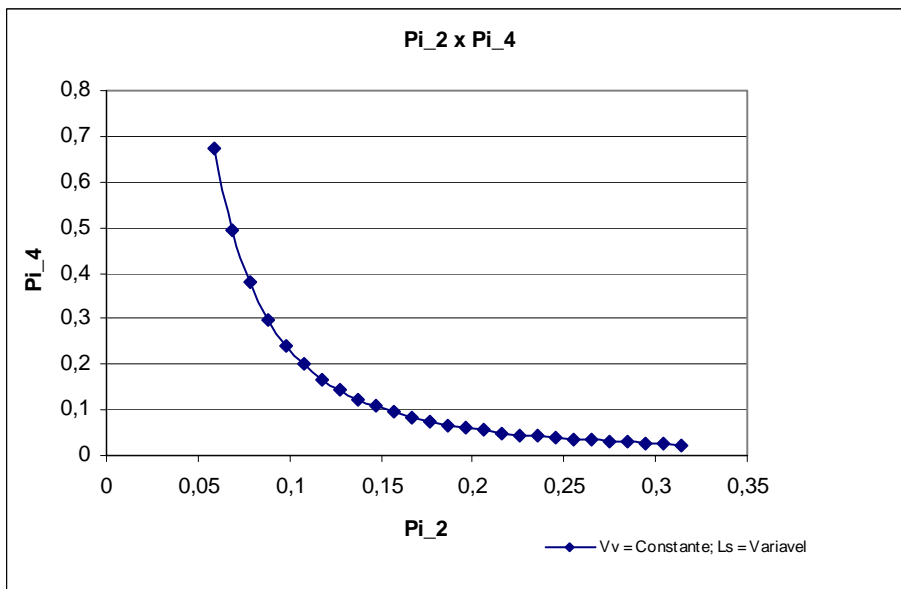


Figura C.6 - Variação de π_2 (Nº de Froude) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido).

Nas Figs. C. 5 a C.7 mostram-se as relações entre o número π_2 com os números π_3 , π_4 e π_5 , respectivamente. Observa-se que π_2 varia inversamente com π_4 e π_5 . Isto ocorre porque estes números têm relação diferente com L_s que é o parâmetro que se está variando.

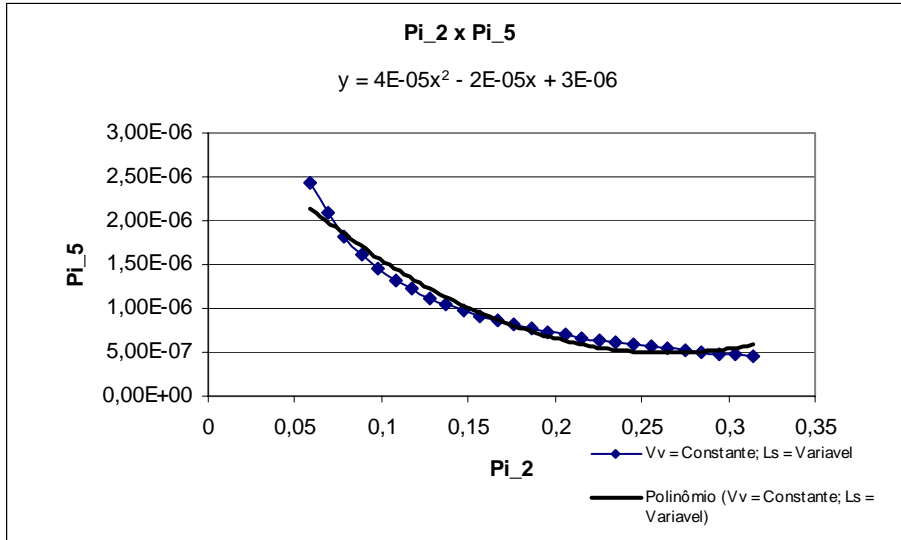


Figura C.7 - Variação de π_2 (Nº de Froude) em função de π_5 (Nº de Reynolds).

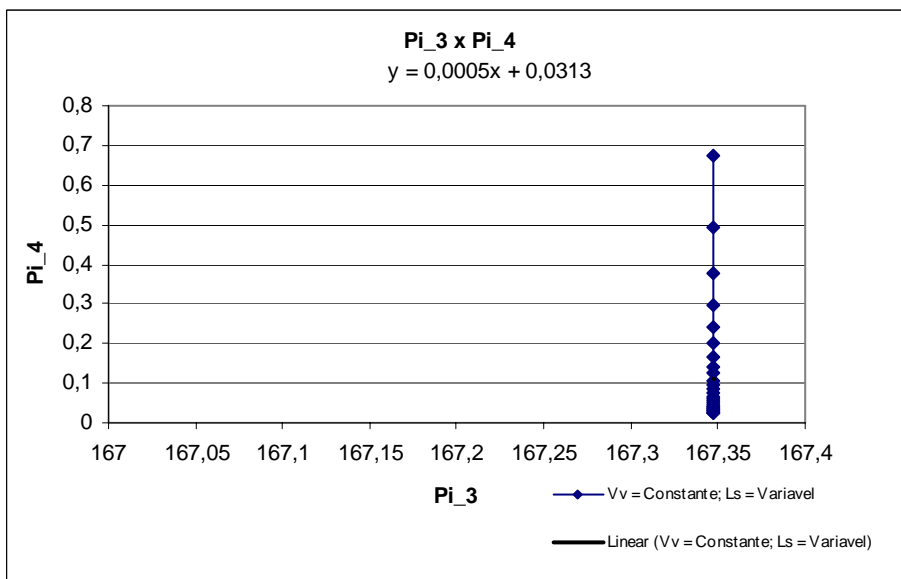


Figura C.8- Variação de π_3 (Semelhança Elástica) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido).

Nas Figs. C. 8 a C.9 apresentam-se relações entre o número π_3 com os números π_4 e π_5 respectivamente. Deve-se lembrar que π_3 independe de L_s .

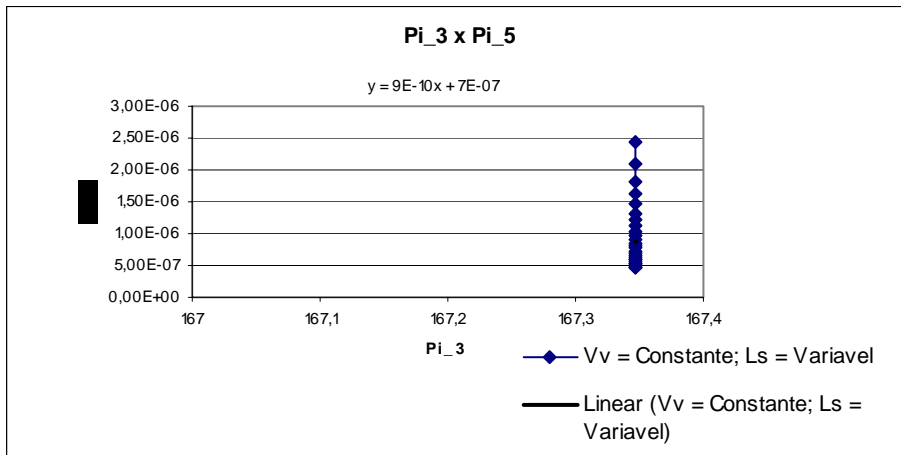


Figura C.9 - Variação de π_3 (Semelhança Elástica) em função de π_5 (Nº de Reynolds).

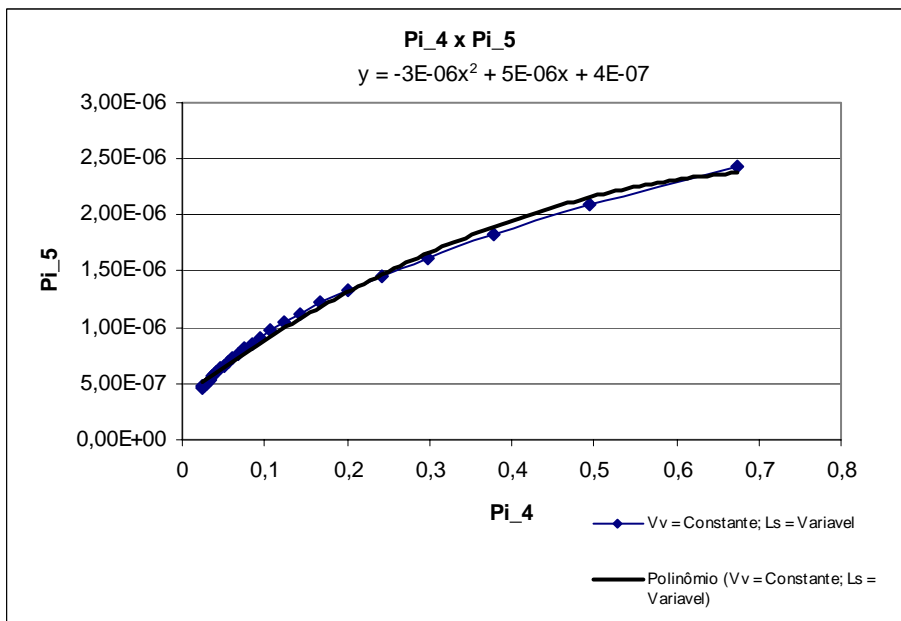


Figura C.10 - Variação de π_4 (Relação Estrutura/Fluido) em função de π_5 (Nº de Reynolds).

Nas Fig. C. 10 apresenta-se a relação entre π_4 e π_5 . A relação destes números é direta, pois ambos são inversamente proporcionais a L_s .

Na obtenção dos gráficos, mostrados nas Figs. C.11 a C. 20, mantém-se o L_s constante e varia-se a velocidade do vento. Nas Figs. C.10 a C. 14 apresenta-se as relações de π_1 , com π_2 , π_3 , π_4 e π_5 , respectivamente. Conforme Equação (4.12d) π_4 independe da velocidade permanecendo constante.

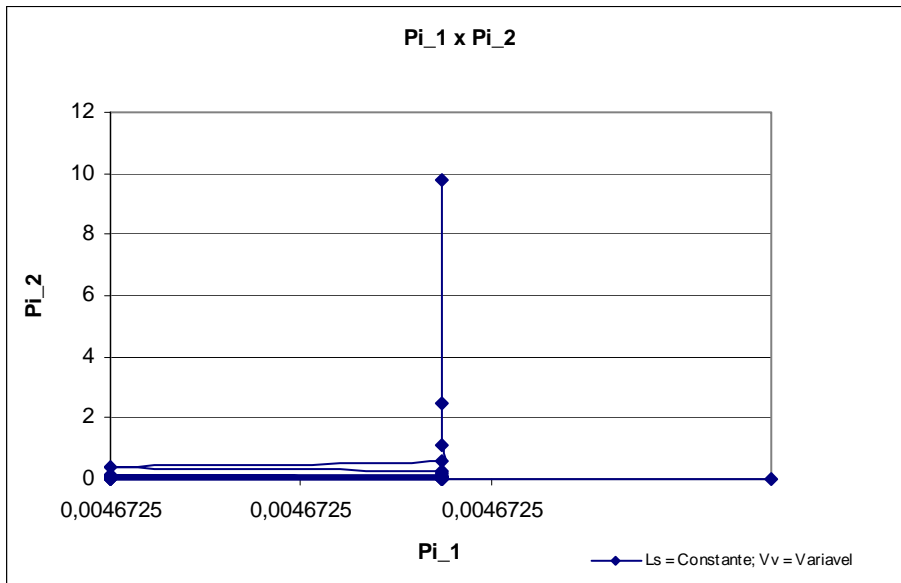


Figura C.11 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_2 (Nº de Froude).

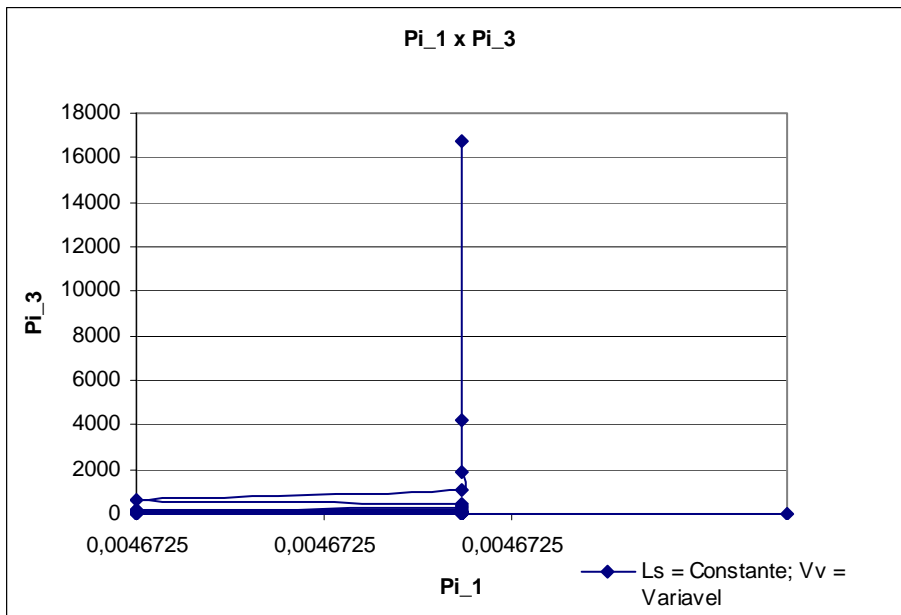


Figura C.12 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_3 (Semelhança Elástica) .

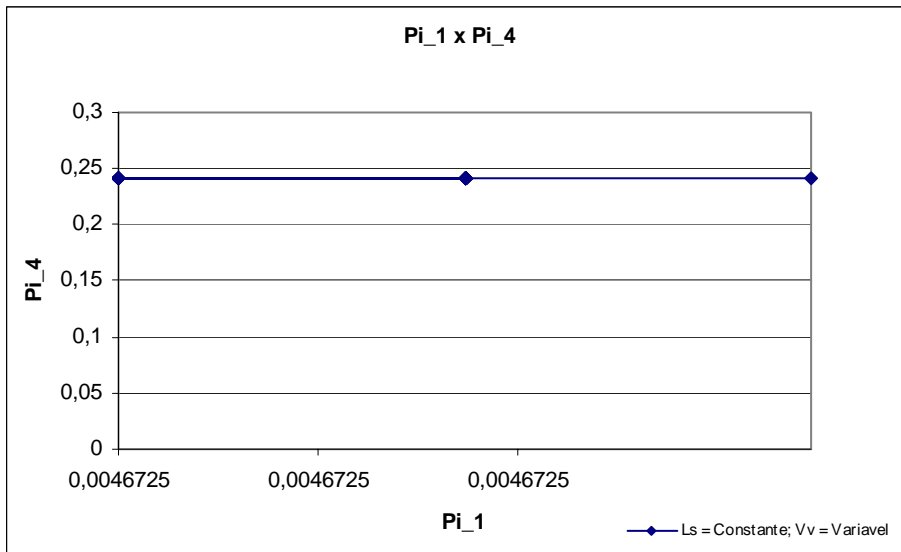


Figura C.13 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido).

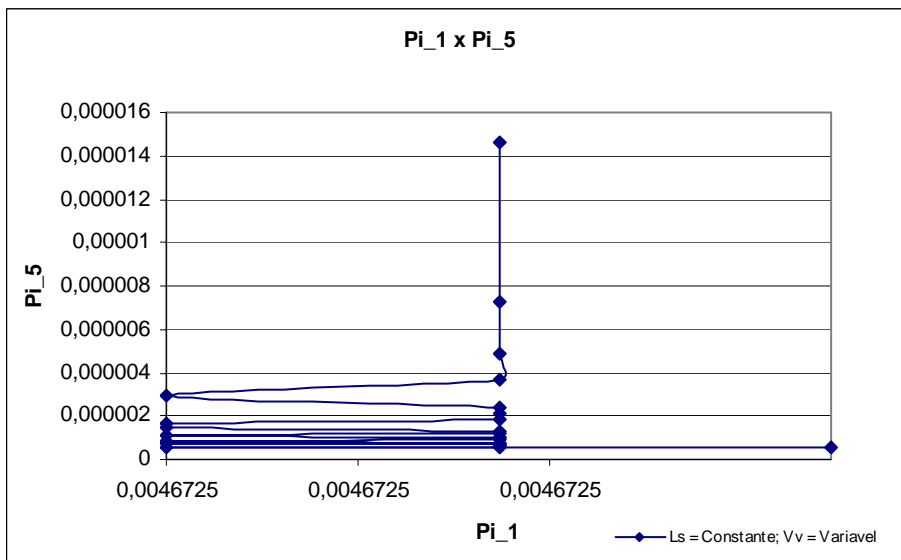


Figura C.14 - Variação de π_1 (Coef. de Arrasto) em função de π_5 (N° Reynolds).

Nas Figs. C.15 a C. 17 apresentam-se as relações de π_2 com π_3 , π_4 e π_5 , respectivamente. Nas Figs. C.18 e C. 19 apresentam-se as relações de π_3 com π_4 e π_5 , respectivamente. Nas Fig. C.120 apresenta-se a relação de π_4 com π_5 .

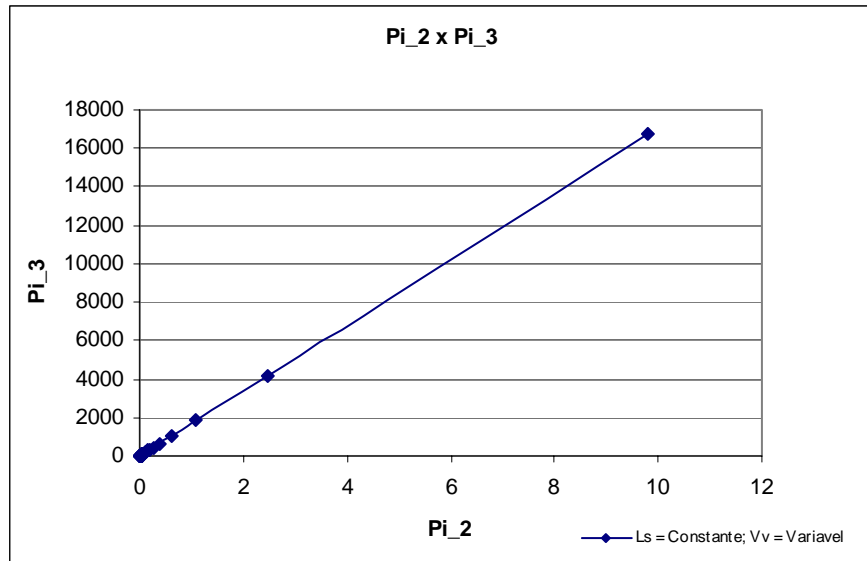


Figura C.15 - Variação de π_2 (Nº Froude) em função de π_3 (Semelhança Elástica).

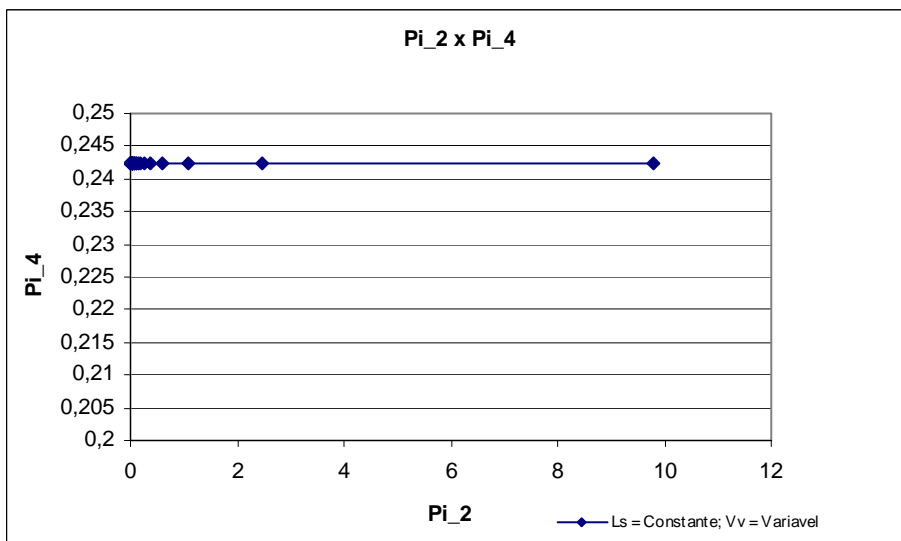


Figura C.16 - Variação de π_2 (Nº Froude) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido).

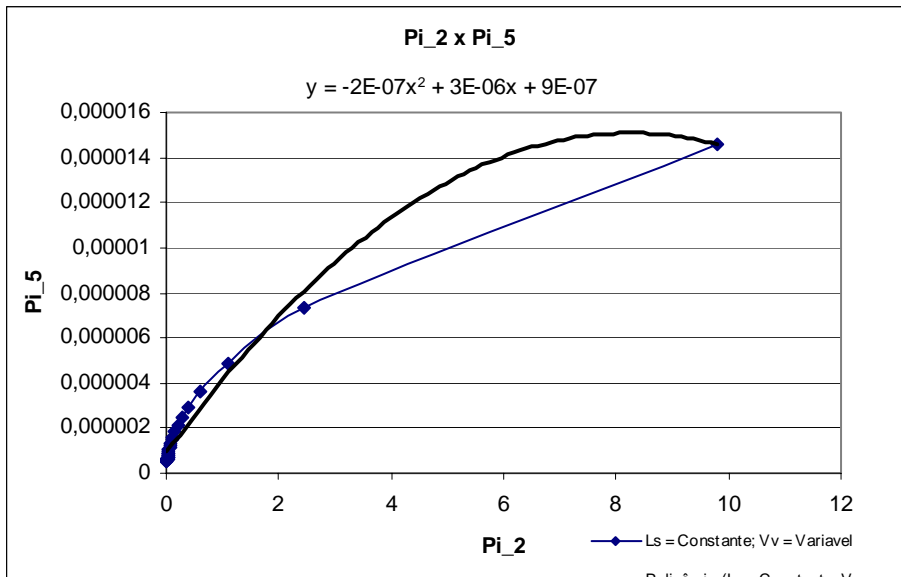


Figura C.17 - Variação de π_2 (Froude) em função de π_5 (Nº Reynolds).

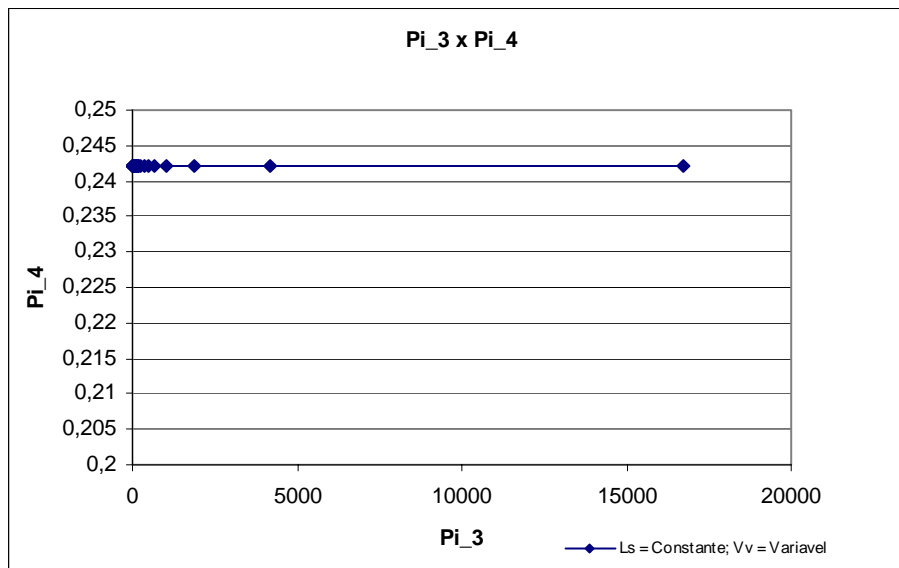


Figura C.18 - Variação de π_3 (Semelhança Elástica) em função de π_4 (Relação Estrutura/Fluido).

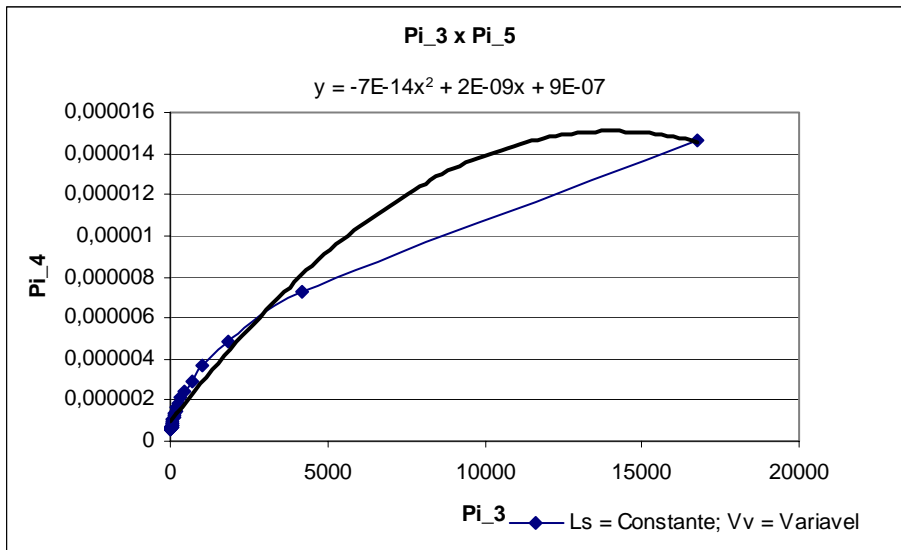


Figura C.19 - Variação de π_3 (Semelhança Elástica) em função de π_5 (Nº Reynolds).

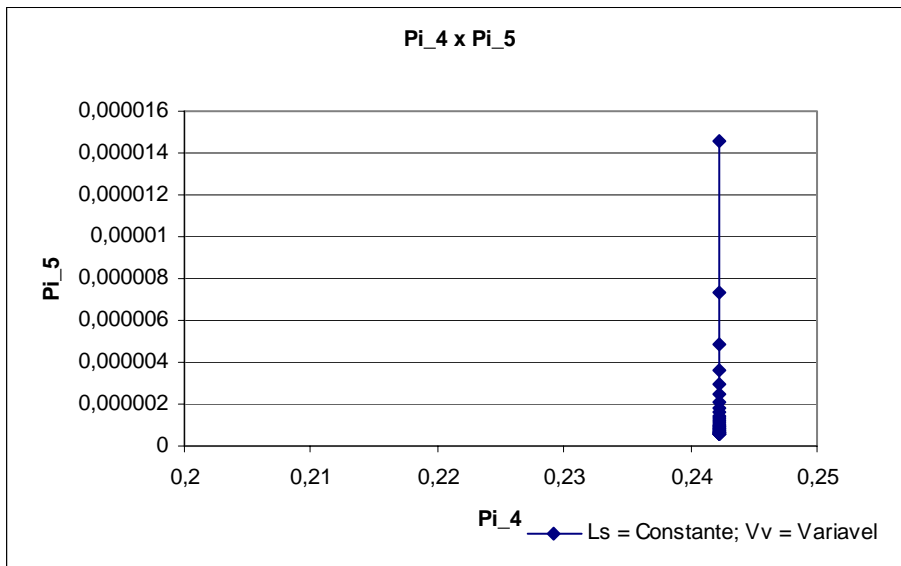


Figura C.20 - Variação de π_4 (Relação Estrutura/Fluido) em função de π_5 (Nº Reynolds).

Para se tirar alguma conclusão mais elaborada da abordagem descrita acima para geração dos modelos, seria necessário que se aprofundasse os estudos iniciais contidos neste trabalho. A idéia inicial, e que pode ser executada em outros trabalhos, era dimensionar uma estrutura de torre com seção transversal tubo circular e analisar o seu comportamento via simulação computacional. Uma vez que as etapas de análise e

dimensionamento da torre, assim como de geração dos números π e dos fatores de escala, sejam realizadas de forma automática via computador, pode-se gerar vários resultados e tirar as devidas conclusões. Logo, o que se apresenta neste trabalho, são resultados iniciais ou preliminares da aplicação da idéia descrita, constituindo-se, assim, numa exploração mais qualitativa.