

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACICABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROJETO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS COM  
UTILIZAÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

**DOUGLAS DE ANDREZA COUTO  
RA 180050035**

Piracicaba

2009

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACICABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROJETO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS COM  
UTILIZAÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

**DOUGLAS DE ANDREZA COUTO**  
RA 180050035

**MONOGRAFIA ELABORADA POR EXIGÊNCIA DA  
DISCIPLINA DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO II, SOB  
SUPERVISÃO DO PROF. FRANCISCO CARLOS  
CASTRO LAHÓZ.**

Orientador: Prof.Eng. Salvador Domingos Marth  
Área de Concentração: Estruturas

Piracicaba  
2009

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACICABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROJETO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS COM  
UTILIZAÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

**DOUGLAS DE ANDREZA COUTO  
RA 180050035**

Monografia aprovada em **14/11/2009** para obtenção do título de Graduação em Engenharia Civil.

Banca Examinadora:

---

Prof. Ms. Francisco Carlos Castro Lahóz

---

Prof.Dr. Edson Valdemir Pigoretti

---

Prof.Ms. Milton Rontani Júnior

*Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, parentes,  
amigos, professores e todas às demais pessoas que  
acompanharam minha trajetória até este ponto.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto dessa obra complexa e magnífica, ao qual damos o nome de Vida.

Aos meus pais, Sérgio e Margarida, por me proporcionarem todas as oportunidades na busca por educação e conhecimento.

Ao Prof.Eng. Salvador Domingos Marth, pela orientação, conhecimento, amizade e incentivo sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Prof.Ms. Francisco Carlos Castro Lahóz e ao Prof.Eng. Antônio Mauro de Ferraz Negreiros, por cederem seu tempo, conhecimento, amizade e paciência, indispensáveis para a produção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene, da Escola Politécnica da USP, por me ceder seu precioso tempo respondendo aos meus e-mails, me dando sugestões valiosíssimas sem as quais jamais poderia ter começado e concluído este trabalho.

Ao Engenheiro Nelson Kazuo Sato, e todo corpo técnico da SRTC Engenharia e Projetos, em especial à Eng<sup>a</sup>. Cristina, a Projetista Iclair, os colegas Luis Augusto e Thiago Iuras, por compartilharem comigo seus conhecimentos e experiências nesses dois anos de estágio.

À todos os professores da Escola de Engenharia de Piracicaba, que tive a oportunidade e a felicidade de conhecer, conviver e aprender durante os cinco anos do curso de Engenharia Civil.

Aos eternos amigos Carlos César Dalava, Cristiano Zonta, Rafael Grigolon Capelo e Renato Caravita Piragibe, amigos de todas as horas e todas as situações, pela amizade, companheirismo e experiências trocadas durante esses anos.

Aos membros da equipe APO/Concrebol-EEP, à qual integrei por dois anos consecutivos, trabalhando na pesquisa e no desenvolvimento do concreto de alto desempenho.

À todas as demais pessoas, tantas essas, que contribuíram direta ou indiretamente com a elaboração deste trabalho.

À todos, o meu sincero,  
*MUITO OBRIGADO!*

*“... a tecnologia, a menos que seja equilibrada por valores humanos, levará a raça humana a um desastroso fim.”*

*Edward Wilson*

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO.....	2
1.3 OBJETIVOS .....	3
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 HISTÓRICO DAS CONSTRUÇÕES .....	4
2.2 DEMANDA POR GRANDES ESTRUTURAS.....	4
2.3 CARGAS E MAGNITUDE DOS ESFORÇOS .....	10
2.4 ESTABILIDADE ESTRUTURAL.....	11
2.5 O CONCRETO COMO MATERIAL ESTRUTURAL .....	12
2.6 COMPOSIÇÃO, ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	14
2.6.1 Agregado Miúdo .....	14
2.6.2 Agregado Graúdo.....	15
2.6.3 Estrutura Macro e Microscópica.....	15
2.7 ZONA DE TRANSIÇÃO .....	16
2.8 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA .....	17
2.9 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	17
2.9.1 Histórico.....	17
2.9.2 Definições .....	18
2.9.3 Importância e Viabilidade.....	18
2.9.4 Materiais .....	20
2.9.4.1 Cimento .....	20
2.9.4.2 Agregado Graúdo .....	20
2.9.4.3 Agregado Miúdo.....	20
2.9.4.4 Sílica Ativa.....	21

2.9.4.5	Aditivos Superplastificantes.....	21
2.9.4.6	Fator Água/Cimento .....	21
2.10	O CAD E O MEIO AMBIENTE .....	22
2.11	ESTUDO DE CASO.....	23
2.11.1	Materiais e Métodos.....	24
2.11.2	Carregamento.....	24
2.11.2.1	Redução de Sobrecargas .....	26
2.11.3	Resultados e Discussão do Estudo de Caso .....	27
2.11.3.1	Estabilidade Global .....	28
2.11.3.2	Deslocamento Horizontal .....	29
2.11.3.3	Consumo de Materiais.....	29
2.11.3.3.1	Consumo de Concreto e Formas.....	29
2.11.3.3.2	Consumo de Aço.....	34
2.12	DISCUSSÕES COMPLEMENTARES E SUGESTÕES PARA EQUACIONAR O PROBLEMA LEVANTADO.....	35
<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 2.1 – VISTA PANORÂMICA DO DISTRITO DE SHIJUKO, CENTRO COMERCIAL E ADMINISTRATIVO DE TÓQUIO .....	5
FIGURA 2.2 – FOTO PETRONAS TWIN TOWERS .....	7
FIGURA 2.3 – EDIFÍCIO BURJ DUBAI, NOS EMIRADOS ÁRABES UNIDOS, A MAIOR ESTRUTURA DE CONCRETO JÁ CONSTRUÍDA PELO HOMEM. ....	8
FIGURA 2.4 – ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO – $V_0$ (M/S).....	9
FIGURA 2.5 – SEÇÃO POLIDA DE UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO (MEHTA E MONTEIRO, 2008) .....	14
FIGURA 2.6 – MICROGRAFIA DE UMA PASTA DE CIMENTO HIDRATADA (MEHTA E MONTEIRO, 2008) .....	15
FIGURA 2.7 – EDIFÍCIO E-TOWER EM SÃO PAULO, RECORDE MUNDIAL DE RESISTÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COLORIDO (FCK MÉDIO DE 125 MPA) (HELENE ET. AL, 2003) .....	18

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 2.1 – POPULAÇÃO NOS ANOS DE LEVANTAMENTO CENSITÁRIO DO MUNICÍPIO E REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO .....	5
TABELA 2.2 – LISTA DOS 10 MAIORES EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS NO MUNDO ATÉ O ANO DE 2009 .....	8
TABELA 2.3 – LISTA DOS 10 MAIORES EDIFÍCIOS CONTRUÍDOS NO BRASIL ATÉ O ANO DE 2009 .....	13
TABELA 2.4 – CARREGAMENTO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO UTILIZADO NO ESTUDO .....	24
TABELA 2.5 – CASOS DE INCIDÊNCIA DE VENTO E COEFICIENTES DE ARRASTO ADOTADOS.....	24
TABELA 2.6 – PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DE ESFORÇO DEVIDOS AO VENTO.....	24
TABELA 2.7 – DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR PAVIMENTOS E SOMA DE REAÇÕES.....	25
TABELA 2.8 – FATORES REDUTORES DE SOBRECARGAS.....	26
TABELA 2.9 – VALORES MÁXIMOS DE $\gamma_z$ PARA OS RESPECTIVOS PROCESSAMENTOS ..	27
TABELA 2.10 – DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DO EDIFÍCIO .....	28
TABELA 2.11 – COSUMO TOTAL DE AÇO POR PROCESSAMENTO .....	33
TABELA 2.12 – CONSUMO E TAXAS DE ARMADURA, FORMAS E CONCRETO.....	33

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 – CONSUMO TOTAL DE CONCRETO EM CADA PROCESSAMENTO .....	29
GRÁFICO 2.2 – CONSUMO TOTAL DE CONCRETO NOS PILARES .....	29
GRÁFICO 2.3 – CONSUMO TOTAL DE CONCRETO NAS VIGAS .....	30
GRÁFICO 2.4 – CONSUMO TOTAL DE CONCRETO NAS LAJES .....	30
GRÁFICO 2.5 – CONSUMO TOTAL DE FORMAS.....	31
GRÁFICO 2.6 – CONSUMO TOTAL DE FOMAS NOS PILARES .....	31
GRÁFICO 2.7 – CONSUMO TOTAL DE FORMAS NAS VIGAS .....	32
GRÁFICO 2.8 – CONSUMO TOTAL DE FORMAS NAS LAJES .....	33
GRÁFICO 2.9 – CUSTOS TOTAIS POR PROCESSAMENTO.....	35
GRÁFICO 2.10 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES PERCENTUAIS DO CUSTO TOTAL DE AÇO-CONCRETO-FORMAS EM TODOS OS PROCESSAMENTOS .....	36

## RESUMO

O surgimento do concreto de alta resistência (CAR) após a década de 1970 e os concretos de alto desempenho (CAD) no início dos anos 1990, proporcionaram ao setor da construção civil uma alternativa extremamente viável na construção de estruturas de concreto. Suas propriedades mecânicas tais como elevada resistência, alto módulo de elasticidade e grande durabilidade, devido ao baixo fator água/cimento, são vistas como fatores de grande vantagem em sua aplicação. A utilização mundial de CAD é extremamente elevada, principalmente na construção de edifícios altos. São empregadas classes de resistência que variam de 60 à 150 MPa em alguns casos. No Brasil a NBR6118:2003, prevê a utilização de concretos com resistências até 50MPa, existem alguns casos de aplicação com resistências superiores, porém com utilização de normalização internacional. Este trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente, dentro dos limites da NBR6118:2003, a utilização do concreto de alto desempenho na estrutura de edifícios altos. Para tal foi feita uma revisão de literatura sobre o tema, abordando as necessidades da construção de tais edificações e adotado um estudo de caso comparativo com aplicação de CAD face à concretos de resistência inferior, avaliando os parâmetros qualitativos e quantitativos de todos os casos em questão bem como, as alternativas mais sustentáveis do ponto de vista econômico e ambiental.

Palavras Chave: Concreto; CAD; CAR; Estruturas; Meio Ambiente; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The arrival of high-strength concrete (HSC) after the 1970's and the high-performance concrete (HPC) in early 1990, provided the construction industry a very viable alternative in the construction of concrete structures. Mechanical properties such as high strength, high modulus of elasticity and durability, due to low water/cement ratio, are seen as factors of great advantage in its application. The global use of HPC is extremely high, especially in the construction of tall buildings. Are used classes of resistance ranging from 60 to 150 MPa in some cases. In Brazil the NBR6118:2003, provides for the use of concrete with strength up to 50MPa, there are some cases of application with greater resistance, but using international standards. This study aims to benchmark, within the limits of NBR6118: 2003, the use of high performance concrete in the structure of tall buildings. For such was made a review of literature on the subject, addressing the needs of the construction of such buildings and adopted a comparative case study with application of HPC in the face of lower strength concrete, assessing the qualitative and quantitative parameters of all the cases in question and the alternatives more sustainable economically and environmentally.

Keywords: Concrete; HPC; HSC; Structures; Environment; Sustainability.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos grandes aglomerados urbanos a verticalização das construções, surge como uma das alternativas para a racionalização do espaço, porém, caso não sejam utilizadas escolhas de projeto tecnicamente e economicamente viáveis, inviabiliza-se a construção ou provoca-se um efeito colateral não desejado. Com os edifícios cada vez atingindo alturas maiores, as cargas em seus elementos estruturais crescem na mesma proporção, exigindo estruturas cada vez mais robustas com grandes dimensões e grande consumo de materiais, o que acaba minimizando o espaço disponível nos pavimentos inferiores e aumentando o peso próprio da estrutura.

A utilização do concreto<sup>1</sup> armado, na construção de estruturas de edifícios é amplamente empregada, visto que apresenta determinadas vantagens frente à outros materiais, tais como ser relativamente mais barato, ser moldável, apresentar boa resistência à maior parte das solicitações à que é submetido (desde que haja um correto dimensionamento), ter grande durabilidade, ser resistente à água, ao fogo, entre outros. (PINHEIRO, 2007).

O aumento exponencial da população mundial gera cada vez mais problemas com utilização de espaço. O crescimento espraiado das cidades tende a tornar o custo de vida da população cada vez mais elevado, uma vez que os serviços de transporte e infra-estrutura deverão ser ampliados na mesma escala do crescimento urbano e populacional. Centros mais desenvolvidos tornam a verticalização uma alternativa viável a esse crescimento horizontal, porém avaliar a viabilidade construtiva de um edifício alto é papel do engenheiro civil.

Dentre as inúmeras dificuldades a serem vencidas pelo projetista estrutural, no âmbito das estruturas de concreto armado, uma delas está na própria característica do material concreto, que apresenta em sua estrutura interna, muitas particularidades que o tornam um material com propriedades diferentes quando exposto a determinados estados de tensões (MEHTA et al., 2008).

A utilização de CAD na construção civil são geralmente em edifícios altos, plataformas submarinas, viadutos, estruturas expostas à intempéries marítimas, pontes de grandes vãos, pavimentação de rodovias etc. Sua aplicação em edifícios altos propicia estruturas esbeltas e pilares com dimensões significativamente reduzidas, gerando ganho de

---

<sup>1</sup> Neste trabalho, o termo concreto refere-se ao concreto de cimento Portland.

espaço, alívio no peso próprio do pórtico, aumento da rigidez e conseqüentemente da estabilidade global da estrutura devido ao maior módulo de elasticidade e resistência característica (fck), além do ganho de tempo na execução e diminuição das áreas de forma. Também se constitui em importante instrumento ecológico, uma vez que em sua composição pode-se utilizar escórias e outros tipos de resíduos industriais, além de ter grande durabilidade, o que contribui para a construção de estruturas mais duráveis (MEHTA, 1999).

Conforme HELENE (1997), projetar estruturas com concretos de resistência (fck) inferiores à 50MPa será antieconômico, principalmente em edifícios altos (mais de 30 pavimentos) e estruturas de grande porte.

Face a essa situação, torna-se um grande desafio para os engenheiros e projetistas estruturais, a avaliação das viabilidades técnicas, econômicas e sustentáveis no emprego do concreto nas estruturas dos edifícios altos.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

No Brasil, os projetos de estruturas de concreto, conforme prevê a NBR 6118:2003, são feitos com concretos de classe de resistência que variam de 25 à 50 MPa, o que faz com que os engenheiros estruturais possam lançar mão de diversos tipos de concepções que tenham como objetivo viabilizar determinados tipos de empreendimentos.

O tempo que uma construção leva para ser concluída pode ser o fator decisivo para viabilizá-la economicamente, e com a utilização de concretos de alto desempenho, onde se tem um tempo de pega e de ganho de resistência reduzidos, pode-se ter vantagens expressivas na redução do tempo de desforma e carregamento da estrutura, sem que hajam deformações indesejáveis e outros fatores que possam dar origem a patologias ou que comprometam a segurança estrutural.

Observado que a resistência do concreto à compressão constitui-se em fator fundamental para o dimensionamento da estrutura, faz-se necessário abordar o tema de forma a verificar a viabilidade e os aspectos envolvidos na utilização de concretos com resistências elevadas, visando economia de materiais, ganho de espaço, aumento da vida útil e melhoria no desempenho em serviço da estrutura.

O problema a ser abordado refere-se à falta de evidências das vantagens com a utilização de concretos com altas resistências.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é fazer uma avaliação das viabilidades técnicas, econômicas e sustentáveis da utilização de concretos de alto desempenho nas estruturas de edifícios altos, bem como analisar seus parâmetros e índices quantitativos e qualitativos, frente à utilização dos concretos convencionais, dentro dos limites da NBR 6118:2003, enaltecendo os procedimentos para minimizar os problemas existentes.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 HISTÓRICO DAS CONSTRUÇÕES

Conforme os registros históricos, o homem primitivo ao deixar de ser nômade, dominando as técnicas de agricultura e pecuária, passa a habitar um local fixo e a ter necessidade de construir abrigos permanentes para se proteger e estocar seus alimentos. Deste ponto da história, começam a surgir as primeiras edificações e aglomerados chamados de aldeias. Não somente para sua habitação, o homem também passou a desenvolver estruturas para os mais diversos fins, que o pudessem auxiliar em suas atividades diárias e simplificar tarefas antes mais complexas, tais como a transposição de rios, armazenamento de água etc. (apud LUCHESEI et al., 1999).

Com o passar dos anos, o homem se aperfeiçoou no desenvolvimento de suas estruturas e dos materiais nelas empregados. Podemos citar civilizações como os egípcios com suas pirâmides, os chineses e seus templos milenares e a grande muralha, os gregos, os romanos com tecnologias bastante avançadas para a época, passando pela idade média e as catedrais góticas, até chegarmos às pontes, barragens e imensos arranha-céus dos dias atuais (LUCHESEI et al., 1999).

### 2.2 DEMANDA POR GRANDES ESTRUTURAS

Com o surgimento das cidades e o aumento constante da população, algumas pequenas aldeias se transformaram em imensos conglomerados urbanos, tais como Tóquio no Japão (figura 2.1) com 12,79 milhões de habitantes<sup>2</sup> e densidade populacional de 5.847 habitantes/km<sup>2</sup> e Nova Iorque nos EUA com pouco mais que 8 milhões de habitantes e 6.673 hab./km<sup>2</sup>.

O mundo hoje, conforme publicado em reportagem do jornal Folha de S. Paulo<sup>3</sup>, conta com uma população de 6,7 bilhões de habitantes e chegará a 9,2 bilhões até o ano de 2050, o que necessariamente irá gerar uma grande demanda por espaço que por sua vez será

---

<sup>2</sup> Fonte: Prefeitura de Tóquio. Dados de Outubro de 2007 – Disponíveis em <http://www.metro.tokyo.jp/ENGLISH/PROFILE/overview03.htm>

<sup>3</sup> “População mundial superará 9,2 bilhões em 2050, estima ONU” – Jornal Folha de S. Paulo de 13/03/2007 disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/mundo/ult94u373836.shtml>

insuficiente nesses grandes centros para a totalidade da população, fazendo com que haja necessidade de se pensar em soluções de engenharia que visem bem-estar e qualidade de vida à todos. Países em desenvolvimento, como o Brasil, hoje somam quase 80% da população mundial, e segundo o mesmo relatório, esses países contarão com cerca de 7,9 bilhões de habitantes, pouco mais de 85% do total de seres humanos que habitarão o mundo até 2050.



**Figura 2.1** – Vista panorâmica do distrito de Shijuko, centro comercial e administrativo de Tóquio no Japão.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%B3quio>

No Brasil, a cidade com maiores problemas de espaço e de crescimento populacional mais acentuado é São Paulo. A MetrÓpole e também capital do Estado ao qual leva o mesmo nome, conta hoje com 10.990.249 habitantes<sup>4</sup> e densidade demográfica de 7.216,2 hab./km<sup>2</sup>. A tabela 2.1 apresenta a evolução do crescimento da população da cidade de São Paulo ao longo dos anos, observa-se que o crescimento econômico ocorrido à partir da década de 20, impulsionado pela imigração e exportação de café, foi fundamental para transformar a capital paulista na metrÓpole global que é hoje (TOLEDO, 2004).

---

<sup>4</sup> Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – CENSO 2008. Disponível em [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2008/POP2008\\_DOU.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2008/POP2008_DOU.pdf)

**Tabela 2.1 - População nos Anos de Levantamento Censitário  
Município e Região Metropolitana de São Paulo, Estado de São Paulo e Brasil  
1872 à 2000.**

Anos	Município de São Paulo		Região Metropolitana de SP		Estado de São Paulo		Brasil	
	População	Taxa de Crescimento <sup>(1)</sup>	População	Taxa de Crescimento <sup>(1)</sup>	População	Taxa de Crescimento <sup>(1)</sup>	População	Taxa de Crescimento <sup>(1)</sup>
1872	31.385		-		837.354		10.112.061	
		4,1		-		2,8		2,0
1890	64.934		-		1.384.753		14.333.915	
		14,0		-		5,1		1,9
1900	239.820		-		2.282.279		17.318.556	
		4,5		-		3,6		2,9
1920	579.033		-		4.592.188		30.635.605	
		4,2		-		2,3		1,5
1940	1.326.261		1.568.045		7.180.316		41.236.315	
		5,2		5,3		2,4		2,3
1950	2.198.096		2.622.786		9.134.423		51.944.397	
		5,6		6,1		3,6		3,1
1960	3.781.446		4.739.406		12.974.699		70.119.071	
		4,6		5,6		3,2		2,9
1970	5.924.615		8.139.730		17.771.948		93.139.037	
		3,7		4,5		3,5		2,5
1980	8.493.226		12.588.725		25.040.712		119.002.706	
		1,2		1,9		2,1		1,9
1991	9.646.185		15.444.941		31.588.925		146.825.475	
		0,9		1,6		1,8		1,6
2000	10.434.252		17.878.703		37.032.403		169.799.170	

Fonte: IBGE, Censos Demográficos.

<sup>1</sup> Taxa de Crescimento Geométrico Anual.

Em: [http://sempla.prefeitura.sp.gov.br/historico/tabelas/pop\\_brasil.php](http://sempla.prefeitura.sp.gov.br/historico/tabelas/pop_brasil.php)

Com o crescimento populacional, as grandes cidades mundiais, impulsionadas também pelo crescimento econômico, iniciaram-se a construção de edifícios cada vez mais altos, a fim de resolver o constante problema de espaço, que é cada vez mais escasso e valorizado nos grandes centros urbanos. Essas torres passaram a ter grande destaque e importância no cenário dessas cidades, uma vez que suas utilizações são para os mais diversos fins, desde residências, escolas e hospitais até grandes centros empresariais, sendo que não passam despercebidos perante as demais edificações (LUCHESEI et al., 1999).

As *Petronas Twin Towers*, figura 1.2, são um exemplo claro dessa tendência. Construídas no ano de 1998, como sendo as maiores torres do mundo na ocasião, superando a Sears Tower em Chicago (EUA). São ocupadas pela companhia estatal de petróleo da Malásia, além de abrigar, centros comerciais e culturais na capital malaia Kuala Lumpur. Estima-se que o fluxo médio diário de pessoas seja da ordem de 50.000 pessoas, as torres são

localizadas próximas a estações de trem e metrô e ruas movimentadas (LUCHESEI et al., 1999).



**Figura 2.2** – Petronas Twin Towers em Kuala Lumpur na Malásia – Torres mais altas do Mundo até 2004 com 452 metros e 88 andares.  
Fonte: [http://www.petronas.com.my/internet/pett/pettweb.nsf/frm\\_home\\_hi?OpenFrameset](http://www.petronas.com.my/internet/pett/pettweb.nsf/frm_home_hi?OpenFrameset)

Não só a Malásia, mas dezenas de países têm cidades dotadas dos maiores arranha-céus do mundo, observa-se na tabela 2.2, uma lista com as dez maiores torres já construídas, espalhadas por todo o globo. Essas torres são dotadas dos mais diversos e modernos sistemas estruturais já criados pelo homem, a concepção visa vencer a grande carga imposta pelas forças do vento e vibrações sísmicas que são de alta importância em estruturas desse porte. Além de dispor de alta tecnologia estrutural, esses edifícios possuem técnicas especiais de construção, uma vez que a viabilidade técnica de sua execução depende de um correto método construtivo, visando vencer as dificuldades de altura, tempo, mão-de-obra, disponibilidade de materiais entre outras (LUCHESEI et. al, 1999).

**Tabela 2.2 – Lista dos 10 Maiores Edifícios Construídos no Mundo até o ano de 2009.**

	<b>Edifício</b>	<b>Cidade</b>	<b>País</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Andares</b>	<b>Ano de Conclusão</b>
1°	Burj Dubai	Dubai	Emirados Árabes Unidos	818	162	2009 <sup>1</sup>
2°	Taipei 101	Taipei	Taiwan	509	101	2004
3°	Shangai World Financial Center	Xangai	China	492	101	2008
4°	Petronas Towers Torre 1	Kuala Lumpur	Malásia	452	88	1998
5°	Petronas Towers Torre 2	Kuala Lumpur	Malásia	452	88	1998
6°	Sears Tower	Chicago	EUA	442	108	1973
7°	Jin Mao Tower	Xangai	China	421	88	1998
8°	Two International Financial Center	Hong Kong	Hong Kong	415	88	2003
9°	CITIC Plaza	Guangzhou	China	391	80	1997
10°	Shun Hing Square	Shenzhen	China	384	69	1996

Fonte: Emporis – [www.emporis.com](http://www.emporis.com)

<sup>1</sup> Ano previsto para conclusão.

A figura 2.3 mostra o edifício Burj Dubai, a maior estrutura de concreto já construída pelo homem. A torre situa-se em um condomínio de fins residenciais e comerciais de 500 hectares no centro de Dubai. Sua inauguração está prevista para Janeiro de 2010<sup>5</sup>.

Em 2007, tornou-se o edifício mais alto do mundo, atingindo 512 m durante sua construção, superando assim o até então maior Taipei 101 (Taiwan), e em seguida ultrapassou os 553m da CN Tower, em Toronto (Canadá), que por 31 anos foi a estrutura livre mais alta do planeta<sup>6</sup>.

Segundo dados da incorporadora Emaar Properties<sup>7</sup>, responsável pela construção do edifício, foram utilizados 230.000 m<sup>3</sup> de concreto, desde os de maior resistência até os mais fluidos, uma vez que as alturas de bombeamento ultrapassaram os 500 metros de altura.

<sup>5</sup> Fonte: “Prédio mais alto do Mundo será inaugurado em Janeiro” – Portal Terra – Em 05/11/2009. disponível em: [http://economia.terra.com.br/noticias/noticia.aspx?idNoticia=200911051652\\_RED\\_78529179](http://economia.terra.com.br/noticias/noticia.aspx?idNoticia=200911051652_RED_78529179)

<sup>6</sup> Fonte: “What’s the new tallest building in the world?” – How Stuff Works – disponível em: <http://adventure.howstuffworks.com/burj-dubai.htm>

<sup>7</sup>Emaar Properties PJSC - [www.burjdubai.com](http://www.burjdubai.com)



**Figura 2.3** – Edifício Burj Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, a maior estrutura de concreto já construída pelo homem.

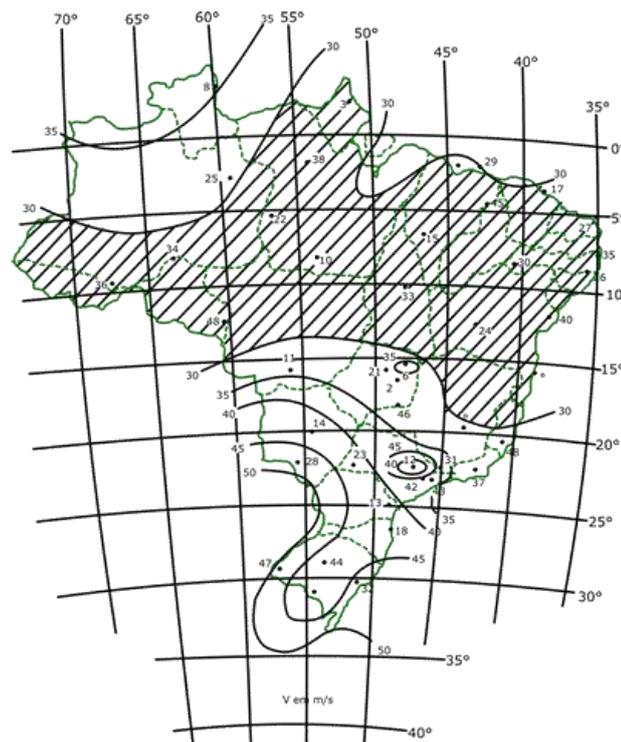
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Burj\\_Dubai\\_20090916.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Burj_Dubai_20090916.jpg)

A estrutura da maior parte desses arranha-céus é constituída de apenas dois materiais, o aço e o concreto. O concreto é amplamente empregado na construção de edifícios. Acredita-se que a escolha desse material em relação aos demais, seja devido aos custos e à velocidade de construção que ele proporciona (MEHTA et al, 2008; HELENE, 2007).

### 2.3 CARGAS E MAGNITUDE DOS ESFORÇOS

A magnitude de cargas e esforços, nos edifícios altos, é o principal problema a ser equacionado, principalmente os esforços devidos a força do vento. No Brasil, a NBR 6123:1988 normaliza o cálculo das forças devidas ao vento. Dentre as inúmeras cargas e combinações de carregamentos que se deve considerar em um projeto estrutural, as cargas de vento em alguns casos são preponderantes no dimensionamento, principalmente em edifícios altos onde a altura e grande área de contato vertical geram esforços de elevada magnitude.

As velocidades básicas do vento são definidas em função das curvas isopletas da NBR 6123:188 conforme figura 2.4. Essas curvas são traçadas conforme a velocidade do vento em cada região, em que a probabilidade dessa velocidade ser excedida é de uma vez em 50 anos a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano.



**Figura 2.4** – Isopletas da velocidade básica do Vento –  $V_0$  (m/s)  
Fonte: NBR 6123:1988

Leva-se também em conta o fator topográfico ( $S_1$ ), a rugosidade do terreno e classe da edificação ( $S_2$ ) e o fator estatístico ( $S_3$ ) que depende do tipo de utilização da edificação.

Os elementos estruturais devem ser devidamente dimensionados para absorver essas cargas, na qual se faz necessário uma análise estrutural que contemple o comportamento da estrutura globalmente. Essa análise deve contemplar todo o pórtico espacial, e o modelo matemático adotado, deve ser o mais próximo possível da realidade da estrutura.

Os efeitos de primeira e segunda ordem nesses casos devem ser considerados. O emprego de softwares tem auxiliado muito as análises de estruturas complexas, em estados múltiplos de tensões e carregamentos. Com emprego de softwares é possível fazer inúmeras combinações de cálculo e adotar a mais desfavorável, com um cálculo refinado e o mais próximo possível da realidade da estrutura.

## 2.4 ESTABILIDADE ESTRUTURAL

A avaliação da estabilidade estrutural em edifícios de muitos pavimentos é fundamental para que se possa projetar uma estrutura segura e que atenda os parâmetros mínimos de conforto. Conforme prevê o item 15.5.3 da NBR 6118:2003, podemos usar como parâmetro de estabilidade o cálculo do coeficiente  $\gamma_z$  (equação 2.1), onde se avalia a importância dos esforços de segunda ordem globais em estruturas de concreto.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (2.1)$$

Onde:

$\Delta M_{tot,d}$  = Momento de Tombamento;

$M_{1,tot,d}$  = Somatório de todos os momentos de primeira ordem atuantes na estrutura.

O coeficiente  $\gamma_z$  foi desenvolvido pelos engenheiros brasileiros Augusto Vasconcelos e Mario Franco para estimar os efeitos de segunda ordem em estruturas de concreto armado. Originalmente esse coeficiente foi definido para medir o grau de sensibilidade da edificação sobre os efeitos de segunda ordem (COVAS, 2009).

## 2.5 O CONCRETO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Vários materiais são utilizados na construção de edificações, e dentre os inúmeros materiais estruturais utilizados pelo homem na atualidade, tais como a madeira, aço, alumínio, fibra de carbono, destaca-se, não apenas um material isolado, mas para um material que é a mistura de vários. Esse material é o concreto. O concreto é um material de construção proveniente da mistura, em proporção adequada, de aglomerantes, agregados e água (PINHEIRO, 2007).

Conforme afirmaram Brunauer e Copeland em artigo publicado pela revista *Scientific American* em 1964, o material de construção mais utilizado no mundo é o concreto, e seu consumo pelo ser humano só não é maior que o da água, estima-se que o consumo anual desse material nos dias atuais, seja da ordem de 11 bilhões de toneladas (apud MEHTA et al., 2008, p.3). Nas mais diversas estruturas o concreto é o material cujo uso é predominante frente aos demais. Essas estruturas podem ser de concreto armado ou protendido, associando o material concreto ao aço fazendo com que trabalhem de maneira solidária, explorando ao máximo as propriedades resistentes dos dois materiais, tornando-o assim com menor custo e execução mais barata diante de outros materiais.

O Cimento Portland, tal como hoje é conhecido, foi descoberto na Inglaterra por volta de 1824, e sua produção industrial iniciou-se após 1950 (VASCONCELOS, 1982).

A primeira associação de um metal a argamassa de pozolana é remota à época dos romanos. No ano de 1770, em Paris, associou-se ferro com pedras para formar vigas como as modernas, com barras longitudinais na região de tração e barras transversais ao cisalhamento.

Considera-se que o cimento armado surgiu na França, no ano de 1849, sendo o primeiro objeto feito com o material, registrado pela História, como sendo um barco, construído pelo francês Lambot, o qual foi apresentado oficialmente em 1855. O barco foi construído com leias de fios finos de serro, preenchidas com argamassa. Embora os barcos funcionassem, não obtiveram sucesso comercial.

A partir de 1861, outro francês, Mounier, que era paisagista, horticultor e comerciante de plantas ornamentais, fabricou um enorme quantidade de vasos de flores de argamassa de cimento com armadura de arame, e depois reservatórios com 25, 180 e 200 m<sup>3</sup>, respectivamente, e por último uma ponte com vão livre de 16,50 metros. Foi o início do que conhecemos hoje como “Concreto Armado”. Até cerca do ano de 1920, o concreto armado era chamado de “cimento armado”. (VASCONCELOS, 1985).

Em 1850, o norte americano Hyatt, fez uma série de ensaios e vislumbrou a verdadeira função da armadura no concreto. Porém, seus estudos não ganharam repercussão devido à falta de publicação. Novamente na França, Hennebique foi o primeiro após Hyatt, a compreender a função das armaduras no concreto. Percebeu a necessidade de dispor outras armaduras além da armadura reta de tração. Imaginou armaduras dobradas, prolongadas em diagonal e ancoradas na zona de compressão. Foi o primeiro a colocar estribos com a finalidade de absorver a força cortante e também foi o criador das vigas T, levando em conta a colaboração da laje como mesa de compressão (VASCONCELOS, 1985).

Os Alemães estabeleceram a teoria mais completa do novo material, toda ela baseada em experimentos e ensaios. VASCONCELOS (1985), afirma que: “*O verdadeiro desenvolvimento do concreto armado no mundo iniciou-se com Gustavo Adolpho Wayss*”, que, após comprar as patentes de Mounier, fundou sua firma em 1875 e as utilizou para empregar no norte da Alemanha.

No Brasil, em 1904 foram construídas casas e sobrados em Copacabana, em outras partes do Rio de Janeiro, ocorreram construções de galerias de água em cimento armado com 47m e 74m de comprimento. Em 1909 foi construída uma ponte na Rua Senador Feijó, com vão de 5,40m. Em 1908 houve a construção de uma ponte com 9m de vão, executada no Rio de Janeiro pelo construtor Echeverria, com projeto e cálculo do francês François Hennebique.

Em São Paulo, no ano de 1910, construiu-se uma ponte de concreto armado com 28 metros de comprimento na Avenida Pereira Rebouças, sobre o Ribeirão dos Machados. Essa ponte existe até os dias de hoje em ótimo estado de conservação. VASCONCELOS (1985), afirma que em 1913, “*a vinda da firma Alemã Wayys & Freytag constituiu, talvez, o ponto mais importante para o desenvolvimento do concreto armado no Brasil*”. Sua empresa no Brasil foi registrada somente em 1924, sob o nome de Companhia Construtora Nacional, funcionando até 1974. Imagina-se que de 1913 à 1924, Wayys utilizou-se da firma de um outro alemão, L. Riedlinger, para construir várias obras no Brasil, entre elas 40 pontes de concreto armado. Riedlinger importou mestres de obra da Alemanha, e a firma serviu de escola para a formação de especialistas nacionais, evitando assim a importação de mais estrangeiros.

O primeiro edifício em São Paulo data dos anos 1907 e 1908, sendo um dos mais antigos do Brasil em “Cimento Armado”, com três pavimentos. À partir de 1924, quase todos os cálculos estruturais passaram a ser feitos no Brasil, com destaque especial para o engenheiro estrutural Emílio Baumgart (VASCONCELOS, 1985).

O Brasil possui inúmeros edifícios de grande porte, os quais utiliza-se concreto como seu material estrutural principal, a tabela 2.3 apresenta uma lista com os maiores edifícios construídos no Brasil bem como suas respectivas localizações.

**Tabela 2.3 – Lista dos 10 maiores edifícios construídos no Brasil até o ano de 2009.**

	<b>Edifício</b>	<b>Cidade</b>	<b>Altura Total (m)</b>	<b>Andares</b>	<b>Ano de Conclusão<sup>1</sup></b>
1°	Mirante do Vale	São Paulo	170	51	1960
2°	Edifício Itália	São Paulo	168	45	1965
3°	Rio Sul Center	Rio de Janeiro	162	40	1982
4°	Edifício Altino Arantes	São Paulo	161	40	1947
5°	Torre Norte	São Paulo	158	38	1999
6°	Edifício Begônias	São Paulo	158	41	2008
7°	Edifício Jabuticabeiras	São Paulo	158	41	2008
8°	Edifício Magnólias	São Paulo	158	41	2008
9°	Edifício Rezendá	São Paulo	158	41	2008
10°	e-Tower	São Paulo	150	39	2005

Fonte: Emporis. [www.emporis.com.br](http://www.emporis.com.br)

## 2.6 COMPOSIÇÃO, ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto é um material compósito, composto de aglomerantes e agregados. O aglomerante consiste no material ligante geralmente composto por cimento Portland e água, e os agregados são materiais granulares como areias, pedregulho, pedriscos, rocha britada, bem como demais resíduos sólidos e escórias. Na composição do concreto os agregados ocupam de 60 à 80% de seu volume total, e devem ser observados com atenção pois são agentes fundamentais para as propriedades mecânicas, resistência e durabilidade do concreto (MEHTA et al., 2008).

### 2.6.1 Agregado Miúdo

Conforme definição da NBR 7211:1983, denomina-se agregado miúdo à areia de origem natural ou resultante de britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

### 2.6.2 Agregado Graúdo

A NBR 7211:1983, define agregado graúdo como sendo pedregulho ou brita provenientes de rochas estáveis ou mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm.

### 2.6.3 Estrutura Macro e Microscópica

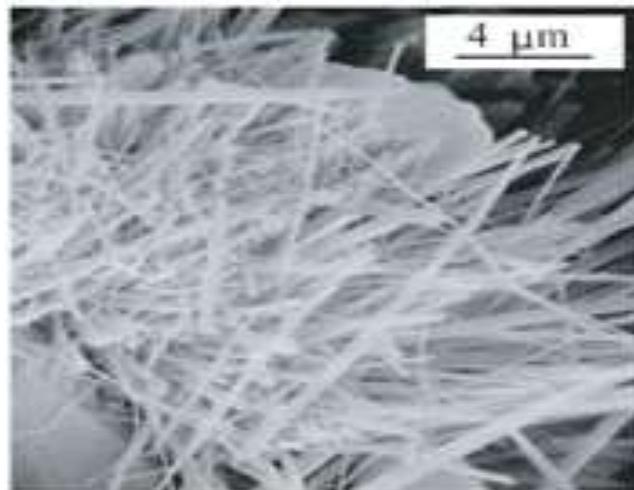
Nos sólidos, a quantidade, o tipo, a forma, a distribuição e o tamanho de suas fases constituem sua microestrutura. A estrutura macroscópica de um material pode ser vista facilmente à olho nu através de um corte na seção transversal de um material (Figura 2.5), já as fases mais finas necessitam da ajuda de microscópios para serem visualizadas.



**Figura 2.5** – Seção polida de um corpo de prova de concreto, parte visível à olho nu. (Estrutura Macroscópica)

Fonte: CD-ROM – Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais – METHA, P. Kumar. MONTEIRO, Paulo J. M. 3ªed. Ibracon, São Paulo 2008.

Conforme MEHTA e MONTEIRO (2008), o termo microestrutura refere-se à “porção com grandeza microscópica da macroestrutura”. Microestrutura é, portanto, a estrutura fina de um material, que pode ser vista através de um microscópio (Figura 2.6). A microestrutura do concreto, devido sua complexidade, é responsável por inúmeras de suas propriedades, e sua caracterização é de extrema importância para a melhor compreensão do concreto.



**Figura 2.6** – Micrografia de uma pasta de cimento hidratada.

Fonte: CD-ROM – Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais – MEHTA, P. Kumar. MONTEIRO, Paulo J. M. 3ªed. Ibracon, São Paulo 2008.

## 2.7 ZONA DE TRANSIÇÃO

É na microestrutura que se caracteriza uma fase importante do concreto, a zona de transição da interface entre agregado graúdo e pasta de cimento hidratada. Na zona de transição, embora seja composta pelos mesmos elementos que a pasta de cimento, suas propriedades e estrutura microscópica, diferem das propriedades da matriz da pasta de cimento (MEHTA et al., 2008).

A resistência na zona de transição de um concreto tende a ser menor do que na matriz da argamassa, isso devido à microfissuras e vazios que se formam nessa região, enfraquecendo a microestrutura do material. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), essas microfissuras prejudicam a resistência da zona de transição, devido à ação das forças de atração de Van der Waals, responsáveis pela aderência entre os materiais, os produtos de hidratação e as partículas de agregado, sendo assim o volume e tamanho de vazios existentes fundamentalmente importantes para a resistência da zona de transição.

As microfissuras podem se formar de inúmeras maneiras no concreto, essa formação depende da quantidade de água utilizada na hidratação, da dimensão máxima do agregado, distribuição granulométrica, consumo de cimento, cura, grau de umidade do ambiente etc.

Considerada como fase limitante na resistência do concreto, a zona de transição também exerce grande influência sobre suas demais propriedades. A rigidez e o módulo de elasticidade do concreto são extremamente dependentes da zona de transição, uma vez que em

um material compósito como o concreto, é a zona de transição o elo de ligação entre a matriz da argamassa e as partículas do agregado. Mesmo seus elementos possuindo altas rigidezes, a rigidez do concreto será afetada devido às partes fragilizadas da zona de transição que não permitem a transferência de tensões. Em geral pode-se melhorar o desempenho da zona de transição, tendo uma relação água/cimento, porosidade e dimensão máxima do agregado reduzidas (MEHTA, et al., 2008).

## 2.8 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

No fim dos anos 60, aditivos superplastificantes<sup>8</sup> compostos de sulfonato de naftaleno e sulfonato de melanina foram desenvolvidos no Japão e também na Alemanha. Sua aplicação se deu inicialmente na confecção de pré-moldados onde se necessitava de altas resistências e também em vigas e pontes moldadas *in loco*, assim como, em peças de concreto submerso. Já que é possível se obter alta resistência e alta trabalhabilidade simultaneamente, esses concretos são adequados a produção de pré-moldados e edifícios altos (MEHTA et al., 2008).

Até a década de 1970, antes da popularização dos superplastificantes, os concretos, chamados de alta resistência, apresentavam resistência da ordem de 40MPa aos 28 dias. Com o aparecimento de concretos de 60 à 120 MPa, o *ACI Committee on Hight Strength Concrete*, revisou a definição abrangendo dosagens com fck de projeto acima de 55 MPa (MEHTA et al., 2008).

## 2.9 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

### 2.9.1 Histórico

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é assim chamado, pois suas propriedades diferem de concretos convencionais. MEHTA e AITICIN (1990) propuseram o termo *Concreto de Alto Desempenho – CAD (HPC – Hight-Performance Concrete)* para concretos com três propriedades destacadas: alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade (apud MEHTA et al., 2008, p. 493).

---

<sup>8</sup> Aditivos Superplastificantes, são substancias redutoras de água de alta eficiência, reduzem de três à quatro vezes a água necessária em uma mistura de concreto (MEHTA et al., 2008).

A produção de CAD é possível acrescentando a mistura do concreto, adições minerais como sílica ativa e aditivos superplastificantes redutores de água. O emprego do CAD é muito apropriado para projetos de estruturas onde a grande durabilidade é requisito fundamental para sua viabilização. As elevadas classes de resistências que se podem atingir com utilização de concreto de alto desempenho, permitem a diminuição das dimensões dos elementos estruturais, aliviando assim o peso próprio da estrutura e aumentando o espaço útil da edificação (PINHEIRO, 2007).

Esses concretos apresentam relação água/cimento muito baixa, reduzindo a porosidade e a permeabilidade do concreto, tornando-o mais durável, e a alta resistência nas primeiras idades permite um tempo menor para a desforma da estrutura (HARTMANN et al. 2003).

As justificativas para a utilização de CAD vão muito além das suas propriedades mecânicas elevadas. Sua durabilidade constitui-se no principal fator que viabiliza sua utilização (MEHTA, 1999).

### 2.9.2 Definições

Não existe ainda um consenso claro entre as definições de concreto de alto desempenho (CAD) e concreto de alta resistência (CAR), muitas vezes se acabam confundindo suas propriedades. Porém define-se concreto de alta resistência apenas com base em sua resistência a compressão em uma dada idade, já no concreto de alto desempenho são considerados outros fatores como durabilidade, trabalhabilidade e também resistência (MEHTA et al., 2008).

### 2.9.3 Importância e Viabilidade

No passado, a maior parte das estruturas dos edifícios altos eram feitas de aço. Hoje, cerca de um terço dos edifícios altos do mundo tem estrutura de concreto, provavelmente devido a rapidez da construção e a disponibilidade comercial de concretos de alta resistência, o que era impraticável no passado. Isso proporcionou uma alternativa altamente viável do ponto de vista econômico para pilares dos pavimentos inferiores desses edifícios. Um exemplo dessa utilização é o edifício e-Tower na cidade de São Paulo, figura 2.7, onde foi utilizado concreto de alto desempenho colorido de 108 à 149 MPa, com média de 125MPa aos 28 dias em alguns pilares dos primeiros seis pavimentos, visando diminuição das

dimensões e ter um ganho nas vagas no estacionamento, que na região da vila Olímpia em São Paulo tem um custo aproximado de US\$ 5.000,00. O emprego do CAD, para a redução dos pilares nessa obra, gerou um ganho de 16 vagas, equivalentes à US\$ 80.000,00 (HARTMANN et al. 2003).



**Figura 2.7** – Edifício e-Tower em São Paulo, recorde mundial de resistência na utilização de concreto de alto desempenho colorido (fck médio de 125 MPa). (HELENE et al., 2002)

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/E-Tower>

Na construção de edifícios de concreto armado, com mais de 30 pavimentos, pode-se adotar concepções que tenham pilares com dimensões normais na parte superior e pilares reduzidos com adoção de CAD nos níveis mais inferiores onde a magnitude dos esforços exige mais trabalho da estrutura (MEHTA, 2008). Esse tipo de concepção propicia um melhor aproveitamento de vagas de estacionamento nos subsolos, além de reduzir as taxas de armaduras, com relação à um concreto convencional de referência e aumentar a durabilidade da estrutura nesses níveis, onde as solicitações acabam por exigir um comportamento diferenciado dos elementos estruturais.

## 2.9.4 Materiais

### 2.9.4.1 Cimento

Cimento Portland comum de qualquer tipo conforme classificação da ASTM C150 podem ser utilizados para obtenção de traços com resistência de até 50 MPa. Para se atingir maior resistência, aliada à boa trabalhabilidade, necessita-se a utilização de aditivos químicos e adições minerais ao cimento. Em casos desse tipo é importante se avaliar também a compatibilidade química entre cimento e aditivo. (MEHTA et al., 2008).

### 2.9.4.2 Agregado Graúdo

Em concretos de resistência normal, o tipo e qualidade do agregado exercem papel importante na estabilidade dimensional do concreto e na zona de transição. A dimensão máxima do agregado pode ser reduzida visando ganho de resistência, devido ao efeito benéfico na zona de transição, além de serem importantes para o módulo de elasticidade (MEHTA et al., 2008). As definições seguem conforme o descrito no item 2.6.2.

### 2.9.4.3 Agregado Miúdo

Qualquer material que atenda as especificações da ASTM C39 é adequado para dosagens de concreto de alta resistência. AITICIN (1990) recomenda a utilização de agregados miúdos com módulo de finura<sup>9</sup> da ordem de 3,0 uma vez que os materiais pozolânicos constituintes da mistura já possuem partículas muito finas e a utilização de partículas maiores de agregado resulta na menor necessidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade (apud MEHTA et al., 2008).

---

<sup>9</sup> Soma das porcentagens retidas acumuladas em todas as peneiras da série normal (ASTM #16 à ASTM #100) dividida por 100. Quanto maior o módulo de finura mais grosso é o agregado.

#### 2.9.4.4 Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como microssílica é um subproduto, altamente pozolânico, da indústria de silício metálico e ligas de ferro-silício, obtida processo de redução do quartzo em silício a temperaturas de até 2000°C (MEHTA et al., 2008).

Segundo MALHOTRA e CARETTE (1983), a utilização de sílica ativa proporciona um melhor empacotamento das partículas de cimento e seu desempenho se deve as suas características físico-químicas que gera uma alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento (apud MENDES, 2002).

#### 2.9.4.5 Aditivos Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes, também chamados de redutores de água de alta eficiência, devido a sua capacidade de reduzir de três a quatro vezes a água necessária a uma determinada mistura de concreto quando comparado com aditivos convencionais. Seu desenvolvimento se deu à partir da década de 1970 e é amplamente aceito e empregado na indústria do concreto. São constituídos basicamente de surfactantes aniônicos de cadeia longa, com grande massa molecular e possuem grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. Seu mecanismo de ação consiste na diminuição da tensão superficial da água quando é adsorvido pelas partículas de cimento, dando forte carga negativa ao sistema e alterando as propriedades reológicas da mistura (MEHTA et al., 2008).

#### 2.9.4.6 Fator Água/Cimento

A água em uma mistura de concreto tem o papel de hidratar as partículas de cimento, iniciando assim as reações que levam a formação de cristais e solidificação do concreto.

Em 1918, Duff Abrams descobriu através de ensaios em mais de 50.000 corpos-de-prova, desenvolvidos no Instituto Lewis (*University of Illinois*), que existe uma relação inversamente proporcional entre relação água/cimento e resistência do concreto. Conhecida como lei de Abrams da relação água/cimento, pode-se representar a relação existente entre resistência e relação água/cimento através da equação 2.2.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (2.2)$$

Onde:

$a / c$  = relação água/cimento

$k_1$  e  $k_2$  = constantes empíricas

Levando-se em conta os fatores responsáveis pela resistência do concreto, pode-se facilmente compreender a relação existente entre relação a/c e resistência, onde isso se explica pelo enfraquecimento progressivo da matriz devido ao aumento da porosidade advinda do aumento da relação água/cimento (MEHTA et. al, 2008; HELENE, 1993).

MEHTA e MONTEIRO no livro “*Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*”, publicado no Brasil em 2008, afirmam que em concretos de alta resistência, para relações água/cimento abaixo de 0,3, pode-se obter aumentos desproporcionalmente elevados na resistência a compressão, com reduções muito pequenas na relação água cimento, diferentemente de concretos de resistência média/baixa, onde a porosidade na zona de transição é determinante para a resistência final, mantendo constante a relação entre relação água/cimento e resistência do concreto.

## 2.10 O CAD E O MEIO AMBIENTE

Um tema amplamente discutido no mundo hoje, é o aquecimento global, que se refere ao constante aumento da temperatura na superfície terrestre à partir dos anos 50. Esse fenômeno tem causado efeitos catastróficos em todo planeta, tais como derretimento de geleiras, mudanças climáticas e desastres naturais. Pesquisadores e cientistas encontraram uma co-relação linear entre o aquecimento global e o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (MEHTA, 2008).

Antes da revolução industrial, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera se mantinha em torno de 280 ppm<sup>10</sup>. Entre os anos de 1950 e 2000, esse número saltou para 390 ppm. Estima-se que essa concentração nos dias atuais seja de 400 ppm e crescente à uma taxa média de 2,0

---

<sup>10</sup> ppm – partes por milhão

ppm/ano, conforme o relatório *Carbon Budget and Trends 2007*<sup>11</sup> (Receitas e Tendências para o Carbono 2007, em livre tradução), publicado pela organização *Global Carbon Project*. Segundo os autores: “A atual concentração é a maior durante os últimos 650 mil anos e provavelmente durante os últimos 20 milhões de anos” afirmam.

Na década de 60 o consumo anual de concreto era da ordem de 3 bilhões de toneladas/ano, pouco mais que 1 tonelada *per capita*. Hoje esse consumo chega à 20 bilhões de toneladas/ano (3 toneladas *per capita*). Sabe-se que na indústria do concreto, 90% das emissões de CO<sub>2</sub> são provenientes da produção de clínquer para fabricação do cimento Portland. A proporção de CO<sub>2</sub> emitida na atmosfera para produção de clínquer é de cerca de 1:1, ou seja, 1 tonelada de CO<sub>2</sub> é gerada para se produzir 1 tonelada de clínquer Portland (MEHTA, 2008).

As emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de cimento Portland, saltaram de 940 milhões de toneladas em 1990, para 1,74 bilhões de toneladas no ano de 2005, o que nos mostra que durante os últimos 15 anos, a indústria do cimento dobrou suas emissões de dióxido de carbono no planeta (MEHTA, 2008).

Registra-se que nos dias atuais, 45% do concreto utilizado no mundo, é consumido por edifícios novos, 15% em obras de infra-estrutura e 40% no reparo e renovação de ambientes já construídos.

MEHTA em 2008<sup>12</sup> propôs a redução do consumo de clínquer na produção do cimento Portland e sua substituição por outros materiais pozolânicos menos poluentes tais como a cinza volante, areia de fundição e adoção de cimentos ternários, bem como a diminuição do consumo de concreto e o aumento da durabilidade das estruturas, diminuindo a demanda por clínquer Portland altamente poluente.

## 2.11 ESTUDO DE CASO

Com intuito de verificar a aplicabilidade de concretos de classe de resistência elevada no dimensionamento de um edifício, decidiu-se por fazer um dimensionamento comparativo, dentro dos limites da NBR 6118:2003, de um edifício de 41 pavimentos com concretos da classe C25 e C50.

---

<sup>11</sup> “Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera é a maior em 20 milhões de anos, diz estudo” – Jornal Folha de S. Paulo de 26/09/2008, disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u449053.shtml>

<sup>12</sup> Palestra proferida durante o 51º Congresso Brasileiro do Concreto – Salvador – BA. Apresentação disponível na íntegra em: [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/plenarias/KUMAR\\_METHA.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/plenarias/KUMAR_METHA.pdf)

### 2.11.1 Materiais e Métodos

Utiliza-se o exemplo de um edifício de concreto armado do acervo técnico da SRTC Engenharia e Projetos Ltda., Trata-se de um empreendimento para fins residências com 40 lajes, sendo 34 pavimentos tipo, localizado na cidade de São Paulo-SP.

Para efetuar os cálculos e verificações dos dimensionamentos de maneira automatizada, foi utilizado o software de engenharia estrutural TQS, versão 14.4, onde foi balizado conforme critérios da NBR 6118:2003, e adotado o modelo de análise por pórtico espacial conforme disponibilidade do sistema.

No primeiro processamento (processamento 1) adota-se o concreto classe C25, para todos os pavimentos do edifício. No segundo processamento (processamento 2) utiliza-se o concreto C50 até o piso do 8º pavimento, C40 até o piso do 20º pavimento e C35 até a cobertura. No terceiro processamento (processamento 3) foi utilizado concreto C25 com a estrutura redimensionada conforme os resultados obtidos com o processamento 1. No quarto e último processamento (processamento 4) redimensiona-se a estrutura com o fck do processamento 2.

Após os processamentos, foram analisados os resultados e feitos ajustes nas dimensões dos elementos a fim de tornar o modelo compatível com o dimensionamento. Após essa análise os processamentos 3 e 4 foram processados novamente com as novas dimensões necessárias para garantir a estabilidade do edifício, bem como o dimensionamento mais econômico dentro de cada classe de concreto.

### 2.11.2 Carregamento

Para os exemplos, adota-se a arquitetura do pavimento tipo, como sendo comum a todos os pavimentos, exceto o ático e cobertura. O carregamento adotado (cargas e sobrecargas) seguiu diretrizes da NBR 6120:1980, conforme tabela 2.4. Em ambos os dimensionamentos, não se considera o cálculo dos elementos de fundação, visto que, o objetivo principal desse estudo é verificar o comportamento de pilares e vigas, onde as dimensões têm grande relevância no conjunto estrutural, e elementos de fundação, tendo dimensões maiores, podem se valer de concretos com classe de resistência inferior.

**Tabela 2.4 – Carregamento dos Pavimentos do Edifício Utilizado no Estudo (kN/m<sup>2</sup>).**

Pavimento	Sobrecarga	Revestimento	Impermeabilização	Reservatório	Mesa dos Motores
2° Subsolo	1,5	1,5	1,0	-	-
1° Subsolo	1,5	1,5	1,0	-	-
Térreo	1,5	1,5	1,0	-	-
1° ao 34° Tipo	1,5	1,5	1,0	-	-
Casa de Máquinas	2,0	1,5	1,0	-	30,0
Ático	2,0	1,5	1,0	13,0	-
Cobertura	1,5	1,5	1,0	-	-

Os esforços devido ao vento foram calculados em ambos os casos, atendendo as especificações da NBR 6123:1988. Os casos de vento e dados dos coeficientes de arrasto definidos na tabela 2.5.

**Tabela 2.5 – Casos de Incidência de Vento e Coeficientes de Arrasto adotados.**

Caso	Ângulo	C.A. <sup>1</sup>	Cota Inicial <sup>2</sup>
1	90	1,08	98,00
2	270	1,08	98,00
3	0	0,94	98,00
4	180	0,94	98,00

<sup>1</sup> C.A. - Coeficiente de Arrasto.

<sup>2</sup> Cota do Pavimento Térreo.

A velocidade básica do vento, características do terreno, rugosidade, classe da edificação e fator estatístico foram obtidos conforme as definições da mesma norma e seguem listados na tabela 2.6.

**Tabela 2.6 – Parâmetros para o Cálculo de Esforços devidos ao Vento<sup>1</sup>**

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade Básica (V <sub>0</sub> )	35,00	m/s
Fator Topográfico (S1)	1,00	-
Categoria da Rugosidade (S2)	IV	-
Classe da Edificação (S2)	C	-
Fator Estatístico (S3)	1,10	-

<sup>1</sup> Parâmetros de Vento da NBR 6123:1988

Os coeficientes de arrasto foram calculados conforme recomendação da NBR 6123:1988, levando em consideração as dimensões de cada face edifício. Os demais critérios foram adotados levando-se em conta a localização da edificação, tendo em vista que se localiza em uma região densamente habitada com vários edifícios de porte elevado em sua vizinhança.

A distribuição de cargas por pavimento, retirada do resumo estrutural do software TQS, segue na tabela 2.7.

**Tabela 2.7 – Distribuição de Cargas por Pavimento e Soma de Reações.**

<b>Pavimento</b>	<b>Piso</b>	<b>Carga aplicada (tf)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga média (tf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Soma de reações (tf)</b>
Cobertura	41	321.9 - 25.6 = 296.3	195.0	1.65	280.3
Ático	40	29.0 - 29.0 = .0	6.8	4.25	.0
Cobertura 34°	39	640.3 - 76.3 = 564.0	291.0	2.20	531.3
34° Pavimento	38	545.5 - 95.4 = 450.1	392.3	1.39	432.8
16° ao 33° Tipo	20-37	541.9 - 92.9 = 449.0	393.6	1.38	432.0
1° ao 15° Tipo	5-19	545.9 - 96.9 = 449.0	393.7	1.39	431.5
Mezanino	4	549.2 - 100.1 = 449.1	393.9	1.39	431.5
Térreo	3	584.8 - 135.8 = 449.1	393.9	1.48	431.5
1° Subsolo	2	547.5 - 98.5 = 449.0	393.9	1.39	431.5
2° Subsolo	1	459.0 - 9.8 = 449.2	393.9	1.17	431.5
Fundação	0	.0 - .0 = .0	.0	.0	.0
		<b>21620.2 - 3695.5 = 17924.6</b>	<b>15451.1</b>	<b>1.40</b>	<b>17218.8</b>

#### 2.11.2.1 Redução de Sobrecargas

Conforme NBR 6118:2003, adota-se a redução de sobrecargas nos pavimentos tipo conforme tabela 2.8. Em ambos os dimensionamentos não foram considerados esforços provenientes de desaprumo e empuxo, por não serem preponderantes na análise em questão, conforme item 11.3.3.4.1 da NBR 6118:2003.

**Tabela 2.8 – Fatores Redutores de Sobrecargas**

Pavimento	Redutor
34° Tipo à Cobertura	0,00
33° Tipo	0,20
32° Tipo	0,40
1° ao 31° Tipo	0,60
Fundação ao Mezanino	0,00

### 2.11.3 Resultados e Discussão do Estudo de Caso

Para avaliação dos resultados foram utilizados os relatórios intermediários do software TQS e o resumo estrutural emitido pelo mesmo. Foram avaliados parâmetros quantitativos como taxas de armadura, taxas de formas, volume de concreto assim como parâmetros qualitativos e a estabilidade global. A fim de simplificar a visualização dos resultados decidiu-se por expô-los em tabelas e apresentar a discussão dos resultados logo em seguida.

No primeiro processamento (processamento 1), adotando a concepção original do edifício, nota-se que muitos pilares não passam no cálculo no estado limite último, o que inviabiliza utilização do fck 25MPa para a primeira concepção.

No segundo processamento (processamento 2), onde foram adotados os concretos C50, C40 e C35, houve uma grande folga no dimensionamento da grande maioria dos pilares o que possibilita a redução de dimensões e reprocessamento visando à economia de concreto e o equilíbrio com consumo de aço, através do aumento das taxas de armadura.

No terceiro processamento (processamento 3), foi utilizado concreto da classe C25, porém necessitou-se um redimensionamento da estrutura, visando à máxima conformidade com a arquitetura aliada a segurança estrutural.

No quarto e último processamento, a estrutura foi recalculada com o fck do processamento 2 e dimensões de pilares revisadas e reduzidas trabalhando em estado limite de utilização.

### 2.11.3.1 Estabilidade Global

O cálculo do coeficiente  $\gamma_z$  em todas as combinações de carregamentos para as concepções analisadas seguem na tabela 2.9.

**Tabela 2.9 – Valores máximos de  $\gamma_z$  para os respectivos processamentos.**

Processamento	Concreto	$\gamma_z$	Situação
1	C25	1,37	Não OK
2	C50	1,27	OK
3	C25	1,28	OK
4	C50	1,24	OK

Observamos nesse caso que com a grande diminuição da rigidez, em função do menor módulo de elasticidade do concreto C25, houve uma perda de estabilidade, o que inviabiliza a utilização da primeira concepção com  $f_{ck}$  25MPa. No terceiro processamento houve ganho de estabilidade, mantendo-se o  $f_{ck}$  em 25MPa e aumentando a dimensão dos pilares, o que levou ao aumento global da rigidez original com concreto C25. Isso resultou em:  $\gamma_z = 1,28$ . Esse valor, embora alto, demonstra que a estrutura se encontra dentro dos limites aceitáveis de estabilidade para uma estrutura de nós móveis ( $1,1 \leq \gamma_z \leq 1,3$ ). Poderíamos melhorar o resultado, aumentando a rigidez do pórtico através do aumento das dimensões dos pilares ou do módulo de elasticidade do concreto aliado ao aumento de suas taxas de armadura, onde essa se encontra abaixo da taxa máxima.

No processamento 2 a concepção original teve grande ganho de rigidez devido ao elevado módulo de elasticidade do concreto classe C50 e as dimensões originais da concepção, o que possibilita um redução nos elementos estruturais (pilares) sem grande perda de estabilidade global conforme observado no processamento 4. Nele foram reduzidas as dimensões dos pilares onde se observou folga em relação aos esforços. O relativo aumento de rigidez no processamento 4, mesmo com redução de dimensões, possivelmente se deu ao aumento da taxa de armadura, que veio como consequência da redução do consumo de concreto.

### 2.11.3.2 Deslocamento Horizontal

Os deslocamentos horizontais dependem diretamente da rigidez e sua avaliação é fundamental, principalmente nos andares superiores, onde devem se encontrar dentro de limites aceitáveis de conforto e segurança.

Apresentam-se na tabela 2.10 os valores limites e máximos dos deslocamentos horizontais para o caso mais desfavorável de cálculo.

**Tabela 2.10 – Deslocamentos Horizontais do Edifício**

Processamento	Deslocamento	Valor máximo (cm)	Caso	Referência (cm)	Situação
1	Topo do edifício (cm)	(H/ 1845) 6.48	5	(H/ 1700) 7.03	OK
	Entre pisos (cm)	(Hi/ 1510) 0.20	5	(Hi/ 850) 0.36	OK
2	Topo do edifício (cm)	(H/ 2485) 4.81	5	(H/ 1700) 7.03	OK
	Entre pisos (cm)	(Hi/ 1972) 0.15	5	(Hi/ 850) 0.36	OK
3	Topo do edifício (cm)	(H/ 2223) 5.39	5	(H/ 1700) 7.06	OK
	Entre pisos (cm)	(Hi/ 1781) 0.17	5	(Hi/ 850) 0.36	OK
4	Topo do edifício (cm)	(H/ 2458) 4.86	5	(H/ 1700) 7.03	OK
	Entre pisos (cm)	(Hi/ 1957) 0.15	5	(Hi/ 850) 0.36	OK

Nota-se que, em todos os processamentos em seus casos mais desfavoráveis, os valores de deslocamento horizontal estão dentro dos limites. Isso se deve a concepção original dotada de pilares parede que dão grande rigidez ao pórtico espacial, tornando-o menos suscetível à esse tipo de deformação.

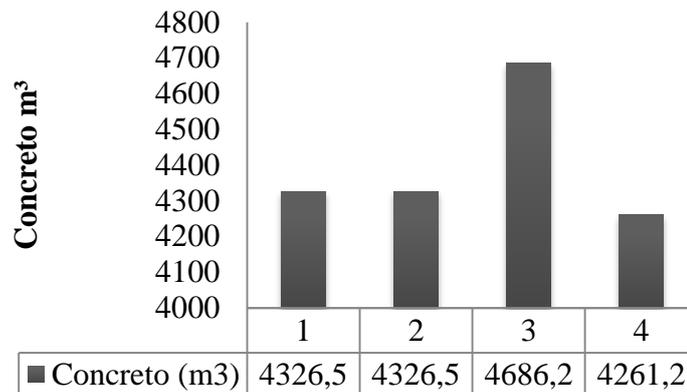
### 2.11.3.3 Consumo de Materiais

#### 2.11.3.3.1 Consumo de Concreto e Formas

Para quantificar o consumo de concreto, formas e aço utilizados nos respectivos processamentos, foi utilizado o resumo estrutural fornecido pelo software TQS, onde se avaliou os quantitativos e para melhor visualização optou-se por expor de forma gráfica os resultados obtidos. Os gráficos 2.1 ao 2.4 mostram o consumo total de concreto em cada processamento, bem como o consumo isolado entre pilares vigas e lajes, os gráficos 2.5 ao 2.8

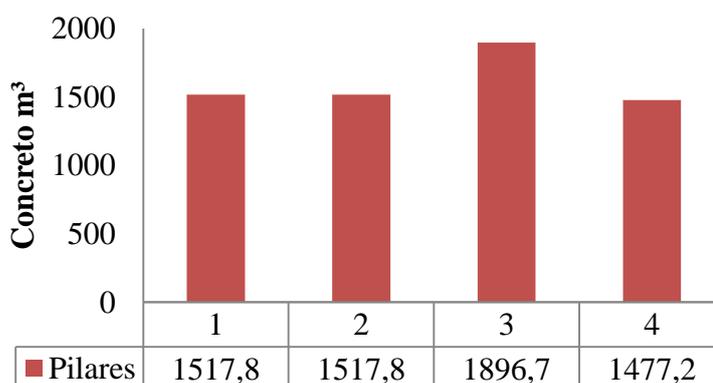
mostram o consumo total de formas e separadamente os consumos referentes aos pilares, as vigas e as lajes.

**Gráfico 2.1 – Consumo Total de Concreto em cada processamento.**



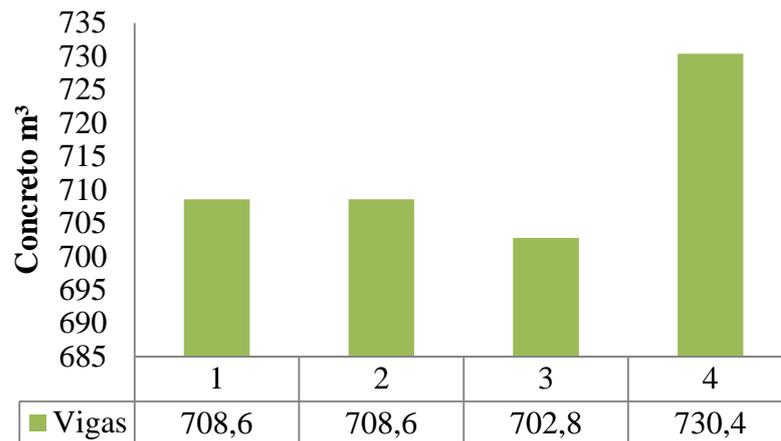
Como nos processamentos 1 e 2, não houve alterações nas dimensões dos elementos estruturais o consumo de concreto permaneceu inalterado. No processamento 3 houve um aumento de 8,31% no consumo de concreto. Isso se deve ao aumento das dimensões dos pilares afim de atingir o melhor resultado para o concreto de classe C25 e melhorar a estabilidade global da estrutura. No processamento 4, com utilização de concreto classe C50, foi possível uma redução nas dimensões de pilares. Vigas e lajes não foram alteradas devido à características arquitetônicas pré-estabelecidas. Com essas reduções foi possível uma economia de 1,5% no consumo total de concreto em relação ao processamento 2, o que representa 65,3m<sup>3</sup> à menos de concreto, e uma economia de 9,97% com relação ao processamento 3, ou seja, uma economia de 425 m<sup>3</sup> de concreto.

**Gráfico 2.2 – Consumo Total de Concreto nos Pilares.**



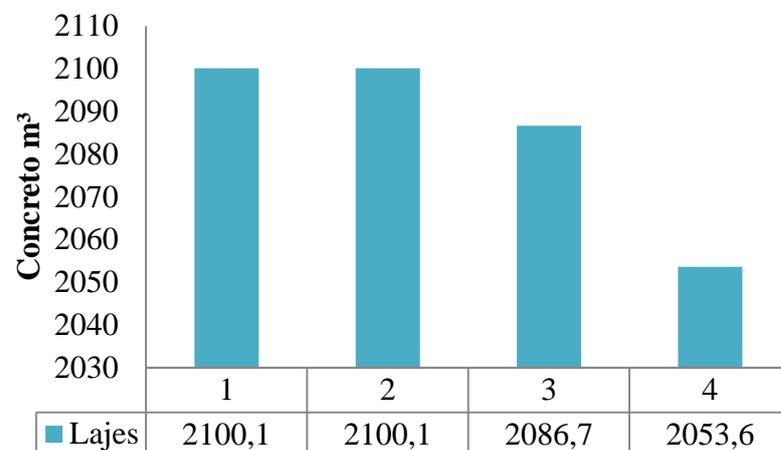
Com relação aos pilares observamos a mesma tendência já observada no consumo total, uma vez que foram os elementos que sofreram redução no processamento 4.

**Gráfico 2.3 – Consumo de Total de Concreto nas Vigas.**



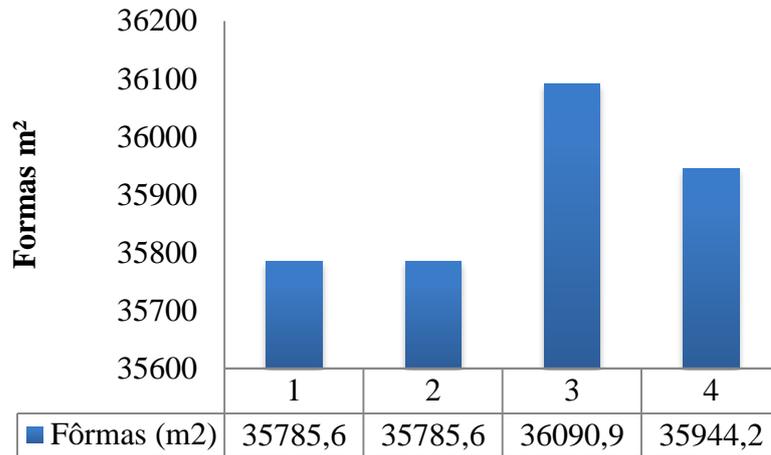
Diferentemente dos casos anteriores, nas vigas houve um aumento sensível no consumo total de concreto, isso devido as dimensões terem sido mantidas pelas características arquitetônicas e de acabamento e também a conseqüente redução de dimensões de pilares no sentido longitudinal das vigas. Isso gerou um pequeno aumento no comprimento que somados resultou num acréscimo de 3,07% em relação aos volumes 1 e 2, e de 3,93% em relação ao volume 3 que diminui pelo efeito oposto ao do processamento 4, onde os pilares foram aumentados, diminuindo o comprimento das vigas em alguns casos.

**Gráfico 2.4 – Consumo Total de Concreto nas Lajes**



Observa-se uma redução no consumo de concreto nas lajes do processamento 4 em relação aos demais, devido a folga no dimensionamento que possibilitou a redução na espessura das lajes, resultando na economia de 46,5m<sup>3</sup> de concreto.

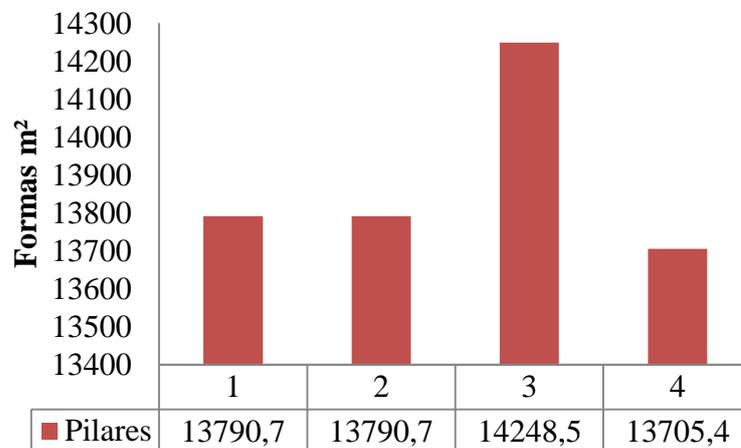
**Gráfico 2.5 – Consumo Total de Formas (m<sup>2</sup>)**



O consumo de formas conforme observado no gráfico acima mostra claramente o aumento no consumo no processamento 3 e também no processamento com relação ao processamento 1 e 2, porém comparando 3 e 4 isoladamente, vemos uma redução importante nesse consumo.

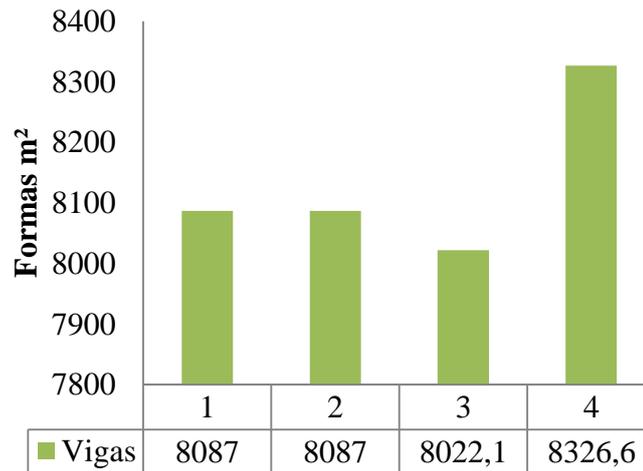
Abaixo podemos comprar isoladamente o consumo de formas em cada parte da estrutura.

**Gráfico 2.6 – Consumo Total de Formas nos Pilares (m<sup>2</sup>)**



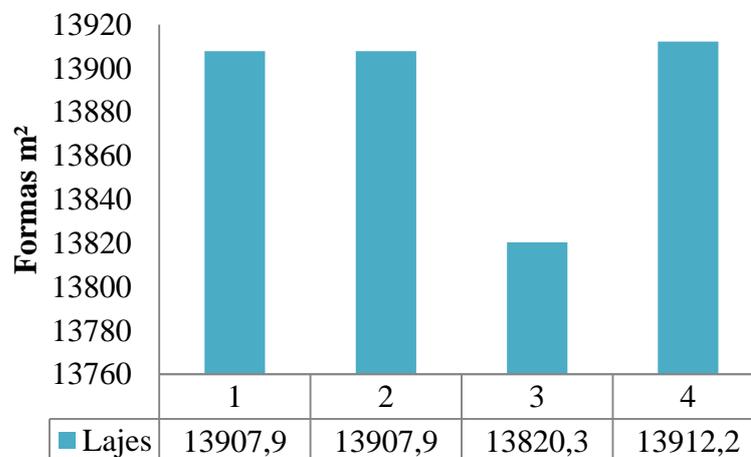
No gráfico 5.6 acima se observa redução no consumo de formas nos pilares, devido ao redimensionamento com tamanhos reduzidos, no processamento 3 há um aumento significativo devido ao aumento da seção dos pilares, os processamento 1 e 2 servem como referência.

**Gráfico 2.7 – Consumo de Formas nas Vigas**



Similar ao consumo de concreto, o efeito do aumento (processamento 3) e redução na seção dos pilares (processamento 4) causou o mesmo impacto no consumo de formas, porém o consumo final não sofreu influência dessa variação uma vez que o consumo de formas nos pilares é muito mais relevante nesse edifício que o das vigas.

**Gráfico 2.8 – Consumo de Formas nas Lajes**



O aumento do consumo de formas no caso das lajes no processamento 4, se deve principalmente ao aumento da área estruturada por lajes, resultante da redução das seções dos pilares, o que também não gerou impacto no consumo final referente ao processamento 4.

#### 2.11.3.3.2 Consumo de Aço

O consumo de aço na estrutura de um edifício é um fator preponderante na viabilidade e econômica do empreendimento face ao impacto que o custo e consumo do material geram no custo global. Através das tabelas 2.11 e 2.12, podemos observar os valores do qualitativo global de aço nos quatro processamentos bem como as taxas e índices indicadores de consumo, para melhor visualizar os resultados também se apresenta os dados constantes nas respectivas tabelas nos gráficos 2.9 e 2.10.

**Tabela 2.11 – Consumo Total de Aço por Processamento**

Processamento	Consumo de Aço (kg)
1	1.089.248,80
2	653.626,00
3	751.930,50
4	642.034,90

**Tabela 2.12 – Consumo e Taxas de Armadura, Formas e Concreto**

Processamento	Aço (kg)	Concreto (m <sup>3</sup> )	Formas (m <sup>2</sup> )	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
1	1.089.248,80	4.326,50	35.785,30	251,76	30,44	0,121
2	653.626,00	4.326,50	35.785,30	151,08	18,27	0,121
3	751.930,50	4.686,20	36.090,90	160,46	20,83	0,130
4	642.034,90	4.261,20	35.944,20	150,67	17,86	0,119

Conforme observamos nos quantitativos de aço e taxas de armação, formas e concreto, nota-se maior consumo de aço nos processamentos onde a resistência de projeto ( $f_{ck}$ ) é menor e o consumo de concreto é maior.

No processamento 1 onde se utilizou a concepção inicial com concreto classe C25, embora a segurança estrutural esteja comprometida, o consumo de aço nesse caso foi o maior, devido principalmente às altas taxas de armadura nos pilares onde muitos não passaram.

No caso do processamento 2, onde os concretos utilizados foram C50, C40 e C35, observa-se uma queda de 40% no consumo de aço para o mesmo consumo de concreto, diminuindo assim a taxa de formas e mantendo constante a taxa de formas.

No processamento 3 (fck 25MPa), onde as dimensões da estrutura foram revisadas, visando a estabilidade global da estrutura, aumentou-se o consumo de concreto e de formas visualiza-se, em relação ao primeiro processamento, uma queda de 31% no consumo e nas taxas de armaduras, porém se comparado ao processamento 2 nota-se um aumento de 15% no consumo de aço aliado à um aumento de 8% no consumo de concreto e de 0,85% na taxa de formas.

No quarto e último processamento, onde o dimensionamento foi feito em função das classes de concreto empregadas (C50, C40 e C35) procurando-se um dimensionamento ótimo dos pilares com seção constante, trabalhando em estado limite de utilização nos pavimentos inferiores, tendo as taxas e seções reduzidas ao longo da seção conforme o alívio de cargas. Nota-se que esse processamento utilizou o menor volume de concreto, menor consumo de aço e de formas. As reduções no consumo de aço chegam à 17,12% em relação ao processamento 3 e 1,81% se comparado ao processamento 2.

## 2.12 DISCUSSÕES COMPLEMENTARES E SUGESTÕES PARA EQUACIONAR O PROBLEMA LEVANTADO

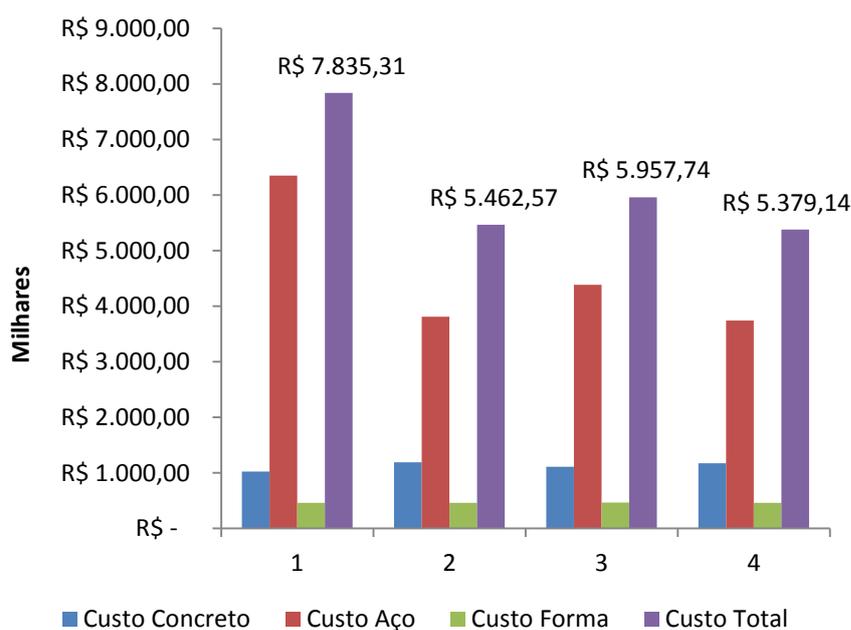
Conforme se avaliou no estudo de caso e procurou-se expor na revisão de literatura, a utilização de concretos de resistências mais altas tende a se tornar a escolha mais econômica e sustentável no longo prazo. Essas estruturas necessitam de menos manutenção, tem durabilidade maior devido à maior compacidade do concreto, além de diminuir o consumo de concreto, aço e formas.

Em edifícios altos, com até 100 pavimentos, é comum se utilizar concretos com classes de resistência superior à 50MPa. A NBR 6118:2003, limita a resistência de projeto em 50MPa para o concreto, porém os institutos de normalização europeu (CEB e EUROCODE) e norte-americano (ASTM e ACI) já prevêm em seus códigos a utilização de concretos com resistência de até 200MPa. Na Europa é comum a comercialização desse tipo de concreto nas

obras usuais. Como a aplicação desse tipo de concreto no Brasil ainda é limitada, o custo de concretos com resistências mais altas ainda é elevado.

Fazendo um comparativo de custos entre as quatro opções avaliadas no estudo de caso, podemos comparar os custos globais envolvidos em cada processamento como observamos no gráfico 2.9.

**Gráfico 2.9 – Custos Totais por Processamento<sup>13</sup>**

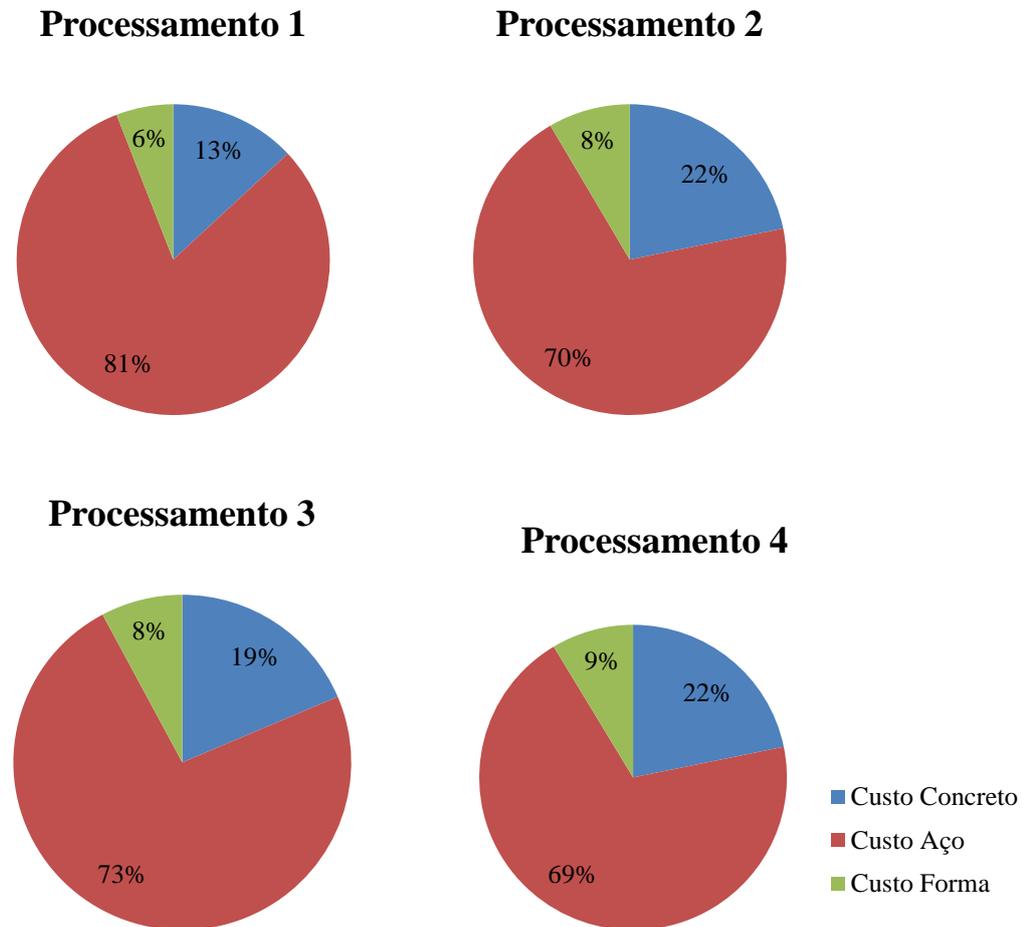


Notamos que os custos envolvendo o concreto e formas, embora importantes, pouco influenciam no custo total da estrutura quando comparados com o custo do aço. No caso 4 foi possível uma redução de 10,76% e de 1,55% nos custos totais, em relação aos casos 3 e 2 respectivamente.

Se analisarmos do ponto de vista percentual no Gráfico 2.10, pode-se observar que em todos os casos o consumo de aço é responsável por mais de 70% do custo total da estrutura, já computado a mão de obra e materiais adicionais, exceto no caso do concreto onde se aplicou apenas o valor unitário por m<sup>3</sup> do material em cada caso.

<sup>13</sup> Valores com base no banco de dados da editora PINI – Software TCPO 13ª edição – dados de out/2009.

**Gráfico 2.10 – Comparação entre valores percentuais do custo total de Aço-Concreto-Formas em todos os processamentos.**



Comparativamente ao primeiro caso, nota-se um aumento de 2% no consumo de formas nos casos 2 e 3 e um aumento de 3% em relação ao 4 conforme já mencionado em 2.11.3.3.1.

A parcela do custo de concreto, nos casos 2 e 4, onde se utilizou concretos de alta resistência (fck 50, 40 e 35) tende a ser maior devido ao custo superior dessas classes de resistência em relação ao concreto fck 25MPa, embora os valores do caso 4 sejam menores devido à diminuição do volume total de concreto empregado.

O consumo de aço, como demonstrado anteriormente é o principal fator de influencia no custo final da estrutura, devido ao alto valor agregado em sua produção e os custo de transporte. Além de estar sujeito à variações súbitas de preço por razões de subida de preços de commodities como o minério de ferro.

O caso 1 serviu apenas como referência aos outros casos, uma vez que sua execução fica impossibilitada devido à problemas de segurança estrutural já mencionados anteriormente.

O caso 2, com aumento do fck, podemos notar uma queda acentuada no consumo de aço, e um aumento sensível no custo de concreto para o mesmo volume empregado no caso 1, uma vez que a estrutura não sofreu alterações em suas dimensões, mantendo assim constantes a área de formas.

Comparando o caso 2 com o caso 3 (onde o fck 25MPa é aplicável), nota-se que embora se tenha um consumo menor de concreto no caso 2, seu custo total é maior devido a diferença de valor em as diferentes classes de concreto. Nesse caso o consumo de aço e formas pesam à favor do aumento de custos no caso 3 que possui taxas de forma e armadura maiores que o caso 2 (Tabela 2.10).

A variação do fck do concreto gerou no caso 4, diminuição no consumo de aço e concreto simultaneamente, porém com um aumento na área de formas, não significativo no custo final dessa estrutura. Como houve diminuição nas dimensões dos pilares, as taxas globais de armadura subiram, entretanto ficaram menores que todas as demais, proporcionando assim um menor consumo de concreto e aço, resultando em uma economia global de até 10,76%.

Observado o fato que estruturas construídas concretos de resistência maior tendem a necessitar de menos manutenção e tem uma vida útil maior, podemos dizer que a aplicação de CAD tem se tornado uma alternativa extremamente viável, pois proporciona os melhores resultados globais de curto, médio e longo prazo.

Ambientalmente, a diminuição no consumo de materiais é de extrema importância para a preservação de recursos naturais e energéticos, uma vez que as indústrias de cimento e aço têm grande demanda por energia e recursos naturais.

Nesse cenário, a aplicação de concretos e resistências superiores à 50 MPa, se mostra como a alternativa mais viável para que o setor atinja a sustentabilidade no longo prazo. Para tal, se faz necessário que as normas vigentes se atualizem e passem a incorporar classes de resistência superiores à 80MPa como preveem as normas internacionais.

Para minimizar os problemas apresentados, poderíamos sugerir:

- Intensificação das pesquisas no âmbito do concreto de alto desempenho e de alta resistência que visem à diminuição, cada vez maior, no consumo de cimento na mistura;
- Incentivo a realização de cursos sobre o tema, através dos centros de pesquisas e instituições de ensino, assim como, estimulado a publicações com abordagens sobre o tema;
- Adequação dos projetos, visando estruturas que possam durar um período maior do que o atualmente utilizado em projeto, eliminando assim a necessidade de demolições e reconstruções num período de até 150 anos.
- Adotar uma abordagem holística para o desenvolvimento de todos os setores da sociedade de forma sustentável.
- Também podemos dizer que a utilização de CAD em obras convencionais e de pequeno porte ainda é limitada, observado que o custo mais elevado inviabiliza sua aplicação.

Do outro lado, o crescimento e o planejamento das cidades devem prever também um crescimento racional e sustentável em longo prazo. A urbanização descontrolada e crescimento insustentável nos trouxeram aos níveis de degradação e consumo irresponsável que estamos hoje. Uma discussão adequada do tema exigirá a revisão dos impactos a médio e longo prazo desses fatores, bem como o estabelecimento de metas tangíveis para todos os setores da sociedade.

O concreto como principal material consumido pela humanidade terá papel fundamental nessa discussão, e sua utilização por parte dos profissionais que detém seu conhecimento, no caso o engenheiro civil, será decisiva no processo de reabilitação do planeta.

### 3 CONCLUSÃO

Tomando por base a revisão de literatura e o estudo de caso avaliado, podemos concluir que o objetivo foi atendido.

As vantagens na utilização de CAD seriam:

- Economia de recursos naturais e financeiros;
- Meio seguro para eliminação de resíduos industriais;
- Maior velocidade na construção;
- Maior durabilidade das estruturas;
- Possibilidade de se ter estruturas esbeltas e seguras;
- Ganho de área livre devido às dimensões reduzidas de pilares;
- Viabilização de empreendimentos onde espaço é fator decisivo para o cliente;

Os inconvenientes ou pontos desfavoráveis com a utilização do concreto de alta resistência estariam assim apresentados:

- Custo relativo alto e baixa disponibilidade no mercado;
- Necessidade de alto controle tecnológico em sua produção;
- Alto consumo de cimento em algumas misturas;
- Redução da trabalhabilidade de algumas misturas;
- Falta de normalização nacional para utilização de concretos com resistências superiores à 50MPa.

Como destaque para equacionar o problema levantado na presente monografia teríamos a sugerir:

- Discussão abrangente sobre o tema no meio técnico-científico;
- Pesquisas relacionadas ao dimensionamento de estruturas de concreto, utilizando resistências superiores à 50MPa.

- Maior utilização de cimentos compostos com outros materiais pozolânicos tais como cinza volante, areia de fundição, no intuito de diminuir o consumo de clínquer;
- Pesquisas sobre cimentos alternativos e agregados reciclados na composição do concreto;
- Maior ênfase na abordagem do tema pelas Universidades e incentivo à pesquisa acadêmica no âmbito da graduação e pós-graduação;

Em linhas gerais, nos falta ainda uma abordagem holística da sociedade e do mundo como um todo, e a falta dessa abordagem se tornou a principal causa dos problemas ambientais mundiais. Sendo a indústria do concreto e da construção civil uma parte do todo, além de garantir o fornecimento de materiais de construção a baixo custo, também se deve levar em conta as necessidades da sociedade, a eliminação de resíduos industriais de forma segura e a preservação dos recursos naturais planeta em busca da sustentabilidade efetiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**: NBR 5733 – Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**: NBR 6118 – Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas Para o Cálculo de Estruturas**: NBR 6120 – Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Fundações**: NBR 6122 – Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças Devidas ao Vento em Edificações**: NBR 6123 – Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para Concreto**: NBR 7211 – Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Informação e Documentação – Trabalhos Acadêmicos – Apresentação**: NBR 14724 – Rio de Janeiro, 2002.

BEER, Ferdinand P., JOHNSTON, E. Russell. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. Título Original: Mechanics of Materials. Tradução: Celso Pinto Morais Pereira – São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

COVAS, Nelson. **Gama Z**. Artigo Técnico. Publicado em TQS News. N° 27. Julho de 2008. pp.15-17. Disponível em: <http://www.tqs.com.br/index.php/tqs-news/download-do-tqs-news> Acessado em 03/10/2009 às 19:14h.

FUSCO, Péricles B. **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**. 1ª ed. – São Paulo: PINI, 1995.

HARTMANN, Carine T., HELENE, Paulo R. L. **Recorde Mundial em Concreto de Alto Desempenho Colorido**. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, 2003, Vitória – ES. Anais.

HELENE, Paulo R. L., TERZIAN, Paulo R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1ª reimpressão (maio 95). São Paulo, PINI / SENAI, 1993. 189p.

HELENE, Paulo R. L. **Concreto de Elevado Desempenho: O Material para Construção das Obras nos Anos 2000**. CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, v 1.0. EPUSP, 1997.

HELENE, Paulo R. L. **Novo Recorde em Concreto de Alto Desempenho**. Revista Ibracon. Nº 29. Abr/Jun. 2002. pp.32-33.

HELENE, Paulo R. L., HARTMANN, Carine T. **Avaliação de Aditivos Superplastificantes Base de Policarboxilatos Destinados à Concretos de Cimento Portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/330 – São Paulo: EPUSP, 2003. 22p.

LUCHESE, Flávio L., FREITAS, Otávio P., FREIBERG, German, KUPERMAN, Arthur, SANCHES, Vivian L., STUART, Guilherme R. **Estruturas: Conceitos Fundamentais e Histórico**. Site: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/Estruturas/index.htm>. Acessado em 04/10/2009 às 15:04h.

MEHTA, P. Kumar. **Advancements in Concrete Technology**. Concrete International, Jun. 1999, p.69-76.

MEHTA, P. Kumar. **A Glimpse into Sustainable Ternary-Blended Cements of the Future**. Palestra, 50º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon. Salvador, 2008. Disponível em: [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/plenarias/KUMAR\\_METHA.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/plenarias/KUMAR_METHA.pdf)

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. Título Original: Concrete: Microstructure, Properties and Materials. Tradução: Nicole P. Hasparyc, Paulo Helene e Valdimir A. Paulon – São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P. Kumar. **Society, Sustainability and the Global Concrete Industry**. Palestra, 51º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon. Curitiba, 2009. Disponível em: [http://www.ibracon.org.br/eventos/51cbc/plenarias/51CBC\\_Palestra\\_KumarMehta.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/51cbc/plenarias/51CBC_Palestra_KumarMehta.pdf)

MENDES, Sandro E. S. **Estudo Experimental de Concreto de Alto Desempenho Utilizando Agregados Graúdos Disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil – Curitiba, 2002

MÖRSCH, Emil. **Teoría y Practica Del Hormigón Armado**. 6 vols. Tradução Espanhola Gustavo Gili – Barcelona, 1948.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas – São Carlos, 2007.

RÜSH, Hubert. **Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete**. Journal of the American Concrete Institute. Julho, 1960.

SANTOS, Fernanda D. **Análise Limite e Projeto Ótimo de Vigas em Concreto Armado**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil – Rio de Janeiro, 2003.

TOLEDO, Benedito L. de. **São Paulo: Três Cidades em Um Século**. São Paulo: Editora Cosac e Naify, 2004.

VASCONCELOS, Augusto C. **O Concreto no Brasil – Professores, Cientistas, Técnicos.** São Paulo: PINI, 1992.

VENTURINI, Wilson S.; RODRIGUES, Rogério de O. **Dimensionamento de Peças Retangulares de Concreto Armado Solicitadas à Flexão Reta.** Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas – São Carlos, 1987.