

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FLÁVIO PEREIRA DA SILVA**

**RENATO DIAS DA SILVA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO  
DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM PILARES DE  
EDIFÍCIO**

**ANÁPOLIS / GO**

**2015**

**FLÁVIO PEREIRA DA SILVA**  
**RENATO DIAS DA SILVA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO  
DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM PILARES DE  
EDIFÍCIO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: ADRIANO CARVALHO DE SOUZA**

**ANÁPOLIS / GO: 2015**

**FLÁVIO PEREIRA DA SILVA**  
**RENATO DIAS DA SILVA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO  
DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM PILARES DE  
EDIFÍCIO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

**APROVADO POR:**

---

**ADRIANO CARVALHO DE SOUZA, Mestre (UniEvangélica)**  
**ORIENTADOR**

---

**ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestre (UniEvangélica)**  
**EXAMINADORA INTERNA**

---

**TADEU JOSÉ DE CARVALHO JÚNIOR, Mestre (UniEvangélica)**  
**EXAMINADOR INTERNO**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 25 de MAIO de 2015**

Dedicamos primeiramente a Deus, pois sem ele jamais teríamos tido forças para chegar até aqui, e aos nossos pais e familiares que não mediram esforços em nos ajudar nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por permitir que tudo acontecesse em nossas vidas, e não somente nestes anos como universitários, mas em todos os momentos sempre esteve conosco.

Ao meu orientador, Prof: Adriano Carvalho de Souza, por todo suporte que me proporcionou.

Agradecemos aos nossos pais que sempre nos apoiaram e incentivaram nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

A todos que de forma direta ou indiretamente, sempre estiveram ao meu lado.

Algo só é impossível até que alguém  
duvide e acabe provando o contrário.

Albert Einstein

## RESUMO

O concreto de alto desempenho já é uma realidade no Brasil e o emprego de concretos com resistências maiores que as usuais – de 40 a 50 MPa – tem se difundido muito nos últimos anos. As empresas de concreto pré-misturado, bem como os centros de pesquisa, estão capacitados a obter esses concretos usados principalmente em estruturas de edifícios, pontes e pré-moldados, reduzindo a seção de pilares, aumentando a durabilidade. O presente trabalho propõe uma análise comparativa de custos entre o uso do Concreto Convencional e do Concreto de Alto Desempenho (CAD), para a produção de pilares de um edifício construído em concreto convencional, o mesmo edifício utilizando-se concreto de alto desempenho em todos os pilares, problematizando assim as vantagens da utilização do CAD em relação ao Concreto Comum para a construção civil. Será utilizado o Residencial Ingá como referência, um edifício de 05 pavimentos, localizado no Bairro JK Setor Oeste em Anápolis-GO e em construção pela Constrio Construtora. Com o estudo foi possível comprovar a hipótese de que o CAD é um tipo de concreto otimizado, dosado em usinas para se obter elevada resistência e durabilidade, o que o torna mais caro em relação aos demais tipos de concreto, contudo eleva sua qualidade, eliminando imperfeições e vazios geralmente existentes em concretos convencionais, reduzindo custos de manutenção e mão de obra.

Palavras chave: Concreto Convencional, Concreto de Alto Desempenho, Custos.

## **ABSTRACT**

The high performance concrete is already a reality in Brazil and the use of concrete with higher strengths than usual - 40-50 MPa - has been widespread in recent years. The ready mix concrete companies and research centers, are able to get these concrete mainly used in building structures, bridges and precast, reducing the section pillars and loads on foundations and increasing durability. This paper proposes a comparative cost analysis between the use of Common Concrete and High Performance Concrete (CAD), for the production of pillars of a building constructed in any conventional concrete and the same building high performance concrete using in all the pillars, thus questioning about the advantages of the use of CAD in relation to the Common Concrete for construction. Will be used as reference Residential Inga, a building of 05 floors, located in District JK West Sector in Anápolis-GO and construction by constriction Construction Company. We proved the hypothesis that the CAD is a kind of optimized concrete, dosed at plant to obtain high strength and durability, making it more expensive than the other types of concrete, but also increases their quality by eliminating generally imperfections in concrete common, reducing maintenance costs and labor, which mitigates the cost at the end of the work.

Keywords: Common Concrete, High Performance Concrete, costs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1 - Gráfico de evolução da resistência do concreto de alto desempenho.....	19
Figura 2 – Influência do agregado graúdo no concreto .....	27
Figura 3 - Micrografia eletrônica de transmissão de sílica ativa .....	32
Figura 4 - Complexidade das interações entre cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos .....	38
Figura 5 - Dimensões do cone de Marsh .....	43
Figura 6 - Fachada do Res. Ingá .....	55
Figura 7 – Planta estrutural do Residencial Ingá .....	56
Figura 8 – Fôrmas dos pilares do subsolo – Residencial Ingá .....	57
Figura 9 – Fôrmas dos pilares do térreo – Residencial Ingá .....	57
Figura 10 – Planta estrutural do edifício residencial com CAD nos pilares .....	59
Figura 11 – Pórtico estrutural 3D do edifício residencial com CAD nos pilares .....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1 - Classificação dos concretos de alta resistência .....	20
Tabela 2 - Classificação dos cimentos Portland comercializados no Brasil .....	25
Tabela 3 - Conteúdo de aluminato tricálcico (C3A) nos cimentos .....	26
Tabela 4 - Relação entre tensões para diferentes dimensões máximas de agregado graúdo obtido por AITCIN (1989) .....	28
Tabela 5 – Limites granulométricos do agregado miúdo .....	29
Tabela 6 – Algumas características físicas da sílica ativa .....	31
Tabela 7 - Classes diferentes de concreto de alto desempenho .....	40
Tabela 8 - Edifícios construídos com concreto de alto desempenho .....	51
Tabela 9 - Pontes construídas com concreto de alto desempenho .....	52
Tabela 10 - Plataformas de petróleo construídas com concreto de alto desempenho .....	53
Tabela 11 – Dimensões dos pilares da estrutura do Residencial Ingá .....	58
Tabela 12 – Dimensões dos pilares da estrutura com CAD .....	60
Tabela 13 – Parâmetro de estabilidade global Gama-Z .....	60
Tabela 14 – Materiais constituintes do CAD com $f_{ck}=50$ Mpa .....	61
Tabela 15 – Materiais utilizados para a produção dos pilares da estrutura do Residencial Ingá.....	62
Tabela 16 – Materiais utilizados para a produção dos pilares da estrutura com CAD .....	62
Tabela 17 – Preço dos concretos analisados, sugerido pela empresa CIPLAN .....	63
Tabela 18 – Preço dos materiais fornecidos loja de materiais para construção .....	63
Tabela 19 – Custo parcial dos materiais utilizados nos pilares da estrutura do Residencial Ingá.....	64
Tabela 20 – Custo por pavimento e custo total dos pilares na estrutura do edifício referência.....	64
Tabela 21 – Custo parcial dos materiais utilizados nos pilares da estrutura com CAD.....	64
Tabela 22 – Custo por pavimento e custo total dos pilares da estrutura com CAD.....	63

## **LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS**

ASTM – American Society for Testing and Materials

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CC – Concreto Convencional

NBR – Norma Brasileira

## SUMÁRIO

Capítulo	Página
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 GENERALIDADES .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1 DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	18
2.2 EVOLUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	18
2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO NO BRASIL .....	20
2.4 VANTAGENS NA APLICAÇÃO DO CAD .....	20
<b>2.4.1 Vantagens técnicas</b> .....	21
<b>2.4.2 Vantagens econômicas</b> .....	21
2.5 DESVANTAGENS NA APLICAÇÃO DO CAD .....	22
<b>3 MATERIAIS CONSTITUINTES E PRODUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO</b> .....	23
3.1 MICROESTRUTURA DO CONCRETO .....	24
3.2 CIMENTO .....	24
3.3 AGREGADOS .....	26
<b>3.3.1 Agregado graúdo</b> .....	26
<b>3.3.2 Agregado miúdo</b> .....	28
3.4 ADIÇÕES MINERAIS .....	30
<b>3.4.1 Silícia ativa</b> .....	30
<b>3.4.2 Cinza volante</b> .....	32
<b>3.4.3 Escória de alto forno</b> .....	34
3.5 ADITIVOS .....	35
<b>3.5.1 Aditivos redutores de água</b> .....	35
<b>3.5.2 Aditivos retardadores de pega</b> .....	36
<b>3.5.3 Aditivos lignosulfonatos</b> .....	36
<b>3.5.4 Aditivos superfluidificantes</b> .....	36
<b>3.5.5 Aditivos superplastificantes</b> .....	37
3.6 DOSAGEM DOS SUPERPLASTIFICANTES .....	39
3.7 ÁGUA .....	40

3.8 CLASSES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	40
3.9 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAD .....	41
<b>3.9.1 Dosagem do concreto de alto desempenho .....</b>	<b>41</b>
<b>3.9.2 Determinação da fluidez da argamassa de cimento .....</b>	<b>42</b>
<b>4 FABRICAÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....</b>	<b>44</b>
4.1 ESTOCAGEM DOS MATERIAIS.....	44
<b>4.1.1 Cimento .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 Sílica ativa .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.3 Aditivos .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.4 Agregados .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.5 Dosagem dos componentes .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.6 Amassamento .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.7 Consistência .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.8 Transporte .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.9 Lançamento .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.10 Compactação .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.11 Cura .....</b>	<b>49</b>
<b>5 APLICAÇÕES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....</b>	<b>50</b>
5.1 EDIFÍCIOS .....	50
5.2 PONTES .....	51
5.3 PLATAFORMAS DE PETRÓLEO .....	52
5.4 APLICAÇÕES ESPECIAIS .....	53
<b>6 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>55</b>
6.1 RESIDENCIAL INGÁ .....	55
6.2 CARACTERIZAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA .....	56
<b>6.2.1 Descrição da estrutura do edifício de referência .....</b>	<b>56</b>
<b>6.2.2 Descrição do modelo considerado no Residencial Ingá com CAD nos pilares .....</b>	<b>58</b>
6.3 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO CAD .....	60
<b>7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
7.1 QUANTITATIVO DE MATERIAIS .....	62
7.2 CUSTOS DOS MATERIAIS .....	63
7.3 CUSTO TOTAL DOS PILARES .....	63
7.4 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS .....	65
<b>8 ANÁLISE OU COMPARAÇÃO / CRÍTICA .....</b>	<b>67</b>

<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

O concreto é um dos materiais mais utilizados em vários tipos de construções em todo o mundo, sendo constituído por cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita ou pedra), água e ar, podendo conter adições (pozolanas, sílica ativa, cinza volante, etc.) e aditivos químicos com o intuito de melhorar ou modificar suas propriedades (SERRA, 1997).

Devido ao grande desenvolvimento na área da construção civil, os edifícios estão cada dia mais altos e com variadas formas arquitetônicas. Com isso, há a necessidade de se construir peças estruturais com menores dimensões, altas resistências e bom desempenho no decorrer da vida útil. Começaram então, há cerca de 40 anos, estudos sobre o concreto de alto desempenho (CAD), viabilizando-se técnica e economia para o uso em obras civis somente há vinte anos (PINTO, 2003).

O Concreto de Alto Desempenho é um tipo de concreto otimizado, dosado em usina com a finalidade de se obter elevada resistência e durabilidade, o que o torna mais caro em relação aos demais tipos de concreto, contudo eleva sua qualidade, eliminando imperfeições geralmente existentes em concretos convencionais, reduzindo custos de manutenção e mão de obra.

Segundo o ACI 363R-92 (2001), o CAD é definido como um concreto que possui resistência à compressão especificada de no mínimo 41 MPa. Diniz (1997) sugere ainda que para um concreto ser considerado de alto desempenho, além da alta resistência, ele deve possuir características que o relacione principalmente com a durabilidade, como por exemplo a baixa permeabilidade.

De acordo com muitos pesquisadores, o fator determinante para um CAD é o emprego de uma baixa relação água/cimento (a/c). Segundo Neville (1997), a relação água/cimento deve ser sempre menor que 0,35, geralmente em torno de 0,25 e ocasionalmente até 0,20. Tendo em vista esses baixos valores de relação a/c, o uso de superplastificantes é essencial para melhorar as características do concreto no estado fresco.

O CAD tem sua resistência determinada pelo agregado, ou seja, por sua interface com o cimento. A adição da sílica ativa ou de outras adições finas (filler's) preenche os vazios da zona de transição do agregado/cimento, proporcionando uma estrutura mais compacta (AMARAL FILHO, 1998). Portanto, o agregado graúdo se torna um fator limitante, deixando

de ser apenas um material inerte, onde passa a ser controlado pelas suas características físicas, mecânicas e mineralógicas (MENDES, 2002).

Segundo Pinto (2003), o CAD exige um grande controle de qualidade de seus materiais componentes, bem como dos critérios e métodos de dosagem específicos. Tendo em vista que os materiais podem mudar de acordo com a região onde é utilizado, devido aos diferentes métodos de dosagem e à ineficácia da execução, tem-se ainda dificuldade em se obter CAD com o desempenho esperado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto convencional é um dos produtos mais consumidos do mundo e vem sendo fruto de muitos estudos pelo mundo a fora, já o CAD (Concreto de Alto Desempenho) vem sendo usado a muito tempo no exterior, mas no Brasil não faz muito tempo, então é necessário por menor que seja a contribuição um estudo feito sobre o CAD e como utiliza-lo. Sabendo que o Concreto de Alto Desempenho traz para o engenheiro civil a possibilidade de desenvolver uma obra com resistência, durabilidade, impermeabilidade e menor utilização de mão de obra, desenvolvemos esse estudo para os profissionais da área e até para os futuros alunos da UniEvangélica como fonte de pesquisa para seus trabalhos.

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos. O capítulo 1 e 2 compreende a introdução e o objetivo do trabalho de pesquisa respectivamente. O capítulo traz os materiais constituintes e a produção do concreto de alto desempenho. Já no capítulo 4, o estudo de caso é descrito através do detalhamento do concreto de alto desempenho utilizado no edifício e-tower. No capítulo 5 é apresentada a revisão bibliográfica referente ao concreto de alto desempenho, considerando aspectos de sua aplicação, materiais constituintes e procedimentos de produção. Também são discutidas, neste capítulo, características de dosagem de concreto de alto desempenho. O capítulo 6 consiste no estudo de caso do Residencial Ingá, Anápolis-GO. No capítulo 7 é mostrado a análise dos resultados obtidos no estudo de caso. No capítulo 8 é feita uma análise e comparação crítica dos resultados obtidos.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste é fazer uma análise comparativa de custos entre o uso do Concreto Comum e do Concreto de Alto Desempenho (CAD) de um edifício de 05 andares (Residencial Ingá – Anápolis – GO) dimensionado com auxílio do programa AltoqiEberick.

Os objetivos específicos são: a busca permanente de qualidade nas estruturas, durabilidade, velocidade de execução, economia, confiabilidade e diminuição da seção transversal das peças estruturais ou até mesmo a necessidade de eliminação de pilares, com o objetivo de aumentar a área útil do pavimento, o estudo do CAD vem ganhando enfoque de vários pesquisadores. Portanto, o presente estudo visa analisar principalmente a economia de materiais constituintes do CAD na aplicação de pilares quando comparados com o concreto convencional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A descoberta do concreto feita por Joseph Aspdin, em 1824 a partir da mistura de materiais proveniente das ilhas Portland, que lhe deu o nome de cimento Portland ao aglomerante, transformou toda a história da construção civil. O aglomerante tornou-se o material mais utilizado na construção civil até os dias atuais, e desde então inúmeras pesquisas se formaram para aumentar o desempenho e resistência do material.

Em 1918 surgiu a Lei de Abrams que estabelecia a relação entre a resistência do concreto e a relação água/cimento permitiu o desenvolvimento das pesquisas sobre aumento da resistência e nos anos posteriores cada vez mais se tornava comum concretos cuja resistência se tornava cada vez mais elevada.

Entretanto, somente na década de 1920 surgiu o que seria o maior avanço nas pesquisas sobre concreto, estabelecendo o que até hoje é um dos elementos fundamentais na dosagem de qualquer concreto.

O termo CAD (concreto de alto desempenho) sofreu, desde a sua descoberta, mudanças quanto a sua definição, em grande parte essas mudanças se deviam ao aumento da resistência que se tornava cada vez maior a cada ano. Seus primeiros registros na década de 50 registravam que resistências de 34 MPA já eram consideradas altas (DJANIKIAN,1995).

Concretos de alta resistência são aqueles cuja resistência se apresenta igual ou superior a 40 MPA, sendo que em países mais avançados como o EUA existem registros de concretos na ordem de 150 MPA (DINIZ,1997). As previsões futuras apontam que futuramente terá concretos na ordem de 200 MPA (SHAH,1985) que poderão ser produzidos e utilizados na construção civil.

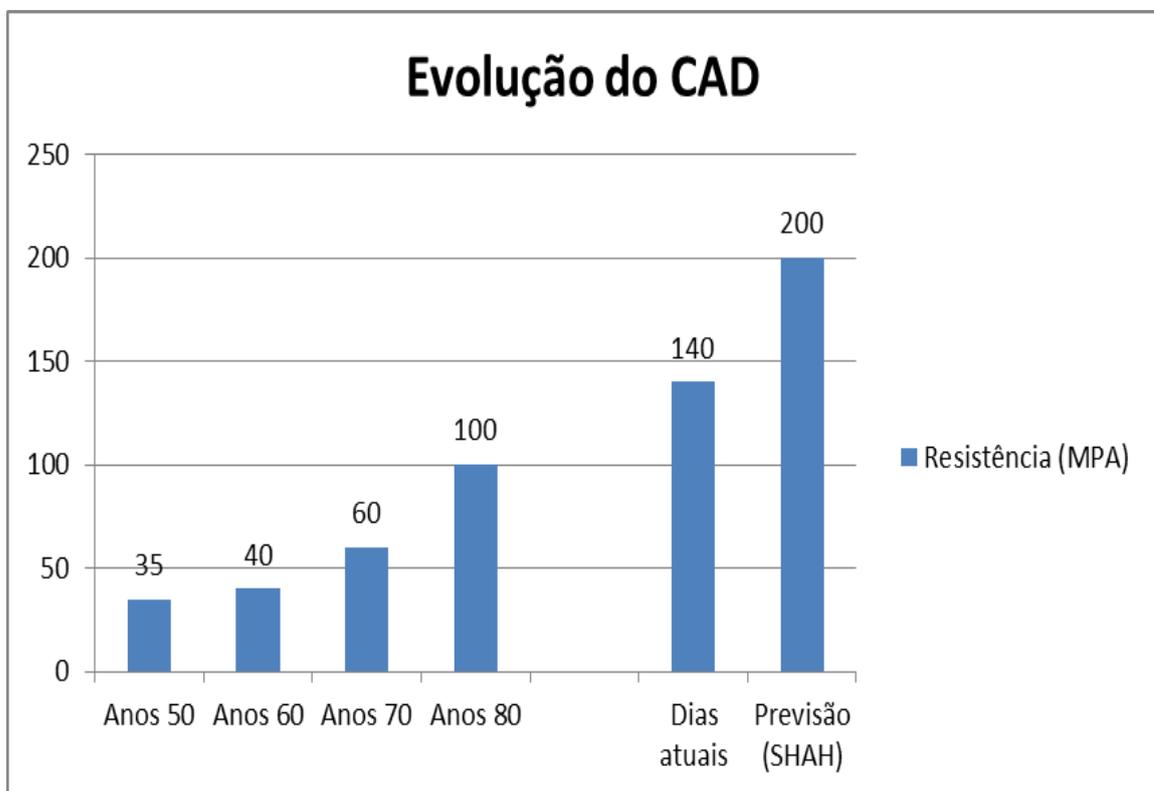
### 2.2 EVOLUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Durante a década de 50 resistências de 35 MPA já eram consideradas como altas, na década posterior já existia comercialmente concretos cuja a resistência chegavam a 40 e 50 MPA.

Entretanto durante os anos seguintes limitações na Lei de Abrams que apresentavam que um aumento na resistência superior aos valores atuais exigiria uma relação água/cimento muito baixa reduziu avanços significativos na área.

A barreira que aparecia causada pela Lei de Abrams se mostrava como um grande problema comercial, o principal aditivo redutor de água/cimento utilizado na época (lignossulfonatos) mostrava que já havia chegado ao seu limite apesar do conhecimento e patente de aditivos redutores de água mais eficazes que existiam desde 1938, o elevado custo de aplicação impediu que comercialmente fosse explorado como forma viável de desenvolvimento. No final dos anos 60 o Japão e a Alemanha passaram a usar aditivos superplastificantes pela primeira vez. Seu uso impulsionou as pesquisas na área o que fez com que nos anos 80, os avanços tecnológicos nos superplastificante aliados a outros subprodutos de origem pozolânica criou circunstâncias para o surgimento de concretos cuja a resistência eram superiores a 100 MPA. A figura a seguir mostra a evolução do CAD da década de 1950 até os dias atuais, seguida da tabela que mostra aa classificação deste tipo de concreto.

**Figura 1** - Gráfico de evolução da resistência do concreto de alto desempenho



Fonte: SHAH(1985)

**Tabela 1** - Classificação dos concretos de alta resistência

Parâmetro	Concreto de alta resistência	Concreto de altíssima resistência	Concreto com ultra resistência
fck (MPa)	50-100	100-150	>150
Fator a/c	0,45-0,30	0,30-0,25	<0,25
Aditivos químicos	Redutor de água ou superplastificante	Superplastificante	Alto redutor de água
Adições minerais	Cinza volante	Sílica ativa	Sílica ativa

Fonte: SANCHEZ, 1997 (adaptada)

### 2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO NO BRASIL

O uso de concreto de alta resistência em território nacional ainda se encontra pouco difundido, cidades como São Paulo, Salvador, Rio de Janeiro e Brasília já utilizam essa tecnologia há alguns anos (ALMEIDA, 1996), entretanto a grande realidade brasileira é que essa tecnologia ainda se encontra pouco difundida se analisado a território nacional.

As pesquisas no país se concentram principalmente nos estados de Goiás, Brasília, Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sendo que as pesquisas se concentram em sua grande maioria nas universidades públicas (ALMEIDA, 1990).

### 2.4 VANTAGENS NA APLICAÇÃO DO CAD

O concreto de alto desempenho apresenta vantagens técnicas e econômicas em relação ao concreto convencional que segundo a ABCP (1999), que são:

### 2.4.1 Vantagens técnicas

- a. Alto módulo de elasticidade;
- b. Alta resistência à compressão, a curtas e longas idades;
- c. Fluência reduzida sob cargas de longa duração;
- d. Menor retração na secagem;
- e. Carbonatação reduzida;
- f. Alta resistência elétrica;
- g. Estrutura mais leve como um todo;
- h. Baixo risco de corrosão da armadura devido à baixa porosidade;
- i. Elevada aderência concreto novo – concreto velho;
- j. Baixa permeabilidade a água e gases;
- k. Se usado um aditivo superplastificante compatível com o cimento e essa mistura for bem dosada, é possível não ter exsudação;
- l. Coeficiente de difusão de cloretos reduzidos;
- m. Se bem dosado, mínima será a segregação no lançamento e adensamento;

### 2.4.2 Vantagens econômicas

- a. Peças estruturais com menores dimensões;
- b. Número reduzido de pilares;
- c. Durabilidade da estrutura com baixo custo de manutenção;
- d. Economia de fôrmas de pilares e vigas e economia nas fundações;
- e. Grande economia na produção de pilares se comparado com o preço da peça pronta;
- f. Para elementos estruturais horizontais protendidos, o uso do CAD também é recomendado;
- g. Como a estrutura se torna mais leve, com o mesmo tipo de fundação é possível o aumento no número de pavimentos;
- h. Devido ao CAD obter altas resistências em curto prazo, a desforma das peças torna-se ágil, com conseqüente ganho de tempo.

No concreto de alto desempenho, o cimento Portland é usado com mais eficiência, caracterizando-se como uma vantagem ambiental (AITCIN, 2000).

## 2.5 DESVANTAGENS NA APLICAÇÃO DO CAD

Das principais desvantagens quanto ao seu uso, segundo QUIEROGA destacamos:

- a. Alto grau de dependência de ativos para aumentar a trabalhabilidade com baixa relação a/c;
- b. Controle de qualidade dos materiais e dos processos muito rigoroso;
- c. Custos elevados com mão de obra especializada no trabalho com CAD, incluindo projetistas;
- d. Perda da consistência, efeito esse gerado pelo uso dos aditivos atualmente disponíveis;

Pereira Neto (1994) relata que o CAD não apresenta deformações excessivas, caracterizando-se em ruptura frágil quando submetidos à tensão superior a sua resistência máxima.

A ABCP (1999) cita a desvantagem econômica para o uso do CAD em elementos estruturais como as lajes e vigas, pois tais elementos são dimensionados levando em conta as deformações e a flexão como critérios determinantes, então, o parâmetro resistência à compressão do concreto pouco influencia em níveis de cargas usuais em edifícios de múltiplos pavimentos.

### **3MATERIAIS CONSTITUINTES E PRODUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Os materiais constituintes do concreto de alto desempenho são em princípio os mesmos empregados em concretos tradicionais. Entretanto, o objetivo de se obter resistências à compressão iguais ou superiores a 60 MPa, aos 28 dias de idade, implica na necessidade de adotar materiais selecionados e relações água/cimento não superiores a 0,40. Devido à utilização de relações água/cimento muito baixas, tornou-se indispensável a utilização de aditivos superplastificantes. Com um estudo adequado das características dos materiais disponíveis, uso de proporções corretas, e baixas relações água/cimento, conseguem-se resistências à compressão por volta de 80 MPa.

Níveis de resistências superiores a 80 MPa resultam na necessidade de utilização de adições minerais na composição do concreto, onde frequentemente emprega-se a sílica ativa.

O concreto de alto desempenho apresenta particularidades, que o distingue claramente, dos concretos utilizados normalmente na estrutura dos edifícios, tanto com relação às suas propriedades mecânicas, quanto à sua forma de obtenção.

É estritamente proibida a maneira habitual de se armazenar a matéria prima ao ar livre, a medição de componentes em volume, a adição de água (sem muito controle) e a incorporação de aditivos de qualidade não comprovada para a produção de concretos de alto desempenho.

Outra modificação importante com relação aos concretos de alto desempenho, diz respeito a relação água/cimento, que deve ser a mínima possível, para conseguir a hidratação dos materiais cimentícios (cimento + adições minerais).

Outra diferença existente entre o concreto de alto desempenho e o concreto tradicional, e que merece destaque, é que nos concretos tradicionais, a dosagem de cimento e água habitualmente utilizada, confere à pasta de cimento uma característica resistente muito inferior à do agregado gráudo. Como consequência, tem-se a ruptura do concreto geralmente por esgotamento da capacidade da pasta. Isto pode ser comprovado nos processos de controle de qualidade do concreto, onde as fissuras propagam-se na matriz de cimento até encontrar o agregado gráudo, circundando-o sem afetá-lo. Já no concreto de alto desempenho, tem-se um aumento da capacidade resistente da argamassa, a qual supera a resistência do agregado, fazendo com que a fissura ocorra através do agregado cortando-o e não mais contornando-

o. Dessa maneira, a resistência dos agregados usuais passam a ser os delimitadores da resistência do concreto.

### 3.1 MICROESTRUTURAS DO CONCRETO

O concreto é considerado tradicionalmente, como um material formado por agregados envoltos em uma matriz de pasta de cimento. As propriedades mecânicas desse concreto dependem das propriedades dos referidos componentes básicos, da proporção entre eles e das características físico-químicas da sua interface.

Com relação à composição do concreto, pode-se dizer que ele é composto de 65% a 75% de agregados e 25% a 35% de pasta de cimento. Quantidades de agregados inferiores a 65% (em volume) do total de componentes afetam negativamente a estabilidade dimensional do concreto, devido à retração.

A pasta de cimento endurecida é um material poroso e heterogêneo. Seu grau de porosidade e heterogeneidade constitui um fator decisivo na durabilidade e resistência do concreto.

Segundo Mindessi apud Gonzalez (1993), são três as alternativas que conduzem ao aumento da resistência para a pasta de cimento:

- Diminuição da porosidade total;
- Melhora na distribuição e tamanho dos poros (reduzindo tanto sua quantidade, como seu tamanho máximo e eliminando defeitos pontuais localizados);
- Melhora da qualidade dos silicatos cálcicos hidratados do cimento.

E finalmente, pode-se dizer que a obtenção de concretos de alta resistência, pode ser feita através das seguintes considerações:

- Adoção de uma baixa relação água/cimento;
- Uso obrigatório de aditivos superplastificantes;
- Utilização de cimentos que proporcionem resistência adequada;
- Para resistências muito elevadas, geralmente, faz-se uso de adições minerais.

### 3.2 CIMENTO

Segundo Howard e Leatham apud Dal Molin (1995), não existem critérios científicos que especifiquem o cimento mais adequado para a produção de concreto de alto desempenho.

Mas de qualquer forma, o cimento deve proporcionar apropriada resistência e comportamento reológico.

O cimento Portland é o primeiro material a ser escolhido, pois o seu desempenho em termos de reologia e de resistência é um item crítico à medida que se aumenta a resistência à compressão (AITCIN, 1998). Ele é um material pulverulento composto basicamente por silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que, na presença da água, irá endurecer devido à hidratação fornecendo as principais propriedades do material (NEVILLE, 1997).

De acordo com Mehta e Aitcin (1990) apud Cordeiro (2001), não existem métodos científicos que possam especificar o cimento mais adequado a ser utilizado para a produção do concreto de alto desempenho, eles ainda comentam que são preferíveis os cimentos com elevado teor de Silicato Tricálcio (C3S) e Silicato Dicálcio (C2S).

Os cimentos comercializados no Brasil são classificados como na Tabela 2 de acordo com a NBR 11578 (1991):

**Tabela 2** - Classificação dos cimentos Portland comercializados no Brasil

Tipo de cimento	Sigla	Composição (percentual em massa)			
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Comum	CP I CP I - S	100 95 - 99		- 1 - 5	
Composto	CP II - E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
	CP II - Z	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10
	CP II - F	90 - 94	-	-	6 - 10
Alto-forno	CP III	25 - 95	35 - 70	-	0 - 5
Pozolânico	CP IV	45 - 85	-	-	1 - 5
Alta res. Inicial	CP V - ARI	95 - 100	-	-	0 - 5
Branco estrutural	CPB	75 - 100*	-	-	0 - 25

Fonte: NBR 11578 - 1991

O cimento ideal deveria ser de acordo com Aitcin e Adam (1995), não muito fino, com baixo teor de silicato tri-cálcio (C3A) e, com reatividade da fase intersticial facilmente controlada por íons sulfatos, derivados da dissolução de sulfatos presentes no cimento.

**Tabela 3** - Conteúdo de aluminato tricálcico (C3A) nos cimentos.

Nº do cimento	1 a 4, 7, 8 e 11	5	6	9	10	12	13
Conteúdo de C <sub>3</sub> A (%)	< 8,0	< 9,7	< 8,3	< 12,7	< 11,0	< 8,9	< 14,4

Fonte: HANNA et al. (1989).

Com base nos resultados, Hanna (1989) estabelece que o conteúdo de C3A é determinante na velocidade e quantidade de formação de etringita, destacando ainda que valores superiores a 8% são a causa fundamental da perda de fluidez no concreto, juntamente com elevados conteúdos de álcali, sulfatos e excessiva finura do cimento.

### 3.3 AGREGADOS

Para escolha dos agregados, deve-se ter às exigências pré-estabelecidas pelas normas pertinentes para produção de concretos de resistências usuais, tais como: NBR 7211-1983 e NBR 12654-1992.

Segundo Shah e Ahmad (1994), as propriedades mais importantes dos agregados para produção de CAD são: forma das partículas, distribuição granulométrica das partículas, propriedades mecânicas das partículas, possíveis reações químicas entre o agregado e a pasta que possam afetar a ligação.

A forma e o estado da superfície são características cuja incidência são decisivas, sobre uma propriedade do concreto, que é a compacidade. A máxima compacidade está associada a agregados arredondados, de forma sensivelmente esférica, ou a agregados triturados de forma próxima à cúbica. A rugosidade superficial dos agregados graúdos melhorará a aderência necessária à pasta de cimento.

#### 3.3.1 Agregado graúdo

Para a produção de concreto de alto desempenho, deve-se utilizar agregados graúdos com elevada resistência. Têm-se utilizado os seguintes tipos de rochas: calcária, dolomita, granito, andesita, diabásio e outras mais. Com relação à forma das partículas, devem-se evitar as partículas planas ou alongadas. Elas são inerentemente fracas e levam as misturas

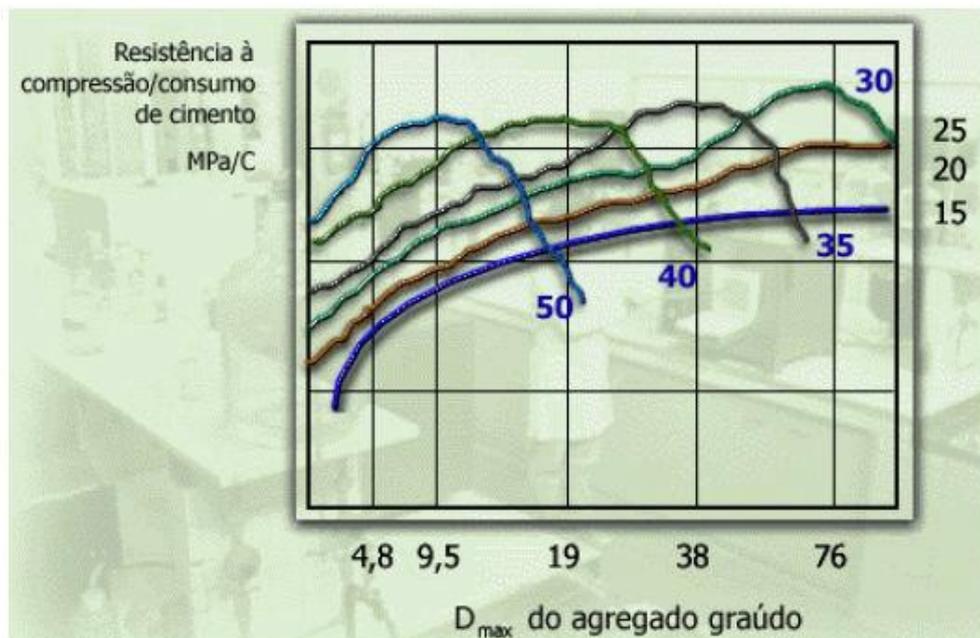
desarmônicas. Devem-se evitar também, partículas altamente polidas, como é o caso do seixo rolado, pois reduzem a ligação cimento agregado.

Além disso, as partículas dos agregados devem estar livres de camadas de silte e argila, pois estes materiais reduzem a resistência da ligação do cimento e do agregado e aumentam a demanda de água.

Com relação à granulometria dos agregados é comumente aceito que quanto menor for a dimensão máxima do agregado graúdo, maior será a resistência obtida, uma vez que dimensões menores proporcionam um aumento da trabalhabilidade do concreto e com isso uma diminuição na quantidade de água a ser utilizada.

Além disso, segundo Jennings apud Dal Molin (1995), como o agregado é normalmente britado, durante a retirada dos blocos dos maciços rochosos por meio de explosivos, podem ocorrer danos à microestrutura dos agregados, sendo maior a probabilidade de permanecerem falhas e fissuras em agregados de dimensões maiores. Por isso, muitas vezes pode-se dar preferência aos agregados naturais, que através de meios naturais, já sofreram um processo de destruição e eliminação das partículas alteradas e menos resistentes, pertencentes ao material. E, portanto existe então uma tendência de se trabalhar com agregados de menor dimensão possível.

**Figura 2** – Influência do agregado graúdo no concreto.



Fonte: ABCP, 1999.

Mehta e Aitcin apud Shah e Ahmad (1994) recomendam uma dimensão máxima do agregado de 10 mm a 12 mm.

Aitcin apud Gonzalez (1993) realizou um estudo envolvendo dois traços de concreto de mesma composição, alterando-se somente a dimensão do agregado graúdo. Em um dos traços utilizou-se agregado de 10 mm e no outro agregado de 20 mm, sendo ambos de mesma procedência.

Os resultados das determinações de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos a partir dos concretos citados, conduzem aos valores de relação entre tensões indicados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Relação entre tensões para diferentes dimensões máximas de agregado graúdo obtido por Aitcin (1989).

<b>Determinação efetuada</b>	<b>Idade do ensaio (dias)</b>	<b>Relação entre tensões</b> <b><math>D_{m\acute{a}x = 10 \text{ mm}}/D_{m\acute{a}x = 20 \text{ mm}}</math></b>
<b>Resistência à compressão</b>	2	1,12
	7	1,13
	28	1,10
	91	1,15
<b>Módulo de elasticidade</b>	2	1,02
	28	1,04
	56	1,04

Fonte: GONZALEZ G. I. (1993).

Já o Aci 363 (1992) recomenda uma dimensão máxima do agregado de 9,5 mm a 12,5 mm, para se obter concreto com ótima resistência à compressão. Em um estudo realizado por AddiSapud Shah e Ahmad (1994), concluiu-se que a resistência do CAD aumentava à medida que, a dimensão máxima do agregado variava no intervalo de 13,2 mm a 26,5 mm.

### 3.3.2 Agregado miúdo

A ABNT (1983) classifica os agregados miúdos em zonas (muito fina, fina, média e grossa), de acordo com sua composição granulométrica. A tabela 5.3 mostra a classificação, de acordo com a NBR 7211.

Tabela 5 – Limites granulométricos do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada na peneira ABNT			
	Zona 1 (muito fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (média)	Zona 4 (grossa)
9,50	0	0	0	0
6,30	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,80	0 a 5*	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,40	0 a 5*	0 a 15*	0 a 25*	5* a 40
1,20	0 a 10*	0 a 25*	10* a 45*	30* a 70
0,60	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,30	50 a 85*	60* a 88*	70* a 92*	80* a 95
0,15	85* a 10	90* a 100	90* a 100	90* a 100

Fonte: NBR 7211 (1983)

É o agregado cuja dimensão máxima não ultrapassa 4,8 mm, sendo constituído pelas areias naturais e artificiais. As areias artificiais devem ser evitadas, pois devido ao processo de moagem, apresentam formas excessivamente angulosas. Esse tipo de formato dos grãos de areia faz com que seja excessiva a demanda de água, não sendo, portanto aconselhável para a produção de CAD, onde são necessárias baixas relações água/cimento.

O agregado miúdo deve consistir, portanto de partículas redondas e polidas, de maneira a reduzir a demanda de água.

A bibliografia recomenda um módulo de finura no intervalo de 2,7 a 3,2, para que se possa diminuir a quantidade de água exigida e melhorar a trabalhabilidade.

Gonzalez (1993) recomenda um módulo de finura variando no intervalo de 3,0 a 3,2, uma vez que a utilização de areias com granulometria excessivamente fina (módulo de finura inferior a 3,0) implica em uma maior demanda de cimento e água, originando um concreto com consistência “pegajosa” e inadequado para os fins previstos.

Um aspecto de grande importância com relação às areias é a forma de armazenamento, uma vez que pode ocorrer uma variação na umidade da areia situada na parte superior, com relação a areia situada na parte inferior de 5%. A consideração dessa variação, na dosagem de concretos de alto desempenho é fundamental. Isto pode ser acompanhado no exemplo seguinte, para um determinado traço de concreto de alto desempenho:

- Agregado graúdo →1310 kg
- Areia →720 kg
- Cimento →450 kg
- Sílica ativa →36 kg (8% sobre o peso do cimento)
- Superplastificante→12,5 kg (2,8% do peso do cimento)
- Água →130 kg
- Relação água total/(cimento + adições) →0,29 (c/ o superplastificante)

Para esse traço, uma variação na umidade de 5% implica em uma quantidade a mais de água incorporada no concreto de 36 litros por metro cúbico ( $720 \times 0,05 = 36$  litros), o que conduziria a uma relação água/cimento de 0,37, comparado a 0,29 inicialmente previsto para o traço do concreto.

Amaral Filho apud Dal Molin (1995), relata que é possível obter concretos com resistência de até 170 MPa com areia quartzosa normal, bem graduada e dentro das especificações. Resistências acima deste valor, só são obtidas com a utilização de agregados especiais, como por exemplo, areia artificial feita com bauxita calcinada.

### 3.4 ADIÇÕES MINERAIS

Outros produtos de grande importância para a execução de um CAD são as adições minerais, que são subprodutos industriais ou materiais naturais que, quando introduzidas à mistura resultam em melhorias na trabalhabilidade no estado fresco, menor fissuração térmica, menor expansão álcali-agregado, maior resistência ao ataque de agentes agressivos, bem como melhoria de resistência e, redução do custo (SACIOTO, 2005).

Os materiais cimentícios mais utilizados na fabricação do concreto de alto desempenho são: sílica ativa, escória de alto-forno e a cinza volante. A cinza volante é a mais variável e menos reativa, devendo-se então ser usadas com mais cuidado (AITCIN, 2000).

#### 3.4.1 Silícia ativa

A sílica ativa é um material pozolânico de tom cinza, subproduto da fabricação das ligas de ferro-silício, do silício metálico e outras ligas de silício (AITCIN, 2000). Atua no

concreto alterando suas características tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, preenchendo os vazios e, colaborando para maior reatividade do material (SOUZA, 1998).

Souza (1998) ainda compara com os concretos convencionais, apresentando as seguintes vantagens de um concreto com sílica ativa:

- a. Menor permeabilidade, porosidade e absorvidade;
- b. Maior resistência à compressão e à tração;
- c. Maior resistência a ataques químicos, como sulfatos e cloretos;
- d. Maior resistência à abrasão e à erosão;
- e. Menor índice de reflexão no concreto projetado;
- f. Maior aderência com novas camadas de concreto.

Bharatkumar (2001) sugere que ao manter a relação a/c com a simples adição da sílica ativa, obtém-se um aumento significativo na resistência à compressão com economia. Esse ganho substancial de resistência é devido aos grãos de sílica serem cerca de cem vezes menores que os do cimento, preenchendo assim os vazios da zona de transição entre agregado-cimento.

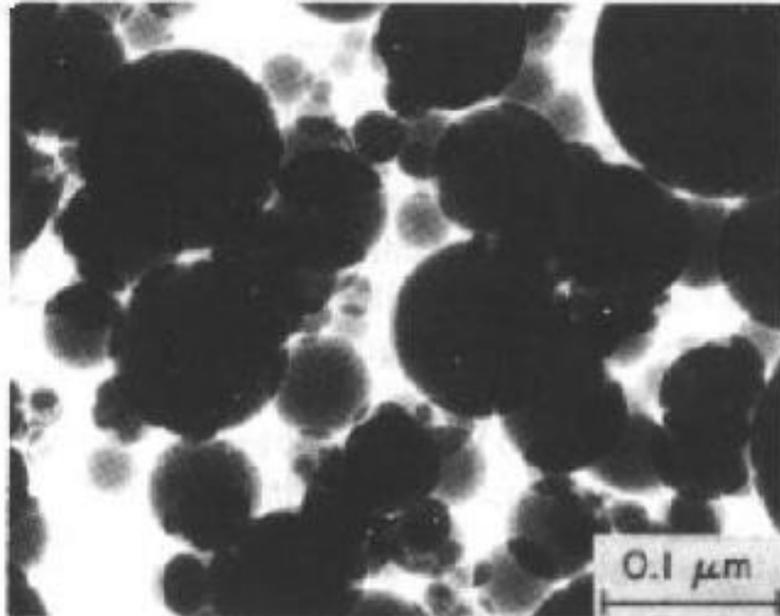
A Tabela 6 descreve algumas características físicas da sílica ativa e, a Figura 3 mostra a micrografia eletrônica da transmissão de sílica ativa segundo Mehta e Monteiro(1994).

**Tabela 6**– Algumas características físicas da sílica ativa

<b>Massa unitária</b>	<b>Densificada</b>	550 kg/m <sup>3</sup>
	<b>Não densificada</b>	360 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica</b>		2220 kg/m <sup>3</sup>
<b>Superfície específica</b>		20000m <sup>2</sup> /kg
<b>Diâmetro médio</b>		0,10 a 0,20 µm
<b>Formato da partícula</b>		Esférico
<b>Cor</b>		Cinza claro

Fonte: MEHTA e MONTEIRO , 1994.

**Figura 3** - Micrografia eletrônica de transmissão de sílica ativa



Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994.

Com a utilização da sílica ativa, a grande redução da exsudação interna e superficial da mistura se torna outro fator muito importante do ponto de vista micro estrutural, pois as zonas de transição ficam mais compactas do que as zonas de um concreto que não contém sílica ativa (AITCIN, 2000).

### **3.4.2 Cinza volante**

Segundo Silva (1995), cinza volante consiste em um material captado dos gases na combustão de carvão pulverizado em centrais termelétricas, constituídas de resíduos finos, captados por coletores mecânicos ou precipitadores eletrostáticos dos gases da combustão, antes de serem lançados na atmosfera.

Segundo a ASTM, existem duas classes de cinza volante (F e C). A classe F é normalmente obtida da combustão de antracito ou carvão betuminoso, possui baixo teor de cálcio e tem propriedades pozolânicas, com pequena ou nenhuma propriedade cimentante, tendo grande campo de aplicação nos concretos de alto desempenho. A cinza volante classe C é obtida da combustão de lignita, possui alto teor de cálcio e, além de ter propriedades pozolânicas, tem algumas propriedades cimentícias.

A cinza volante tem sido muito utilizada na produção de concretos de alto desempenho, mas infelizmente a cinza volante é muito mais variável que a sílica ativa, em ambas as suas características físicas e químicas.

Utilizando-se a cinza volante, a resistência do concreto em geral não passará dos 70 MPa, ainda que existam poucos registros de concretos de alto desempenho, com resistência superior a 98 MPa, no qual tenha sido empregada a cinza volante.

Segundo Shah e Ahmad (1994), para aplicações de concretos de alto desempenho, a cinza volante é utilizada com taxas de dosagem de 15% do conteúdo de cimento. Devido à grande variabilidade deste material, deve-se fazer um controle de qualidade da composição da cinza volante proveniente de uma mesma fábrica.

A cinza volante retarda o início de pega do concreto reduzindo a quantidade de reações de hidratação, favorecendo assim a trabalhabilidade. Mas o efeito principal da cinza volante, segundo Mehta e Monteiro (1994), pode ser observado no estado endurecido do concreto, como:

- a. Reduzir o calor de hidratação;
- b. Retardar o ganho de resistência nas primeiras idades, devida a baixa velocidade das reações, ultrapassando, porém, em relação ao clínquer hidratado, as resistências após os 28 dias;
- c. Diminuir a possibilidade de ocorrência das reações álcali-agregados;
- d. Minimizar a retração e, conseqüentemente, o aparecimento de microfissuras devido ao menor calor de hidratação.

Portanto, as adições minerais podem atuar de três formas no concreto:

- a. Contribuir no controle de perda de abatimento (slump), que é frequentemente uma grande dificuldade para os concretos (PINTO, 2003);
- b. Produzir, através de seu potencial, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultante numa reação de hidratação de uma adequada mistura do cimento Portland e a pozolana (AITCIN, 1998);
- c. Preencher, devido o efeito filler, os espaços entre as partículas de cimento, tendo-se assim uma pasta menos porosa com menor necessidade de água de amassadura (ALMEIDA, 1990).

### 3.4.3 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um material não metálico obtido em condição liquefeita, simultaneamente com ferro em alto forno. A escória sofre um resfriamento rápido em água e se solidifica, adquirindo uma textura vítrea e granular, tornando-se um material hidráulico ativo, que atuará no concreto como substituição parcial do cimento. A escória de alto forno é constituída essencialmente de sílica, alumina e cal.

Segundo Shah e Ahmad (1994), na América do Norte, a escória de alto forno não é tão extensamente disponível como é na Europa, e por isso não há muita informação disponível sobre o seu comportamento em concretos de alto desempenho.

Entretanto, as indicações são que escórias que possuem um bom desempenho em concretos normais, são adequadas para uso em concretos de alto desempenho, para taxas de dosagens entre 15% e 30%. Para concretos de alto desempenho, com resistência superior a 98MPa, é provável que seja necessário o uso da escória em conjunto com a sílica ativa.

Ao que tudo indica, não há efeitos deteriorativos quando se utiliza sílica ativa no concreto. Entretanto quando se utiliza de cinza volante e escória de alto forno podem ocorrer alguns problemas tais como:

- a. O desenvolvimento de elevadas resistências em idades prematuras do concreto, nos quais uma parte de cimento Portland tenha sido substituída por escória de alto forno ou cinza volante, ocorre de maneira mais devagar do que aquela que se obtém utilizando-se apenas cimento Portland. Isso possui um efeito adverso, no tempo segundo o qual é possível fazer a retirada da fôrma. Uma maneira de proceder com esse problema, é por uma nova redução na relação água/cimento, através do uso de mais superplastificante. Claramente, isto não é muito atrativo economicamente, pois se altas resistências iniciais são necessárias, talvez seja necessário, reduzir o conteúdo da cinza volante ou escória de alto forno.
- b. Para níveis de substituição de (15% a 30%), cinza volante ou escória de alto forno, terão um efeito muito pequeno na temperatura máxima desenvolvida na massa de concretos pobres.

### 3.5 ADITIVOS

Os aditivos, conforme já relatado anteriormente, foram introduzidos na mistura de concreto com a finalidade de ajustar as características reológicas às necessidades do projeto, com objetivos de aumentar a plasticidade, reduzir a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução de calor, aumentar a durabilidade em condições específicas.

Segundo a norma ASTM C 494-92 os aditivos podem ser classificados em 7 tipos diferentes:

TIPO A: Redutores de água.

TIPO B: Retardadores de pega.

TIPO C: Aceleradores de pega.

TIPO D: Redutores de água e retardadores de pega.

TIPO E: Redutores de água e aceleradores de pega.

TIPO F: Redutores de água de alto grau.

TIPO G: Redutores de água de alto grau e retardadores de pega.

Os aditivos são classificados em produtos químicos derivados de sais solúveis e polímeros ou aditivos minerais. Os de base mineral são em geral pozolonas ou subprodutos de fornos de usinas termelétricas ou de fornos de indústria metalúrgica.

No caso de produção de concreto de alto desempenho, são utilizados basicamente os dois tipos de aditivos: líquidos superplastificantes e minerais. Deve ser citado que, em alguns casos, são combinados dois tipos de aditivos minerais.

#### 3.5.1 Aditivos redutores de água

Também conhecidos como dispersantes, são produtos químicos que incorporam um certo número de moléculas orgânicas, capazes de neutralizar as cargas elétricas dos grãos do cimento e por conseguinte, sua capacidade de floculação.

Em função de efeitos secundários negativos, tais como atraso no tempo de pega do concreto e absorção de bolhas de ar, a dosagem deste aditivo não pode ser aumentada à vontade, mesmo porque seu poder dispersante é limitado. Mediante o emprego deste produto,

a redução da quantidade de água de amassamento necessária pode alcançar valores entre 8% e 10%.

### **3.5.2 Aditivos retardadores de pega**

São aditivos que retardam a reação de hidratação do cimento. Os retardadores de pega eram recomendados para algumas aplicações de CAD, com o objetivo de minimizar o problema de rápida perda de slump. Entretanto, é difícil de manter a compatibilidade entre o retardador e o superplastificante, para minimizar a perda de slump, sem reduzir excessivamente o ganho de resistência inicial. Na prática moderna, retardadores são recomendados apenas como último recurso.

### **3.5.3 Aditivos lignosulfonatos**

As moléculas de lignosulfonato, extraídas do resíduo da pasta de papel, caracterizam-se por possuir uma estrutura molecular mais larga que a dos redutores de água, o que permite um recobrimento mais efetivo das partículas de cimento. Como consequência, tem-se a redução na quantidade de água de amassamento, a qual está compreendida entre 10% a 15% do total.

Possui os mesmos efeitos secundários que os aditivos redutores de água (atraso no tempo de pega e incorporação de bolhas de água), em função da presença de açúcares incorporados na matéria-prima.

Entretanto, deve-se levar em conta que durante 40 anos os lignosulfonatos têm sido os aditivos mais utilizados na indústria do concreto, permitindo com relativa facilidade a obtenção de resistências próximas dos 50 MPa.

### **3.5.4 Aditivos superfluidificantes**

Os superfluidificantes ou redutores de água de alto grau consistem em policondensados de formaldeído e melamina sulfonada ou formaldeído e naftaleno sulfonado. Estes compostos possuem moléculas de forma linear e alargada que permitem o recobrimento total das partículas de cimento, neutralizando as cargas de sinal negativo existentes nestas

partículas. Com isso, acabam-se as forças de atração eletrostáticas existentes entre as partículas de cimento, dificultando o fenômeno da floculação.

Os aditivos superfluidificantes não são subprodutos de nenhuma transformação industrial. Para sua obtenção é necessário um processo químico específico e de qualidade garantida. Sabendo-se da procedência desse produto, pode-se incorporá-lo à produção de concretos, com bastante segurança, em quantidades de até 10 vezes a máxima quantidade permitida para o emprego de lignosulfonatos, sem o aparecimento dos efeitos nocivos inerentes ao uso desses produtos. A possibilidade de emprego de elevadas quantidades de superfluidificantes, permite a adoção de valores de relação água/cimento da ordem de 0,22, o que se traduz na obtenção de um produto com uma porosidade muito baixa e como consequência, uma resistência muito alta.

Segundo Shah e Ahmad (1994), existem basicamente 3 tipos de superplastificantes: baseados em lignosulfonatos, policondensados de formaldeído e sulfonados de naftaleno.

### **3.5.5 Aditivos superplastificantes**

Os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis, obtidos sinteticamente através de um processo de polimerização. São aniônicos com grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto, formando longas moléculas que tendem a envolver as partículas de cimento com carga negativa e que devido as forças de Van der Waals, geram uma dispersão. Desta forma, partículas de cimento com cargas opostas, que tenderiam a atrair-se, repelem-se. Com isso, há uma hidratação melhor e mais rápida do cimento tendo como resultado final deste processo, um concreto com alta trabalhabilidade e alta resistência.

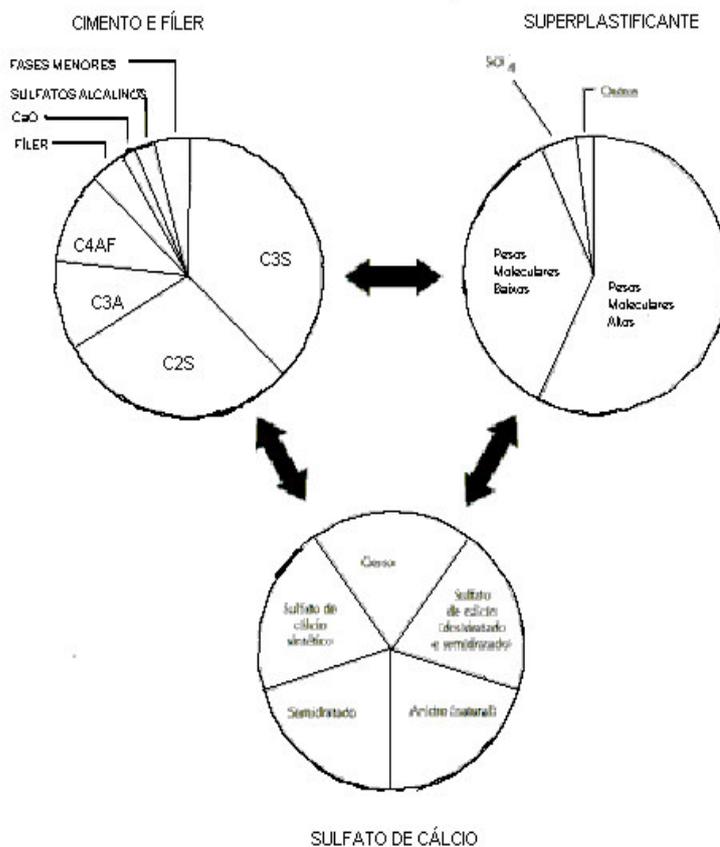
Dentre as categorias de superplastificantes, podemos citar os seguintes materiais:

- Condensados sulfonados de melamina-formaldeídos;
- Condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos;
- Condensados de lignosulfonados modificados;
- Ésteres de ácido sulfônico (sendo utilizados em menor escala).

Apesar de inúmeras pesquisas sobre a reação de hidratação de cimento Portland em presença de superplastificantes, ora abordando aspectos físicos da mistura Foissy e Pierre, ora químicos Andersen, Diamond e Struble, ou ainda uma abordagem mais orientada para o cimento, estudando o efeito dos superplastificantes nas diferentes partes constituintes C3S,

C2S, C3A segundo Masazza e Costa, não existe ainda uma teoria clara e bem aceita explicando os pormenores de toda a ação dos superplastificantes sobre as partículas do cimento durante a mistura e hidratação inicial. Sabe-se também que a interação entre cimento e plastificante torna-se ainda mais complexa devido às interações simultâneas entre cimento e sulfatos e destes com o superplastificante.

**Figura 4** - Complexidade das interações entre cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos.



Fonte: Aitcin, 2000.

No entanto, sabe-se que o superplastificante aumenta a trabalhabilidade do concreto, aumentando seu abatimento e sendo sua mistura fresca passível de lançamento com pouco ou nenhum adensamento, não sofrendo com isso efeitos excessivos de segregação ou exsudação.

### 3.6 DOSAGEM DOS SUPERPLASTIFICANTES

Não há, a princípio, uma maneira de se determinar a quantidade exigida de aditivo superplastificante, para um determinado traço de concreto.

Deve-se determinar a dosagem apropriada através de tentativa de acerto e erro. Basicamente, se a resistência é o primeiro critério, então procura-se obter a menor relação água/cimento possível, e dessa forma maiores quantidades de superplastificantes são utilizadas.

Às vezes, tem-se comprovado que cimentos e aditivos superplastificantes que satisfazem respectivamente às exigências normativas correspondentes, desenvolvem, ao serem postos em contato, comportamentos reológicos inexplicáveis que conduzem a perda de trabalhabilidade do concreto e perda de resistência. Em tais casos, se fala em incompatibilidade entre o cimento e o aditivo. Segundo Neville (1997) essa incompatibilidade consiste no seguinte: na reação de hidratação do cimento, os superplastificantes interagem com o aluminato tricálcico (C3A) que consiste no primeiro componente do cimento que se hidrata. Essa reação é controlada pela presença do gesso que é adicionado durante a fabricação do cimento Portland. Assim, tanto o aditivo superplastificante como o gesso podem reagir com o C3A. Entretanto, é essencial que todo o superplastificante não seja fixado pelo C3A. Essa fixação ocorreria se o gesso não liberasse íons de gesso com suficiente rapidez para que reagissem com o C3A. Quando os íons sulfato são liberados muito lentamente, diz-se que o cimento Portland e o aditivo superplastificante são incompatíveis.

A única forma de prevenir a aparição na obra de tais incompatibilidades consiste na realização de ensaios prévios em condições controladas de laboratório.

As dosagens normalmente utilizadas na fabricação de concretos de alto desempenho oscilam entre 5 e 20 litros/m<sup>3</sup>.

A experiência atual do uso destes produtos aconselha sua incorporação no concreto em duas fases.

- Primeira fase: durante o amassamento, em quantidade suficiente para conseguir uma trabalhabilidade que permita uma mistura direta dos distintos componentes e seu transporte sem segregação.

- Segunda fase: no momento da concretagem, em quantidade suficiente para compensar a perda de trabalhabilidade sofrida durante o transporte.

### 3.7 ÁGUA

Segundo Cordeiro (2001), a água introduzida no concreto como um de seus componentes tem duas funções. Uma parte, denominada água de amassamento, contribui para garantir uma trabalhabilidade adequada. A outra permite o desenvolvimento das reações químicas no concreto, tanto de hidratação do cimento Portland, quanto reações pozolânicas com os aditivos minerais e/ou constituintes do cimento empregado. Segundo o ACI 363 (1991) apud Cordeiro (2001), os mesmos requisitos de qualidade exigidos para água de concretos convencionais devem ser cumpridos no concreto de alto desempenho. De acordo com Neville (1997), águas potáveis, ligeiramente ácidas, não são prejudiciais ao concreto.

### 3.8 CLASSES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A divisão dos concretos de alto desempenho em cinco classes não é tão arbitrária como parece à primeira vista, mas deriva de uma combinação da experiência com o atual estado da arte. Essa classificação pode converter-se em norma em futuro próximo, à medida que se desenvolve a nossa compreensão dos diferentes fenômenos envolvidos na produção do concreto de alto desempenho. A faixa de alta resistência tem sido dividida em cinco classes correspondendo a incrementos de 25 Mpa (Aiticin, 2000).

**Tabela 7** - Classes diferentes de concreto de alto desempenho

Resistência à compressão (Mpa)	50	75	100	125	150
Classe de concreto de alto desempenho	I	II	III	IV	V

Fonte:Aiticin, 2000

A classe I representa um concreto de alto desempenho tendo a resistência à compressão entre 50 e 75 Mpa, a classe II entre 75 e 100 Mpa, a classe III entre 100 e 125 Mpa, a classe IV entre 125 e 150 Mpa e a classe V acima de 150 Mpa (Aiticin, 2000).

Para ser um pouco mais preciso essas resistências à compressão correspondem a valores médios obtidos aos 28 dias, com corpos-de-prova cilíndricos de 100x200mm, curados

sob as condições de norma usadas para concretos usuais. Essas não são resistências especificadas ou de projeto, pois o desvio padrão da produção concreto tem que ser levado em consideração (Aitcin, 2000).

### 3.9 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAD

De acordo com Aitcin (2000), diversos métodos têm sido propostos para calcular as proporções de uma mistura de concreto de alto desempenho. Os três abordados são o proposto pela Comissão ACI 363 para concretos de alta resistência, o proposto por de Larrard em 1990 e o método simplificado apresentado por Mehta and Aitcin (1990).

#### 3.9.1 Dosagem do concreto de alto desempenho

A dosagem pode ser entendida como o proporcionamento adequado dos materiais constituintes, atendendo as principais condições, segundo Helene e Terzian (1992), como:

- a. Técnicas de execução;
- b. Condições de exposição e operação;
- c. Exigências de projeto;
- d. Tipos de agregados disponíveis economicamente;
- e. Custo do processo.

Os diversos exemplos de proporção adotados em várias aplicações de CAD são baseados procedimentos empíricos ou a partir de dosagens de aplicações anteriores (SHAH & AHMAD, 1994).

Existem vários métodos de dosagem e quantificação do concreto de alto desempenho que, segundo Cordeiro (2001), destacam-se os sugeridos por: Mehta e Aitcin (1990), Larrard (1990), Bharatkumar (2001), ACI 363 (1993), Domone e Soutsos, Rougeron e Aitcin (1994), DAY (1996), O'Reilly (1998).

Segundo Lima (1997), os equipamentos de mistura utilizados para a produção de um CAD podem ser os mesmos adotados para concretos convencionais, devendo-se observar que a eficiência da mistura é melhor quanto maior for o desempenho do equipamento utilizado. É o caso de misturadores de alta velocidade, capazes de produzir misturas mais homogêneas em tempo mais curto e, dos misturadores com movimentos contra corrente, com tambor rotativo e

pás internas giratórias no sentido contrário ao do tambor ou outros com movimentos ditos planetários das pás internas, que propiciam uma perfeita homogeneização de misturas coesivas.

Em relação à sequência de colocação dos materiais, deve ser seguido o seguinte: primeiramente todo o agregado graúdo, opcionalmente, colocar um pouco da água; todo o cimento; a sílica ativa; o resto da água com o aditivo superplastificante e, finalmente, todo o agregado miúdo. O tempo de mistura deve ser um pouco maior que o adotado para o concreto convencional, para se atingir a dispersão um pouco apropriada, principalmente dos materiais finos e a incorporação de aditivos à mistura. A definição do tempo de amassamento depende da experiência dos técnicos, tempos prolongados podem provocar redução de consistência e da resistência à compressão (LIMA, 1997).

Como na maioria dos casos, o concreto é produzido em centrais e, transportado até o local da obra, existe uma dependência do tempo de percurso e, condições de trânsito durante o transporte. O tempo de transporte pode ultrapassar o tempo de ação do aditivo superplastificante, mesmo com a colocação em conjunto de aditivos retardadores, o que inviabiliza a operação de bombeamento. A solução para este problema é transportar o concreto da central para a obra, apenas com uma parte da água, sem os aditivos químicos e, sem a sílica ativa (LIMA, 1997).

No local da obra prepara-se uma solução com a sílica ativa dissolvida no restante da água e, com os aditivos apropriados, esta solução é colocada no caminhão betoneira e misturada por algum tempo e, com rotação apropriada, em seguida, bombeado para as fôrmas (LIMA, 1997).

Um dos objetivos fundamentais de um processo de dosagem, de acordo com O'Reilly (1998) apud Cordeiro (2001), é criar uma metodologia que considere as condições próprias de cada lugar e os recursos materiais disponíveis, para atingir características pré-definidas, sem, obviamente, elaborar regras gerais de aplicação do concreto.

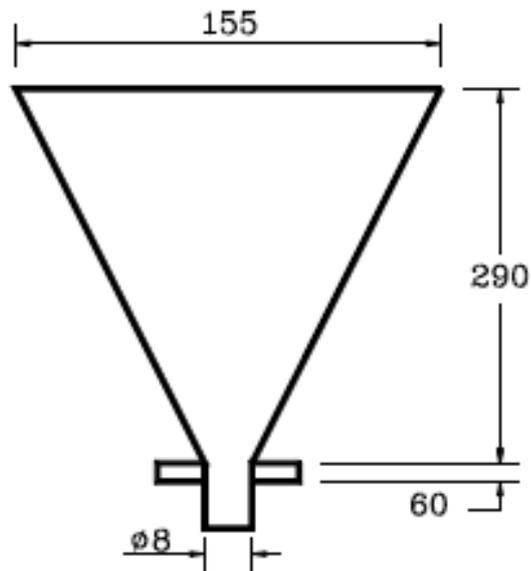
### **3.9.2 Determinação da fluidez da argamassa de cimento**

A fluidez da pasta de cimento pode ser caracterizada pelo tempo necessário para preencher um recipiente de volume conhecido, situado debaixo de um cone normalizado (cone de Marsh), no qual é colocada a pasta em estudo. Com esse procedimento, pode-se variar a quantidade dos componentes da pasta, tais como cimento, água, aditivos e adições

minerais, de tal forma que o tempo de fluxo seja igual a um estabelecido como padrão. As dimensões do cone de Marsh podem ser as apresentadas na figura 5.

O tempo de fluxo de referência a ser adotado, pode ser de 5 a 20 segundos, sendo o tempo necessário para preencher um recipiente de 200 cm<sup>3</sup>. O volume da pasta de cimento depositada no cone deve ser constante em todos os ensaios, sendo aproximadamente 1,5 litros.

**Figura 5** - Dimensões do cone de Marsh



Obs: dimensões em mm

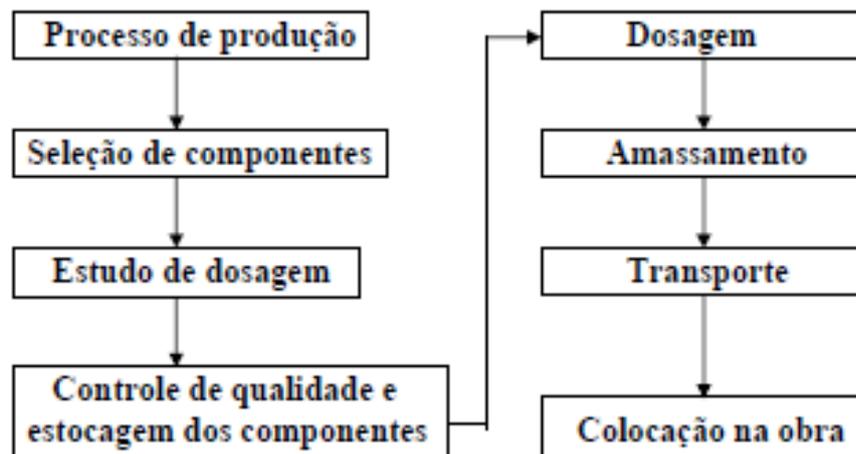
Fonte: GONZALEZ G. I. (1993).

## 4 FABRICAÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

As exigências para a fabricação de concreto de alto desempenho são maiores do que as contempladas pelas normas atuais, como pode ser visto a seguir:

- Estrito controle de qualidade dos componentes;
- Atenção especial para invariabilidade da relação água/cimento;
- Dosagem em peso de todos os materiais constituintes;
- Determinação periódica da granulometria e umidade dos agregados;
- Presença de laboratório junto à obra.

Em termos gerais o processo de fabricação do concreto de alto desempenho é o seguinte:



### 4.1 ESTOCAGEM DOS MATERIAIS

A estocagem dos materiais constituintes do concreto de alto desempenho deve ser feita de forma adequada, independentemente do material em questão. Geralmente, observa-se um armazenamento correto do cimento, aditivos e adições minerais, sendo o mesmo não observado para os agregados.

#### **4.1.1 Cimento**

Com relação ao cimento, caso esteja contido em sacos, deve ser armazenado em local ventilado e protegido, tanto das intempéries como da umidade do solo e paredes. Se o cimento estiver a granel, seu armazenamento deverá ser feito em silos, que o isolem da umidade ambiente e, na medida do possível, da temperatura ambiente.

#### **4.1.2 Sílica ativa**

A sílica ativa pode ser encontrada no mercado densificada (onde as partículas são compactadas por processo de ar sobre pressão), não densificada (material bastante solto, podendo gerar problema durante o seu manuseio) e em suspensão.

Em pó tem-se:

- a granel
- em sacos plásticos de grande capacidade

Em suspensão tem-se:

- a granel
- em caixas
- em vasilhames

De qualquer forma, o produto deve ser armazenado de acordo com as especificações do fabricante, e sempre protegido da umidade ambiente, e em local seco e ventilado.

#### **4.1.3 Aditivos**

Os aditivos empregados na fabricação de CAD podem-se apresentar em estado líquido ou estado sólido (menos habitual), convenientemente ensacados.

#### **4.1.4 Agregados**

São os agregados os componentes que apresentam maiores deficiências com relação às características exigíveis para emprego em concreto de alto desempenho.

A heterogeneidade no conteúdo de umidade do material é suficiente para impedir a obtenção da resistência adequada, desqualificando qualquer alternativa de estocagem de material ao ar livre.

A estocagem de cada fração de agregado que será utilizada no traço do concreto de alto desempenho, deverá ser feita em caixas ou compartimentos independentes.

É desaconselhável a estocagem direta de material fino em silos que incorporem um elevado conteúdo de umidade, em função da distribuição irregular que a mesma imporá à massa de material, em um tempo relativamente curto de armazenamento.

#### **4.1.5 Dosagem dos componentes**

A dosagem dos componentes deve ser feita em peso, com exceção da água e dos aditivos líquidos que poderão ser medidos em volume.

Os agregados também devem ser dosados em peso, tendo-se o cuidado de se fazerem as correções de umidade, de acordo com a umidade que esses materiais se encontram, pois as quantidades foram definidas supondo o material em estado seco.

#### **4.1.6 Amassamento**

A diferença entre o amassamento do concreto normal e do concreto de alto desempenho é que para o concreto tradicional efetua-se o amassamento completo do material antes da chegada do mesmo à obra, não sendo admitida nenhuma mudança no concreto depois que o mesmo saiu da central de produção. Já para o concreto de alto desempenho, é conveniente a incorporação do aditivo em duas fases: a primeira na central de produção, em quantidade suficiente para permitir a obtenção de uma massa com consistência adequada, a fim de possibilitar seu transporte. A segunda deve ser feita na obra, com o objetivo de se obter a consistência prevista. Além dessa mudança, pode-se destacar que alguns autores recomendam que o tempo de amassamento do concreto de alto desempenho deveria ser

aumentado de 50%, em relação ao tempo especificado para os concretos tradicionais, a fim de se obter um melhor efeito dos agentes superplastificantes.

#### **4.1.7 Consistência**

Inicialmente, admitia-se que para a obtenção de um concreto de alta qualidade era necessário que ele apresentasse um reduzido abatimento de tronco de cone. Isto em função da incompatibilidade de grande quantidade de água e elevada resistência.

Já para o concreto de alto desempenho esse aspecto muda radicalmente, pois com a utilização de superplastificantes, a consistência da massa de concreto fica independente do conteúdo de água, sendo possível a obtenção de concretos extremamente fluidos com relação água/cimento não superior a 0,30.

Na maioria dos casos, o concreto de alto desempenho é utilizado em elementos estruturais com elevada taxa de armadura, o que implica na necessidade de se obter concretos de elevada resistência com abatimento de tronco de cone igual ou superior a 200 mm.

#### **4.1.8 Transporte**

O transporte do CAD deve ser efetuado o mais rápido possível, assim como nos concretos convencionais, a fim de minimizar os efeitos de enrijecimento e perda de trabalhabilidade (CORDEIRO, 2001). O principal problema enfrentado durante o transporte do concreto de alto desempenho, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), é a perda de consistência ou fluidez com o tempo. Resolve-se isto com dosagens repetidas de aditivos superplastificantes ou com o uso de aditivo retardador de pega, devendo ser feitas tais dosagens com cautela em relação à segregação do concreto.

#### **4.1.9 Lançamento**

O lançamento do concreto de alto desempenho pode ser realizado segundo os métodos tradicionalmente usados, como linhas de bombeamento, guindastes, caçambas e correias transportadoras. O lançamento, em geral, é mais simples quando comparado com concretos usuais, devido a maior trabalhabilidade do concreto de alto desempenho, promovida pelo uso de superplastificantes e aditivos minerais (Cordeiro, 2001).

#### 4.1.10 Compactação

Em função da exigência de algumas características para o concreto de altodesempenho, tais como: abatimento de tronco de cone igual ou superior a 160 mm, ausência de segregação, alta viscosidade, menor tamanho de agregado graúdo e suficiente volume de partículas finas, a moldagem e a compactação de concreto de alto desempenho ficam bastante facilitadas.

As atividades prévias à moldagem do concreto de alto desempenho não diferem muito das utilizadas para concretos normais. Convém destacar que para os CAD, devido à menor energia de compactação, podem-se utilizar fôrmas menos rígidas e resistentes.

A determinação da consistência real do concreto no momento da chegada do concreto à obra deve ser norma de rotina. Caso seja necessária a adição de nova quantidade de aditivo, deve-se fazer nova homogeneização do material, mantendo a caçamba do caminhão betoneira durante 2 minutos com velocidade superior a que estava sendo mantida.

Devido à maior coesão existente entre as partículas dos componentes do CAD, tem-se uma diminuição da segregação do material.

Segundo Triantafillis apud Gonzalez (1993), em concretos sob condições controladas, é possível lançar o concreto de uma altura de até 4,50 metros com pouca ou nenhuma segregação.

Triantafillis estabelece as seguintes recomendações para compactação de concretos de alto desempenho:

- a) A energia de compactação requerida por um concreto de alto desempenho é da ordem de 25% da necessária para concretos Classe I, com abatimento de tronco de cone entre 50 mm e 100 mm.
- b) O diâmetro da agulha do vibrador não deve exceder 40 mm e a frequência deve ser maior do que 7000 vibrações por minuto.
- c) A profundidade da vibração está relacionada com a espessura da capa de concreto. De qualquer forma, tem-se obtido bons resultados, com apenas uma única penetração em capas com até 2 metros de espessura.
- d) A separação entre os pontos de vibração varia entre 30 cm e 60 cm.
- e) Com o objetivo de se evitar segregação e concentração de materiais finos, não se deve vibrar a armadura e nem a forma.
- f) O concreto não deve se mover horizontalmente com o vibrador.

#### 4.1.11 Cura

A cura, um dos procedimentos mais críticos na confecção de um concreto, tem como função principal manter a umidade da mistura durante o período de hidratação dos materiais cimentícios, além de minimizar a retração. A cura em concreto de alto desempenho é altamente recomendada em função da baixa relação água/aglomerante e alto teor de materiais cimentícios, sendo essencial para garantir a durabilidade adequada de superfícies expostas, desenvolvimento das resistências mecânicas e controle da fluência e retração. Sabe-se que a falta de uma cura adequada pode influenciar negativamente na qualidade final do concreto, independente dos cuidados com preparo, transporte, lançamento e adensamento (Cordeiro, 2001).

As adições minerais trazem como consequência o refinamento dos poros da pasta de cimento e da zona de transição por meio de suas ações de densificação e de atividade pozolânica (Mehta e Monteiro, 1994). Desta forma, o concreto de alto desempenho pode alcançar uma estrutura porosa descontínua e de baixa permeabilidade com poucos dias de hidratação, reduzindo o tempo de cura quando comparado com o concreto convencional (Cordeiro, 2001). Aïtcin (1998) apud Cordeiro (2001) considera 7 dias como um período longo para reduzir drasticamente a retração do concreto. Em todo caso Cordeiro (2001) conclui que a cura com água nunca deve ser inferior a 3 dias.

Ramezaniapour e Malhotra (1995) apud Cordeiro (2001) estudaram o comportamento de diferentes concretos com adições minerais (escória de alto-forno, cinza volante e sílica ativa), com relação água/aglomerante de 0,50, em diferentes tipos de cura: cura úmida após desmoldagem; cura a temperatura ambiente; cura a temperatura ambiente após 2 dias de cura úmida; e cura a temperatura de 38° C com umidade relativa do ar de 65%.

Os concretos com cura úmida apresentam, após 180 dias, melhores resultados de resistência à compressão, permeabilidade e penetração de cloretos. Já os concretos que não receberam cura após desmoldagem foram os que mostraram piores desempenhos nas propriedades.

## 5 APLICAÇÕES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Em função da grande resistência e durabilidade, os concretos de alto desempenho têm sido utilizados em diferentes tipos de construções ao longo de todo mundo, como pode ser visto a seguir.

### 5.1 EDIFÍCIOS

Pode-se dizer que a maior aplicação do concreto de alto desempenho é na execução de pilares, em edifícios de grande altura. Nestes, o concreto de alto desempenho possibilita diminuir as dimensões das seções, em função do acréscimo de resistência, principalmente para os pilares dos pavimentos inferiores, onde os carregamentos são maiores, proporcionando um melhor aproveitamento do espaço útil.

Outro aspecto vantajoso, na utilização do concreto de alto desempenho para os edifícios, consiste no aumento do módulo de deformação longitudinal, proporcionando maior rigidez para os pilares.

No Brasil, a obra pioneira no uso de concreto de alto desempenho foi o Edifício Trianon, que abriga o Museu de Arte de São Paulo (MASP), construído em meados da década de 60. O concreto empregado apresentou uma resistência característica à compressão de 45MPa aos 28 dias.

Tem-se na Tabela 8 uma relação de edifícios construídos com concreto de alto desempenho.

E por último, cabe destacar a facilidade de colocação e de compactação do concreto, que é de fundamental importância em estruturas com elevadas taxas de armadura.

**Tabela 8** - Edifícios construídos com concreto de alto desempenho.

Edifício	Localização	Ano	Nº de pavimentos	Resistência (MPa)
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	52
Water Tower Place	Chicago	1975	79	62
Royal Bank Plaza	Toronto	1975	43	61
Helmsley Palace Hotel	New York	1978	53	55
Texas Commerce Tower	Houston	1981	75	52
Columbia Center	Seattle	1983	76	66
Interfirst Plaza	Dallas	1983	76	69
900 N. Mich. Annex	Chicago	1986	15	97
Grande Arche de la Défense	Paris	1988	---	65
Bank of China Tower	Hong Kong	1988	72	---
South Wacker Tower	Chicago	1989	79	83
Two Union Square	Seattle	1989	58	115

Fonte: FIP/CEB-197 (1990).

## 5.2 PONTES

Nas pontes com grandes vãos, o concreto de alto desempenho é empregado com o objetivo de reduzir o peso próprio e aumentar a durabilidade de pilares e vigas protendidas de tabuleiros, em função da sua menor porosidade e permeabilidade, pois impede a ação de agentes químicos como sulfatos, nitratos e cloretos.

Na Noruega, o ministério de transporte exige nas pontes o uso de concretos cuja relação água/(cimento + adições) seja inferior a 0,40, sendo obrigatória a incorporação de cinza volante ou de sílica ativa.

Na Dinamarca, as características de durabilidade se impõem mediante a utilização de concretos com relação água/(cimento + adições) inferiores a 0,35 e resistência à compressão compreendida entre 50MPa e 60 MPa.

Tem-se na Tabela 9 uma relação de pontes, nas quais foi empregado o concreto de alto desempenho.

**Tabela 9** - Pontes construídas com concreto de alto desempenho

Ponte	Localização	Ano	Vão máximo (m)	Resistência (MPa)
Willows Bridge	Toronto	1967	48	41
Kaminoshima Highway B.	Japão	1970	86	59
Ootanabe Railway Bridge	Japão	1973	24	79
Selbjorn Bridge	Noruega	1977	212	40
Pasco-Kennewick intercity	Washington	1978	299	41
Deutzer Bridge	Alemanha	1978	185	69
Parrot Ferry Bridge	California	1979	195	43
Houston Ship Chanal	Texas	1981	229	41
Huntington to Proctorville	Ohio	1984	274	55
Pont du Pertuiset	França	1988	110	65
Boknasundet	Noruega	1990	190	60
Helgelandsbrua	Noruega	1990	425	65

Fonte: FIP/CEB-197 (1990).

### 5.3 PLATAFORMAS DE PETRÓLEO

O concreto de alto desempenho tem sido utilizado nas estruturas de todas as plataformas de petróleo construídas no Mar do Norte. Essa grande utilização se dá em função da grande capacidade do material de suportar a ação de agentes agressivos, menor custo de manutenção e grande durabilidade.

Convém destacar ainda a facilidade de moldagem dos elementos em função da grande fluidez do concreto, possibilitando em alguns casos a concretagem de estruturas cujas taxas de armadura em determinadas posições alcançam os 1.000 kg de aço por metro cúbico de concreto. Ainda com relação às propriedades favoráveis do concreto de alto desempenho, tem-se: resistência à abrasão e resistência ao choque.

Tem-se na Tabela 10 uma relação de algumas plataformas de petróleo construídas com concreto de alto desempenho.

**Tabela 10** - Plataformas de petróleo construídas com concreto de alto desempenho

Plataforma	Ano	Resistência aos 28 dias em MPa (corpo-de-prova cilíndrico)		
		De projeto	Média obtida	Resist. real
Ekofisk 1	1972	40	45	41,6
Beryl A	1974	45	55	50,7
Frigg MP-2	1976	40	56	49,8
Ninian Central	1978	50	59	53,1
Statfjord B	1979	55	62,5	56,9
Gulfaks A	1984	55	65,2	60,3
T300. Testmodel	1984	65	84,5	74,4
Oseberg A	1985	60	76,7	71,5
Gulfaks C	1986	65/70	79	75

Fonte: FIP/CEB-197 (1990).

#### 5.4 APLICAÇÕES ESPECIAIS

Numerosos exemplos de diversas obras encontram-se espalhados por vários países. A seguir encontram-se alguns exemplos da aplicação do concreto de alto desempenho.

- Estrutura de sustentação de tubulação de gás, construída em 1982, na costa da Noruega, com um comprimento total de 590 metros, disposta em diferentes profundidades, atingindo uma profundidade máxima de 30 m. Foram empregados elementos pré-fabricados com concretos de resistência compreendida entre 65 MPa e 75 MPa.

- Coberturas de um hipódromo em Doncaster (Inglaterra) e outro em Leopardstown (Irlanda), fabricadas com concreto de alto desempenho, feito a partir de agregados leves, com resistência de 52 MPa.

- Estrutura de elementos pré-fabricados de concreto de alto desempenho (75 MPa) no Japão, para proteção de estradas com relação a avalanches de neve e de materiais soltos.

- Depósito e caixas fortes de segurança, utilizando concretos com níveis de resistência compreendidos entre 95 MPa e 100 MPa, em Turim (Itália), em 1988.

- Pavimentos de autovias foram realizados na Noruega, empregando-se concreto de alto desempenho, com a finalidade de verificar seu comportamento frente aos esforços de

abrasão, impostos por condições de tráfego especialmente agressivas (pneus reforçados com cravos metálicos para melhorar sua aderência ao pavimento e baixas temperaturas superficiais). Após 6 anos de análise, os resultados obtidos foram muito positivos.

- Passarela pré-fabricada em tramos e protendida com pós-tensão, construída em Montreal (Canadá). A passarela foi construída com concreto de alto desempenho com resistência à compressão de 250 MPa e apresenta espessura da laje do tabuleiro do piso de apenas 3 cm.

- Pátio da indústria de papel e celulose Domtar Papers, em Windsor (Canadá), construído para depósito de toras de madeira, com área de 87.000 m<sup>2</sup> equivalente a 16 campos de futebol, de concreto de alto desempenho compactado com rolo. A laje construída sem juntas, ao longo de 45 dias, é a sexta maior do mundo.

## 6 ESTUDO DE CASO

### 6.1 RESIDENCIAL INGÁ

Dados:

Proprietário: Constrio Construtora e Incorporadora LTDA

Construção: Constrio Construtora

Localização: Rua Rodovanio Rodvalho, Jk Setor Oeste, Anápolis-GO, CEP: 75115-581

Fase: Em construção

Previsão de entrega: Dezembro de 2015

O Residencial Ingá possui 16m de altura com 5 pavimentos, 22 apartamentos com 71,47m<sup>2</sup> cada sendo: 02 apartamentos no térreo e 20 distribuídos em cinco andares, com 4 por andar, todas as vagas de garagem estão localizadas no subsolo, área de lazer localizada no térreo, elevador AMG, churrasqueira, piscina e espaço para playground. Cada apartamento contém: 02 quartos, banheiro social, cozinha (bancada americana), lavanderia, sala com dois ambientes (jantar/estar-tv), sacada, 02 vagas de garagem cobertas, laje técnica individual para ar condicionado, piso porcelanato 60X60 retificado/polido Portinari, portas com vedação de borracha, louças e metais deca, água/gás/energia com medição individual.

**Figura 6** - Fachada do Res. Ingá



Fonte: Constrio Construtora e Incorporadora

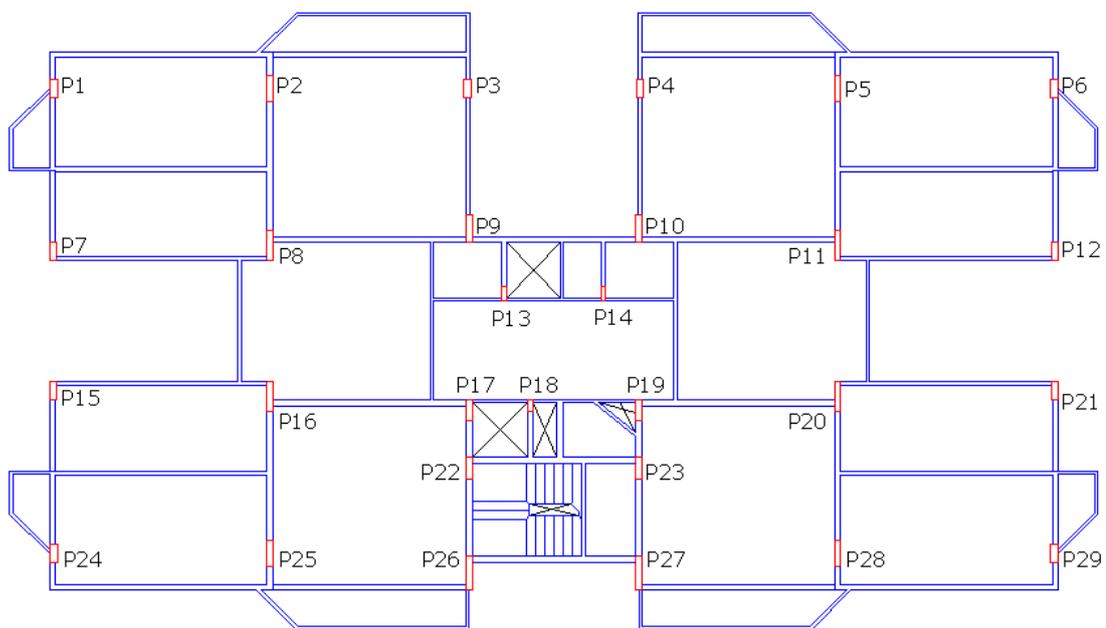
## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Neste capítulo são apresentadas as informações necessárias ao estudo da viabilidade econômica que são: o programa utilizado para o dimensionamento dos pilares em CAD, a estabilidade global da estrutura e os materiais utilizados no traço do concreto em referência.

### 6.2.1 Descrição da estrutura do edifício de referência

A análise econômica para utilização de concreto de alto desempenho nos pilares dará através da modelagem estrutural baseada na estrutura de referência, Residencial Ingá. O concreto estrutural utilizado em toda estrutura foi de 20 MPa de resistência característica à compressão e o edifício possui um elevador. O pé direito dos andares do edifício é de 2,80 m. A Figura 7 apresenta a planta estrutural do residencial de referência. As dimensões dos seus pilares estão discriminadas na tabela 11.

**Figura 7** – Planta estrutural do Residencial Ingá



Fonte: Constrio Construtora e Incorporadora

**Figura 8** – Fôrmas dos pilares do subsolo – Residencial Ingá



Fonte: Arquivo pessoal

**Figura 9** – Fôrmas dos pilares do térreo – Residencial Ingá



Fonte: Arquivo Pessoal

**Tabela 11** – Dimensões dos pilares da estrutura do Residencial Ingá

<b>Pilares</b>	<b>Dimensões (cm)</b>
P13, P14	15x50
P18	20x40
P7, P12, P15, P21	20x60
P17, P19, P22, P23	20x70
P2, P5, P25, P28	20x85
P9, P10	20x90
P8, P11, P16, P20, P26, P27	20x100
P1, P3, P4, P6, P24, P37	25x60

Fonte: Constrio Construtora e Incorporadora

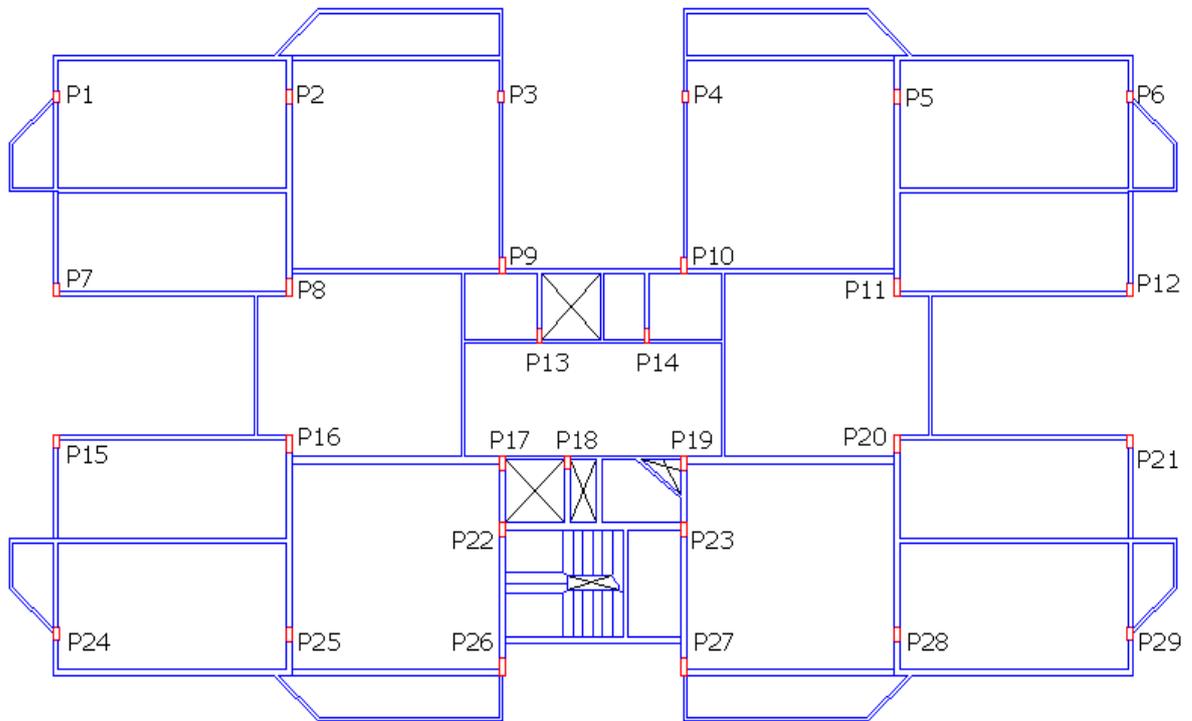
### 6.2.2 Descrição do modelo considerado no Residencial Ingá com CAD nos pilares

Foi dimensionado no programa Eberick V5 e analisado a estrutura do Residencial Ingá, mantendo-se o mesmo posicionamento dos pilares (Figura 7), alterando apenas a resistência característica do concreto utilizado nos pilares, de 20 MPa para 50 MPa.

A carga acidental considerada para todos os ambientes foi de 200 kg/m<sup>2</sup>. A carga acidental para as lajes que cobrem o fosso dos elevadores na cobertura (casa de máquinas) foi de 650 kg/m<sup>2</sup>. Para efeito de carga, foi considerada uma laje em cada vazio das escadas, com carga acidental de 300 kg/m<sup>2</sup>. Todas essas cargas seguem as recomendações da NBR 6120/1980.

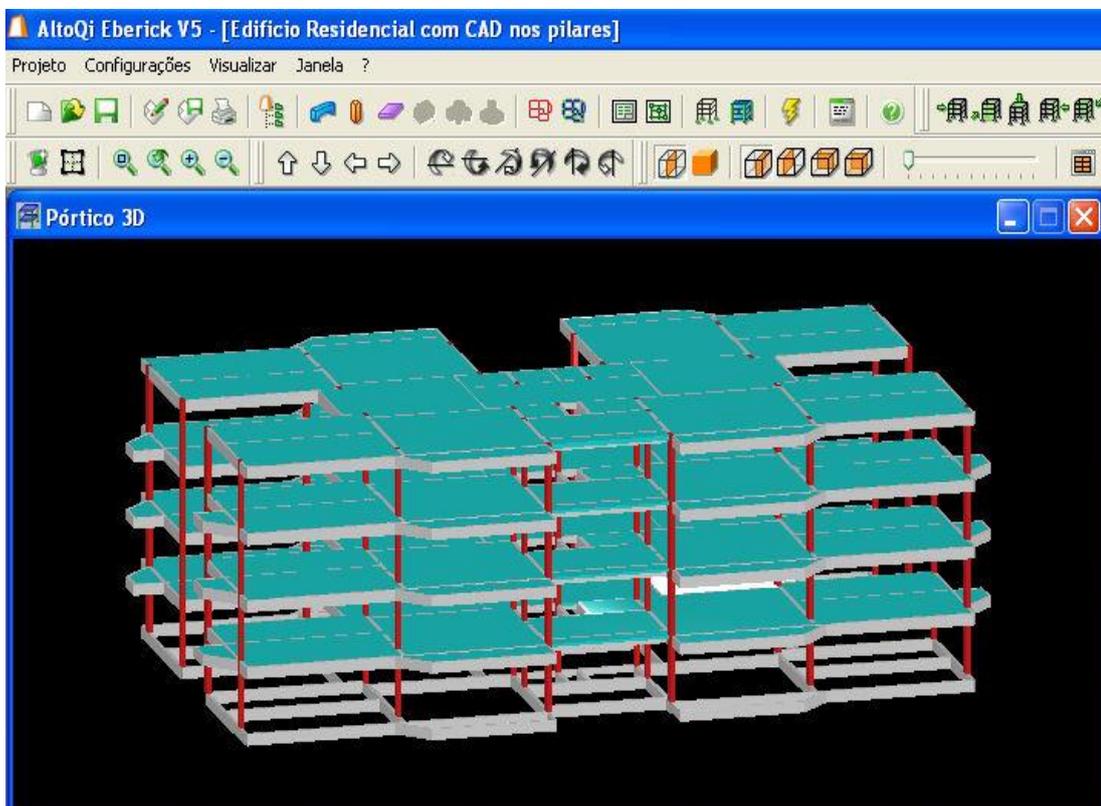
A planta estrutural e o pórtico em 3D do estudo de caso são apresentados nas figuras 10 e 11, respectivamente. Com o uso do CAD houve alteração nas dimensões dos pilares, conforme estão especificadas na Tabela 12.

**Figura 10** – Planta estrutural do edifício residencial com CAD nos pilares.



Fonte: Eberick V5

**Figura 11** – Pórtico estrutural 3D do edifício residencial com CAD nos pilares.



Fonte: Eberick V5

**Tabela 12** – Dimensões dos pilares da estrutura com CAD.

<b>Pilares</b>	<b>Dimensões (cm)</b>
P13, P14	15x40
P1, P3, P4, P6, P9, P12, P15, P18, P20, P24, P29	20x35
P2, P5, P19, P21, P22, P23, P25, P28	20x40
P7, P8, P10, P11, P16, P17, P26, P27	20x50

Fonte: Eberick V5

Foram considerados engastados todos os pilares do pavimento térreo, possuindo 1m até a cota de arrasamento da fundação. A fundação do edifício foi feita com estaca hélice porém não foi dimensionada, pois não é o foco deste trabalho.

Após processada a estrutura, foi verificada sua estabilidade global através do coeficiente Gama Z para as duas direções da edificação, como mostra a Tabela 13.

**Tabela 13** – Parâmetro de estabilidade global Gama-Z.

<b>Coefficiente Gama-Z</b>	<b>Direção</b>	<b>Limite (NBR 6118/2007)</b>
1,00	x	1,10
1,00	y	1,10

Fonte: Eberick V5

Pode-se verificar que o edifício é considerado como “estrutura de nós fixos”, por apresentar o parâmetro de estabilidade global Gama-Z com valor inferior ao limite estabelecido pela NBR 6118(ABNT, 2007). Sendo assim, a estrutura possui boa rigidez em relação aos esforços horizontais.

### 6.3 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO CAD

Os materiais considerados para a produção dos pilares em concreto de alto desempenho do edifício processado foram baseados em um traço fornecido pela empresa goiana chamada CIPLAN, atuante no ramo de fornecimento de concreto usinado, conforme mostra a Tabela 14.

**Tabela 14** – Materiais constituintes do CAD com  $f_{ck}=50$  Mpa

<b>Materiais</b>	<b>Massa para o traço (kg)</b>
Aditivo superplastificante (Conplast SP430)	3,1
Água	220,0
Areia Média	990,0
Brita 0	220,0
Brita 1	830,0
Cimento	980,0
Microssilica	330,0

Fonte: Ciplan

## 7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 7.1 QUANTITATIVO DE MATERIAIS

Os materiais necessários para a produção dos pilares do Residencial Ingá e do edifício em estudo de caso estão descritos conforme a Tabela 15 e 16, respectivamente.

Os materiais descritos na Tabela 15 foram retirados do detalhamento de materiais do projeto estrutural existente para o Residencial Ingá, os materiais da Tabela 16 foram levantados com o auxílio do software Eberick V5.

**Tabela 15** – Materiais utilizados para a produção dos pilares da estrutura do Residencial Ingá.

<b>Pavimento</b>	<b>Vol. Concreto (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso do aço CA 50 (kg)</b>	<b>Peso do aço CA 60 (kg)</b>	<b>Área de fôrma (m<sup>2</sup>)</b>
Térreo	4,41	468,90	111,30	54,80
Tipo 01	12,35	781,00	304,30	153,44
Tipo 02	12,35	795,20	295,10	153,44
Tipo 03	12,35	831,00	304,60	153,44
Cobertura	12,35	1255,40	255,40	153,44
<b>Total</b>	<b>53,81</b>	<b>4131,50</b>	<b>1270,70</b>	<b>668,56</b>

Fonte: Constrio Construtora e Incorporadora

**Tabela 16** – Materiais utilizados para a produção dos pilares da estrutura com CAD.

<b>Pavimento</b>	<b>Vol. Concreto (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso do aço CA 50 (kg)</b>	<b>Peso do aço CA 60 (kg)</b>	<b>Área de fôrma (m<sup>2</sup>)</b>
Térreo	2,33	278,50	61,20	35,10
Tipo 01	6,52	520,80	154,30	98,28
Tipo 02	6,52	650,80	153,10	98,28
Tipo 03	6,52	898,50	153,10	98,28
Cobertura	6,52	1504,70	134,70	98,28
<b>Total</b>	<b>28,41</b>	<b>3853,30</b>	<b>656,40</b>	<b>428,22</b>

Fonte: Eberick V5

## 7.2 CUSTOS DOS MATERIAIS

O preço do metro cúbico dos concretos analisados neste trabalho ( $f_{ck}$  de 20 MPa e  $f_{ck}$  de 50 MPa) foi baseado no preço sugerido pela CIPLAN, para o mês de Março de 2015 conforme a Tabela 17.

**Tabela 17** – Preço dos concretos analisados, sugerido pela empresa CIPLAN

Concreto	Preço por m <sup>3</sup> (R\$)
$f_{ck} = 20$ MPa	245,00
$f_{ck} = 50$ MPa	350,00

Fonte: Ciplan

Os preços dos aços CA 50 e CA 60 e da chapa de madeira compensada plastificada para fôrmas foram retirados da Goiás Materiais para Construção, como apresenta a Tabela 18.

**Tabela 18** – Preço dos materiais fornecidos loja de materiais para construção

MATERIAL	Preço por kg (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$)
Aço CA-50	6,5	-
Aço CA-60	6,69	-
Chapa de madeira compensada plastificada (para fôrma)	-	25,56

Fonte: Goiás Materiais Para Construção

## 7.3 CUSTO TOTAL DOS PILARES

Com os preços de todos os materiais citados para a análise definidos, a Tabela 19 apresenta o custo parcial dos materiais necessários para a fabricação dos pilares na estrutura com  $f_{ck}$  de 20 MPa (edifício modelo).

Os custos apresentados referem-se aos custos de produção somente dos pilares das duas estruturas estudadas (estrutura referência com concreto convencional e estrutura do estudo de caso com CAD nos pilares).

**Tabela 19** – Custo parcial dos materiais utilizados nos pilares da estrutura do Residencial Ingá

Pavimento	Custo do concreto (R\$)	Custo do aço CA 50 (R\$)	Custo do aço CA 60 (R\$)	Custo das fôrmas (R\$)
Térreo	1.080,45	1.697,42	459,67	1.018,73
Tipo 01	3.025,75	2.827,22	1.256,76	2.852,45
Tipo 02	3.025,75	2.878,62	1.218,76	2.852,45
Tipo 03	3.025,75	3.008,22	1.258,00	2.852,45
Cobertura	3.025,75	4.544,55	1.054,80	2.852,45
<b>Total</b>	<b>13.183,45</b>	<b>14.956,03</b>	<b>5.247,99</b>	<b>12.428,53</b>

Fonte: Arquivo pessoal

A Tabela 20 descreve o custo do edifício modelo por pavimento e o custo total para a produção dos pilares.

**Tabela 20** – Custo por pavimento e custo total dos pilares na estrutura do edifício referência.

Pavimento	Custo por pavimento (R\$)
Térreo	4.256,27
Tipo 01	9.962,18
Tipo 02	9.975,59
Tipo 03	10.144,42
Cobertura	11.477,55
<b>Custo total</b>	<b>45.816,00</b>

Fonte: Arquivo pessoal

A Tabela 21 apresenta o custo parcial dos materiais necessários para a fabricação dos pilares na estrutura com fck de 50 MPa (edifício com CAD nos pilares).

**Tabela 21** – Custo parcial dos materiais utilizados nos pilares da estrutura com CAD.

Pavimento	Custo do concreto (R\$)	Custo do aço CA 50 (R\$)	Custo do aço CA 60 (R\$)	Custo das fôrmas (R\$)
Térreo	815,50	1.008,17	252,76	652,51
Tipo 01	2.282,00	1.885,30	558,57	1.827,03
Tipo 02	2.282,00	2.355,90	554,22	1.827,03
Tipo 03	2.282,00	3.252,57	554,22	1.827,03
Cobertura	2.282,00	5.447,01	487,61	1.827,03
<b>Total</b>	<b>9.943,50</b>	<b>13.948,95</b>	<b>2.407,38</b>	<b>7.960,61</b>

Fonte: Arquivo pessoal

A Tabela 22 descreve o custo do edifício com CAD por pavimento e o custo total para a produção dos pilares.

**Tabela 22** – Custo por pavimento e custo total dos pilares da estrutura com CAD.

<b>Pavimento</b>	<b>Custo por pavimento (R\$)</b>
Térreo	2.728,94
Tipo 01	6.552,89
Tipo 02	7.019,14
Tipo 03	7.915,82
Cobertura	10.043,65
<b>Custo total</b>	<b>34.260,44</b>

Fonte: Arquivo pessoal

#### 7.4 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS

O custo do pavimento térreo do edifício referência representou 9,29% em relação ao custo total. O custo do pavimento térreo do edifício com CAD nos pilares representou 7,97% em relação ao custo total. O percentual de economia do pavimento térreo do edifício referência em relação ao pavimento térreo do edifício com o CAD nos pilares foi de 35,88%.

O custo do pavimento tipo 01 do edifício referência representou 21,74% em relação ao custo total. O custo do pavimento tipo 01 do edifício com CAD nos pilares representou 19,13% em relação ao custo total. O percentual de economia do pavimento tipo 01 do edifício referência em relação ao pavimento tipo 01 do edifício com o CAD nos pilares foi de 34,22%.

O custo do pavimento tipo 02 do edifício referência representou 21,77% em relação ao custo total. O custo do pavimento tipo 01 do edifício com CAD nos pilares representou 20,49% em relação ao custo total. O percentual de economia do pavimento tipo 02 do edifício referência em relação ao pavimento tipo 02 do edifício com o CAD nos pilares foi de 29,63%.

O custo do pavimento tipo 03 do edifício referência representou 22,14% em relação ao custo total. O custo do pavimento tipo 03 do edifício com CAD nos pilares representou 23,10% em relação ao custo total. O percentual de economia do pavimento tipo 03 do edifício referência em relação ao pavimento tipo 03 do edifício com o CAD nos pilares foi de 21,97%.

O custo do pavimento cobertura do edifício referência representou 25,05% em relação ao custo total. O custo do pavimento cobertura do edifício com CAD nos pilares representou 29,32% em relação ao custo total. O percentual de economia do pavimento cobertura do edifício referência em relação ao pavimento cobertura do edifício com o CAD nos pilares foi de 12,49%.

O uso do CAD nos pilares teve uma economia de 25,22% em relação ao uso do concreto convencional.

## **8 ANÁLISE OU COMPARAÇÃO / CRÍTICA**

São muitas as vantagens praticas do uso do CAD: a redução da área da seção dos pilares e conseqüente ganho de área útil nos pavimentos. Com as peças estruturais de menores dimensões, economiza-se no volume do concreto, na área de fôrma e na mão-de-obra de execução (redução de 52% do volume de concreto a ser empregado nos pilares, representando uma economia de aproximadamente 7%, quando comparado ao uso de um concreto de fck50 MPa).

Concretos de alto desempenho apresentam reduzida relação água/cimento (relação entre a massa de água e a massa de cimento do concreto), proporcionando a obtenção de concretos mais duráveis, menos permeáveis e menos porosos. Com a redução da relação água/cimento, as resistências são maiores e o prazo de desforma da estrutura pode ser menor.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal a análise da viabilidade econômica entre o CAD e o concreto convencional em pilares do Residencial Ingá. Os fatores que levaram a este estudo foram a crescente utilização do CAD devido a sua durabilidade e à economia gerada quando se utiliza este material principalmente em peças estruturais submetidas à compressão.

As pesquisas apresentadas neste trabalho mostraram que o custo do metro cúbico do concreto de alto desempenho é cerca de 43% mais caro em relação ao concreto convencional. Portanto, observa-se que com o uso do CAD tem-se a possibilidade da diminuição da seção transversal dos pilares desde que a estrutura permaneça estável.

Este trabalho apresentou um edifício com 5 pavimentos como referência e, em seguida, estudou-se o mesmo edifício com alterações em seus pilares para realizar uma análise quantitativa.

O CAD além de ter apresentado um menor custo global, ainda possui maior durabilidade devido à redução na permeabilidade da estrutura e, conseqüentemente, diminuição nos custos das manutenções em relação ao concreto convencional.

Apesar da tecnologia de produção do CAD ser criteriosa, este material vem se tornando comum na construção civil e, por apresentarem vários estudos sobre sua aplicação e vantagens técnicas e econômicas, o mesmo deixa de ser uma barreira e passa a ser uma opção bastante viável.

## REFERÊNCIAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Concreto de Alto Desempenho, Segundo CD-ROM**, 1CD, versão I, 1999.
- AITCIN, P. R. (2000) **Concreto de Alto Desempenho**, Trad. Giammusso, S. E. 1º ed., São Paulo: Editora Pini.
- ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características**. Lisboa, 1990. Tese (Doutorado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de Alto Desempenho, Definições e Características Técnicas**. In: Revista Ibracon, 21, ano VI. São Paulo abril/julho 1998.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1992). ACI 363R-92 - **State-of-art report on high strength concrete**. Detroit, ACI.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11.578: **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira de Cimento Portland (1999) **Guia básico de utilização do cimento Portland** – BT-106. 5ª ed., São Paulo, 28 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983) **Agregado para concreto: NBR 7211**. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) **Aditivos para concreto de cimento Portland: NBR 11768 – EB-1763**. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) **Concreto – Preparo, controle e recebimento: NBR 12655**. Rio de Janeiro.
- BACCIN, A.G.C.; PINHEIRO, L.M. (1997). **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho para aplicação em edifícios**. In: REUNIÃO DO IBRACON, 39., São Paulo, 1997. v.2, p.687-700.
- BS 8110 (1985). **Structural use of concrete - Part 1: Code of practice for design and construction**. London, British Standards Institution.
- Bucher, H. R. E. (1988) **Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos**. In: Anais da 30ª Reunião do Instituto Brasileiro de Concreto – REIBRAC, Rio de Janeiro, pp. 609 – 625.
- COOK, J.E. (1989). **Research and application of high-strength concrete: 10000 psi concrete**. *Concrete International*, p.67-75.Oct.

COLLINS, M.P.; MITCHELL D.; MACGREGOR, J.G. (1993). **Structural design considerations for high-strength concrete**. *Concrete International: Design and Construction*, v.15, n.5, p.27-34. May.

CORDEIRO, G. (2001) **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita**. Dissertação (mestrado) Msc. Em Ciências de Engenharia. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, RJ, 2001.

DAL MOLIN, D.C.C. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica**. São Paulo. 224p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DINIZ, José Zamalio F. **Alto Desempenho Alta Resistência**, ABCP, 1997. 1CD (1:20 min), son., color.

EUROCODE 2 (1992). **Design of concrete structures - Part 1: general rules and rules for buildings**. Brussels, CEN.

FERRARI A.A.; FLOR J.M.; CALIXTO, J.M.F. (1995). **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 27., Tucuman, Argentina, sept. Memorias. v.5, p.93-102.

FIP-CEB Working Group on High-Strength Concrete (1990). **High strength concrete: state of the art report**. CEB Bulletin d'Information, n. 197, August.

GONZALEZ-IZABEL, G. (1993). **Hormigon de alta resistencia**. Madrid, Intemac. 297p.

GRIEB, W.E.; WERNER, G. (1962). **Comparison of splitting tensile strength of concrete with flexural and compressive strengths**. *Public Roads*, v.32, n.5.

HAN, N.; WALRAVEN, J.C. (1994). **Properties of high-strength concrete subjected to uniaxial loading**. In: MALHOTRA, V.M. High performance concrete. (Proceedings ACI International Conference Singapore, 1994). Detroit, ACI. p.269-280.

KHAN, A.A.; COOK, W.D.; MITCHELL, D. (1995). **Early age compressive stress-strain properties of low-medium, and high-strength concretes**. *ACI Materials Journal*, v.92, n.1, p.617-624. November - December.

KONG, F.K.; EVANS, R.H. (1987). **Reinforced and prestressed concrete**. 3.ed. Wokingham, UK, Van Nostrand Reinhold. 509p.

Hartmann, C. T., Helene, P., (2005) **Estudo de caso concreto de Alto desempenho do edifício E-Tower**.

Helene, P. R. L., Terzian, P. (1992) **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Editora Pini, 349 p.

LIMA, F. B. **Pilares de Concreto de Alto Desempenho. Fundamentos e Experimentação.** Tese (Doutorado) Dr. Em Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas, SP, 1997.

MACGREGOR, J. G. (1992). **Reinforced concrete mechanics and design.** 2.ed., Englewood Cliffs, Prentice Hall. 848p.

MEHTA, P. K. (1990). **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete.**In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., Detroit, American Concrete Institute, p.265-286. (SP-121).

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (1994) **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1ª ed., São Paulo: Editora Pini, 616 p.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental do concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Curitiba, 2002. Dissertação (Requisito parcial para o grau de Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** Tradução Eng. Salvador E. Giammusso. 2. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

O 'REILLY DÍAZ, V. **Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho.** São Paulo Ed. Pini, 1998. 122 p.

PEREIRA NETO, P. M. (1994). **O Efeito do Agregado Graúdo em algumas Propriedades do Concreto de Alta Resistência com Microssílica.** São Paulo. 173p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO, R. O. **Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para o concreto de alto desempenho (CAD) Empregando Materiais na Região de Goiânia.** Goiânia, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiânia.

PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B.; LOPES, A. N. M. L. , **Aplicação dos Métodos de Dosagem Específicos para Concretos de Alto Desempenho (CAD),** Ibracon, 2003.16p.

SACIOTO, A. P. **Comportamento frente à ação dos cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** Santa Catarina, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina.

SERRA, G. G. **A Pedra Artificial.** *Téchne*, v.7, n. 27, p. 12-16, mai/jun, 1997.

SHAH, S.P.; AHMAD, S.H., (1985). **Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete.** PCI Journal, p. 93-119. November-December.

SHAH, S. P.; AHMAD, S.H. (1994) **High Performance Concretos and Applications.** London, Edward Arnold, 402 p.

SHEIKH, S. A.; SHAH, D. V.; KHOURY, S.S. (1994). **Confinement of high-strength concrete columns**. ACI Structural Journal, v.91, n.1, p.100-111. January-February.

SOUZA, V. C. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo Ed. Pini, 1998. 255 p.

# FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, FLÁVIO PEREIRA DA  
SILVA, RENATO DIAS DA

Estudo da Viabilidade Econômica Da Utilização de Concreto de Alto Desempenho em Pilares de Edifício (2015)

72P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2015).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Concreto Comum  
3. Custos

2. Concreto de Alto Desempenho

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, F. P. & SILVA, R. D. Estudo da Viabilidade Econômica Da Utilização de Concreto de Alto Desempenho em Pilares de Edifício. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 72p. 2015.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Flávio Perereira da Silva e Renato Dias da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: GRAU:

Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2015

É concedida à Unievangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Flávio Pereira da Silva  
Rua 21 N° 200 – Bairro Carrilho  
76380-000 – Goianésia/GO - Brasil  
E-mail: eng.flaviosilva@gmail.com

---

Renato Dias da Silva  
Av. Bahia, 76-A – Bairro Carrilho  
76380-000 – Goianésia/GO  
E-mail: renato.31.dias@gmil.com