

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DO TIPO E DO TEMPO DE DURAÇÃO DE CURA
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS DE ALTO
DESEMPENHO (CAD) PRODUZIDOS EM PERÍODO QUENTE
($t > 25^{\circ}\text{C}$) E DE BAIXA UMIDADE RELATIVA DO AR ($h < 50\%$)**

Simone Ataíde Beserra

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer

Co-Orientador: Prof. Dr. Edgar Bacarji

Goiânia

2005

SIMONE ATAÍDE BESERRA

**INFLUÊNCIA DO TIPO E DO TEMPO DE DURAÇÃO DE CURA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO
(CAD) PRODUZIDOS EM PERÍODO QUENTE ($t > 25^{\circ}\text{C}$) E DE BAIXA UMIDADE
RELATIVA DO AR ($h < 50\%$)**

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Goiás para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil

Área de concentração: Estrutura e
materiais

Orientador: Prof. Dr. André Luiz
Bortolacci Geyer

Goiânia

2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

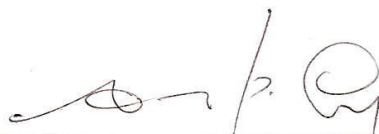
- B554i Beserra, Simone Ataíde.**
Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$) / Simone Ataíde Beserra. – 2005.
xiv, 121f. : il., color., tabs., qds., figs.
- Orientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer; Co-Orientador: Prof. Dr. Edgar Bacarji.**
1.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil, 2005.
 2.
Bibliografia: f. 112-121.
Inclui listas de tabelas, quadros, figuras e de fotos.
Anexos.
 3.
1. Cura do Concreto 2. Concreto – Alto desempenho 3.
 4.
Concreto I. Geyer, André Luiz Bortolacci. II. Bacarji, Edgar.
 5.
III. Universidade Federal de Goiás. **Escola de Engenharia**
 6.
Civil IV. Título.

CDU:693.547

**INFLUÊNCIA DO TIPO E DO TEMPO DE DURAÇÃO DE CURA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO (CAD)
PRODUZIDOS EM PERÍODO DE BAIXA UMIDADE RELATIVA DO AR ($h < 50\%$)**

SIMONE ATAÍDE BESERRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 07 de junho de 2005, pela banca examinadora constituída pelos componentes:



André Luiz Bortolacci Geyer, Dr. (UFG)
(ORIENTADOR)



Edgard Bacarji, Dr.(UFG)
(CO-ORIENTADOR)



Marlova Piva Kulakowski, Dr^a. (UFRGS, FEEVALE)
(EXAMINADORA EXTERNA)



Enio Pazini Figueiredo, Dr. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)



Anne Neiry de Mendonça Lopes (FURNAS)
(CONVIDADA)

*Aos meus maravilhosos pais, Epaminondas e Verany,
pelas oportunidades, incentivo, amor e compreensão.
Sem eles eu jamais conquistaria mais este desafio.*

*Às minhas irmãs, Luciana e Sirlane,
pela grande amizade e companheirismo.*

*À minha querida avó Vitória,
pelo imenso carinho a mim dispensado.*

Eu amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo gostaria de agradecer a Deus pela minha vida maravilhosa, pela saúde e pelas oportunidades que me proporciona. Sem Ele ao meu lado nada disto seria possível.

À toda minha família, em especial meus pais e minhas irmãs, pelo incentivo, imenso carinho, compreensão e esforço que permitiu conquistar este desafio.

Ao meu orientador e grande amigo Professor André Geyer pela competente e segura orientação, interesse, dedicação, paciência, amizade e permanente disponibilidade durante este trabalho.

Ao meu co-orientador e também amigo Professor Edgar Bacarji pela valiosa orientação, interesse, dedicação e disponibilidade.

Ao grande e inseparável amigo Osvaldo Valinote pela ilimitada amizade, pelo incentivo e pelas maravilhosas conversas compartilhadas.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas, em especial à engenheira Luciana dos Anjos, aos engenheiros Alfredo Liduário e Flávio e aos grandes colegas Emerson Júlio, Jésus, Cláudio, Ériko, Creuzivaldo, Paulo Arcanjo, Misael, Luiz Polaco, Rosivaldo, Sílvio, Fernando, Eloy, Edson, Luiz Antônio, Marco Aurélio, Jacilene e Lutz, pela ajuda com seriedade e profissionalismo na realização dos ensaios.

Ao Manuel, Agnaldo e Deusair pela amizade e grande ajuda durante todo o curso.

Ao querido e amado Carlos Eduardo (Dudu), pelo incentivo, paciência e ajuda durante esta árdua caminhada, sempre me apoiando nos momentos difíceis e fazendo-me acreditar na vitória.

À Cimento Goiás, em nome do engenheiro Marcus Vinícius pela doação de materiais utilizados no programa experimental.

À Impercia, em nome do grande profissional Richelieu, pela doação de materiais utilizados no programa experimental e pelo imenso interesse, apoio e pelas valiosas sugestões para esta pesquisa.

Ao meu amigo Professor Enio Pazini pela recomendação à coordenação do mestrado, pelo apoio e amizade.

À CAPES pelo apoio financeiro, através de bolsa de estudo, durante a realização desta pesquisa.

Aos meus companheiros de mestrado, grandes amigos. Foi uma satisfação imensa ter conhecido cada um de vocês.

À todos que, direta ou indiretamente, propiciaram a realização deste trabalho.

Simone

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE FOTOS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	2
1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	3
1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	3
2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD).....	5
2.1. CONCEITOS.....	5
2.2. HISTÓRICO.....	6
2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO CAD.....	8
2.4. MATERIAIS CONSTITUINTES.....	11
2.4.1. Cimento.....	11
2.4.2. Agregados.....	12
2.4.3. Adições minerais.....	13
2.4.4. Aditivos químicos para CAD.....	16
2.5. PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....	17
2.5.1. Massa Específica.....	18
2.5.2. Trabalhabilidade.....	18
2.5.3. Teor de ar.....	19
2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD.....	20
2.6.1. Resistência à compressão.....	20
2.6.2. Resistência à tração.....	21
2.6.3. Módulo de deformação.....	23
3. CURA DO CAD.....	25
3.1. CONCEITO E IMPORTÂNCIA.....	25
3.2. RETRAÇÃO.....	26
3.3. FATORES QUE AFETAM A CURA.....	28
3.3.1. Duração da cura.....	28
3.3.2. Umidade.....	31
3.3.3. Temperatura.....	32
3.3.4. Vento.....	33
3.4. TIPOS E PROCEDIMENTOS DE CURA.....	36
3.4.1. Cura úmida.....	36
3.4.2. Cura por membrana.....	37
3.4.3. Cura térmica.....	39
3.5. CURA DO CAD.....	39
3.6. INFLUÊNCIA DA CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD.....	42

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL: PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	46
4.1. LOCAL DOS EXPERIMENTOS.....	46
4.2. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	46
4.2.1. Variáveis independentes.....	46
4.2.2. Variáveis dependentes.....	54
4.3. MATERIAIS UTILIZADOS.....	56
4.3.1. Cimento.....	56
4.3.2. Agregado miúdo.....	57
4.3.3. Agregado graúdo.....	58
4.3.4. Adição mineral.....	59
4.3.5. Aditivo.....	61
4.3.6. Membranas para curas químicas.....	61
4.4. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	62
4.5. PRODUÇÃO DA AMOSTRA EXPERIMENTAL.....	62
4.6. DOSAGEM DO CONCRETO.....	64
4.7. ENSAIOS NO CONCRETO FRESCO.....	67
4.8. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	68
4.9. DESFORMA DOS CORPOS DE PROVA.....	68
4.10. APLICAÇÃO DA CURA E ARMAZENAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	70
4.11. ENSAIOS DO CONCRETO ENDURECIDO.....	72
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1. CONCRETO FRESCO.....	74
5.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	74
5.2.1. Resistência estimada 60 MPa.....	75
5.2.2. Resistência estimada 80 MPa.....	78
5.2.3. Resistência estimada 100 MPa.....	81
5.2.4. Análise do desempenho dos tipos de cura na resistência à compressão.....	83
5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	87
5.3.1. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 60 MPa.....	89
5.3.2. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 80 MPa.....	91
5.3.3. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 100 MPa.....	92
5.3.4. Análise do desempenho dos tipos de cura na resistência à tração na flexão.....	94
5.4. MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	95
5.4.1. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 60 MPa.....	96
5.4.2. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 80 MPa.....	98
5.4.3. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 100 MPa.....	98
5.4.4. Análise do desempenho dos tipos de cura no módulo de deformação.....	99
5.4.5. Resistência à compressão x Módulo de deformação.....	100
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	102
6.1. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	103
ANEXO A.....	104
ANEXO B.....	108
ANEXO C.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de resistência à compressão de CAD (DAL MOLIN, 1999).....	6
Tabela 2.2 – Obras executadas com CAD.....	7
Tabela 3.1 – Tempo mínimo de cura recomendando pelo IBRACON de acordo com o tipo de cimento e relação a/c do concreto (BATTAGIN <i>et al.</i> , 2002).....	28
Tabela 3.2 – Tempos mínimos de cura (em dias) recomendados pela ENV 206:1992 (NEVILLE, 1997).....	30
Tabela 4.1 – Caracterização química e física do cimento.	56
Tabela 4.2 – Composições de cimentos utilizados na produção de CAD.....	57
Tabela 4.3 – Caracterização física do agregado miúdo.....	58
Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211/1983).....	58
Tabela 4.5 – Caracterização física do agregado graúdo granulito – Brita 0.....	59
Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado graúdo granulito – Brita 0 (NBR 7217/87).....	59
Tabela 4.7 – Caracterização da sílica ativa.....	60
Tabela 4.8 – Composições químicas de sílicas de diferentes fontes de produção (PINTO, 2003).....	60
Tabela 4.9 – Caracterização do aditivo (MBT, 2003).....	61
Tabela 4.10 – Caracterização das membranas químicas para cura do CAD (MANUAL TÉCNICO, 2003).....	61
Tabela 4.11 – Composição dos concretos por m ³	65
Tabela 4.12 - Consumos usuais de aglomerantes em CAD.....	66
Tabela 5.1 – Ensaio do concreto fresco.....	74
Tabela 5.2 – Resistência à compressão aos 03, 07 e 28 dias para os diferentes tipos e tempos de duração de cura.....	75
Tabela 5.3 – Porcentagem média de acréscimo de resistência em relação à referência.....	84
Tabela 5.4 – Resultado de resistência à tração na flexão aos 07 dias.....	88
Tabela 5.5 – Resultado de resistência à tração na flexão aos 28 dias.....	88
Tabela 5.6 – Porcentagem média de acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência.....	95
Tabela 5.7 – Resultado de módulo de deformação aos 7 e 28 dias.....	96
Tabela 5.7 – Porcentagem média de acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Classificações gerais de clima (ROMERO, 1988).....	47
Quadro 4.2 – Tipos e tempos de duração de cura.....	50
Quadro 4.3 – Programa experimental.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comparação entre diferentes correlações propostas (DAL MOLIN; MONTEIRO, 1996).....	24
Figura 3.1 - Períodos de cura recomendados (CEB - Boletim nº183, 1989).....	29
Figura 3.2 - Grau de hidratação do silicato de cálcio para diferentes umidades relativas (OLLIVIER, 1998).....	31
Figura 3.3 – Influência da umidade relativa do ar sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (temperatura do ar 21°C; velocidade do vento 4,5m/s) (NEVILLE, 1997).....	32
Figura 3.4 – Influência da velocidade do vento sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (umidade relativa 70%; temperatura do ar 21°C) (NEVILLE, 1997).....	34
Figura 3.5 – Influência da velocidade e temperatura do ar do concreto sobre a evaporação da água do concreto (CANOVAS, 1996).....	35
Figura 3.6 - Regimes mais adequados de cura no curso das reações de hidratação (AITCIN,2000).....	41
Figura 3.7 – Efeito dos tipos de cura no CAD (ZAIN; RADIN, 2000).....	43
Figura 3.8 – Influência dos diferentes procedimentos de cura no CAD (PINTO e GEYER, 2003).....	44
Figura 4.1 – Umidade relativa do ar durante o mês de setembro/2004 (INMET, 2004).....	48
Figura 4.2 – Temperaturas mínimas, máximas e médias durante o mês de setembro/2004 (INMET, 2004).....	48
Figura 5.1 – Resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de cura para resistência estimada 60 MPa.....	76
Figura 5.2 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	77
Figura 5.3 – Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes tipos e tempos de duração de cura para resistência estimada 80 MPa.....	79
Figura 5.4 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	80
Figura 5.5 – Resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de cura pa resistência estimada 100 MPa.....	81
Figura 5.6 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	82
Figura 5.7 - Acréscimos de resistência à compressão, em porcentagem, dos diferentes tempos de duração de cura em câmara úmida, em relação à referência (C0).....	85
Figura 5.8 - Acréscimos de resistência à compressão, em porcentagem, dos diferentes tempos de duração de cura através de aspersão de água, em relação à referência (C0).....	85
Figura 5.9 - Acréscimos de resistência à compressão, em porcentagem, dos diferentes tempos de duração de cura através de aspersão de água, em relação à referência (C0).....	85
Figura 5.10 - Acréscimo de resistência à compressão, em porcentagem, para os diferentes tipos de cura.....	86
Figura 5.11 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura	89

para resistência estimada 60 MPa.....	
Figura 5.12 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	90
Figura 5.13 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura.....	91
Figura 5.14 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	92
Figura 5.15 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 100 MPa.....	93
Figura 5.16 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.....	94
Figura 5.17 – Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 60 MPa.....	97
Figura 5.18 – Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 80 MPa.....	98
Figura 5.19 – Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura.....	99
Figura 5.20 – Correlação do módulo de elasticidade e resistência à compressão.....	100

LISTA DE FOTOS

Foto 4.1 – Pesagem dos materiais.....	65
Foto 4.2 – Colocação dos materiais na betoneira.....	65
Foto 4.3 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	67
Foto 4.4 – Ensaio para determinação da massa específica do concreto.....	67
Foto 4.5 – Ensaio para determinação do teor de ar incorporado.....	67
Foto 4.6 – Formas preparadas para a moldagem.....	68
Foto 4.7 – Desforma do corpo de prova 5 horas após a moldagem.....	69
Foto 4.8 – Desforma do corpo de prova 8 horas após a moldagem.....	69
Foto 4.9 – Desforma do corpo de prova 12 horas após a moldagem.....	69
Foto 4.10 - Corpo-de-prova exsudando água, antes da aplicação do produto de cura química (a) e o mesmo corpo-de-prova após a aplicação do produto de cura química (b) (COUTO, 2003).....	70
Foto 4.11 - Superfície dos corpos de prova após a aplicação da membrana química de cura.....	71
Foto 4.12 – Vista da parte externa da tenda para armazenagem dos corpos de prova..	71
Foto 4.13 – Vista da parte interna da tenda para armazenagem dos corpos de prova...	71
Foto 4.14 – Local de armazenagem dos corpos de prova destinados ao processo de cura por molhagem.....	72
Foto 4.15 – Ensaio para determinação da resistência à compressão.....	72
Foto 4.16 – Ensaio para determinação da resistência à tração na flexão.....	73
Foto 4.17 – Ensaio para determinação do módulo de deformação.....	73

RESUMO

No caso de concreto convencional, pequenos defeitos construtivos, variações de dosagem ou mesmo curas inadequadas podem não comprometer significativamente o material. Já no CAD exige-se um rigor no controle desde sua dosagem até a execução, pois qualquer falha pode trazer sérios prejuízos ao material ou a estrutura. Dentre os aspectos mais importantes relativos à qualidade total de qualquer concreto está a cura, o que se torna fundamental quando se trata de CAD.

A cura do concreto de alto desempenho constitui assunto polêmico no meio técnico assim como o tipo e duração desta, por isso a necessidade de um estudo mais apurado sobre este tema.

Esta pesquisa verifica a influência do tipo e tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas do CAD (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de deformação), produzidos em Goiânia em período quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$), situação esta considerada crítica pela norma NBR 14931 (ABNT, 2003) e predominante nos meses de maio a setembro na região. No estudo experimental foram produzidos CAD de resistência à compressão estimada 60, 80 e 100MPa, a partir do Método de Dosagem de Furnas, utilizando cimento CP II-F-32, sílica ativa, superplastificante à base de éter carboxilato, areia natural e brita 0 de granulito. Foram aplicados 14 curas de diferentes tipos e tempos de duração: cura com permanência de 1, 3, 7, 14, e 28 dias dentro da câmara úmida; cura através de aspersão de água durante 1, 3, 7, 14 e 28 dias; cura química com membrana à base de parafina e à base de borracha clorada; cura através de aspersão de água durante 7 dias e depois selagem da peça com membrana de cura à base de borracha clorada e cura ao ar.

Para os concretos de resistência estimada aos 28 dias de 60 MPa e de 80 MPa, o melhor tipo de cura foi “via úmida” (cura em câmara úmida e cura através de aspersão de água) e o melhor tempo de duração foi 7 dias. Para o de 100 MPa o melhor tipo de cura também foi “via úmida”, porém o tempo de duração foi 14 dias.

Quanto à cura química, algumas vezes os resultados foram até mesmo inferiores ao de referência (cura ao ar). Dentre os dois tipos de curas químicas utilizados não verificou-se diferença nos resultados de resistência à compressão, salientando-se que a membrana química à base de parafina tem custo inferior à base de borracha clorada.

BESERRA, S. A. Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em período quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$). Goiânia, 2005. Dissertação (Mestrado) – UFG, Escola de Engenharia Civil. Orientador André Luiz Bortolacci Geyer.
Palavras chave: cura, concreto de alto desempenho, CAD.

ABSTRACT

In the case of conventional concrete, small constructive defects, variations of mix proportion or even inadequate curings can not compromise significantly the material. No longer HPC demands a severity in the control since its dosage until the execution, therefore any imperfection can bring serious damages to the material or the structure. Amongst the relative aspects most important to the total quality of any concrete it is the curing, that becomes basic when is about HPC.

The curing of the high performance concrete constitutes in a controversial subject in the technician area as well as the type and duration of it, therefore the necessity of a deeper refined study on this subject.

This research verifies the influence of the type and time of duration of curing in the mechanical properties of the HPC (compressive strength, flexion tensile strength and module of deformation), produced in Goiânia in hot period ($t > 25^{\circ}\text{C}$) and of low relative humidity of air ($h < 50\%$) situation this considered critical for NBR 14931/2003 and predominant in the months of May the September in this region. In the experimental study were produced HPC of target compressive strength 60, 80 and 100MPa, from the Furnas Mix Proportion Method, using cement CP II-F-32, silica fume, polycarboxylate based superplasticizer, natural sand and crushed stones n° 0 of the granulite. 14 cures of different type and times of duration had been applied: curing with permanence of 1, 3, 7, 14, and 28 days inside of the humid chamber; curing with aspersion of water during 1, 3, 7, 14 and 28 days; chemical curing based on paraffin and chemical curing based on chloride rubber; cure for aspersion of water during 7 days and later sealing of the part with membrane of curing based on chloride rubber and air curing.

For concretes of target compressive strength to the 28 days of 60 MPa and 80 MPa, the best type of curing was "saw humid" (curing in humid chamber and curing with aspersion of water) and the best time of duration humid was 7 days. For the one of 100 MPa the best type of curing also was "saw humid", however the duration time was 14 days.

According to the chemical curing, some times the results had been even though less than to the one of reference (air curing). Among the two types of used chemical curing, difference in the results of compressive strength was not verified, despite the chemical membrane based on paraffin has an inferior cost to the chloride rubber base.

BESERRA, S. A. Influence of the type and time duration of curing in mechanical properties of the high performance concrete (HPC) produced in hot period ($t > 25^{\circ}\text{C}$) and of low relative humidity of the air ($h < 50\%$). Goiânia, 2005. Dissertation (M.Sc. degree) – UFG, Escola de Engenharia Civil. Supervisor: André Luiz Bortolacci Geyer.
Keywords: curing, high performance concrete, HPC.

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

O interesse na utilização do Concreto de Alto Desempenho (CAD), devido as suas propriedades mecânicas e de durabilidade bem como pela economia em relação às estruturas convencionais vem crescendo desde os anos 70 (AİTCIN, 2000). Sua utilização tem se intensificado nas últimas décadas, em todo o mundo, principalmente pela sua alta resistência (PINTO; GEYER, 2003; DAL MOLIN *et al.*, 1997; AİTCIN, 2000; ALMEIDA, 1990).

O CAD necessita, para sua produção e utilização, de cuidados redobrados para que estas propriedades sejam obtidas. No caso de concreto convencional, pequenos defeitos construtivos, variações de dosagem ou mesmo curas inadequadas podem não comprometer significativamente o material. Já no CAD exige-se um rigor no controle desde sua dosagem até a execução, pois qualquer falha pode trazer sérios prejuízos à estrutura.

Dentre os aspectos mais importantes relativos à qualidade total de qualquer concreto está a cura, o que se torna fundamental quando se trata de CAD.

As características mecânicas e a durabilidade do concreto melhoram à medida que a hidratação progride. Mas a hidratação só pode ocorrer em presença de uma quantidade de água suficiente (COUTO, 2003). Neste sentido, como para produção de CAD muitas vezes utiliza-se menos água que a necessária, a reposição da água através da cura torna-se importantíssima.

Neville; Brooks (1987) descrevem que a queda da resistência em concretos devido a uma cura inadequada é mais pronunciada em misturas ricas e chamam a atenção para a importância da cura nas primeiras idades em CAD.

Segundo Aİtcin (2000), alguns pesquisadores dizem que o concreto de alto desempenho pode ser curado como qualquer concreto usual. Outros pesquisadores, segundo o mesmo, dizem que, devido à sua microestrutura muito densa, o concreto de alto desempenho não precisa de nenhuma cura. Dentre aqueles que percebem uma necessidade de cura adequada, existe outra controvérsia: por quanto tempo o concreto de alto desempenho precisa ser curado?

A necessidade do concreto de alto desempenho ser curado constitui assunto polêmico no meio técnico e mesmo o tipo e duração da cura para os partidários de sua adoção são igualmente controversos (BATTAGIN *et al.*, 2002), por isso a necessidade de estudos sobre este tema.

Como a umidade e a temperatura agem como catalisadores das reações de hidratação, a cura tem como finalidade principal evitar que falte água ao concreto e que a temperatura seja adequada durante os primeiros dias que compreendem a pega e o primeiro endurecimento (CANOVAS, 1988).

O rigor da realização do processo de cura em concretos moldados *in loco* está diretamente ligado ao clima, devendo-se ser bastante cuidadoso em climas quentes, secos e com ventos (LIMA; PACHA, 2001).

Esta pesquisa verifica a influência do tipo e tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas do CAD (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de deformação), produzidos em Goiânia em período quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$), situação esta considerada crítica pela norma NBR 14931 (ABNT, 2003) e predominante nos meses de maio a setembro na região.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a influência de diferentes tipos e tempos de duração da cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de deformação), produzidos e curados em condições de clima quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e com baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$) situação esta considerada crítica pela NBR 14931 (ABNT, 2003) e predominante em várias regiões, como por exemplo, Goiânia entre os meses de maio e setembro. Com isto busca-se contribuir com o entendimento de como deve ser a cura em CAD moldados em obras com as características climáticas citadas.

1.2.2. OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Como objetivos secundários, pretende-se:

- Comparar vários tipos de cura recomendados pela bibliografia, entre si e com CAD curado ao ar em clima quente e seco;
- Verificar a influência do tempo de duração da cura em cada tipo de cura;
- Verificar a eficiência dos procedimentos de cura.

1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Devido ao tempo disponível para a pesquisa, foram estabelecidos alguns limites na abrangência da pesquisa:

- Foram avaliadas somente as propriedades mecânicas mais relevantes na aplicação de estruturas de CAD, não sendo analisadas diretamente outras propriedades como as de durabilidade;
- A resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade somente foram realizados para os seguintes tipos de cura: C₀ (cura ao ar), CH₂₈ (permanência do corpo de prova em câmara úmida durante 28 dias), CA₇ (aspersão de água nos corpos de prova durante 7 dias), CQ₁ (cura química com membrana à base de parafina), CQ₂ (cura química com membrana à base de borracha clorada) e CAQ (cura mista: aspersão de água durante 7 dias e no 8º dia selagem da peça com aplicação de membrana química à base de borracha clorada).

1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação envolve dois tipos de abordagem, a primeira teórica, que consta de uma revisão da literatura sobre o CAD e procedimentos de cura e, a segunda, um programa experimental com a produção e cura de CAD a partir de diferentes procedimentos com a realização de ensaios mecânicos nos concretos produzidos. A pesquisa está dividida em seis capítulos.

O *Capítulo 1*, Introdução, destaca a importância deste trabalho, sua justificativa, além dos objetivos, limitações da pesquisa e estrutura.

O *Capítulo 2* apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre CAD sendo subdividido em itens que contém definição, histórico, utilização, materiais constituintes e as propriedades mecânicas.

No *Capítulo 3* é apresentada a revisão bibliográfica sobre o procedimentos de cura no CAD e influência de fatores climáticos neste.

No *Capítulo 4* é apresentada toda a seleção e a justificativa da escolha, seguida da caracterização dos materiais tais como o cimento, adição mineral, agregados e superplastificante utilizados no programa experimental.

O programa experimental também está apresentado detalhadamente neste capítulo, começando pelo planejamento (variáveis) e definição dos experimentos.

A apresentação dos resultados dos ensaios está presente no *Capítulo 5*, bem como as análises dos dados e o estudo da eficiência dos procedimentos de cura.

O *Capítulo 6* registra as considerações finais e algumas sugestões para futuras pesquisas.

2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)

2.1. CONCEITOS

O CAD é um material referenciado como uma evolução tecnológica dos concretos tradicionais, fruto da pesquisa aplicada e resultado da introdução conjunta, no elenco das matérias primas básicas do concreto, de adições minerais e aditivos químicos (ALMEIDA, 1992). O desenvolvimento destes materiais, principalmente a descoberta da extraordinária ação de dispersão dos aditivos superplastificantes, é diretamente responsável pelo espetacular aumento da resistência à compressão dos concretos (AÏTCIN, 1995).

Segundo Metha; Monteiro (1994), o CAD é aquele que apresenta resistência à compressão acima de 40 MPa, para misturas feitas com agregados normais. Esta definição é justificada por dois argumentos:

- A maioria dos concretos convencionais está na faixa de 21 a 42 MPa. E para produzir concreto com mais de 42 MPa é necessário controle de qualidade severo e mais cuidado na seleção e dosagem dos materiais.
- Estudos experimentais mostram que, em muitos aspectos, a microestrutura e as propriedades do concreto com resistência acima de 42 MPa são diferentes das do concreto convencional, como por exemplo: maior módulo de elasticidade, menor impermeabilidade e maior resistência à abrasão.

CAD tem como definição corrente nos Estados Unidos o concreto com resistência à compressão, medida em cilindros, maior que 41 MPa (ACI 363-R, 1991). Já a ABNT publicou, em 1992, a modificação da norma NBR 8953 (ABNT, 1992) de classificação de concreto para fins estruturais por grupos de resistência, na qual inclui uma classe especial de concretos acima de 50 MPa.

Parrot (1969) define concreto de alto desempenho como aquele que apresenta resistências à compressão aos 28 dias superiores a 80 MPa, em corpos de prova cúbicos de 100 mm de aresta.

Já Coutinho (1973) designa por “concreto de resistência elevada” aquele que apresenta tensão de ruptura compreendida entre 50 e 100 MPa, e por “concreto com resistência ultra-elevada” o que possui tensão de ruptura à compressão superior a 100 MPa.

A Tabela 2.1 apresenta os valores de resistência à compressão especificados por vários autores.

Tabela 2.1 – Valores de resistência à compressão de CAD (adaptado de DAL MOLIN *et al.*, 1997).

PESQUISADOR	RESISTÊNCIA – F_{ck} 28 dias – MPa	
	ALTA	ALTÍSSIMA
METHA	> 40	-
CARVAJAL	35 a 60	60 a 100
NEVILLE	> 40 a 50	-
PARROT	> 80	-
BURGE	> 42,8	-
SHAH	> 42	-
ROCHA	> 40	-
ROCHLITZ	> 45	-
BROOKS	-	> 80
NBR 6118/2003	> 50 – Classe especial	-

Existem duas tendências a respeito da terminologia deste material: concreto de alto desempenho – CAD e o concreto de alta resistência – CAR; e ainda não há um consenso claro sobre o significado destas expressões. Neste trabalho esta discussão não é enfocada e denomina-se o concreto em estudo de CAD.

Na tabela 2.1 pode-se observar que para a maioria dos autores são considerados CAD aqueles que possuem $f_{c28} > 40$ MPa.

2.2. HISTÓRICO

Devido a um excesso de “espírito pioneiro”, um pequeno grupo de projetistas e produtores de concreto tiveram a iniciativa de empregar o concreto de alta resistência em meados dos anos 60 (AİTCIN, 2000).

Esse desenvolvimento tornou-se possível em Chicago porque, naquele tempo, um projetista corajoso e um produtor de concreto inovador começaram a trabalhar juntos (MORENO, 1987). Naquela época o concreto comumente usado pela indústria da construção civil tinha uma resistência à compressão de apenas 15 MPa a 30 MPa. Propor dobrar esta resistência à compressão da noite para o dia era realmente um desafio (AİTCIN, 2000).

Objetivando dar a este concreto de alta resistência uma oportunidade para demonstrar o seu valor, projetistas e produtores de concreto tinham que imaginar um modo de convencer os proprietários a utilizar um tal material novo, do qual não tinham experiência anterior e apenas muito poucos dados. A abordagem que eles decidiram seguir foi inteligente (ALBINGER; MORENO, 1991). Sempre que um edifício de grande altura

estava sendo planejado o produtor de concreto pedia permissão ao proprietário para incluir (sem custo extra, naturalmente) uma ou duas colunas principais. Usando então esta estratégia, a resistência à compressão máxima do concreto usado em edifícios de altura na área de Chicago foi multiplicada por três, passo a passo, devagar e progressivamente, durante um período de cerca de 10 anos, aumentando a resistência de compressão de 15 MPa – 20 MPa para 45 MPa – 60 MPa (AÏTCIN, 2000).

No início dos anos 70, uma barreira técnica não permitia a produção de concreto com mais de 60 MPa: os redutores de água não eram capazes de diminuir mais a relação água/aglomerante (a/agl) (BLICK; PETERSON; WINTER, 1974). Então se iniciou a utilização dos superplastificantes (apesar da 1ª patente datar de 1938) como fluidificantes e, depois, como redutores de água. Pouco a pouco, as dosagens dos superplastificantes, mais desenvolvidos, foram aumentadas, até que Bache (1981) produziu um microconcreto (com sílica ativa) abaixo da “barreira psicológica” de a/agl 0,3.

A Tabela 2.2 ilustra alguns marcos da utilização do CAD, no mundo e no Brasil (AÏTCIN, 2000; DAL MOLIN, 1995; ABCP, 1997; HELENE, 2002; PINTO, 2003).

Tabela 2.2 – Obras executadas com CAD

<i>Obra</i>	<i>Local</i>	<i>Ano</i>	<i>fck (MPa)</i>
Obras no Exterior			
Ed. Lake Point Tower	Chicago	1965	52
Ed. Water Tower Place	Chicago	1975	62
Plataforma Gullfaks	Noruega	1981	70
Arco da Defense	Paris	1988	65
Ponte da Île de Ré	França	1988	68
Ed. Scotia Plaza Building	Toronto	1988	70
Ponte Joigny	França	1989	60
Ed. Two Union Square	Seattle	1989	115
One Peachtree	Atlanta	1991	83
Ponte Montée St-Rémi	Canadá	1993	80
Ponte da Confederação	Canadá	1997	72
Petronas Tower	Kuala Lumpur	1999	80
Obras no Brasil			
Ed. MASP	São Paulo	1963	45
CNEC	São Paulo	1989	60
Ponte sobre o Rio Maranhão	Goiás	-	50
Supremo Tribunal de Justiça	Brasília	1993	60
Ed. Suarez Trade Center	Salvador	1993	60
Torre das Nações Unidas	São Paulo	1997	50
Ed. E-Tower	São Paulo	2002	125

Uma referência mundial de resistência em CAD e de estrutura de concreto é o concreto de 80 MPa, obtido nas bases e pilares do edifício Petronas Tower, em Kuala Lumpur, na Malásia. Construído em 1997 para ser um monumento ao poder mulçumano, o Petronas é o prédio mais alto do mundo. Outros edifícios na França, (Grand Arch em Paris), na Alemanha (Banco do Comércio de Frankfurt), no Canadá (Scotia Plaza em Toronto) e nos Estados Unidos (Pacific Tower em Seattle) têm utilizado CAD e chegado a resistências da ordem de 100 MPa (HARTMANN; HELENE, 2000).

No caso do Brasil, as primeiras obras a empregarem CAD foram o Museu de Arte de Niterói no Rio de Janeiro com f_{ck} igual a 35 MPa e o Museu de Arte de São Paulo com f_{ck} igual a 45 MPa (ambos considerados recordes brasileiros na época). Em Salvador pode ser citado o CAD de 60 MPa empregando nas obras do Edifício do Banco de Tokyo, do Centro Empresarial Previnor e ainda do Suarez Trade Center (HARTMANN; HELENE, 2000). Dentre diversas obras importantes que empregaram concreto de alto desempenho destaca-se também o Supremo Tribunal de Justiça, em Brasília (SERRA, 1997).

As aplicações mais recentes de CAD no Brasil são as obras do Continental Square (Construtora Inpar), que explorou, em seus 20 andares na Vila Olímpia, possibilidades arquitetônicas excepcionais graças à resistência obtida em suas estruturas (50 MPa, em vez dos 25 MPa normalmente empregados) e o CENU com f_{ck} de 50 MPa nos pilares. Porém, foi a construtora Tecnum, que aceitou o desafio de romper o recorde de resistência do CAD, com a construção do edifício E-Tower, um edifício de 42 andares, entre os mais altos do país, situado também na Vila Olímpia em São Paulo. Na estrutura básica do prédio (garagem e primeiros andares) conseguiu atingir 125 MPa de resistência média à compressão (HARTMANN; HELENE, 2000).

2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO CAD

Uma das principais aplicações do concreto de alta resistência (CAD) na construção civil tem sido em edifícios altos. Seu uso pode viabilizar pilares de menores dimensões, aumentando assim o espaço útil dos diversos pavimentos, principalmente nos andares mais baixos. Além disso, permite maior liberdade arquitetônica, aumentar a velocidade de execução (existem prédios construídos à velocidade de dois pisos por semana, equivalente à da construção predial em estrutura metálica), maior reaproveitamento das fôrmas, pois as dimensões das colunas podem variar menos ao longo da altura da estrutura, reutilização

mais rápida das fôrmas, pelo desenvolvimento de resistências mais elevadas em idades menores, que podem ser de até 12 horas, reduzir a carga permanente da estrutura e nas fundações, aumentar a durabilidade do concreto (DAL MOLIN, 1995; ALMEIDA, 1990).

Dal Molin *et al.* (1997) estudaram a viabilidade econômica do emprego de CAD, fazendo um estudo econômico comparativo entre a execução de um edifício de 15 andares e área do pavimento tipo de 320 m², com concreto convencional e CAD no 3º pavimento. As resistências características foram respectivamente 21 e 60 MPa e comprovou-se o ganho significativo no emprego de CAD, que resultou na economia de 11,74% do custo total.

Quanto ao custo, o meio técnico ainda tem uma visão distorcida com relação ao uso do CAD, pois apesar do valor do m³ do CAD ser superior ao do concreto convencional, os ganhos reais de resistência e durabilidade, com redução de reparos e o volume total de concreto empregado, podem justificar a adoção desse material. Contudo recomenda-se que seu uso seja sempre precedido de uma criteriosa avaliação técnico econômica (ALMEIDA, 1992). Em uma pesquisa realizada por Almeida *et al.* (2002) que estudaram a viabilidade econômica do uso de concretos de alta resistência à compressão de 20, 40 e 60 MPa em um edifício de 20 pavimentos tipos, além do ganho na área útil de construção, devido à redução das seções dos pilares, constatou-se a redução da carga na fundação e uma economia de 3,5% na estrutura de 41 MPa e 5,3% na estrutura de 60 MPa, em relação à de 20 MPa.

Ferreira *et al.* (2001), realizaram comparações de custos totais e de comportamento estrutural, a partir dos resultados de cálculos de dimensionamento realizados para três modelos adotados para um mesmo edifício alto real de 30 pavimentos: o primeiro com concreto de resistência convencional de 30 MPa em todos os pavimentos; o segundo com CAD aplicado apenas nos pilares, com variação de resistência ao longo da altura de 65, 45 e 30 MPa e o terceiro com CAD aplicado nos pilares e nas vigas, sofrendo variação de classe de resistência idêntica à do modelo anterior, ao longo da altura do edifício, e concluiu que o CAD pode proporcionar economia de custos e suavização das cargas atuantes nas fundações, contudo, problemas relativos à estabilidade global podem tomar lugar se forem reduzidas as seções dos elementos estruturais.

Em um estudo realizado na Universidade Federal de Goiás (UFG), Omar *et al.* (2005) também fizeram um estudo econômico comparativo entre o uso de concreto convencional e CAD em um edifício de 20 pavimentos na cidade de Goiânia. Neste estudo

os pilares anteriormente calculados com f_{ck} de 30 MPa foram recalculados com CAD de 60 MPa. Verificou-se que além de proporcionar um ganho de área útil no térreo e subsolo, o que pode proporcionar um acréscimo no número de garagens, houve um decréscimo na quantidade de fôrmas, aço e concreto e uma economia de 0,5% em relação ao modelo com concreto convencional.

Além da utilização em edifícios altos, outro grande campo de aplicação tem sido em pontes. Carpenter *apud* Peterman; Carrasquillo (1986) lista as vantagens de usar o CAD em pontes:

- a) maior resistência à compressão por unidade de custo, peso e volume;
- b) maior módulo de deformação, que é vantajoso quando deflexões controlam o projeto;
- c) maior resistência à tração, que é um parâmetro de controle no projeto de elementos de concretos protendidos;
- d) projetos estruturais mais leves e esbeltos (ALMEIDA, 1990);
- e) maiores vãos (ALMEIDA, 1990);

Para a produção de pré-moldados o concreto de alto desempenho é particularmente adequado, uma vez que permite projeto de peças muito esbeltas e recuperação mais rápida das fôrmas. No projeto dos pré-moldados, a leveza e a esbeltez são requisitos impostos pela necessidade de transporte e montagem. Então, o concreto de alto desempenho permite peças mais esbeltas por ser mais resistente, por ser mais impermeável fornecendo maior proteção às armaduras, por ser mais trabalhável e por permitir a retirada precoce das fôrmas, principalmente quando a cura é a vapor (SERRA, 1997).

A baixa porosidade desses concretos torna-os particularmente indicados onde o concreto aparente seja especificado e onde o ambiente agressivo está presente. Em particular, o concreto de alto desempenho é adequado para as obras marinhas e para construções industriais em que o concreto pode estar exposto ao ataque químico. As mesmas considerações podem ser feitas quanto às obras em que uma grande e prolongada durabilidade é um requisito ou onde a manutenção da estrutura não puder ser feita com a frequência necessária. Decorrentemente, a aplicação do concreto de alto desempenho é também indicada nas obras abaixo do lençol freático, nas obras de túneis, de fundações e de subsolos, assim como nos pavimentos.

O CAD vem também, recentemente, sendo usado na construção de caixas-fortes de banco, isto porque resistem à perfuração de brocas de vídea, destruindo-a numa profundidade de 5mm a 10mm, tornando assim o material impenetrável. Permite também

que, com uma espessura de 43mm, resistam a impactos de balas de fuzil, calibre 7.62mm (arma de altíssimo poder de fogo), num alvo de 150mm de diâmetro. Quanto aos projéteis de metralhadoras convencionais e revólveres, esse concreto é extremamente resistente (LIBÓRIO, 2004).

Várias outras possibilidades de aplicação são relatadas na bibliografia, entre as quais: pavimentos rodoviários (HELLAND, 1990), reatores nucleares (de LARRARD *et al.*, 1990), reparos e recuperação de estruturas (CHORINSKY, 1990), plataformas marítimas (RONNEBERG; SANDVIK, 1990).

2.4. MATERIAIS CONSTITUINTES

A seleção de materiais é um problema sempre presente, pois os cimentos e agregados disponíveis possuem variações significativas de composição e propriedades, não havendo normas claras para a escolha de tipos de cimentos e agregados mais adequados para o uso em CAD. A situação é complicada pelo fato de que aditivos químicos e adições minerais são utilizados simultaneamente, e não há regras simples que permitam uma escolha prudente (MEHTA; AÏTCIN, 1990). Entretanto, existe um consenso de que algumas características e propriedades dos materiais constituintes afetam de forma benéfica o comportamento das misturas, permitindo otimizar as propriedades mecânicas do concreto endurecido (DAL MOLIN *et al.*, 1997).

2.4.1 Cimento

A primeira escolha a ser feita quando se vai produzir um CAD é, definitivamente, a do cimento, pois seu desempenho em termos de reologia e de resistência torna-se um item crítico à medida que a resistência à compressão aumenta (AÏTCIN, 2000).

A escolha de parâmetros relativos ao cimento para a confecção de concreto de alto desempenho é extremamente importante, pois sabe-se que este componente influencia tanto a resistência da pasta quanto a intensidade de aderência agregado-pasta (ALMEIDA, 1990).

Dentre os cimentos Portland produzidos no Brasil, o que mais se aproxima das características indicadas à produção do CAD é o cimento ARI (Alta resistência inicial). O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem

diferente de calcário e argila na produção o clínquer, que resulta num elevado teor de C_3S ; bem como a moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências com maior velocidade (ALVES, 1997). De acordo com Howard; Leatham (1989) não existem critérios científicos que especifiquem o mais adequado cimento para produção de CAD.

Na opinião de AİTCIN (2000), entre os cimentos Portland existentes é normalmente impossível encontrar sequer um que se adapte totalmente à produção de um CAD no intervalo de resistência à compressão de 75 a 125 MPa; em tais casos, é necessário o uso simultâneo de uma ou duas adições minerais. Alguns cimentos têm bom desempenho quanto à resistência inicial, mas um comportamento reológico muito ruim, devido ao elevado teor de C_3A e, ao contrário, outros apresentam bom desempenho em termos de reologia, mas não alcançam valores consideráveis de resistência.

Quanto à finura do cimento, existem exigências conflitantes: do ponto de vista da resistência, quanto mais fino for o cimento melhor, pois mais fase silicato entrará rápida e inteiramente em contato com a água; mas do ponto de vista reológico, quanto mais fino for o cimento mais reativo ele será, uma maior porção das fases silicato e intersticial estará em contato com a água e, assim, mais etringita será formada e mais C-S-H se desenvolverá rapidamente na superfície das fases silicato (NAWA, EGUCHI, OKKUBO, 1991).

No Brasil, o uso do CAD ainda é incipiente e os projetistas e tecnólogos de concreto têm utilizado diferentes tipos de cimento, o que muitas vezes está ligado à disponibilidade local. Por exemplo, o CAD de 125 MPa, produzido para a construção de alguns pilares do Edifício E-Tower em São Paulo, utilizou-se do CP V-ARI (HELENE, 2002), e os concretos de 50 MPa produzidos em Goiânia, utiliza o CP II-F-32 (PINTO, 2003).

2.4.2 Agregados

Quando a resistência à compressão está na faixa de 20 a 40 MPa, a resistência à compressão dos agregados é de importância secundária, pois nestes concretos a ruptura inicia-se na pasta ou na interface pasta-agregado. No caso do CAD isto nem sempre é verdadeiro, pois a ruptura pode ocorrer também nos agregados devido à alta resistência da pasta de cimento hidratada, tornando, muitas vezes, o agregado um fator limitante da capacidade resistente do material (AİTCIN, 1995).

Então é imperativo utilizar agregados de alta resistência para fazer CAD, já que o tipo de agregado tem uma grande influência sobre a estabilidade dimensional (MEHTA; AİTCIN, 1990).

Existem controvérsias em relação à dimensão máxima característica do agregado graúdo. A dimensão máxima característica apropriada para CAD, na opinião de Metha; Aİtcin (1990), é entre 10 e 15 mm. Já, de acordo com Aİtcin (2000), é mais seguro trabalhar entre 10 e 12 mm, mas isso não significa que um agregado de 20 mm não possa ser usado.

Quanto à forma, agregados com granulometria lamelar e forma irregular influenciam negativamente nas propriedades mecânicas, na consistência e no acabamento superficial, pois devido a menor trabalhabilidade, exige-se maior quantidade de água e, conseqüentemente, acarreta menor resistência do concreto (O'REILLY DÍAZ, 1998).

A seleção do agregado graúdo deve ser feita depois de um exame cuidadoso da mineralogia e da petrografia, para assegurar que todas as partículas são resistentes o suficiente para o CAD (AİTCIN, 2000).

Na opinião de AİTCIN (2000), os agregados graúdos que têm sido usados com sucesso na produção de CAD são as rochas densas e duras britadas, tais como calcário, a dolomita e rochas ígneas do tipo plutônico (como o granito, sienito, diorito e diabásio).

Já a resistência do agregado miúdo não é tão importante quanto à do agregado graúdo (MINDESS, 1985).

De acordo com Aİtcin (2000), a dimensão do agregado miúdo deve estar no lado mais graúdo desse limite, o qual corresponde a um módulo de finura de 2,5 a 3,0. O uso de uma areia tão grossa é apoiado pelo fato de que todos os traços de alta resistência serem bastante ricos em partículas finas devido ao seu alto teor de cimento e de materiais cimentícios, de tal forma que não é necessário usar uma areia fina sob o aspecto da trabalhabilidade e da segregação. Além disso, o uso da areia mais grossa leva a um pequeno decréscimo da água de mistura necessária para uma dada trabalhabilidade, o que é vantajoso tanto do ponto de vista da resistência, como do econômico.

2.4.3 Adições minerais

Tem-se substituído, sempre que economicamente viável, uma parte do cimento usado na produção do concreto por certos produtos naturais ou subprodutos industriais

conhecidos como materiais cimentícios suplementares, principalmente aqueles que apresentam reatividade pozolânica. A construção civil tem-se aproveitado de diferentes resíduos de diversas fontes, entre elas: as escórias siderúrgicas, e as pozolanas, como a cinza de termoelétricas (SWAMY *et al.*, 1986, MALHOTRA *et al.*, 1987, MALHOTRA; MEHTA, 1996, entre outros), a sílica residual da produção do ferrosilício e silício metálico – sílica ativa (DAL MOLIN, 1995), a cinza de casca de arroz, o metacaulim (LACERDA; HELENE, 2002) e diversas outras.

As adições minerais podem atuar de três formas no concreto:

- De forma física,
 - Extrema finura: ocupam os vazios entre os grãos do cimento diminuindo os espaços disponíveis à água e densificando a pasta de cimento (empacotamento, efeito filler);
 - Pontos de nucleação: além do crescimento de cristais a partir dos grãos de cimento, há também crescimento desses cristais nos poros ocupados pela sílica ativa e água, acelerando as reações de hidratação e influenciando o tamanho dos produtos de hidratação formados. Como a sílica ativa limita os espaços são formados grande quantidade de pequenos cristais em vez de grandes cristais em pouca quantidade. Há então a instabilização do sistema propiciando uma melhor hidratação.
- De forma química, através do potencial de produzir o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) pelas reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio (CH) resultante da hidratação do C_3S e C_2S do cimento Portland. Este produto, o C-S-H, é que dá a propriedade ligante e a compacidade ao concreto (AÏTCIN, 1995; ALMEIDA, 1992).
- De forma a contribuir no controle da perda de abatimento (slump), que é freqüentemente uma grande dificuldade para a produção de um CAD (PINTO, 2003).

As adições minerais associadas ao uso de superplastificantes atuam no concreto fresco ajudando no controle do abatimento, principalmente em concretos de baixa relação água/cimento; pois só os cimentos e superplastificantes não conseguem manter a trabalhabilidade da mistura num tempo suficiente para transportar e lançar o concreto. Sabe-se também que estes materiais reduzem a resistência à compressão inicial (durante as primeiras 24 horas), mas a um nível não significativo (AÏTCIN, 1995).

A maioria das pozolanas usadas em concreto de alto desempenho são subprodutos industriais. Dentre aquelas usadas em larga escala estão a cinza volante e a sílica ativa. A escória de alto-forno, que não é propriamente um material pozolânico, tem também sido

usada para fazer concreto de alto desempenho (AİTCIN, 2000). Outras adições também utilizadas são o metacaulim e a cinza de casca de arroz.

As adições pozolânicas ultrafinas, como a sílica ativa, cinza de casca de arroz e o metacaulim, têm-se mostrado mais efetivas no aumento da resistência, pois, além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição, sendo assim, indispensável seu uso na produção de CAD. Misturas ternárias (cimento mais a combinação de duas adições minerais) também têm sido usadas com sucesso no CAD (DAL MOLIN *et al.*, 1997).

Papadakis (1999), investigando a atividade da sílica ativa, observou que apesar da porosidade total aumentar com o acréscimo do teor de adição (em substituição à massa do cimento) houve uma alteração na distribuição de tamanho de poros, ocorrendo um refinamento, ou seja, um aumento de microporos. Esse refinamento foi devido à redução dos diâmetros dos poros existentes à redução dos tamanhos dos cristais de CH.

Em termos de ação química, a atuação das cinzas volantes na fase pasta de cimento é o mesmo tipo descrito para a sílica ativa, baseando-se principalmente na reação pozolânica na transformação de CH em C-S-H e na alteração da estrutura dos poros. No caso particular das cinzas volantes, porém, a atuação é lenta, pois essa adição é menos reativa que a sílica ativa. Em termos de ação física, há uma diferença marcante: ao contrário da sílica ativa, as partículas da cinza volante pela sua esfericidade, permitem a redução da relação a/c , mantida uma dada trabalhabilidade (ALMEIDA, 1990).

Sabir *et al.* (2001), Calderone *et al.* (1994) produziram concretos com 5% e 10% de substituição de cimento por metacaulim que resultaram ganho na resistência à compressão até idades de 365 dias. Relataram que os concretos de cimento Portland com metacaulim apresentaram, ainda, resistências maiores que os concretos com cimento Portland e sílica ativa, para os mesmos níveis de substituição de cimento por material pozolânico. Resultados similares foram obtidos por Wild *et al.* (1996).

De acordo com Neville (1997), pode haver melhoria na microestrutura do concreto com teores de escória de alto-forno até valores entre 60% e 70% em substituição ao clínquer, sendo que a mistura de escória de alto-forno com cimento Portland resulta em uma mistura com maior quantidade de sílica, originando, então, uma microestrutura com maior quantidade de C-S-H.

Sato (1998) pesquisou sobre a distribuição de poros de concreto com adição de escória, com teor de 70% em substituição à massa de cimento, e também verificou o refinamento da estrutura de poros.

2.4.4 Aditivos químicos para CAD

No caso de CAD, os aditivos químicos são utilizados no concreto para se alcançar objetivos como: promover consistência (superplastificantes) e controlar o tempo de pega (retardadores). Deve-se ressaltar, que a ação dos superplastificantes é indispensável para a produção do CAD, visto que sem a aplicação destes não se consegue obter concretos trabalháveis com as baixas relações a/agl requeridas (PINTO, 2003).

Existem vários meios para aumentar a dispersão das partículas e, conseqüentemente, melhorar a trabalhabilidade. O mais simples é adicionar mais água, o que aumenta a porosidade do concreto endurecido e resulta em menor resistência à compressão e reduzida impermeabilidade. Outro meio é a utilização de produtos químicos conhecidos genericamente como redutores de água que neutralizam as cargas nas superfícies das partículas de cimento sem adicionar mais água. Mas a 1ª geração de redutores de água (plastificantes) não supria a trabalhabilidade do concreto quando a quantidade de água era a mínima necessária para hidratação. Além disso, acima de determinada dosagem, os redutores de água causam efeitos colaterais como retardamento da pega e do endurecimento e excessivo ar incorporado (AİTCIN, 1995). Para retificar essa situação foram desenvolvidos novos tipos de redutores de água conhecidos como superplastificantes.

Os superplastificantes são produtos orgânicos, como os condensados com formaldeído de melamina sulfonada ou de naftaleno sulfonado, sintetizados especialmente para a indústria do concreto devido à sua maior eficiência na neutralização das cargas em relação a seus antecessores. Sua ação dispersante elimina a necessidade de adicionar água para produzir suficiente trabalhabilidade e para deflocular as aglomerações de partículas de cimento (AİTCIN, 1995). Assim, proporcionam a redução da relação água/aglomerante e, conseqüentemente, colaboram na redução da porosidade total e do diâmetro dos poros, o que aumenta consideravelmente a impermeabilidade do concreto. A redução da relação água/aglomerante sempre atua na elevação das resistências mecânicas e no aumento da durabilidade do concreto (ALMEIDA, 1992).

Atualmente uma nova geração de superplastificantes surge no mercado, formados à base de éter policarboxilato, e que tem apresentado eficiência superior aos seus antecessores. Estes aditivos consistem de polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais que, no começo do processo da mistura ao concreto, inicia o mecanismo de dispersão eletrostática como nos tradicionais, porém suas cadeias laterais unidas à estrutura polimérica geram uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento. Com este processo obtém-se um concreto fluido com grande redução da quantidade de água (MBT, 2003).

O superplastificantes possuem efeito relativamente curto, em torno de 60 minutos e não influenciam a resistência final do concreto. A dosagem de superplastificante depende do teor de sólidos deste. Geralmente esta dosagem é feita por kg de cimento, mas normalmente, fica entre 1 e 3 litros por metro cúbico de concreto. Quando é utilizado como redutor do teor de água na mistura, o consumo fica entre 5 e 20 litros por metro cúbico. Nestes casos, deve-se ter atenção especial, pois altos consumos podem também influenciar no desprendimento de calor quando da hidratação do cimento (SIMPLÍCIO, 1999).

Com relações água/cimento cada vez menores, percebe-se, em determinadas situações, que algumas combinações entre cimento e aditivo apresentam comportamento inesperado e indesejado, fenômeno esse conhecido como incompatibilidade cimento-aditivo (HARTMANN, 2002).

A incompatibilidade cimento-aditivo superplastificante tem provocado problemas como a rápida perda de abatimento e baixa fluidez do concreto fresco, comprometendo o bombeamento, adensamento e acabamento. Também podem ser alterados os tempos de pega do concreto (pega rápida ou falsa pega) e sua resistência inicial (AÏTCIN, 2000).

2.5. PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

É importante controlar as propriedades do concreto de alto desempenho fresco por duas razões principais. A primeira é que o concreto de alto desempenho deve ser facilmente lançado, como o concreto usual, e a segunda é que o concreto de alto desempenho, cujas propriedades enquanto fresco estão sob controle completo, provavelmente redundará num concreto endurecido, cujas propriedades estarão também bem controladas. Este segundo ponto é verdadeiro para o concreto usual, mas como a

margem de erro é muito menor quando se faz concreto de alto desempenho, uma atenção maior tem que ser dada às propriedades do concreto fresco (AİTCIN, 2000).

O controle das propriedades do concreto fresco, como massa específica, abatimento, teor de ar incorporado e temperatura, é fácil econômico e não é demorado pois estas são medidas da mesma maneira que aquelas do concreto usual (AİTCIN, 2000).

2.5.1. Massa Específica

A massa específica correspondente à massa de uma unidade de volume do concreto fresco adensado de acordo com a normalização brasileira, considerando o volume de ar aprisionado ou incorporado. É medida pelo ensaio: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico: NBR 9833 (ABNT, 1987).

A realização deste ensaio elimina a necessidade de medições freqüentes do teor de ar, que demandam mais tempo. Se a massa específica for constante, o teor de ar também o será, e se o teor de ar permanecer o mesmo, a redução da massa específica é devida a uma variação das proporções do traço ou a um erro na sua determinação (AİTCIN, 2000).

Mather (1970) afirma que, entre concretos de composições semelhantes, as maiores massas específicas correspondem geralmente às mais elevadas resistências à compressão.

A massa específica do concreto de alto desempenho, sem ar incorporado, é da ordem de 2500 kg/m³, é pouco superior à dos concretos convencionais (ALMEIDA, 1992).

2.5.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade. Essa propriedade compreende, pelo menos, dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade; e a coesão, que equivale à resistência à exsudação ou à segregação.

Dos fatores que afetam a consistência do concreto, e conseqüentemente a sua trabalhabilidade, deve-se ressaltar aqueles relacionados ao esqueleto granular e ao comportamento reológico da pasta. Do primeiro, devem ser cuidadosamente observadas a quantidade total de agregados e a proporção entre os agregados graúdo e miúdo, suas granulometrias e suas formas; seja para produção de CAD ou concreto usual (AİTCIN,

2000). Já o comportamento reológico da pasta de cimento está diretamente ligado à relação a/agl. Quanto maior for esta relação, mais partículas finas serão diluídas em água e esta passa a ser, fisicamente, responsável pela reologia da pasta. Neste caso, as partículas ficam muito separadas entre si e a sua interação durante a hidratação não afeta a trabalhabilidade do concreto fresco (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Com a diminuição desta relação, e a adição de superplastificantes, a situação torna-se mais complexa, pois a água deixa de ser responsável pela reologia da pasta e agora, as partículas de material cimentante, passam a interagir fisicamente, de acordo com sua forma, distribuição de grãos e reatividade química, pois estão muito mais próximas umas das outras tornando-se necessário o emprego de superplastificante. A incorporação deste aditivo à mistura para deflocular as partículas de cimento e de adições, interagindo com as mesmas em hidratação, torna ainda mais complexo o conjunto de fatores que influenciam a reologia do CAD fresco (AİTCIN, 2000).

A medição da trabalhabilidade é feita usualmente, por analogia, com os resultados do Ensaio: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR 7223 (ABNT, 1982). Em concretos usuais este ensaio é facilmente determinado porque, depois de alguns segundos, o cone de concreto para de ruir e mantém uma altura estável. Já no CAD com superplastificantes à base de policarboxilato não é tão fácil, pois o abatimento é progressivo e algumas vezes é difícil determinar quando medir a altura do concreto que está se desfazendo. Por isso, deve-se ressaltar que este ensaio pode não indicar com precisão o quanto trabalhável é o concreto mas, devido a sua facilidade de execução e uso corrente, é o mais aplicado (PINTO, 2003).

2.5.3. Teor de ar

A norma brasileira Concreto fresco – Determinação do teor de ar pelo Método Pressométrico: NBR 11686 (ABNT, 1990) descreve o ensaio de ar incorporado.

Geralmente o concreto de alto desempenho contém de 1 a 3% de ar aprisionado, uma vez que a mistura é mais viscosa que a do concreto convencional. Quanto menor relação água/aglomerante, mais viscoso será o concreto fresco. Contudo, dependendo da combinação cimento-aditivo, é possível manter ar aprisionado entre 1 e 1,5% para concretos com relações água/aglomerante maior que 0,3 (AİTCIN, 2000). Para Metha;

Aïtcin (1990), as misturas de CAD tendem a reter aproximadamente 2% de ar, mesmo sem nenhuma incorporação química.

Existe também a possibilidade de se incorporar até 4 a 5% de ar para melhorar as características do concreto no estado fresco. A incorporação de ar através de aditivos pode também ser considerada em CAD utilizado em condições de gelo e degelo (METHA; AÏTCIN, 1990).

2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD

O concreto, como material empregado em estruturas, deve possuir determinadas propriedades mecânicas, tais como: resistência, boa aderência com as armaduras, densidade suficiente para garantir impermeabilidade da estrutura e proteger as armaduras contra corrosão (PINHEIRO; GIONGO, 1986).

A densidade do concreto, exigível para cada obra é obtida escolhendo uma conveniente granulometria dos agregados, adensando e vibrando o concreto lançado nas fôrmas e adotando o consumo de cimento compatível com o tipo de obra. O aumento da densidade do concreto gera um aumento da resistência mecânica (PINHEIRO; GIONGO, 1986).

O concreto de alto desempenho apresenta melhorias de comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, quando comparado com os concretos usuais (LIMA, 1997). Neste item são apresentadas considerações sobre as seguintes propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação, relacionadas com o programa experimental que foi desenvolvido neste trabalho.

2.6.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é normalmente considerada como a propriedade mais importante do concreto, pois ela está diretamente relacionada com a estrutura interna do material, fornecendo uma estimativa do desempenho do concreto tanto em termos mecânicos como, indiretamente, de sua durabilidade (DAL MOLIN, 1995).

A resistência à compressão dos concretos é ditada por uma série de fatores. Os principais, segundo Neville (1997), Metha; Monteiro (1994), entre outros, são: natureza e dosagem do aglomerante; granulometria, máxima dimensão, forma, textura superficial,

resistência e rigidez dos agregados; relação água/cimento; porosidade; relação cimento/inertes; grau de compactação; condições de cura e condições do ensaio.

A “lei” que sugere o crescimento da resistência à compressão à medida que a relação a/agl diminui, existente para concretos usuais, só é válida para CAD até o alcance da resistência máxima do agregado graúdo. Quando isto ocorre, a resistência do agregado torna-se menor que da pasta de cimento e a resistência à compressão do concreto já não é aumentada significativamente com a diminuição da relação a/aglomerante (AÏTCIN, 2000). Mesmo quando se utiliza agregado graúdo suficientemente resistente, é impossível estabelecer uma correlação geral entre a relação a/agl e a resistência à compressão do CAD, devido a grande quantidade de combinações entre materiais e as características dos materiais usados em sua produção (PINTO, 2003).

Um aspecto importante na tecnologia do CAD é a resistência à compressão nas primeiras idades e sua evolução com o tempo. Considerando o ganho de resistência nas primeiras idades, é preciso dizer que a pega e o endurecimento do CAD, bem como do concreto usual, são influenciados, sobremaneira, pela temperatura do concreto fresco no momento do seu lançamento. Além disso, as reações de hidratação podem ser atrasadas significativamente devido ao uso de altas dosagens de superplastificante e, algumas vezes, de um retardador de pega; mas quando a hidratação começa, ela se desenvolve muito rapidamente (ROUGERON; AÏTCIN, 1994).

O ensaio para determinação da resistência à compressão é realizado segundo a norma NBR 5739 – Concreto: ensaios de compressão de corpos de prova (CPs) cilíndricos (ABNT, 1994a), em corpos de prova (CPs) cilíndricos.

2.6.2. Resistência à Tração

A resistência à tração é importante porque é baseado nela que se avalia o comportamento do concreto, no que diz respeito ao controle da fissuração. DAL MOLIN (1995) resume bem os três ensaios disponíveis para obtenção do valor da resistência à tração:

- Resistência à tração por compressão diametral (ft,D) que consiste na compressão da aresta do cilindro de concreto, segundo a NBR 7222 (ABNT, 1982), método que também pode ser utilizado em corpos-de-prova cúbicos. Dal Molin (1995) afirma que alguns dos

fatores que mais afetam a resistência à tração por compressão diametral do CAD são: teor de sílica ativa, cura, idade e relação água/aglomerante.

- Resistência à tração na flexão (f_t), também conhecido como módulo de ruptura e que consiste em aplicar uma carga centrada em uma viga padronizada de concreto. A ação pode ser concentrada no centro do vão ou nos terços, segundo a NBR 12142 (ABNT, 1994b). A resistência à tração na flexão ou módulo de ruptura é geralmente tomada com sendo um dos indicadores mais confiáveis da resistência do concreto à tração (BUCCIN, 1998).

- Resistência à tração direta (f_t), que consiste na aplicação direta de uma força de tração no corpo-de-prova. Apesar de ser o único ensaio direto de tração, não é muito utilizado devido às dificuldades de execução.

As fórmulas para concretos convencionais, ajustadas para previsão da resistência à tração a partir da resistência à compressão, não servem para concretos de alto desempenho, pois a relação f_t/f_c normalmente diminui com o acréscimo da resistência à compressão ou acréscimo da relação a/agl (ACI 363-R, 1991; DAL MOLIN, 1995).

A relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão foi estudada por Buccin (1998), o qual concluiu que, para concretos com resistência superior a 84 MPa, a resistência à tração pode ser estimada como sendo 5% da resistência à compressão. Segundo Alves (2000), para concretos convencionais, o valor da resistência à tração pode ser superior a 10% da resistência à compressão. Porém, para concretos de resistência acima de 85 MPa, esse valor pode chegar a menos de 5%.

Pinto (2003) não verificou o decréscimo da relação f_t/f_c com o aumento da resistência à compressão, conforme Dal Molin (1995). Pôde-se notar baixos valores desta relação (4,3% a 6,9% para resistência à tração por compressão diametral) no CAD.

Não é tão difícil para o concreto usual, determinar uma relação entre o módulo de ruptura (resistência à tração na flexão) e a resistência por compressão diametral, pois os valores são muito baixos e não variam muito, e são muito influenciados pela resistência à tração da pasta de cimento hidratado. Contudo, isso já não é verdadeiro no caso de concreto de alto desempenho, para o qual a relação água/aglomerante e a resistência à compressão podem variar dentro de uma faixa muito grande. Além disso, o concreto de alto desempenho é feito usando-se tantas composições cimentícias diferentes que o módulo de ruptura e a resistência à tração por compressão diametral podem variar dentro de um intervalo muito grande para os mesmos valores de resistência à compressão. Deve

ser enfatizado que as relações, que têm sido propostas entre a resistência à compressão, o módulo de ruptura e a resistência à tração por compressão diametral para os concretos usuais, perdem um pouco do seu valor de previsão ao ser aplicadas para o concreto de alto desempenho (AİTCIN, 2000).

Desta forma, a melhor maneira de prever o valor das resistências à tração por compressão diametral e na flexão de qualquer concreto de alto desempenho é determiná-lo diretamente (AİTCIN, 2000).

2.6.3. Módulo de Deformação

O conhecimento do módulo de deformação de um concreto é muito importante do ponto de vista do projeto, quando se devem calcular as deformações dos diferentes elementos que compõem a estrutura (DAL MOLIN, 1995), bem como quando se avalia a estabilidade global da edificação.

Segundo Parrot (1969), o módulo de deformação dos concretos de alto desempenho não segue o mesmo padrão de crescimento da resistência à compressão. Em termos absolutos, estes valores podem chegar a 50 GPa, embora geralmente se situe na faixa de 30 a 40 GPa (ALMEIDA, 1992).

A maioria das normas existentes apresenta formulações que relacionam módulo de deformação com resistência à compressão, cuja validade tem sido comprovada para concretos convencionais. Ao elevar a resistência para patamares superiores a 50 MPa, parece ser consenso da bibliografia que as equações não mais podem ser aplicadas, pois superestimam os valores calculados de módulo de deformação (CARRASQUILLO *et al.*, 1981; GUTIÉRREZ; CANOVAS, 1995; ACI 363-R, 1991).

Pelos estudos realizados por Dal Molin; Monteiro (1996), pôde-se constatar que as relações água/aglomerante, idade, cura e adições exercem considerável influência no módulo de elasticidade. Quanto à correlação entre o módulo e a resistência à compressão, os autores procuraram definir um modelo que ajustasse bem aos dados obtidos e permitisse a relação entre esses parâmetros considerando as amostras curadas em câmara úmida, com sílica ativa e de acordo com a idade. Procurou-se incluir resistência à compressão no intervalo de $20 < f_c < 90$ MPa. Na Figura 2.1 é apresentada a curva obtida comparada às normas disponíveis para a estimativa do módulo de elasticidade.

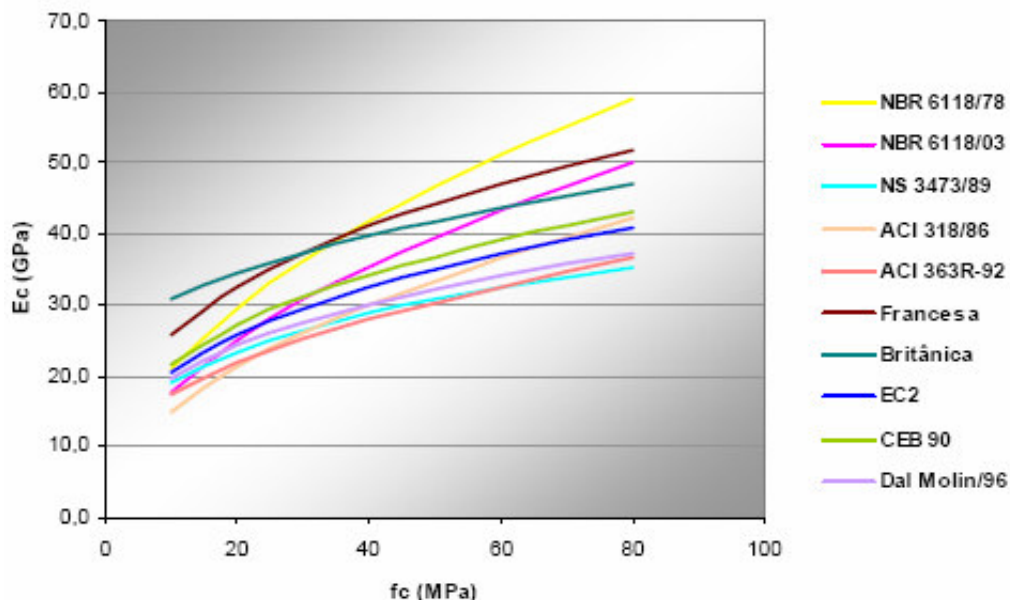


Figura 2.1 – Comparação entre diferentes correlações propostas (DAL MOLIN; MONTEIRO, 1996).

Observa-se, através da Figura 2.1, que os valores obtidos por todos os métodos foram próximos em níveis mais baixos de resistência, o que mostra que as correlações entre módulo e resistência à compressão podem ser válidas para o concreto convencional. No entanto, para resistências mais altas, é notável que a norma brasileira NBR 6118/78 e a norma francesa superestimam os valores de módulo de elasticidade. Com o advento da nova NBR 6118 (ABNT, 2003), a correlação entre resistência à compressão e o módulo de elasticidade permite menores valores de módulo, se comparada com a versão antiga. A norma norueguesa, contudo, foi a que mais se aproximou dos resultados da pesquisa.

3. CURA DO CAD

3.1. CONCEITO E IMPORTÂNCIA

De acordo com NBR 14931 (2004), enquanto não atingir endurecimento satisfatório, o concreto deve ser curado e protegido contra agentes prejudiciais para:

- evitar a perda de água pela superfície exposta;
- assegurar uma superfície com resistência adequada;
- assegurar a formação de uma capa superficial durável.

A cura é um processo mediante o qual mantém-se um teor de umidade satisfatório, evitando a evaporação de água de mistura, garantindo ainda, uma temperatura favorável ao concreto, durante o processo de hidratação dos materiais aglomerantes, de modo que se possam desenvolver as propriedades desejadas do concreto (BAUER *et al.*, 1999). Cura excessiva é sempre melhor do que nenhuma cura, mas deve se reconhecer que não existe problema para se realizar uma boa cura quando ela é planejada no início, já que isso envolve somente a adição de um material quase sem custo no concreto: a água (AÏTCIN, 2000).

Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento até uma condição desejável. No caso de concreto de obra, quase sempre a cura é interrompida bem antes que tenha ocorrido a máxima hidratação possível (NEVILLE, 1997).

A falta de uma cura adequada age principalmente contra a durabilidade das estruturas, a qual é inicialmente controlada pelas propriedades das camadas superficiais desse concreto. Secagens prematuras resultam em camadas superficiais porosas com baixa resistência ao ataque dos agentes agressivos (GEYER *et al.*, 2003).

A cura é realizada por duas razões: para hidratar tanto quanto possível o cimento presente na mistura e, o que às vezes é esquecido, para minimizar a retração (AÏTCIN, 2000).

3.2. RETRAÇÃO

O entendimento do efeito da cura no CAD passa pela compreensão das retrações que nele ocorrem.

Se para o concreto convencional é importante, para o CAD a cura é indispensável, especialmente depois da desforma. Isto porque no concreto convencional, a retração final é essencialmente devido à retração térmica e hidráulica. Enquanto que no CAD, além destas, ainda há influência de outras retrações, como (PEREIRA *et al.*, 1997):

- retração plástica, devido a sua baixa exsudação;
- retração autógena, que é a contração volumétrica que se desenvolve no concreto quando a porosidade é muito fina (como é o caso do CAD), criada durante a hidratação do cimento;
- retração térmica, devido a gradientes térmicos, originados pelo desenvolvimento heterogêneo da temperatura do concreto, durante o esfriamento.

O somatório dos efeitos destes mecanismos causadores de retração, que podem reduzir o volume aparente do concreto, será o responsável pela retração final do CAD (PEREIRA *et al.*, 1997).

Retração plástica é a secagem prematura (perda de água) do concreto ainda fresco, o que gera uma rede de capilares em sua superfície e, assim, pode ser evitada impedindo ou minimizando a exsudação da água com a proteção da superfície do concreto enquanto no estado fresco (AÏTCIN, 2000).

A pasta de cimento endurecida não permanece dimensionalmente estável quando exposta a umidades ambientais que estão abaixo da saturação. Inicialmente, a mudança de volume experimentada pelo concreto pela perda de água livre, presente nos vazios maiores da pasta, não causa variação de volume. Com a continuidade da evaporação inicia-se a perda da água adsorvida, retida nas proximidades dos componentes sólidos da pasta, e da água retida em pequenos poros capilares, originando a retração irreversível, considerada a principal causa de retração por secagem. Em condições de secagem mais severas (umidade relativa da ordem de 11%), a água interlamelar também pode ser removida, causando retração entre as camadas de C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 1994; CANOVAS, 1998; NEVILLE, 1997). Esta situação evidencia a gravidade de se executar concretos de alto

desempenho em regiões com baixa umidade relativa do ar sem que se tenha uma condição ideal de cura.

Deve ser lembrado que a evaporação aumenta quando a temperatura do concreto for muito mais alta do que a temperatura ambiente. Em tais circunstâncias pode ocorrer retração plástica, mesmo que seja alta a umidade relativa do ar. Portanto, é melhor proteger o concreto contra o sol e contra o vento, lançar e iniciar a cura o mais cedo possível (LIMA; PACHA, 2001).

A hidratação do concreto é seguida de uma redução do volume sólido, pois a hidratação dos componentes do cimento Portland também é acompanhada por uma contração volumétrica. De fato, ao hidratar um volume A de cimento com um volume B de água, sabe-se que formará um volume C menor, isto é, $A+B > C$. Mesmo que não existam valores definidos para A, B e C, é usualmente aceito que a redução do volume sólido provocada pela hidratação do cimento é cerca de 10% (AÏTCIN, 2000).

Essa contração volumétrica desenvolve a retração no concreto quando a porosidade muito fina, criada durante a hidratação do cimento, drena a água de capilares maiores e, assim, provoca a formação de meniscos dentro do sistema de poros, gerando a retração autógena (AÏTCIN, 2000).

Como qualquer outro concreto, o concreto de alto desempenho desenvolve retração autógena, mas como a relação a/agl é baixa, a retração autógena começa a desenvolver muito rapidamente e intensamente durante as primeiras 24 horas. Neste momento a rede de capilares é muito fina, porque as partículas cimentícias estão próximas uma das outras devido à baixa relação a/agl , e como o volume de água nos capilares não é muito grande os meniscos são criados muito rapidamente pela auto-dessecação que é desenvolvida nos capilares mais finos. Estes meniscos desenvolvem tensões de tração significativas quando a pasta de cimento ainda não é muito resistente. Quanto menor a relação a/agl mais cedo e maior será a retração autógena (AÏTCIN *et al.*, 2004).

A retração autógena é proporcional ao consumo de cimento por m^3 de concreto e à quantidade de água estequiometricamente necessária à hidratação do cimento, tendendo a aumentar em temperaturas muito altas e com teores de cimento maiores (NEVILLE, 1997).

A cura pode evitar as retrações desenvolvidas no concreto de alto desempenho já que essas ocorrem nas idades iniciais do concreto em que se faz o procedimento de cura (PINTO, 2003).

3.3. FATORES QUE AFETAM A CURA

O termo cura trata de procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento, consistindo no controle do tempo, temperatura, condições de umidade e do vento imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas (METHA; MONTEIRO, 1994).

Durante a concretagem em clima quente é necessário alguns cuidados, como a cura, para minimizar ou controlar os efeitos das altas temperaturas ambiente, baixa umidade relativa e grande velocidade do vento. Em cada obra onde estiver presente um ou mais desses fatores é necessário adotar técnicas e procedimentos apropriados e observá-los rigorosamente. A uniformidade é essencial e a inobservância desses procedimentos significa problemas (NEVILLE, 1997).

Seguramente peças de concreto confeccionadas em períodos diferentes de um mesmo ano estarão sujeitas a diferentes temperaturas e umidades relativas decorrentes das estações climáticas. Um concreto produzido no verão está sujeito a temperatura e umidade do ar muito diferente de outro produzido no inverno (GALVÃO *et al.*, 2002).

3.3.1. Duração da cura

Segundo Andriolo; Sgarbosa (1996), para cimento Portland comum, 7 dias no mínimo, Portland composto ou com adição mineral, a cura deve prolongar-se entre 14 a 21 dias a fim de garantir o desenvolvimento das reações pozolânicas.

O IBRACON (BATTAGIN *et al.*, 2002) recomenda um tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e relação a/c utilizada no concreto (Tabela 3.1):

Tabela 3.1 – Tempo mínimo de cura recomendando pelo IBRACON de acordo com o tipo de cimento e relação a/c do concreto (BATTAGIN *et al.*, 2002)

Tipo de cimento	Relação água/cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III-32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Se considerarmos que o CAD apresenta relações água/cimento próxima a 0,35, de acordo com a Tabela 3.1 poderia-se dizer que o tempo indicado de cura seria 2 dias. No entanto a tabela não indica o tipo de cura, condições ambientais, etc. Quando tratamos de CAD poucos são os estudos e recomendações acerca da cura.

A Figura 3.1 do Comitê Euro-International du Béton (CEB183, 1989) sugere alguns períodos de cura, em função da agressividade ambiental durante a vida útil da obra *versus* clima durante o período de cura *versus* sensibilidade do concreto.

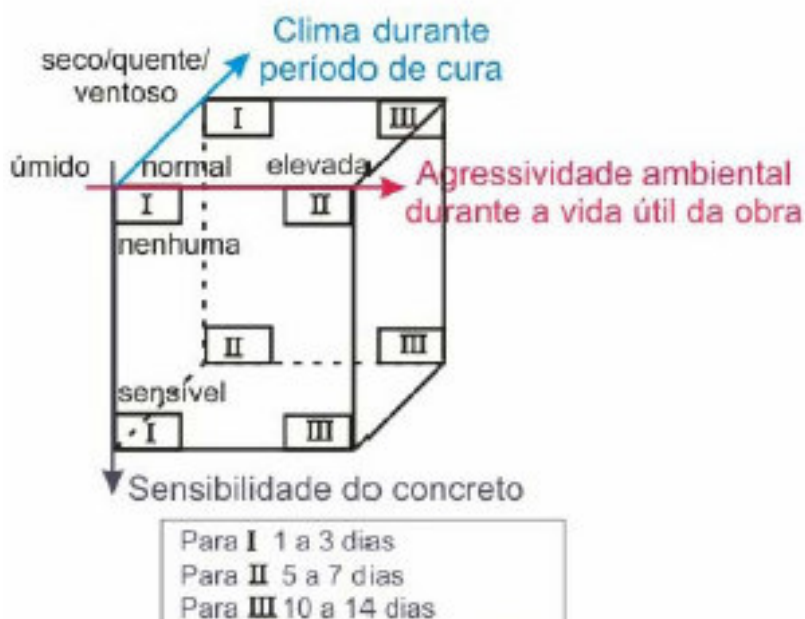


Figura 3.1 - Períodos de cura recomendados (CEB - Boletim no.183, 1989).

Deve-se entender que o aumento da sensibilidade do concreto está relacionado com o aumento da relação água/cimento (principalmente) e com o tipo e a quantidade de cimento. Portanto, para reduzir o diagrama da Figura 3.1 a duas dimensões, garantindo misturas ricas, basta diminuir a relação água/cimento. De qualquer forma, quanto maior for o tempo de cura, ou seja, quanto mais se impedir a saída de água do concreto, melhores serão as características do concreto em relação à resistência, à agressividade do meio ambiente, permeabilidade, dentre outras (CEB183, 1989).

Ainda observando a Figura 3.1 para concretos de baixa sensibilidade à cura, ou seja, para o caso de CAD, em condições normais de agressividade ambiental durante a vida útil da obra e para clima seco, quente e com vento durante o período de cura (situação esta

preponderante durante o programa experimental desta pesquisa), prescreve que seja feita cura de 1 dia a 3 dias.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003), a proteção contra secagem prematura deve acontecer pelo menos durante os sete primeiros dias após o lançamento do concreto, aumentando este mínimo quando a natureza do cimento exigir.

O período de cura necessário na prática não pode ser prescrito de modo simples: os fatores relevantes compreendem a severidade das condições de secagem e os requisitos esperados da durabilidade. Como exemplo, na Tabela 3.2 são mostrados os períodos mínimos de cura para exposição externa, incluindo congelamento e degelo, mas não o uso de agentes descongelantes, e para exposição a agentes químicos. Essa tabela é baseada na norma europeia ENV 206:1992. Se o concreto deve ser submetido a abrasão recomenda-se dobrar os períodos de cura indicados (NEVILLE, 1997).

Tabela 3.2 – Tempos mínimos de cura (em dias) recomendados pela ENV 206:1992 (NEVILLE, 1997).

Endurecimento do concreto	Rápido*			Médio			Lento		
Temperatura do concreto, °C	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Condições durante a cura									
Sem sol, h>80%	2	2	1	3	3	2	3	3	3
Sol ou vento médio, h>50%	4	3	3	6	4	3	8	5	4
Sol e vento forte, h<50%	4	3	2	8	6	5	10	8	6

H = umidade relativa do ar

*Baixa relação água/cimento e cimento de alta resistência inicial.

No caso de concretos com relação água/cimento baixa, é essencial a cura contínua às primeiras idades, pois a hidratação parcial pode tornar os capilares descontínuos: na retomada da cura, a água poderia não conseguir penetrar no interior do concreto e não haveria prosseguimento da hidratação. No entanto, concretos com relação água/cimento alta mantêm um volume grande de capilares de modo que a cura pode ser retomada em qualquer tempo sem prejuízo da eficiência, mas quanto mais cedo melhor (NEVILLE, 1997).

O tempo adequado de molhamento, para concreto convencional, segundo vários autores (NEVILLE, 1997; SPEGLICH; DUCATTI, 1997; CANOVAS, 1998; TAN; GJORV, 1996; BAUER *et al.*, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 1994; HO; CHIRGWIN, 1996) varia de 5 a 7 dias, sendo o ideal 28 dias. Já PIRES (1999) afirma que 3 dias de molhamento é o suficiente. Para o CAD a bibliografia não apresenta muitos estudos, sendo mais raros ainda os que levam em conta condições climáticas específicas.

3.3.2. Umidade

Para o prosseguimento da hidratação, o interior do concreto deve ser mantido a uma umidade relativa no mínimo igual a 80%. Se a umidade relativa do ar ambiente é pelo menos igual a esse valor, haverá uma pequena movimentação da água entre o concreto e o ar ambiente e não será necessária cura para assegurar a hidratação. A rigor, essa afirmativa somente é válida se não intervierem outros fatores, por exemplo, se não houver vento, se não houver diferença de temperatura entre o concreto e o ar e se o concreto não estiver exposto ao sol. No entanto, na prática, a cura somente não é necessária em climas muito úmidos com temperatura bem estável. É importante notar que em muitas partes do mundo a umidade relativa cai abaixo de 80% durante parte do dia, de modo que é influenciada a crença em “cura natural” devida ao clima úmido (NEVILLE, 1997).

A microestrutura do concreto é afetada pelas condições de hidratação. A taxa de hidratação do silicato de cálcio varia com a umidade relativa. A Figura 3.2 mostra a hidratação do C_3S que cessa quando a umidade relativa é menor que 75% (OLLIVIER, 1998).

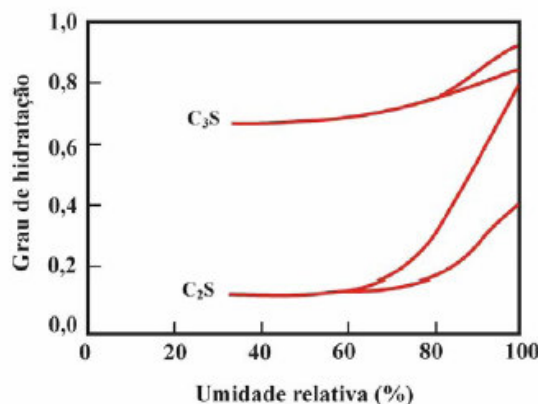


Figura 3.2 - Grau de hidratação do silicato de cálcio para diferentes umidades relativas (OLLIVIER, 1998).

Na Figura 3.3 é dada uma indicação da influência da evaporação pela superfície do concreto, da temperatura e da umidade relativa do ar circundante e da velocidade do vento, conforme resultados de Lerch (NEVILLE, 1997).

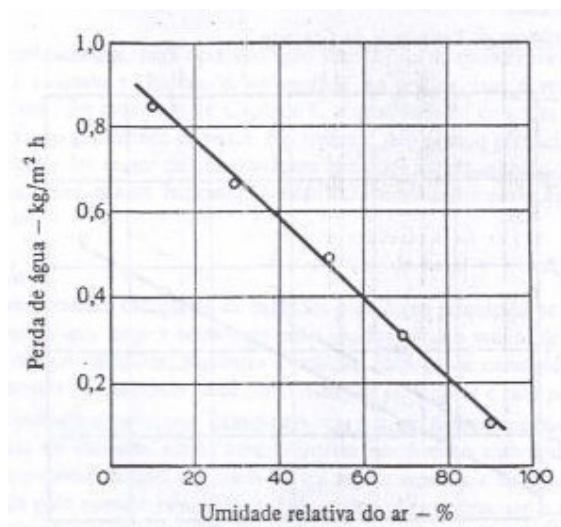


Figura 3.3 – Influência da umidade relativa do ar sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (temperatura do ar 21°C; velocidade do vento 4,5m/s) (NEVILLE, 1997).

Neste estudo de Lerch observou-se que, com uma redução da umidade relativa do ar de 100% para 94%, aumentou-se bastante a capacidade de absorção de água pelo concreto, o que se considera uma indicação da extensão do sistema contínuo de grandes poros do concreto. Cura a uma umidade relativa abaixo de cerca de 80% resultou um considerável aumento do volume de poros maiores do que 37 nm, que são importantes para a durabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

3.3.3. Temperatura

A temperatura de cura também influencia nas propriedades do concreto endurecido, principalmente temperaturas de cura elevada, pois esta impede a hidratação do cimento em idades posteriores (ZAIN; SAFIUDDIN; MAHMUD, 2000).

Na faixa de temperatura de 4 a 46°C quando o concreto é lançado e curado numa temperatura específica e constante, é geralmente observado que, até os 28 dias, quanto maior a temperatura, mais rápida é a hidratação do cimento e o ganho de resistência resultante. Já para concretos lançados a 21°C e subsequentemente curados a temperaturas diferentes desde abaixo de 0°C até 21°C, menores são as resistências aos 28 dias tanto quanto menor for a temperatura de cura. Como as reações de hidratação dos compostos de cimento Portland são lentas, entende-se que níveis adequados de temperatura devem ser mantidos por um tempo suficiente para proporcionar a energia de ativação necessária para as reações. Isto permite que o processo de desenvolvimento da resistência, que é associado

com o progressivo preenchimento dos vazios com os produtos de hidratação, prossiga livremente (METHA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Troxell; Davis *apud* Bauer (1987), as temperaturas favoráveis a uma boa cura situam-se no intervalo de 15°C a 35°C, pois abaixo de 15°C as reações de hidratação ocorrem lentamente, dificultando o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades. Já em temperaturas mais altas, acima de 35°C, as reações de hidratação ocorrem de maneira mais rápida, promovendo uma redução da resistência final. Dentro desse intervalo observa-se um aumento da resistência acompanhado de um aumento da temperatura do concreto desde que seja conservado úmido durante um período suficientemente longo.

A influência da temperatura sobre a resistência do concreto têm várias aplicações importantes na prática de construção em concreto. Dado que a temperatura de cura é muito mais importante para a resistência do que a temperatura de lançamento, o concreto comum lançado em clima frio deve ser mantido a uma certa temperatura mínima por tempo suficiente. De um concreto curado no verão ou em clima tropical pode se esperar que tenha uma resistência inicial maior, porém uma menor resistência final do que o mesmo concreto curado no inverno ou em clima frio (METHA; MONTEIRO, 1994).

3.3.4. Vento

Ventos fortes são muito prejudiciais ao concreto jovem, visto que dão lugar a uma deficiência na hidratação do cimento por perda de água com conseqüente repercussão nas resistências e retração, afetando a integridade e durabilidade do concreto (CANOVAS, 1998).

Na Figura 3.4 é dada uma indicação da influência da evaporação pela superfície do concreto, da temperatura e da umidade relativa do ar circundante e da velocidade do vento, conforme resultados de Lerch (NEVILLE, 1997).



Figura 3.4 – Influência da velocidade do vento sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (umidade relativa 70%; temperatura do ar 21°C) (NEVILLE, 1997).

A partir da Figura 3.4 observa-se que, para concreto convencional, quanto maior a velocidade do vento maior é a perda de água e conseqüentemente maior será a retração do concreto. Sendo assim, nota-se que a cura é indispensável evitando que ocorra a fissuração da peça.

O ábaco da Figura 3.5 permite avaliar para que condições de velocidade do vento, temperatura ambiente, e do concreto, e umidade relativa, o concreto é suscetível ou não de fissurar-se por retração, tendo em vista que para velocidades de evaporação superiores a 0,50 l/m²/h é de se esperar que o concreto fissure, existindo uma velocidade de evaporação de 1,50 l/m²/h uma probabilidade de 100% de aparecimento de fissuras, sendo necessárias medidas enérgicas de cura que impeçam a evaporação da água (CANOVAS, 1996).

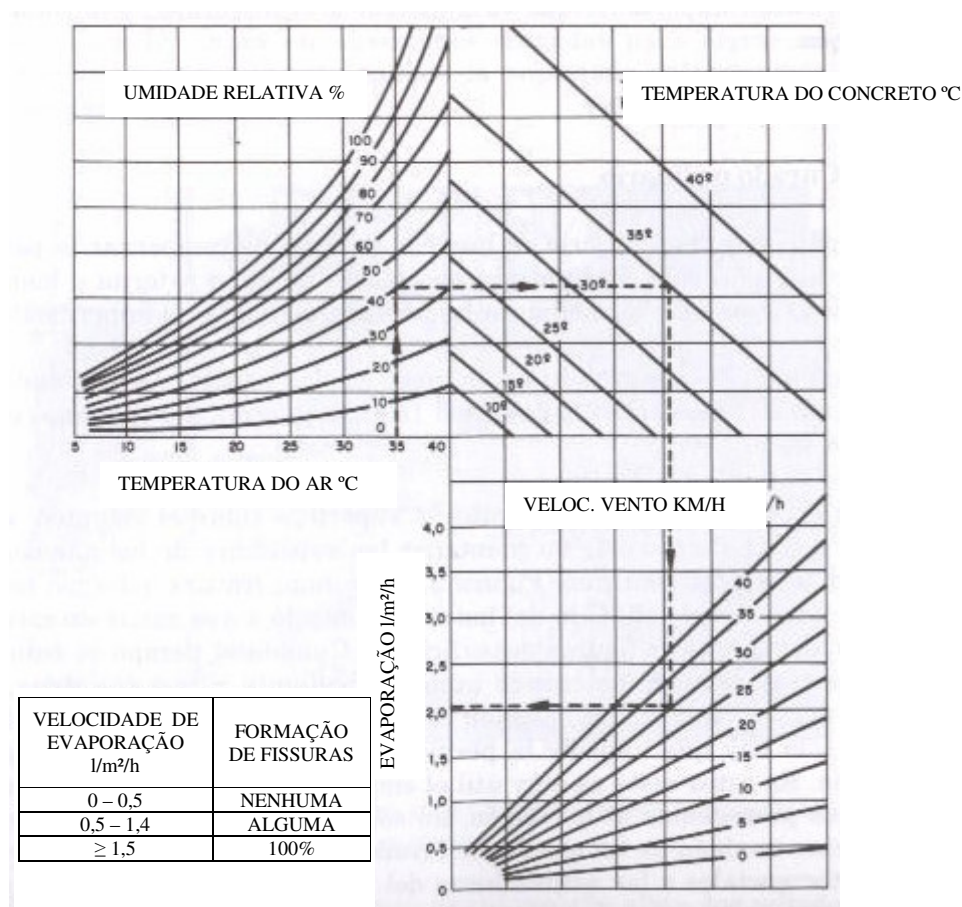


Figura 3.5 – Influência da velocidade e temperatura do ar do concreto sobre a evaporação da água do concreto (CANOVAS, 1996).

Para uma temperatura ambiente de 35°C, umidade relativa do ar de 40%, temperatura do concreto de 35°C e velocidade do vento de 30km/h, a velocidade de evaporação será de 2l/m²/h, o que equivale a uma probabilidade de fissuração de 100% (CANOVAS, 1996). Esta situação é bastante comum em Goiânia nos meses de maio a setembro, período considerado para esta pesquisa.

A norma NBR 14931 (ABNT, 2004) prescreve que, quando a concretagem for efetuada em temperatura ambiente muito quente ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) e, em especial, quando a umidade relativa do ar for baixa ($\leq 50\%$) e a velocidade do vento alta ($\geq 30\text{m/s}$), devem ser adotadas as medidas necessárias para evitar a perda da consistência e reduzir a temperatura da massa de concreto. Imediatamente após as operações de lançamento e adensamento, devem ser tomadas providências para reduzir a perda de água do concreto.

3.4. TIPOS E PROCEDIMENTOS DE CURA

Existem vários métodos de cura empregados em obra, sendo os mais usados: aspersão de água (lâmina de água), areia ou serragem de madeira umedecidas, sacaria mantida molhada e manta plástica. Existem também produtos químicos que uma vez aplicados sobre a superfície do concreto formam, em contato com o ar, uma película impermeável, evitando a evaporação da água do concreto e assegurando-lhe uma cura eficiente e sua conseqüente durabilidade (RIPPER, 1984).

Na seqüência, serão discutidos com mais detalhes os procedimentos utilizados na parte experimental desta pesquisa.

3.4.1. Cura úmida

Este tipo de cura consiste em encharcar o concreto com água. Isto pode ser conseguido por espalhamento contínuo ou inundação (formando uma lâmina de água sobre o concreto) ou cobrindo o concreto com areia, terra, serragem ou palhas molhadas. Deve ser tomado cuidado, pois podem resultar algumas manchas na superfície. Para proteção do concreto também podem ser usadas juta, esteiras de algodão espessas ou dobradas, molhadas periodicamente bem como materiais absorventes em contato com água. Em superfícies inclinadas pode ser feita molhagem com mangueiras. O suprimentos contínuos de água são mais eficientes do que os intermitentes (COUTO, 2003), isto porque molhagens intermitentes em superfícies expostas a altas temperaturas podem sofrer choques térmicos indesejáveis.

Quando se utiliza a aspersão, deve-se ter a precaução para que não ocorra uma secagem muito profunda, a fim de evitar fadiga superficial devida às dilatações e contrações freqüentes, em idades nos quais o concreto ainda não desenvolveu por completo a sua resistência mecânica (BAUER, 1987).

A cura por imersão em concretos de alto desempenho parece ter sua eficiência reduzida devido à formação de uma zona superficial de baixa permeabilidade que dificulta o acesso de água às regiões mais internas, onde a cura com membranas plásticas ou cobertores impermeáveis parece ter uma eficiência equivalente ou até melhor do que a cura por imersão em água (AGOSTINI; NUNES, 1996).

Com relação à manutenção das fôrmas de madeira, Souza; Ripper (1998) lembram que, são necessários molhamentos freqüentes, não só para dilatá-las, impedindo a evaporação através de juntas e fendas, como porque a movimentação higroscópica da madeira é maior que a do concreto.

Quanto à água para a cura, de preferência, deveria ser a mesma usada para amassamento. Uso de água do mar pode causar corrosão da armadura. A presença de ferro ou matéria orgânica pode resultar manchamento, em particular se a água flui lentamente sobre o concreto e evapora rapidamente. É de fundamental importância que a água seja isenta de substâncias que possam atacar o concreto endurecido. Também é muito importante observar a temperatura da água. Esta não deve estar muito abaixo da temperatura do concreto para evitar choque térmico ou gradientes acentuados de temperatura (NEVILLE, 1997); o ACI 308 (1992) recomenda que a diferença não ultrapasse 11°C.

A água adicionada para amassamento e cura das argamassas e concretos deve cumprir com os requisitos físicos e químicos definidos pela norma NM 137 (ABNT, 1997).

3.4.2. Cura por membrana

Consiste na aplicação de um produto químico que, ao secar, forma uma membrana impedindo a saída de água pela superfície do concreto, evitando-se a evaporação desta.

As técnicas mais usadas para este método são cobrir a superfície do concreto com mantas de polietileno ou papel reforçado. Outra técnica usa compostos de cura aplicados por pulverização que formam uma membrana. Os mais comuns são soluções de resinas de hidrocarbonetos sintéticas em solventes muito voláteis. Outras resinas disponíveis são os butadienos de acrílico, vinila e borrachas cloradas. Também podem ser usadas emulsões de cera ou parafina, mas elas resultam em superfícies escorregadias difíceis de serem removidas, ao passo que resinas de hidrocarbonetos têm pouca aderência ao concreto e se degradam pela ação dos raios ultra-violetas; estas duas características são desejáveis (NEVILLE, 1997).

O produto de cura química deve ser aplicado depois de cessada a ascensão de água à superfície do concreto (exsudação), mas antes que a superfície seque, valendo ressaltar que concretos que possuem sílica ativa, não apresentam exsudação e por isso a membrana de cura deverá ser aplicada rapidamente, pois se o composto de cura for aplicado sobre

uma superfície já seca, o produto penetrará no concreto impedindo a hidratação na região externa (NEVILLE, 1997).

As membranas de cura mantêm a impermeabilidade superficial do concreto por um certo período de tempo, em geral 3 a 4 semanas, evitando, assim, a rápida secagem do concreto, através de um filme impermeável que dura aproximadamente esse tempo (BAUER, 1987).

Dentre as curas por pulverização, as emulsões à base de cera ou parafina são as mais baratas, mas há a ressalva que estes produtos devem ser aplicados apenas em superfícies onde o concreto será aparente, pois estes produtos reduzem a aderência de revestimentos (NEVILLE, 1997).

As substâncias que permitem obter membranas de cura são aquosas ou soluções de produtos resinosos ou parafínicos, que se rompem quando entram em contato com o meio alcalino. Essas substâncias, ao se romperem, depositam uma delgada película de resina ou parafina nas estruturas onde são aplicadas. Essa película formada não deve ser incolor, para que se possa determinar, à vista, os locais em que está aplicada. Usualmente, a cor da película é clara, para não absorver a radiação solar, impedindo assim, a elevação da temperatura do concreto, que aceleraria a saída da água (BAUER, 1987).

A membrana à base de borracha clorada adere melhor ao substrato, apresentando assim uma melhor eficiência na retenção de umidade. A membrana é aplicada sobre o concreto fresco uma vez finalizado processo de concretagem e imediatamente após o desaparecimento da água de exsudação. Pré-moldados são tratados imediatamente após a desfôrma. A aplicação deve ser feita de preferência com utilização de pulverizador para obter uma camada uniforme. É possível a utilização de brochas e rolos, porém estes podem aumentar o consumo, danificar a superfície e ocasionar bolhas. O rendimento depende da textura e porosidade da superfície, as dosagens normais são em torno de 200g/m², aplicado com pulverizador. O tempo de secagem é de aproximadamente uma a três horas na temperatura de 21°C (MBT, 2003).

Dado que, em concreto convencional, a quantidade de água de amassamento usada na mistura do concreto é normalmente maior do que a necessária para a hidratação do cimento (estimada em 30% em massa do cimento), a aplicação de uma membrana impermeável logo após o lançamento do concreto proporciona um meio aceitável de manter o processo de hidratação do cimento e de garantir uma velocidade satisfatória de desenvolvimento da resistência do concreto (METHA; MONTEIRO, 1994). Já este método

torna-se questionável quando se trata de CAD uma vez que este não possui água suficiente para todas as partículas de cimento serem completamente hidratadas com a quantidade de água inicial da mistura, sendo necessário então fornecimento de água para evitar a retração autógena (AİTCIN, 2000).

3.4.3. Cura térmica

A cura térmica é uma técnica que busca otimizar os processos construtivos. Em determinadas circunstâncias, é altamente compensadora para as obras com grande quantidade de peças pré-moldadas, a utilização de cura acelerada por agentes químicos (HOLANDA; VASCONCELOS, 1981). Sua utilização reduz o tempo da cura, proporcionando resistência mínima para desforma, manuseio ou utilização das peças de concreto, reduzindo a área de estoque e aumentando a rotatividade dos moldes (SALVADOR FILHO; BARBOSA, 2000).

Pode ser realizada com vapor à pressão atmosférica ou com vapor a alta pressão em autoclave. Existem ainda, outros métodos de cura térmica, com o objetivo de acelerar a evolução da resistência do concreto, tais como o método de tratamento à quente e método de cura por eletricidade e, em outros países, a cura com radiação infravermelha (NEVILLE, 1997).

Este tipo de cura é mais apropriado para a indústria de pré-moldados visto a dificuldade desta ser executada com concretos moldados *in loco*.

3.5. CURA DO CAD

Estudando diferentes períodos de cura, Asselani *et al. apud* Khayat; Aİtcin (1992) sugerem que 7 dias de cura úmida são suficientes para que concretos com microsílica desenvolvam suas resistência potenciais.

Agostini; Nunes (1996) pesquisando diferentes variações de cura em câmara úmida, complementadas por cura submersa ou envoltas em lona ou em ambiente do laboratório até 91 dias concluíram que para concretos de alto desempenho sem microsílica os melhores resultados são obtidos por cura por imersão em água, sendo estes resultados tanto melhores quanto mais cedo a imersão for feita.

Segundo Neville (1997), para concretos com relação água/cimento menor do que 0,5, e, certamente menor do que 0,4, deve se usar cura por molhagem, mas, somente se puder ser aplicada por completo e continuamente. Se isso não for possível, é preferível a cura por membrana, mas que seja bem executada.

Barbosa *et al.*(1999) citam que a cura por imersão em água do CAD provoca melhores resultados que o envolvimento em cobertores plásticos pelo fato de que a selagem da peça não permite a entrada de água para repor a água perdida na autodessecação causada pela baixa relação a/c e microestrutura compacta.

Aİtcin (2000) afirma que os compostos de membrana de cura (cura química) aceitáveis para curar concretos com relação água/aglomerante alta (0,5 a 0,7) não são suficientes para curar um CAD. Quanto mais baixa a relação água/aglomerante, mais elevada a retração autógena e maior a necessidade de água.

Na Figura 3.6 pode ser vista a melhor maneira, segundo Aİtcin (2000), de proteger o CAD das retrações. Logo após o lançamento e acabamento, isto é, quando concluída a concretagem, deve-se proteger o CAD com uma membrana temporária de cura ou nebulização para evitar a retração plástica. Enquanto se processam as reações de hidratação do cimento, o CAD deve ser curado com água para evitar a retração autógena. O período de sete dias de cura úmida parece ser suficientemente longo para reduzir drasticamente a retração autógena, mas, de qualquer forma, a cura nunca pode ser inferior a três dias. Finalmente, o CAD deverá ser coberto por uma película impermeável (por exemplo, uma pintura) logo que a cura úmida for finalizada (AİTCIN, 2000).

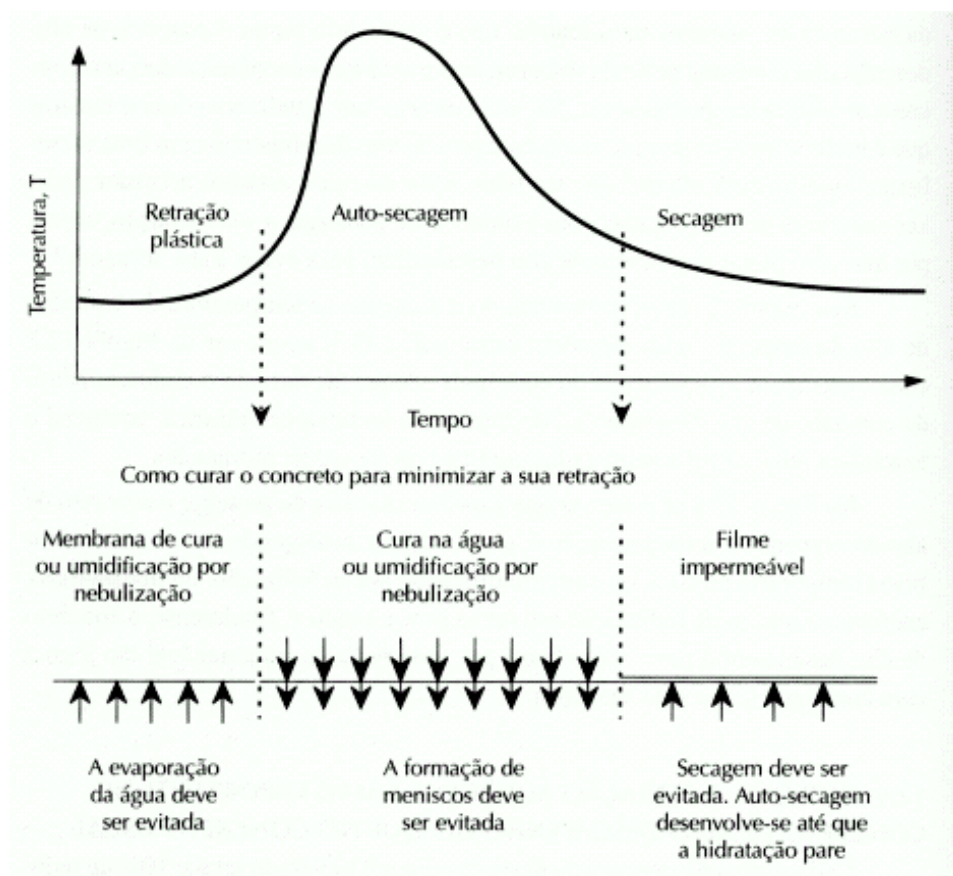


Figura 3.6 - Regimes mais adequados de cura no curso das reações de hidratação (AİTCIN,2000).

O Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON (Battagin *et al.*, 2002) recomenda para concretos com relação água/cimento igual a 0,35 (valor próximo ao usado para o CAD) 2 dias de cura, mas não especifica que tipo de cura.

Segundo Pinto; Geyer (2003) 7 dias de cura úmida parece ser suficiente para se evitar a retração autógena. A cura química, segundo os mesmos, melhora de forma insignificante ou, às vezes, até no decréscimo da resistência.

Weber; Reinhardt (1997) sugerem, como um método eficaz de cura, o uso de agregado leve saturado dentro do concreto criando uma fonte interna (interna para concreto) de água externa (externa para a pasta de cimento). Por outro lado, Jensen; Hansen (2000) sugerem introduzir polímeros superabsorventes que absorvem alguma água extra durante a moldagem e provê uma fonte dispersa de água externa dentro do concreto quando a auto-dessecação se desenvolve. Segundo Aİtcin *et al.* (2004), em ambos os casos, devido a presença de fonte de água dentro do concreto a água capilar não é sugada de dentro da pasta, e conseqüentemente os meniscos não serão desenvolvidos dentro do

sistema fechado. Em tais casos o uso de membrana de cura é apropriado para prevenir a retração plástica porque a água externa está contida dentro do concreto.

Analisando as opiniões de diversos autores nota-se que não existe consenso ao indicar o melhor tipo de cura para o CAD e nem mesmo a duração desta, necessitando assim de mais estudos.

Outra questão importante são as condições climáticas que, por variarem de lugar para lugar, com diferentes temperaturas, velocidades de vento e umidades relativas do ar, impõe que se estude soluções para casos específicos.

3.6. INFLUÊNCIA DA CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD

Neste item é abordado a influência da cura nas propriedades mecânicas do CAD. A influência da cura na durabilidade não é assunto discutido nesta pesquisa.

As normas existentes e vigentes no Brasil, que tratam da moldagem e cura de corpos de prova de concreto, aconselham que os corpos de prova permaneçam em condições de cura até a data do ensaio. Porém, contrário a isto, tem-se observado que em muitos casos, para o CAD um tempo menor de cura úmida apresenta resultados vantajosos quando se analisa a resistência à compressão do concreto (AGOSTINI; NUNES, 1996).

Parrot (1995), baseado em resultados de um extenso programa experimental, relata uma maior sensibilidade dos concretos de alta resistência aos efeitos da cura.

Os estudos sobre cura de Asselanis *et al.* *apud* Khayat; Aïtcin (1992), indicaram que a resistência à compressão, aos 28 dias, de um concreto com relação água/(cimento + microssílica) de 0,28, com adição de 10% de microssílica, curado ao ambiente, foi 18% inferior à do mesmo concreto submetido à cura úmida.

O fenômeno de regressão de resistência, ocasionalmente observado quando o concreto de alto desempenho é exposto a condições severas de secagem ao ar, enfatiza a necessidade de cura inicial e adequada em água para o concreto de alto desempenho e mesmo, em alguns casos críticos, de revestir alguns elementos estruturais de concreto de alto desempenho com película impermeável ou com sua pintura, para evitar qualquer retração por secagem, de tal modo que nenhum gradiente de tração seja criado na “pele” do concreto de alto desempenho (AÏTCIN, 2000).

Salvador Filho; Barbosa (2000) realizaram ensaios mecânicos em CAD submetidos à cura térmica com ciclo térmico no patamar de 80°C e conclui que houve uma perda

resistência à compressão da ordem de 12% utilizando este tipo de cura. Segundo Laplante (1993) isso pode ser explicado pela diminuição do volume de água no concreto, o que diminui o coeficiente de dilatação global. As perdas de resistências são estimadas em torno de 10%, para temperaturas de cura da ordem de 60°C, podendo atingir 30% para a temperatura máxima de 80°C (ESCANDEILLAS *et al.*, 1999).

Zain; Radin (2000) testaram a resistência à compressão (28 dias) de CADs compostos com relação água/aglomerante de 0,25 e diferentes tipos de adições em corpos de prova submetidos a 03 diferentes tipos de cura: imersão em água, cura úmida (sacos de aninhagem molhados) e cura ao ar. A partir dos resultados obtidos, como pode ser visto na Figura 3.7, concluíram que o desempenho do concreto que foi curado ao ar foi significativamente inferior, devido à formação da retração autógena, enquanto que, a cura úmida teve um comportamento muito próximo da cura sob imersão na água pois ela garante o fornecimento de água necessária para evitar a retração autógena e secagem do concreto.

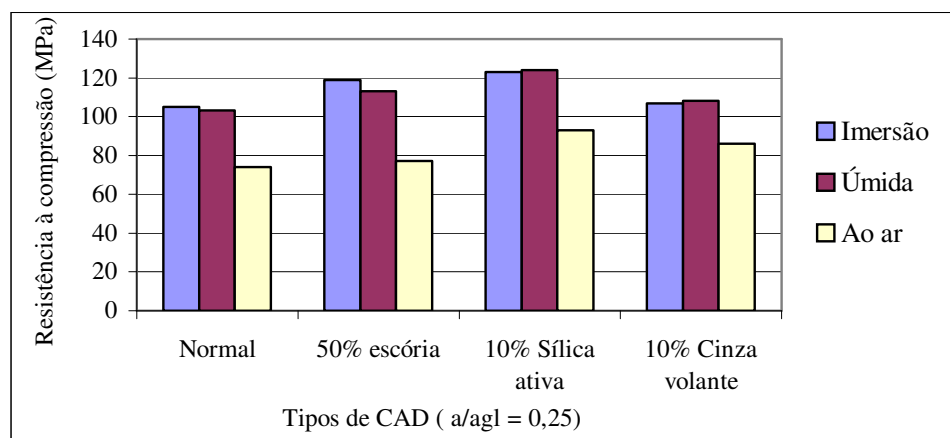


Figura 3.7 – Efeito dos tipos de cura no CAD (ZAIN; RADIN, 2000).

Neste mesmo estudo (ZAIN; RADIN, 2000) também foi notado que a cura tem influência também no módulo de elasticidade do CAD. Como se sabe, o tipo de retração que mais influencia no CAD é a autógena. Neste tipo de concreto, os capilares são muito finos. A medida que a água tende a deixar o concreto, desenvolvem-se meniscos em capilares cada vez mais finos, sendo desenvolvidas forças capilares, propiciando a retração autógena, o que tende a decrescer a sua resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Sendo assim, é fundamental fornecer água durante a sua cura.

Pinto; Geyer (2003) analisaram a influência de 05 tipos de cura na resistência à compressão aos 28 dias de CAD produzido com 10% de sílica ativa: 7 dias de cura úmida

(câmara úmida), cura química à base de parafina, cura química à base de borracha clorada e cura ao ar. Estes perceberam que a condição de 7 dias de cura úmida equivale, em todos os concreto, ao melhor resultado de resistência à compressão. Em contrapartida, a cura química à base de parafina e borracha clorada obteve irrelevante melhora, ou até resultados inferiores, em relação à pior condição de cura, no caso ao ar. E a situação de 1 dia de cura úmida, apesar de apresentar resistências superiores às curas químicas e ao ar, também não demonstrou diferença significativa (Figura 3.8). Ressalta-se que as condições climáticas no estudo feito por estes autores não foram observadas, portanto seus resultados, segundo os mesmos, merecem mais estudos para serem considerados definitivos.

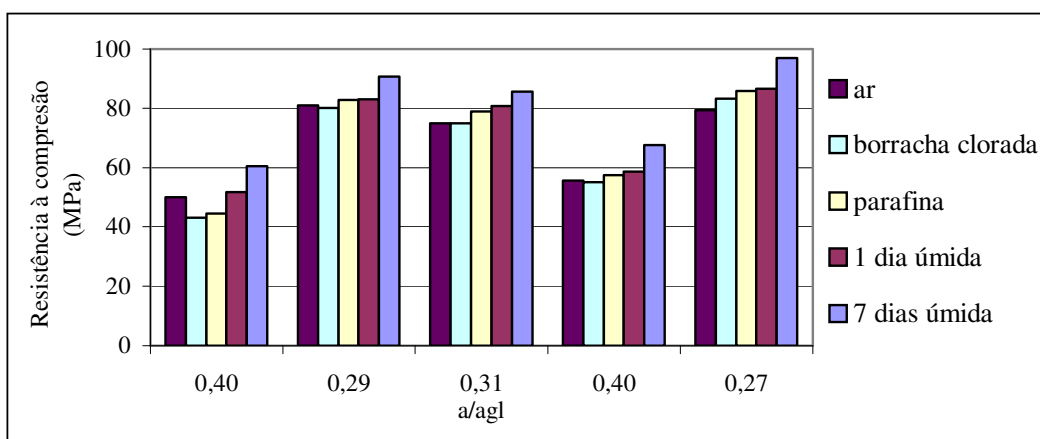


Figura 3.8 – Influência dos diferentes procedimentos de cura no CAD (PINTO e GEYER, 2003).

Cervo; Balbo (2004) realizaram um estudo sobre a influência do método de cura na resistência à tração na flexão de CADs e verificaram que existe importante influência do método de cura na resistência do concreto.

Já, para Neville (1997), o efeito da cura inadequada sobre a resistência é maior com relações água/cimento maiores, e também é maior em concretos com menor velocidade de evolução da resistência. Assim, a resistência de concretos feitos com cimento Portland comum é mais influenciado por cura deficiente.

Ramires (1993), para estudar o comportamento na resistência à compressão de concretos com sílica ativa, quando submetidos a diferentes métodos e períodos de cura, desenvolveu um programa experimental avaliando três relações água/(cimento + sílica ativa) – 0,28, 0,37 e 0,58 -, com 10% de adição de sílica ativa proporcional à massa de cimento. Os tipos de cura utilizados foram (C1) em câmara úmida com temperatura controlada em $23^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$, (C2) em câmara úmida por 3 dias e mantido o restante do tempo no ambiente do laboratório, (C4) submersa com temperatura controlada, (C5) no ambiente

do laboratório e (C6) com utilização de composto formador de película. Os resultados obtidos mostraram que os concretos com relações água/(cimento + sílica ativa) iguais a 0,28 e 0,37 apresentaram praticamente o mesmo comportamento em todos os tipos de cura utilizados. O concreto com relação água/(cimento + microssílica) igual a 0,58, no entanto, mostrou-se muito sensível ao método de cura utilizado, sendo a cura no ambiente do laboratório (C5) e a cura submersa (C4) responsáveis pelos menores e maiores resultados obtidos, respectivamente, que diferiram em aproximadamente 29% aos 63 dias. Este estudo revela que quanto maior a relação água/(cimento + microssílica), maiores deverão ser os cuidados com a cura, sendo os concretos de alta resistência menos suscetíveis às variações ambientais. Observa-se que este estudo de Ramires (1993) fica limitado uma vez que não foram observadas as condições ambientais os quais segundo Metha; Monteiro (1994) e Canovas (1996) são muito importantes.

Carette; Malhotra (1993), realizando ensaios de resistência à compressão até a idade de 3,5 anos, de concretos sem e com incorporação de 10% de sílica ativa em substituição à massa de cimento, curados em água e no ambiente de laboratório, concluíram que os dois tipos de concreto sofreram reduções nos valores de resistência à compressão quando curados ao ambiente, sendo o efeito mais marcante para os concretos com adições de sílica ativa e relações água/(cimento + sílica ativa) mais altas.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL: PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Com o objetivo de se verificar a influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de CAD, produzido em período quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa ($h < 50\%$), foi proposto o programa experimental.

Realizou-se o estudo de parâmetros relacionados com a qualidade do concreto, levando-se em conta aspectos de desempenho mecânico. Comparou-se concretos submetidos a 14 condições de cura, variando -se tipo e tempo de duração.

O programa experimental estabeleceu três classes de resistência de concreto de alto desempenho (resistência estimada aos 28 dias de 60, 80 e 100 MPa) englobando ensaios no estado fresco e endurecido.

No concreto fresco foram realizados: ensaios de abatimento de tronco de cone, ensaios de massa específica e ensaio de teor de ar incorporado. E no concreto endurecido foram realizados: ensaio de resistência à compressão, ensaio de resistência à tração na flexão e ensaio de módulo de deformação.

4.1. LOCAL DOS EXPERIMENTOS

Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de FURNAS S.A., localizado em Aparecida de Goiânia – GO.

4.2. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Apresenta-se aqui todo do desenvolvimento do programa experimental partindo da descrição do planejamento dos experimentos (variáveis e definição dos métodos experimentais).

4.2.1. Variáveis independentes

a) Clima: quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$, onde t é a temperatura média diária), com temperaturas máximas médias acima de 33°C , e com baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$, onde h é a umidade relativa do ar média diária), apresentando no período umidade relativa do ar mínima de 27%.

Conforme Quadro 4.1 (ROMERO, 1988) o clima da região de Goiás, na época da execução dos ensaios (mês de setembro de 2004) pode ser classificado com quente e muito seco.

Quadro 4.1 – Classificações gerais de clima (ROMERO, 1988)

<i>Conforme a</i>	<i>Tipo de clima</i>
Temperatura média do ar	Quente (acima de 20°C)
	Temperado (acima de 10 °C)
	Frio (entre 10°C e 0°C)
	Glacial (abaixo de 0°C)
Umidade relativa do ar média	Muito seco (abaixo de 55%)
	Seco (entre 55% e 75%)
	Úmido (entre 75% e 90%)
	Muito úmido (acima de 90%)

De acordo com a Agência Ambiental, o Estado de Goiás se caracteriza por ter um clima quente, variando de úmido a semi-árido, com até cinco meses de seca. Característico dos climas úmidos tropicais, com duas estações bem definidas: seca, no inverno, e úmida, no verão, com transições mais próximas dos períodos que estão findando.

Tem-se como uma particularidade importante no estudo o fato de que nesta cidade, entre os meses de maio a setembro tem-se um período de seca, com ausência de chuvas, elevadas temperaturas (temperatura média diária acima de 25°C e temperatura máxima média acima de 33°C) e também baixíssima umidade relativa do ar ($h < 50\%$) respectivamente, o que para fins de cura do concreto pode-se considerar como uma situação adversa. Neste período foram realizados os experimentos deste trabalho, com o intuito de contribuir para os estudos do efeito de diferentes tipos de cura nestas condições climáticas.

No ano de 2004, em particular, a umidade relativa do ar (URA) foi a mais baixa dos últimos 30 anos em Goiás. Esta chegou a valores de 7% nos bairros da Região Norte e 12% nos da Região Central de Goiânia. A URA da Região Norte da capital é quase a metade da média verificada no Deserto do Saara, de 13%. Índices semelhantes aos verificados na capital só foram registrados em 1973 (DORIAN, 2004).

Nas Figuras 4.1 e 4.2 encontram-se, respectivamente, os gráficos com as umidades relativas do ar e temperaturas (máxima, média e mínima) para o mês de setembro do ano de 2004, época da realização desta pesquisa.

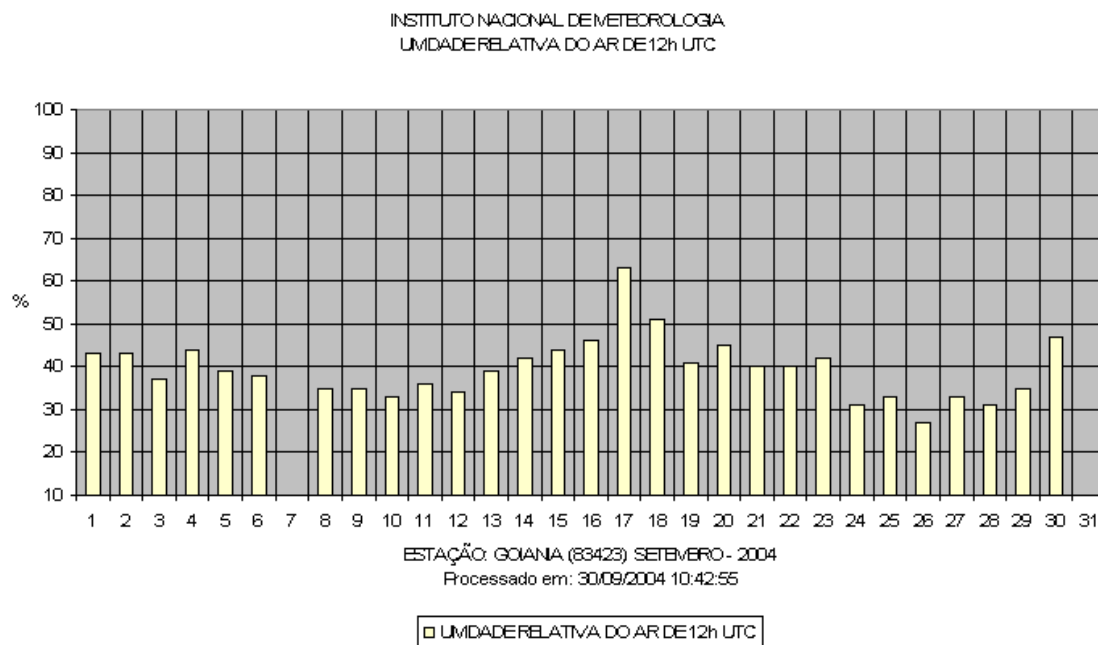


Figura 4.1 – Umidade relativa do ar durante o mês de setembro/2004 (INMET, 2004).

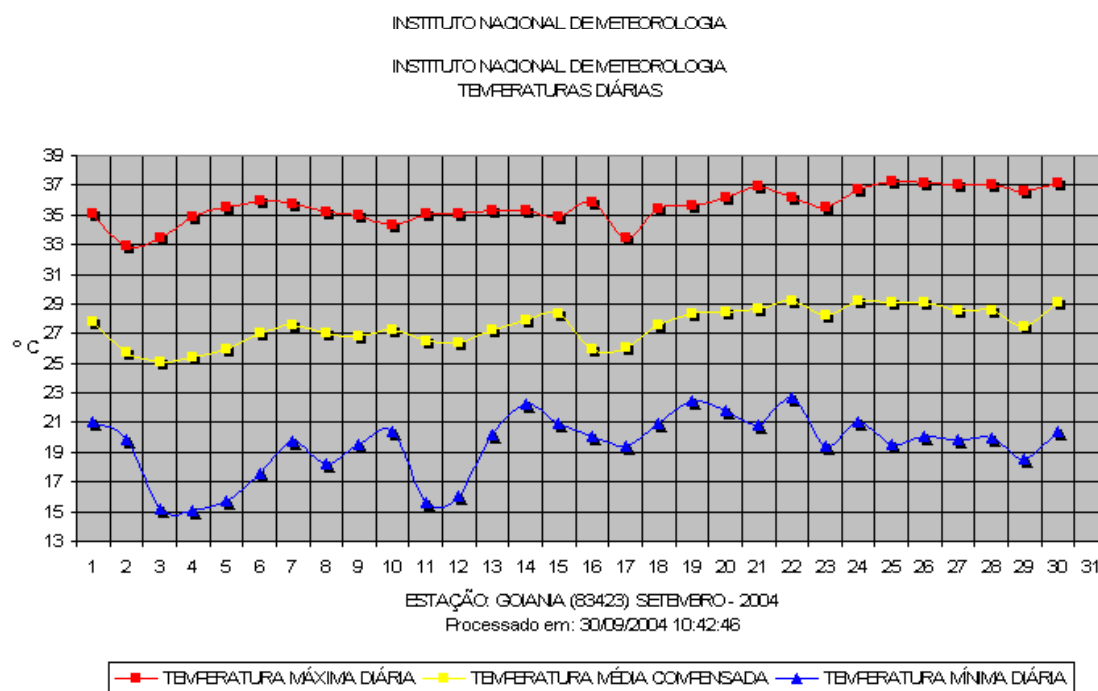


Figura 4.2 – Temperaturas mínimas, máximas e médias durante o mês de setembro/2004 (INMET, 2004).

Pode-se observar, através das Figuras 4.1 e 4.2, que durante o mês de setembro/2004 apenas durante 01 dia (dia 17) a umidade relativa do ar esteve acima de 50% (62%).

b) Resistência à compressão estimada aos 28 dias (f_{c28}): 60, 80 e 100 MPa;

Estes valores de resistência à compressão foram escolhidos por abrangerem uma significativa faixa de CAD utilizados em obras e também atender as especificações de vários autores (AİTCIN, 2000; METHA; AİTCIN, 1990).

c) Idade de ensaio

Foram adotadas para realização dos ensaios as idades de 1, 3, 7 e 28 dias por serem comumente utilizadas em análise de comportamento do concreto quanto às propriedades mecânicas. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 1, 3, 7 e 28 dias; e a resistência à tração e o módulo de deformação aos 7 e 28 dias.

A resistência à compressão com 01 dia de idade foi obtida apenas para os corpos de prova com cura ao ar (C_0) e para a cura em câmara úmida (CH_{28}). Isto foi determinado para auxiliar no entendimento do efeito da cura nas primeiras idades e com isso verificar a necessidade ou não de cura em CAD durante as primeiras horas de hidratação.

d) Tipos de cura

No Quadro 4.2 encontram-se as 14 diferentes curas divididas, de acordo com o tipo, em 05 grupos distintos:

Quadro 4.2 – Tipos e tempos de duração de cura.

<i>Grupo</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Duração da cura</i>
Grupo 1	Cura ao ar - REFERÊNCIA	C0	Até a data dos ensaios
Grupo 2	Cura úmida através de aspersão de água	CA1	1 dia
		CA3	3 dias
		CA7	7 dias
		CA14	14 dias
		CA28	28 dias
Grupo 3	Cura úmida em câmara úmida à 23°C e UR (umidade relativa) > 90%	CH1	1 dia
		CH3	3 dias
		CH7	7 dias
		CH14	14 dias
		CH28	28 dias
Grupo 4	Cura química à base de parafina	CQ1	Até a data dos ensaios
	com membrana à base de borracha clorada	CQ2	Até a data dos ensaios
Grupo 5	Cura mista com aspersão de água durante 7 dias e aplicação de membrana química à base de borracha clorada no 8º dia	CAQ	Até a data dos ensaios

A seguir encontram-se descritos detalhadamente todos os tipos de cura:

Grupo 1: C₀

C₀ – Os corpos de prova ficaram sem cura, foram deixados em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento, até a data do ensaio. Ambiente este considerado referência para este estudo (quente com ($t_{\text{média}} > 25^{\circ}\text{C}$ e seco com $h_{\text{médio}} < 50\%$).

Grupo 2: cura úmida através de aspersão de água: CA duração da cura (dias)

CA₁ – As superfícies dos corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram deixadas em ambiente externo permanentemente molhadas, através de aspersão de água utilizando-se mangueira, no período de 8h até às 17h durante o 1º dia. A partir do 2º dia os corpos de prova foram armazenados em uma tenda sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento, até data do ensaio.

CA₃ – As superfícies dos corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram deixadas em ambiente externo permanentemente molhadas, através de aspersão de água utilizando-se mangueira, no período de 8h até às 17h durante 3 dias. A partir do 4º dia os corpos de prova foram armazenados em uma tenda sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento, até data do ensaio.

CA₇ – As superfícies dos corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram deixadas em ambiente externo permanentemente molhadas, através de aspersão de

água utilizando-se mangueira, no período de 8h até às 17h durante 7 dias. A partir do 8º dia os corpos de prova foram armazenados em uma tenda sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento, até data do ensaio.

CA₁₄ – As superfícies dos corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram deixadas em ambiente externo permanentemente molhadas, através de aspersão de água utilizando-se mangueira, no período de 8h até às 17h durante 14 dias. A partir do 15º dia os corpos de prova foram armazenados em uma tenda sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento, até data do ensaio.

CA₂₈ – As superfícies dos corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram deixadas em ambiente externo permanentemente molhadas, através de aspersão de água utilizando-se mangueira, no período de 8h até às 17h até data do ensaio.

Grupo 3: cura úmida em câmara úmida: CH duração da cura (dias)

CH₁ – Os corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram colocados dentro da câmara úmida permanecendo lá durante 1 dia, no 2º dia foram colocados em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegido da chuva, porém sem proteção contra o vento, até a data do ensaio.

CH₃ - Os corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram colocados dentro da câmara úmida permanecendo lá durante 3 dias, no 4º dia foram colocados em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegido da chuva, porém sem proteção contra o vento, até a data do ensaio.

CH₇ - Os corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram colocados dentro da câmara úmida permanecendo lá durante 7 dias, no 8º dia foram colocados em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegido da chuva, porém sem proteção contra o vento, até a data do ensaio.

CH₁₄ - Os corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram colocados dentro da câmara úmida permanecendo lá durante 14 dias, no 15º dia foram colocados em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegido da chuva, porém sem proteção contra o vento, até a data do ensaio.

CH₂₈ - Os corpos de prova, após a desforma (12 horas após a moldagem), foram colocados dentro da câmara úmida permanecendo lá até a data do ensaio.

Grupo 4: cura química: CQ tipo de membrana (1: membrana à base de parafina; 2: membrana à base borracha clorada)

CQ₁ – A cura química foi aplicada no topo dos corpos de prova após o término da exsudação da água. Então, depois da desforma (12 horas após a moldagem), foi aplicada uma película uniforme com um agente de cura química à base de parafina. Estes corpos de prova permaneceram até a data do ensaio em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento.

CQ₂ – A cura química foi aplicada no topo dos corpos de prova após o término da exsudação da água. Então, depois da desforma (12 horas após a moldagem), foi aplicada uma película uniforme com um agente de cura química à base de borracha clorada. Estes corpos de prova permaneceram até a data do ensaio em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegidos da chuva, porém sem proteção contra o vento.

Grupo 5: cura mista: CAQ (cura úmida através de aspersão de água em conjunto com cura química com membrana à base de borracha clorada)

CAQ – Este é um processo misto de cura e é mencionado por AÏTCIN (2000). Consistiu em deixar a superfície do concreto sempre molhada durante 7 dias através de aspersão de água e no 8º dia foi aplicada uma película uniforme com um agente de cura à base de borracha clorada. Após a aplicação da membrana de cura os corpos de prova permaneceram em ambiente externo sem controle de umidade e temperatura, protegido da chuva, porém sem proteção contra o vento. Foi escolhida membrana química à base de borracha clorada por esta apresentar melhor aderência à superfície dos corpos de prova.

O tipo de cura C₀ foi escolhido por representar a situação sem cura na condição climática escolhida. Este foi considerado referência em relação aos outros procedimento de cura.

O tipo de cura CA (cura através de aspersão de água, utilizando-se de mangueira) foi escolhido, pois este é o procedimento adotado na maioria das obras, principalmente na cura de lajes.

O tipo de cura CH (cura em câmara úmida) foi escolhido por ser considerada em normas para o controle do concreto. O concreto permanece em ambiente com temperatura e umidade controlada não sofrendo nenhum tipo de intempérie, como por exemplo, mudanças de temperatura e umidade.

A bibliografia é controversa a respeito da cura química no CAD. Alguns afirmam ser como em concretos convencionais, existem outros que descartam a utilização da cura química no CAD (BARBOSA *et al.*, 1999; AİTCIN, 2000), já que este necessita do fornecimento de água para evitar a retração autógena. Foram escolhidas duas situações de cura química (CQ₁ e CQ₂) com o objetivo de confirmar o comportamento, para as condições desta pesquisa.

Foram escolhidos dois diferentes tipos de película impermeabilizante: uma a base de parafina e a outra a base de borracha clorada. A de parafina foi escolhida por ser largamente utilizada em obras e por ter um menor preço. A de borracha clorada foi escolhida por ser preconizada no mercado, como a MBT, produto com desempenho acima dos demais que há no mercado em relação à cura química, porém com um preço muito elevado, quando comparado ao de parafina.

O tipo CAQ (aspersão de água durante 7 dias e no 8º dia selagem da peça com membrana química à base de borracha clorada) foi escolhido por ser mencionado por AİTCIN (2000), uma alternativa de cura para CAD.

Quanto à escolha do tempo de cura, as diversas idades escolhidas são justificadas conforme segue: segundo o CEB183 (1989), para concretos de baixa sensibilidade à cura, ou seja, para o caso de CAD, em condições normais de agressividade ambiental durante a vida útil da obra e para clima seco, quente e com vento durante o período de cura (situação esta preponderante durante o programa experimental desta pesquisa), prescreve que seja feita cura de 1 dia a 3 dias. Portanto optou-se pela idade de 1 dia.

O tempo de duração de cura de 3 dias foi escolhido por ser prescrito pelo CEB183 (1989), conforme citado anteriormente, e por ser este tempo comumente utilizado em algumas obras na cidade de Goiânia, de acordo com uma pesquisa realizada por Couto (2003) em 11 obras de 11 construtoras locais.

O período de 7 dias de cura úmida foi definido por ser suficientemente longo para reduzir drasticamente a retração autógena que, no CAD, se desenvolve mais que as demais retrações (plástica e hidráulica). Com a cura úmida, os poros capilares maiores drenam água da fonte externa impedindo a geração das tensões de tração e, conseqüentemente, da retração autógena (AİTCIN, 2000). Este tempo de duração de cura é prescrito pela norma NBR 6118 (ABNT, 2003).

Segundo o CEB183 (1989), para concretos de baixa sensibilidade à cura, ou seja, para o caso de CAD, em condições de elevada agressividade ambiental durante a vida útil

da obra e para clima seco, quente e com vento durante o período de cura (situação esta preponderante durante o programa experimental desta pesquisa), prescreve que seja feita cura de 10 dias a 14 dias. Portanto optou-se por realizar cura durante um período de 14 dias.

E 28 dias foi escolhido por ser recomendado pela norma brasileira para concreto convencional, a NBR 5738 (ABNT, 2003).

e) Abatimento

A bibliografia traz valores elevados de abatimento (120 a 250 mm) indicados para o CAD (AİTCIN, 2000; TORALLES CARBONARI, 1996).

Foi escolhido o abatimento 150 ± 20 mm, por ser esta trabalhabilidade usual para concreto bombeado. Pinto; Geyer (2003) verificaram boas condições de aplicação de concretos com este abatimento.

4.2.2. Variáveis dependentes

a) Resistência à compressão obtida

A resistência à compressão dos concretos é ditada por uma série de fatores. Os principais, segundo NEVILLE (1997), METHA; MONTEIRO (1994), entre outros, são: natureza e dosagem do ligante, granulometria, máxima dimensão, forma, textura superficial, resistência e rigidez dos agregados, relação água/cimento, porosidade, relação cimento/inertes, grau de compactação, condições de cura e condições do ensaio. Segundo Dal Molin (1995) o tipo e o período de cura realizada são fatores determinantes da resistência à compressão de concretos com ou sem adições de sílica ativa.

A resistência à compressão é normalmente considerada como a propriedade mais importante do concreto, pois ela está diretamente relacionada com a estrutura interna do material, fornecendo uma estimativa do desempenho do concreto tanto em termos mecânicos como, indiretamente, de sua durabilidade (DAL MOLIN, 1995; BUCCIN, 1998; AİTCIN, 2000).

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 5739 – Concreto: ensaios de compressão de corpos de prova (CPs) cilíndricos (ABNT, 1994a), em CPs cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm.

b) Resistência à tração na flexão

Dal Molin (1995) afirma que alguns dos fatores que mais afetam a resistência à tração por compressão diametral do CAD são: teor de sílica ativa, cura, idade e relação água/aglomerante. Como praticamente se tratam dos mesmos fatores intervenientes na resistência à compressão, optou-se por realizar apenas o ensaio de resistência à tração na flexão.

A resistência à tração na flexão do CAD é afetada pelos mesmos fatores já citados na resistência à tração por compressão diametral, porém na tração na flexão a influência da cura é mais significativa do que na resistência à tração por compressão diametral do CAD (DAL MOLIN, 1995; AİTCIN, 2000).

A resistência à tração flexão ou módulo de ruptura é geralmente tomada com sendo um dos indicadores mais confiáveis da resistência do concreto à tração (BUCCIN, 1998).

Para a determinação da resistência à tração na flexão foi realizado o ensaio segundo a norma NBR 12142 – Concreto - Determinação de resistência à tração na flexão em corpos de prova (CPs) prismáticos (ABNT, 1994b), em CPs prismáticos de dimensões 15 x 15 x 60 cm.

c) Módulo de deformação

O módulo de deformação do concreto é também afetado, a princípio, pelos mesmos fatores já citados na análise da resistência à compressão. Mas as características dos agregados graúdos no módulo de deformação exercem particular influência no CAD. Há vários estudos que demonstram que diferentes concretos podem apresentar o mesmo valor de resistência à compressão, preparados com diferentes litologias, no entanto, apresentando diferentes valores de módulo de deformação (ACITO; GUERRIN, 1999; CETIN; CARRASQUILLO, 1998; GUTIERREZ; CANOVAS, 1995).

O conhecimento do módulo de deformação de um concreto é muito importante do ponto de vista do projeto, quando se devem calcular as deformações dos diferentes elementos que compõem a estrutura (DAL MOLIN, 1995), bem como quando se avalia a estabilidade global da edificação.

Para a determinação do módulo de deformação foi realizado o ensaio segundo a norma NBR 8522 – Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação (ABNT, 2003), em CPs cilíndricos de dimensões 15 x 30 cm.

4.3. MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item é descrita toda a seleção, seguida de caracterização completa dos materiais utilizados no programa experimental para a produção e cura do CAD.

4.3.1. Cimento

Foi utilizado cimento Portland CP II-F-32 por ser de uso corrente no mercado regional, sendo assim, o mais acessível para o desenvolvimento da pesquisa.

Na Tabela 4.1 encontra-se a caracterização química, física e mecânica do cimento utilizado.

Tabela 4.1 – Caracterização química e física do cimento.

<i>Propriedades determinadas</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites (NBR 11578/91)</i>
Análise física			
Massa específica (g/cm ³)		3,08	-
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	1,7	<= 12
	Resíduo na peneira 325 (%)	7,6	-
	Área específica (cm ² /g)	4120	>= 2600
Tempo de pega (h:min)	Início	2:20	>= 1:00
	Fim	3:00	<= 10:00
Água de consistência – Pasta (%)		26,8	-
Expansão em autoclave (%)		0,0	<= 0,8
Resistência à	3 dias	24,2	>= 10
Compressão (MPa)	7 dias	27,4	>= 20
	28 dias	34,5	>= 32 e <= 49
Análise química			
Perda ao fogo		5,15	<= 6,5
Resíduo insolúvel		1,5	<= 2,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		2,54	<= 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		1,13	<= 6,5
Dióxido de silício (SiO ₂)		20,04	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,42	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,19	-
Óxido de cálcio (CaO)		62,54	-
Óxido de cálcio livre (CaO)		2,3	-
Alcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,58	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,63	-
	Equivalente alcalino	1,00	-
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		4,32	-

A Tabela 4.2 apresenta, também, composições químicas de outros cimentos utilizados na produção de CAD.

Tabela 4.2 – Composições de cimentos utilizados na produção de CAD.

<i>Propriedades determinadas</i>		<i>Cimento selecionado</i>	<i>PINTO (2003)</i>	<i>DAL MOLIN (1995)</i>
		<i>CP II-F- 32</i>	<i>CP II-F- 32</i>	<i>CP V-ARI</i>
Massa específica (g/cm ³)		3,08	3,07	3,11
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	1,7	1,7	-
	Resíduo na peneira 325 (%)	7,6	12,1	-
	Área específica (cm ² /g)	4120	3860	4410
Tempo de pega (h:min)	Início	2:20	2:00	2:45
	Fim	3:00	3:00	-
Água de consistência – Pasta (%)		26,8	27	-
Expansão em autoclave (%)		0,0	-	-
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	24,2	21,2	23,3
	7 dias	27,4	29,5	38,6
	28 dias	34,5	35,8	44,0
Perda ao fogo		5,15	6,57	2,46
Resíduo insolúvel		1,5	1,76	0,56
Trióxido de enxofre (SO ₃)		2,54	3,06	3,11
Óxido de magnésio (MgO)		1,13	0,72	1,38
Dióxido de silício (SiO ₂)		20,04	18,74	19,67
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,42	3,25	2,62
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,19	5,07	5,01
Óxido de cálcio (CaO)		62,54	60,72	64,02
Óxido de cálcio livre (CaO)		2,3	1,7	1,48
Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,58	0,32	0,03
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,63	0,51	0,84
	Equivalente alcalino	1,00	0,65	-
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		4,32	5,2	-

Pode-se notar que o cimento selecionado para o programa experimental atende aos requisitos da norma NBR 11578 – Cimento Portland Composto (ABNT, 1991) e apresenta semelhante constituição de outros cimentos, até mesmo de tipos diferentes, utilizados com sucesso na produção de CAD.

4.3.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente da região de Itapuranga-GO, largamente empregado nas obras em Goiânia-GO. O parâmetro para a escolha do agregado miúdo foi o módulo de finura e a limpeza.

Na Tabela 4.3 apresenta a caracterização do agregado miúdo.

Tabela 4.3 – Caracterização física do agregado miúdo.

<i>Ensaio realizado</i>	<i>Método</i>	<i>Resultado</i>
Módulo de finura (MF)	NBR 7217/87	2,48
Diâmetro máximo característico (DMC)	NBR 7217/87	4,8
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9776/87	2,66
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR 7251/82	1,43
Absorção (%)	NBR NM 30/98	0,70
Teor de materiais pulverulentos (%)	NBR 7219/87	1,35
Teor de torrões de argila (%)	NBR 7218/87	0,01

Nota-se que a areia selecionada apresenta módulo muito próximo (2,48) do indicado como mínimo por Aïtcin (2000) e Metha; Aïtcin (1990) (2,50). Por se tratar de uma areia largamente utilizada na produção de concreto na região optou-se pela utilização. Também pode-se observar, que a areia selecionada apresenta ausência de material pulverulento e torrões e argila.

A Tabela 4.4 mostra a composição granulométrica da areia.

Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211/1983).

<i>Peneiras (mm)</i>	<i>% retida acumulada</i>
9,5	2
6,3	2
4,8	3
2,4	6
1,2	16
0,6	47
0,3	80
0,15	94
Fundo	100

4.3.3. Agregado graúdo

De acordo com a revisão bibliográfica, a dimensão máxima característica (DMC) apropriada do agregado graúdo para o CAD é entre 10 e 15 mm, daí a utilização de britas de DMC inferiores (brita 0).

Em um estudo realizado por Pinto (2003) foram testados, para produção de CAD, agregados graúdos disponíveis na região de Goiânia: granulito (brita 0 e brita 1) e calcário (brita 0). Através da produção de CAD com estes agregados e ensaio de abrasão Los Angeles observou-se que o concreto produzido com granulito (brita 0) resultou em maior resistência à compressão e menor desgaste.

Com base no estudo de Pinto (2003) também para esta pesquisa optou-se por usar este granulito (brita 0) proveniente da cidade de Caturai – Goiás.

A Tabela 4.5 apresenta a caracterização física do agregado graúdo.

Tabela 4.5 – Caracterização física do agregado graúdo granulito – Brita 0.

<i>Ensaio realizado</i>	<i>Método</i>	<i>Resultado</i>
Módulo de finura (MF)	NBR 7217/87	5,58
Diâmetro máximo característico (DMC)	NBR 7217/87	9,5
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9776/87	2,60
Absorção (%)	NBR NM 30/98	1,10
Teor de materiais pulverulentos (%)	NBR 7219/87	0,81

A Tabela 4.6 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado graúdo granulito – Brita 0 (NBR 7217/87).

<i>Peneiras (mm)</i>	<i>% retida acumulada</i>
12,5	0
9,5	5
4,8	71
2,4	092
1,2	596
0,6	7197
0,3	9298
0,15	9699
Fundo	100

4.3.4. Adição mineral

Como adição mineral, foi utilizada a sílica ativa. Esta foi selecionada, por ser a adição mineral disponível comercialmente na região de Goiânia dentre as usualmente empregadas na produção de CAD.

Nas Tabela 4.7 encontra-se a caracterização da sílica ativa utilizada.

Tabela 4.7 – Caracterização da sílica ativa

<i>PROPRIEDADES DETERMINADAS</i>		<i>VALORES ENCONTRADOS</i>	<i>LIMITES NBR 13956/1997</i>
Massa específica (g/cm ³)		2,2	-
Perda ao fogo		3,08	<= 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		0,31	<= 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		0,86	<= 6,5
Dióxido de silício (SiO ₂)		92,30	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		0,08	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		0,00	-
Óxido de cálcio (CaO)		0,57	-
Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,17	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,68	-
	Equivalente alcalino	0,62	-
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,53	-
Teor de umidade		1,17	-

A Tabela 4.8 apresenta, também, composições químicas de outras sílicas provenientes da produção de sílcio-metálico e ferro-silício (75%), e intervalos típicos resultante de um estudo de várias sílicas.

Tabela 4.8 – Composições químicas de sílicas de diferentes fontes de produção (PINTO, 2003).

<i>Composição química</i>	<i>Sílica ativa selecionada</i>	<i>PINTO (2003)</i>	<i>MALHOTRA; METHA apud PINTO (2003)</i>		<i>HJORTH apud DAL MOLIN (1995)</i>	
			<i>Silício- metálico</i>	<i>Ferro- silício</i>	<i>Silício- metálico</i>	<i>Ferro- silício</i>
Perda ao fogo	3,08	4,12	2,5	2,7	0,8 – 1,5	2 – 4
SO ₃	0,31	0,52	-	-	-	-
MgO	0,86	0,75	1,1	0,2	0,3 – 0,9	1 – 3,5
SiO ₂	92,30	91,05	94	90	94 – 98	86 – 90
Fe ₂ O ₃	0,08	0,3	0,03	2,9	0,02 – 0,15	0,3 – 1
Al ₂ O ₃	0,00	0,17	0,06	1	0,1 – 0,4	0,2 – 0,6
CaO	0,57	0,77	0,5	0,1	0,08 – 0,3	0,2 – 0,6
C	-	-	-	-	0,2 – 1,3	0,08 – 2,3
Na ₂ O	0,17	0,21	-	2,2	0,1 – 0,4	0,8 – 1,8
K ₂ O	0,68	0,27	0,1	-	0,2 – 0,7	1,5 – 3,5
S	-	-	-	-	0,1 – 0,3	0,2 – 0,4

Pode-se notar que a sílica ativa selecionada para o programa experimental atende aos requisitos da norma NBR 13956 – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação (ABNT, 1997) e apresenta semelhante constituição das outras sílicas, outrora utilizadas em CAD.

4.3.5. Aditivo

Para a produção de CAD foi utilizado um aditivo de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado. Na Tabela 4.9 encontram-se as características deste aditivo.

Tabela 4.9 – Caracterização do aditivo (MBT, 2003).

<i>Propriedade</i>	<i>Valores</i>
pH	5 a 7
Viscosidade (cps)	95 a 160
Densidade (g/cm ³)*	1,09
Sólidos (%)*	39,11

* Ensaio realizado em Fornos.

A melhor ação de dispersão do cimento deste aditivo, em relação aos superplastificantes tradicionais (à base de melamina sulfonada ou de naftaleno sulfonado), pôde ser comprovada em ensaios preliminares à sua aplicação no procedimento experimental (PINTO; GEYER, 2003). Por esta maior eficiência, este superplastificante foi selecionado.

4.3.6. Membranas para curas químicas

Para a se fazer a cura do CAD foram utilizadas dois diferentes tipos de membranas químicas.

Na Tabela 4.10 encontra-se a caracterização dos dois tipos de membrana utilizados.

Tabela 4.10 – Caracterização das membranas químicas para cura do CAD (MBT, 2003).

<i>Propriedade</i>	<i>Membrana 1</i>	<i>Membrana 2</i>
Base química	Emulsão parafínica em água	Borracha clorada em solvente
Densidade (g/m ³)	0,98 a 1,02	0,93 a 0,97
Sólidos (%)	-	23 a 26
Viscosidade (cps)	-	5 a 12
Resíduo seco (%)	9,5 a 10,5	-
pH	8 a 10	-

A membrana deve ser contínua e não deve ser danificada. A pulverização para cura deve ser aplicada depois que tenha cessado a ascensão de água à superfície do concreto por exsudação, mas antes que a superfície seque: o momento ideal é aquele em que desaparece a água livre na superfície do concreto de modo que não se veja mais o brilho dessa água. Alguns concretos, por exemplo, aqueles que contém sílica ativa, não apresentam exsudação, caso em que a membrana de cura deve ser aplicada sem demora. Se o composto

de cura for aplicado sobre uma superfície já seca, o produto penetra no concreto e impede a hidratação na região externa. Além disso, se forma uma membrana de cura não eficiente (NEVILLE, 1997).

4.4. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Para o concreto fresco foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone: NBR 7223 (ABNT, 1982);
- Determinação do Teor de Ar pelo Método Pressométrico: NBR 11686 (ABNT, 1990);
- Determinação da Massa Específica pelo Método Gravimétrico: NBR 9833 (ABNT, 1987).

Para o concreto endurecido foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos: NBR 5739 (ABNT, 1994a);
- Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos de Prova Prismáticos: NBR 12142 (ABNT, 1994b);
- Determinação do Módulo de Deformação Estática: NBR 8522 (ABNT, 2003).

4.5. PRODUÇÃO DA AMOSTRA EXPERIMENTAL

Foram moldados, para a realização dos ensaios experimentais, corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm e 15x30 cm e também corpos de prova prismáticos nas dimensões 15x15x60 cm.

Os corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm foram moldados para o ensaio de resistência à compressão. Já os corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm foram moldados para os ensaio de determinação do módulo de deformação. Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados para o ensaio de resistência à tração na flexão.

No Quadro 4.3 encontra-se exposto o procedimento experimental.

RESISTÊNCIA ESTIMADA (MPa)					
		60	80	100	
↓					
ENSAIOS	TIPO DE CURA	IDADE DOS ENSAIOS MECÂNICOS			
		01 dia	03 dias	07 dias	28 dias
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (10 x 20) cm	C ₀	03	03	03	03
	CA ₁	-	-	-	03
	CA ₃	-	-	-	03
	CA ₇	-	03	03	03
	CA ₁₄	-	-	-	03
	CA ₂₈	-	-	-	03
	CH ₁	-	-	-	03
	CH ₃	-	-	-	03
	CH ₇	-	-	-	03
	CH ₁₄	-	-	-	03
	CH ₂₈	03	03	03	03
	CQ ₁	-	03	03	03
	CQ ₂	-	03	03	03
	CAQ	-	-	-	03
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (15 x 30) cm	C ₀	-	-	03	03
	CA ₇	-	-	03	03
	CH ₂₈	-	-	03	03
	CQ ₁	-	-	03	03
	CQ ₂	-	-	03	03
	CAQ	-	-	-	03
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (15 x 15 x 60) cm	C ₀	-	-	02	02
	CA ₇	-	-	02	02
	CH ₂₈	-	-	02	02
	CQ ₁	-	-	02	02
	CQ ₂	-	-	02	02
	CAQ	-	-	-	02
QUANTIDADE DE CPs POR DOSAGEM					
CPs Cilíndricos (10x20)cm		06	15	15	42
CPs Cilíndricos (15x30)cm		-	-	15	18
CPs Prismáticos (15x15x60)cm		-	-	10	12
QUANTIDADE TOTAL DE CPs					
CPs Cilíndricos (10x20)cm			234		
CPs Cilíndricos (15x30)cm			99		
CPs Prismáticos (15x15x60) cm			66		

Quadro 4.3 – Programa experimental.

No Quadro 4.3 pode-se observar que os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de deformação foram realizados aos 7 e 28 dias, idades comumente utilizadas para estes tipos de ensaios, exceto para o tipo de cura CAQ (cura mista com aspersão de água durante 7 dias e no 8º dia selagem da peça com membrana química à base de borracha clorada) que foi apenas realizado aos 28 dias. Isto aconteceu porque se os ensaios de desempenho mecânico

fossem realizados aos 7 dias seria apenas verificada a cura por aspersão de água e não a cura mista, como foi proposto.

O ensaio de resistência à compressão na idade de 1 dia foi realizado somente para os tipos CH₂₈ e C₀ com o intuito de se verificar a necessidade ou não de fornecimento de água durante as primeiras horas de hidratação do cimento. Não optou-se pela cura através de aspersão de água pois, se aspergíssemos água no concreto nas primeiras horas poderia ocorrer uma lavagem da pasta de cimento causando prejuízos ao material.

O ensaio de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias foram realizados apenas para os tipos de cura prescritos por norma: CA₇ (NBR 14931/2004) e CH₂₈ (NBR 5738/2004), para os dois tipos de cura química (CQ₁ e CQ₂) e para o concreto com cura o ar (C₀). Isto foi necessário por causa da limitação do tempo para a pesquisa.

4.6. DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto utilizado foi dosado, preparado e moldado no Laboratório de Furnas, utilizando o método de dosagem elaborado por este laboratório. Este método se fundamenta no desenvolvimento experimental de diversas combinações entre agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto.

Durante o desenvolvimento da dosagem, as misturas preliminares resultam em gráficos que relacionam módulo de finura com consumo de água ou resistência à compressão ou consumo de cimento. Por fim, fazem-se alguns ajustes do teor de agregado miúdo. Por meio destes gráficos obtém-se o traço desejado. Este método é empregado usualmente por Furnas no desenvolvimento de concretos massa e convencional (BITTENCOURT *et al.*, 2001). Para que este método também passasse a ser utilizado em CAD, Pinto (2003) fez adaptações também observadas no desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente foi feito um amplo estudo de dosagem para se determinar o traço final para a produção de CAD através das resistências estimadas.

Para a produção de CAD fixou-se o teor de sílica ativa em volume de 8% de substituição em volume de cimento e o teor de aditivo superplastificante de última geração em 1,1%.

Metha; Aïtcin (1990) indicam 10% em volume, já Aïtcin (2000) não determina o teor da adição. Neste trabalho, nos estudos de dosagem, observou-se bons resultados com 8% em volume, inclusive com razoáveis consumos de cimento e superplastificante.

As Fotos 4.1 e 4.2 ilustram a pesagem e colocação dos materiais na betoneira.



Foto 4.1 – Pesagem dos materiais.



Foto 4.2 – Colocação dos materiais na betoneira.

A Tabela 4.11 apresenta os traços de cada mistura de concreto.

Tabela 4.11 – Composição dos concretos por m³.

<i>Resistência estimada (MPa)</i>	<i>Cimento (kg)</i>	<i>Sílica (kg)</i>	<i>Brita (kg)</i>	<i>Areia (kg)</i>	<i>Aditivo (kg)</i>	<i>Água (kg)</i>	<i>Relação a/agl</i>
60	380	24	962	771	4,543	161	0,389
80	532	33	1006	657	6,358	154	0,267
100	689	43	1011	509	8,239	144	0,213

Um dos parâmetros mais importantes para a escolha do traço de um concreto é o consumo de aglomerantes que, nesta pesquisa, é constituído de cimento e sílica. De acordo com as Tabela 4.11, o consumo de cimento variou de 380 kg/m³ para o traço mais pobre a 689 kg/m³ para o traço mais rico, e o consumo de aglomerantes variou de 404 a 732 kg/m³.

Sabe-se que o alto consumo de cimento pode gerar vários problemas técnicos no concreto. Uma vez que sua reação de hidratação é um processo exotérmico, elevados teores de cimento equivalem à alta liberação de calor que pode, muitas vezes, causar a retração do concreto e, conseqüentemente, gerar fissuras que comprometem a vida útil do concreto.

Todas as composições produzidas nesta pesquisa representam consumos usuais na produção do CAD, ou seja, considerados comuns para os níveis de resistência obtidos. A Tabela 4.12 ilustra alguns teores de aglomerantes referentes a estudos sobre métodos de dosagem e obras executadas com CAD.

Tabela 4.12 - Consumos usuais de aglomerantes em CAD.

<i>Origem</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	<i>a/agl</i>	<i>Aglomerante (kg)</i>			
			<i>Cimento</i>	<i>Sílica</i>	<i>Escória</i>	<i>Total</i>
Método Metha/Aïtcin	62	0,37	421	42	-	463
	71	0,31	462	46	-	508
	77	0,26	503	50	-	553
	84	0,23	530	53	-	583
	79	0,19	571	57	-	628
Método Aïtcin	75	0,25	491	49	-	540
	79	0,23	534	53	-	587
Método ACI	50	0,30	531	-	-	531
Método USP	50	0,35	575	-	-	575
Scotia Plaza	85	0,30	315	36	135	486
Pont de Normandie	60	0,36	425	-	-	425
Método Metha/Aïtcin	81,9	0,36	442	35	-	477
	104,6	0,28	497	40	-	537
	89,9	0,33	408	45	-	453
	111,4	0,30	450	50	-	500
	68,4	0,43	368	41	-	409
Método Furnas	86,9	0,35	404	45	-	449
	101,4	0,28	506	56	-	562

Pode-se notar, através da Tabela 4.12, que os consumos obtidos nesta pesquisa foram razoáveis, exceto para a resistência estimada de 100 MPa onde foi observado um maior consumo de cimento. Isto também foi observado por PINTO (2003) que utilizou também o método de dosagem de Furnas para produção de CAD e notou que este método apresentou baixo consumo de aglomerantes (cimento+sílica) para concretos no intervalo de 60 a 85MPa.

4.7. ENSAIOS NO CONCRETO FRESCO

Após a mistura dos materiais na betoneira foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR 7223 (ABNT, 1982), para se verificar a consistência do mesmo. A Foto 4.3 ilustra este ensaio.



Foto 4.3 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Antes de se fazer o traço definitivo foi feito o ajuste necessário para que o concreto atingisse o abatimento necessário.

Depois da verificação da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone foram feitos os ensaios de massa específica conforme NBR 9833 (ABNT, 1987) (Foto 4.4) e o teor de ar incorporado do concreto de acordo com a NBR 11686 (ABNT, 1990) (Foto 4.5).



Foto 4.4 – Ensaio para determinação da massa específica do concreto.



Foto 4.5 – Ensaio para determinação do teor de ar incorporado.

4.8. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após os ensaios do concreto fresco foram moldados para cada dosagem 78 corpos de prova cilíndricos nas dimensões 10x20 cm, 33 corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm e 22 corpos de prova prismáticos. Adotou-se o processo de adensamento mecânico, conforme NBR 5738 (ABNT, 2003), foi realizado em camada única compactada com vibrador para corpos de prova cilíndricos 10x20 cm e corpos de prova prismáticos e em 02 camadas para os corpos de prova de 15x30 cm. A Foto 4.6 mostra as formas preparadas para a moldagem.



Foto 4.6 – Formas preparadas para a moldagem.

4.9. DESFORMA DOS CORPOS DE PROVA

Costuma-se adotar 24 horas após a moldagem para a desforma do concreto convencional. Como o concreto de alto desempenho possui uma quantidade maior de cimento teoricamente este tempo poderia ser reduzido. Para se saber qual o menor tempo para a desforma do CAD, durante o estudo de dosagem foram moldados alguns corpos de prova para serem desformados às 5, 8 e 12 horas após a moldagem dos mesmos, ilustrados nas Fotos 4.7, 4.8 e 4.9.



Foto 4.7 – Desforma do corpo de prova 5 horas após a moldagem.



Foto 4.8 – Desforma do corpo de prova 8 horas após a moldagem.



Foto 4.9 – Desforma do corpo de prova 12 horas após a moldagem.

A desforma 5 horas após foi descartada, pois o concreto não apresentavam dureza superficial suficiente para ser manuseado. A desforma 8 horas também foi descartada, pois a o concreto ainda estava frágil podendo ocorrer quebra dos corpos de prova durante a desforma. A desforma dos corpos de prova 12 horas após a moldagem foi ideal. O tempo ideal após a moldagem para a desforma dos corpos de prova foi determinado analisando-se visualmente os corpos de prova.

4.10. APLICAÇÃO DA CURA E ARMAZENAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A membrana química foi aplicada no topo de todos corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) destinados à cura química logo após o acabamento. E então, 12 horas após a moldagem a membrana foi aplicada em todo o corpo de prova. A aplicação deste produto foi através de um pulverizador para que fosse garantida uma película uniforme por toda a superfície do corpo de prova.

A utilização destes tipos de produto é uma alternativa para evitar os efeitos da evaporação rápida da umidade superficial impedindo a diminuição das resistências, da formação de trincas, fissuras, etc. (MBT, 2003).

Pode-se notar a diferença, por exemplo, o topo e superfície dos corpos de prova cilíndricos após a secagem da membrana química de cura nas Fotos 4.10 e 4.11, respectivamente.

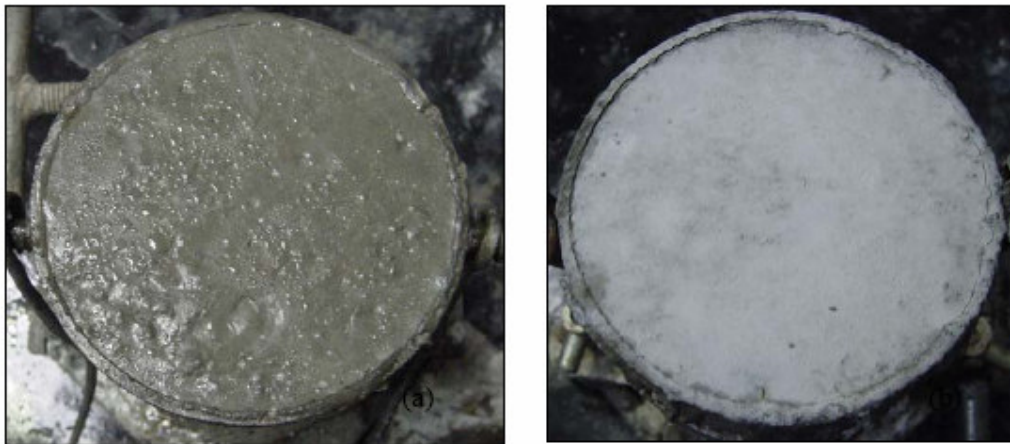


Foto 4.10 - Corpo-de-prova exsudando água, antes da aplicação do produto de cura química (a) e o mesmo corpo-de-prova após a aplicação do produto de cura química (b) (COUTO, 2003)



Foto 4.11 - Superfície dos corpos de prova após a aplicação da membrana química de cura e do corpo de prova de referência.

Os corpos de prova sem cura e com cura química ficaram armazenados em uma tenda que protegia os corpos de prova da chuva, mas não do vento. Nesta tenda não havia controle algum de umidade e temperatura. A Foto 4.12 ilustra o local de armazenagem desses corpos de prova e a Foto 4.13 ilustra o interior desta.



Foto 4.12 – Vista da parte externa da tenda para armazenagem dos corpos de prova.



Foto 4.13 – Vista da parte interna da tenda para armazenagem dos corpos de prova.

Como pode-se notar na Foto 4.15, os corpos de prova foram armazenados sobre estrados para que não houvesse interferência da umidade do solo.

Os corpos de prova destinados para a cura com aspersão de água ficaram armazenados ao ar livre, sobre estrados para evitar qualquer contato com o piso.



Foto 4.14 – Local de armazenagem dos corpos de prova destinados ao processo de cura por molhagem.

Os corpos de prova curados em câmara úmida ficaram armazenados na mesma até a data de ensaio. A câmara úmida possui umidade superior a 90% e temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.11. ENSAIOS DO CONCRETO ENDURECIDO

Antes da realização dos ensaios mecânicos o topo e a base dos corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão e módulo de deformação foram polidos, garantindo, assim, que ambas as faces estejam paralelas entre si e perpendiculares ao eixo dos mesmos.

Na Foto 4.15 encontra-se ilustrado o ensaio de determinação de resistência à compressão, prescrito pela norma NBR 5739 (ABNT, 1994).



Foto 4.15 – Ensaio para determinação da resistência à compressão.

A Foto 4.16 mostra o ensaio de determinação de resistência à tração na flexão de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 1994b).

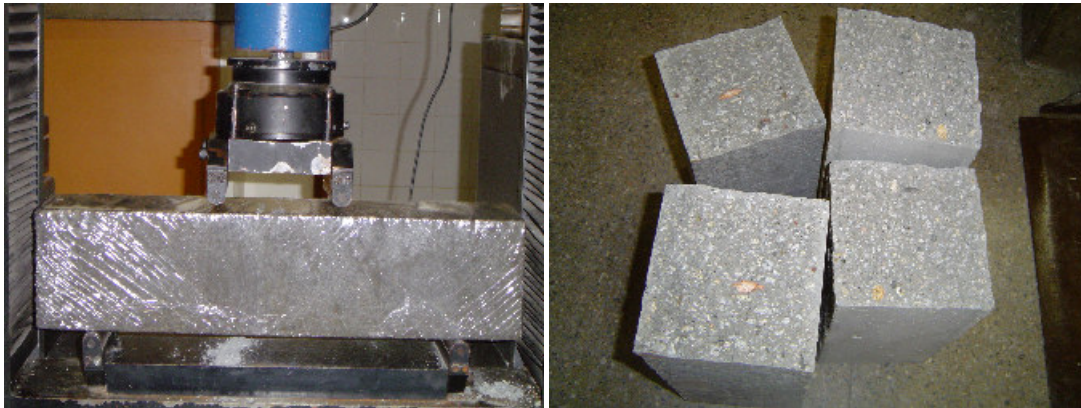


Foto 4.16 – Ensaio para determinação da resistência à tração na flexão e corpo de prova ensaiado.

Na Foto 4.17 pode-se observar o ensaio de módulo de deformação. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 8522 (ABNT, 1984), com a utilização de extensômetros do tipo LVDT. Após a determinação do módulo de deformação foram retirados os extensômetros elétricos, e então estes foram levados à ruptura.

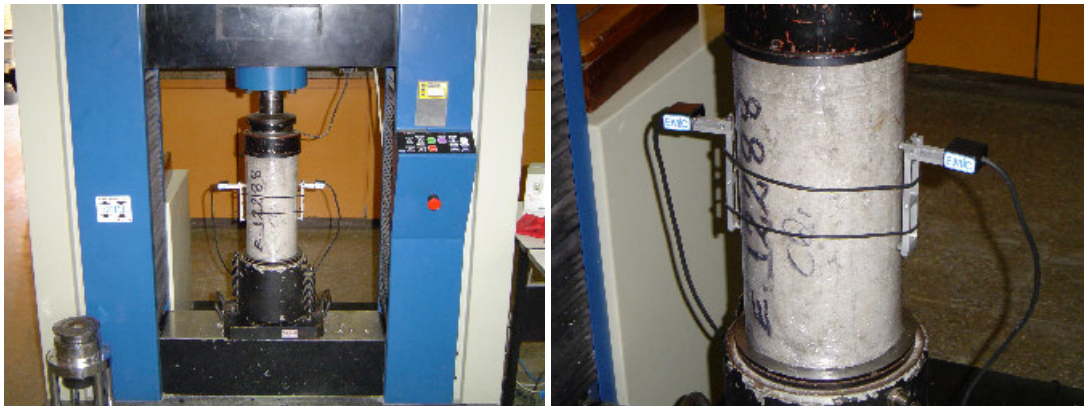


Foto 4.17 – Ensaio para determinação do módulo de deformação.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se os resultados e as discussões.

5.1. CONCRETO FRESCO

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios do concreto fresco: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR 7223 (ABNT, 1982), Determinação do teor de ar incorporado pelo método pressométrico – NBR 11686 (ABNT, 1990) e Determinação da massa específica pelo método gravimétrico – NBR 9833 (ABNT, 1987).

Tabela 5.1 – Ensaio do concreto fresco

<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Abatimento (cm)</i>	<i>Ar incorporado (%)</i>	<i>Massa específica (kg/l)</i>
60	13	2,4	2,29
80	17	2,0	2,39
100	14	2,0	2,43

Em relação ao teor de ar incorporado, nota-se que todos os concretos apresentaram valores próximos a 2, isto é, dentro do intervalo, de 1 a 3%, considerado usual para CAD (AİTCIN, 2000), uma vez que sua mistura é mais viscosa que a do concreto convencional. Considerando a massa específica dos concretos produzidos, percebe-se que os valores se apresentam de acordo com a literatura (de acordo com Aİtcin (2000) freqüentemente próxima de 2500kg/m³), aumentando proporcionalmente à quantidade de aglomerantes, ou seja, à resistência estimada.

O abatimento foi mantido dentro do intervalo proposto (15 ± 2cm).

5.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão simples aos 01, 03, 07 e 28 dias, para os três corpos de prova ensaiados para cada idade e para cada tipo e tempo de duração de cura podem ser observados no Anexo A. Os valores que constam na Tabela 5.2 foram obtidos através da média aritmética destes.

Na Tabela 5.2 pode-se verificar os valores de resistência à compressão aos 01, 03, 07, e 28 dias para cada tipo de cura.

Tabela 5.2 – Resistência à compressão aos 01, 03, 07 e 28 dias para os diferentes tipos e tempos de duração de cura.

<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à compressão obtida para cada tipo de cura</i>													
		<i>C₀</i>	<i>CH₁</i>	<i>CH₃</i>	<i>CH₇</i>	<i>CH₁₄</i>	<i>CH₂₈</i>	<i>CA₁</i>	<i>CA₃</i>	<i>CA₇</i>	<i>CA₁₄</i>	<i>CA₂₈</i>	<i>CQ₁</i>	<i>CQ₂</i>	<i>CAQ</i>
60	01	23,9	-	-	-	-	27,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	03	41,6	-	-	-	-	43,4	-	-	45,9	-	-	43,1	43,5	-
	07	48,4	-	-	-	-	49,1	-	-	47,8	-	-	47,0	50,1	-
	28	58,2	59,4	64,0	65,1	64,8	59,2	59,3	63,4	60,2	65,2	59,0	61,3	59,6	62,9
80	01	22,3	-	-	-	-	22,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	03	50,3	-	-	-	-	53,2	-	-	50,2	-	-	52,6	51,1	-
	07	58,4	-	-	-	-	63,8	-	-	56,2	-	-	61,0	60,5	-
	28	67,0	75,8	77,2	78,0	73,8	69,5	76,3	75,6	82,7	79,1	76,4	64,8	65,7	70,2
100	01	52,2	-	-	-	-	50,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	03	65,0	-	-	-	-	55,7	-	-	63,8	-	-	68,5	66,9	-
	07	70,9	-	-	-	-	69,3	-	-	67,0	-	-	70,6	72,3	-
	28	93,7	93,9	95,9	96,0	101,6	91,7	92,6	85,4	88,7	101,8	100,6	88,8	96,1	97,4

As análises sobre o efeito dos diferentes tipos e tempos de duração de cura na resistência à compressão (f_c) tiveram como objetivo principal a verificação da resistência à compressão obtida aos 28 dias (f_{c28}), ou seja, idade utilizada como referência para a maioria das estruturas de concreto. Neste sentido o foco principal das discussões são os resultados nesta idade de ensaio.

5.2.1. Resistência estimada 60MPa

Na Figura 5.1 encontram-se os valores de resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos e tempos de duração de cura.

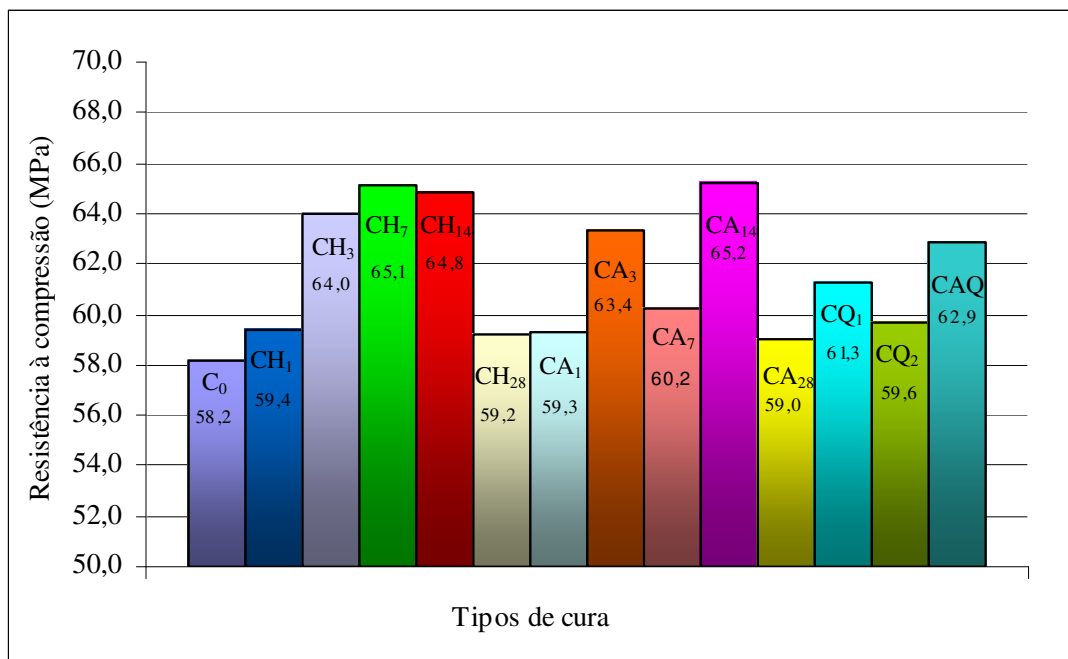


Figura 5.1 – Resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de cura para resistência estimada 60 MPa

De acordo com a Figura 5.1, para o concreto de resistência estimada 60 MPa, os tipos de cura que levaram a maiores resistências à compressão aos 28 dias foram com cura úmida, tanto em câmara úmida (CH₇ = 65,1MPa e CH₁₄ = 64,8MPa) quanto através de aspersão de água (CA₁₄ = 65,2MPa).

Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.2 apresenta as estimativas da média global.

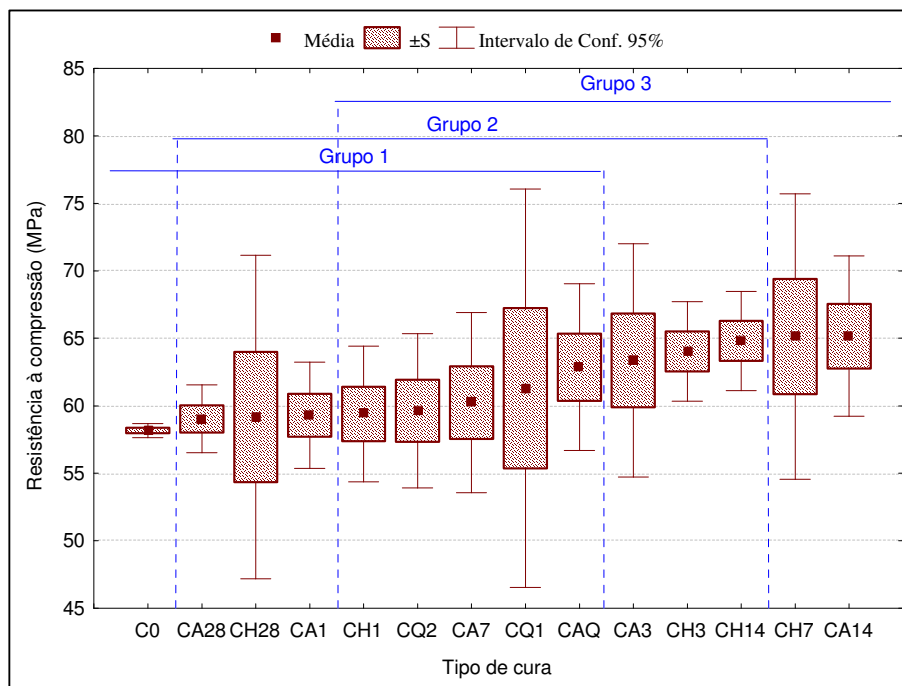


Figura 5.2 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Observando a Figura 5.2, os tipos de cura que levaram aos maiores acréscimos de resistência à compressão foram as curas úmidas CH₇ e CA₁₄, sendo estes concretos considerados estatisticamente iguais.

Pode-se observar no caso da cura em câmara úmida que, à medida que aumenta o tempo de cura, até os 7 dias, tende a crescer a resistência. Aos 14 dias já não se observa crescimento. Os corpos de prova que ficaram na câmara úmida até a data do ensaio (CH₂₈ = 59,2MPa) obtiveram resistência próxima aos que estavam expostos ao ambiente (C₀ = 58,2MPa). Esta resistência da amostra CH₂₈ pode não ter crescido devido à saturação dos corpos de prova no momento dos ensaios. Outra provável explicação para isto é dada por Agostine; Nunes (1996) que afirmam que este tipo de cura, dependendo da saturação, pode gerar uma zona superficial de baixa permeabilidade que dificulta a cura.

A resistência à compressão dos corpos de prova curados com membrana química (CQ₁ = 61,3MPa e CQ₂ = 59,6MPa) não apresentaram resultados muito diferentes em relação à referência (C₀ = 58,2MPa). Este comportamento pode indicar a necessidade de fornecimento de água, nas primeiras idades do CAD, para evitar a retração autógena (AÏTCIN, 2000).

A cura mista (CAQ = 62,9MPa) superou em 8,1% ao referência ($C_0 = 58,2\text{MPa}$), mas com crescimento abaixo das curas em câmara úmida CH₃ (64,0MPa), CH₇ (65,1MPa) e CH₁₄ (63,4MPa) e através de aspersão de água CA₃ (63,4MPa) e CA₁₄ (65,2MPa).

Ressalta-se aqui que a cura em câmara úmida, apesar de apresentar bons resultados, apenas em algumas situações tem seu uso viabilizado, como por exemplo, no caso de indústria de pré-moldados. O contrário acontece com a cura através de aspersão de água que é o tipo de cura mais utilizada nas obras de construção civil por ser de fácil aplicação.

Para esta classe de concreto de alto desempenho, pode-se dizer em relação a isto, que em situações de cura em obra, as curas que apresentaram melhor performance em relação à referência foram as curas através de aspersão de água durante 3 dias (CA₃) e 14 dias (CA₁₄) e a cura mista (CAQ).

Observa-se que para 7 dias de cura através de aspersão de água (CA₇) os resultados de resistência à compressão foram inferiores. Credita-se isto à possível variação da amostra, a qual foi bastante reduzida, indicando que seja repetido o ensaio a fim de confirmá-lo.

5.2.2. Resistência estimada 80MPa

Na Tabela 5.2 pode-se verificar os valores de resistência à compressão aos 01, 03, 07, e 28 dias para cada tipo de cura.

Na Figura 5.3 encontram-se os valores de resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos e tempos de duração de cura.

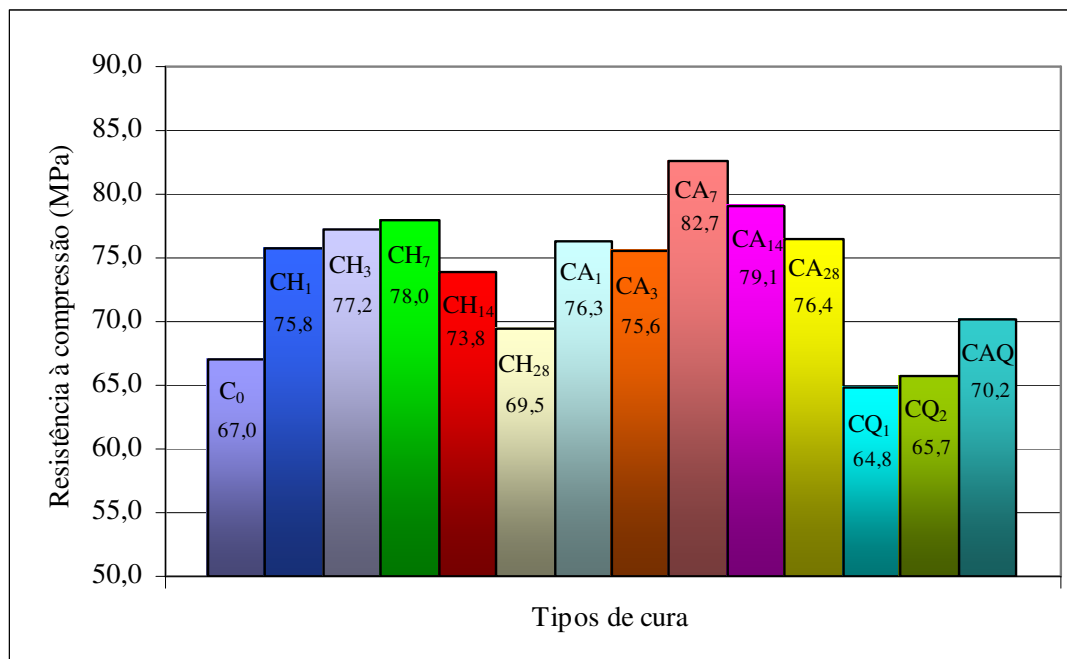


Figura 5.3 – Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes tipos e tempos de duração de cura para resistência estimada 80 MPa.

De acordo com a Figura 5.3 pode-se observar que, para o concreto de resistência estimada em 80 MPa, o tipo de cura que levou a maiores resistências à compressão aos 28 dias foi a cura úmida por 7 dias, tanto em câmara úmida ($CH_7 = 78,0\text{MPa}$) quanto através de aspersão de água ($CA_7 = 82,7\text{MPa}$).

Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.4 apresenta as estimativas da média global.

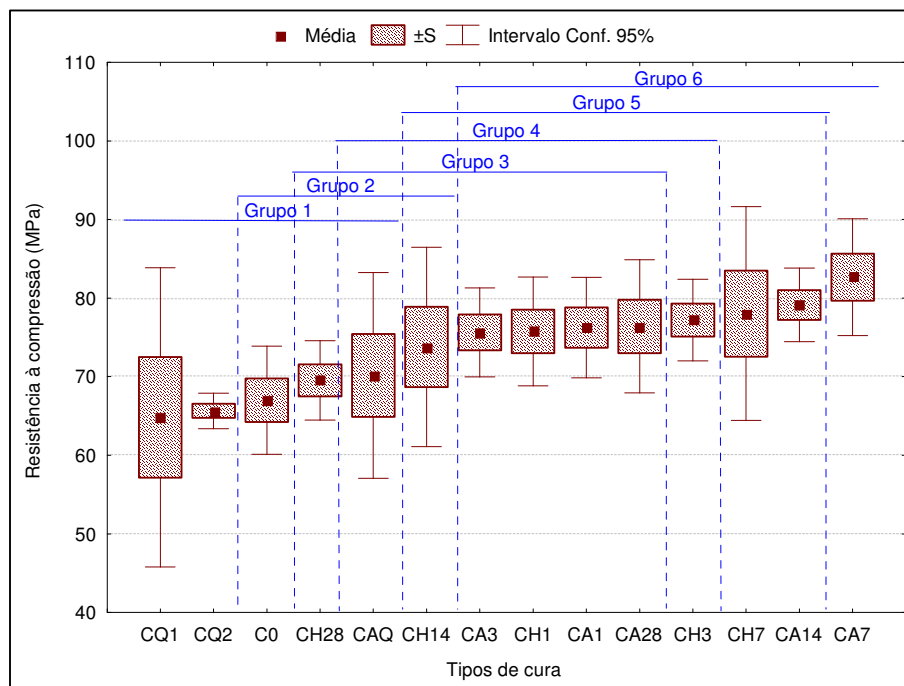


Figura 5.4 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 5.4, os tipo de cura que levaram aos maiores acréscimos foi a cura através de aspersão de água durante 7 dias (CA₇).

No caso da cura em câmara úmida qual, à medida que aumenta o tempo de cura, até os 7 dias, tende a crescer a resistência. Aos 14 dias já não se observa crescimento, até mesmo uma pequena queda.

Porém pode-se, de uma forma geral, dizer, com base nestes resultados, que curas com aspersão de água durante 1 a 28 dias podem incrementar ganhos de resistência.

Observa-se que para 3 dias de cura através de aspersão de água (CA₃) os resultados de resistência à compressão foram inferiores. Credita-se isto à possível variação da amostra, a qual foi bastante reduzida, indicando que seja repetido o ensaio a fim de confirmá-lo.

A resistência à compressão dos corpos de prova curados com membrana química (CQ₁ = 64,8MPa e CQ₂ = 65,7MPa) apresentaram resultados inferiores em relação a referência (C₀ = 67,0MPa). Este comportamento indica a necessidade de fornecimento de água, nas primeiras idades do CAD, para evitar a retração autógena (AÏTCIN, 2000).

A cura mista (CAQ = 70,2MPa) superou em 4,8% ao referência porém indicando que este tipo de cura possui alguma eficiência.

Em relação à viabilidade de aplicação da cura em situações de obra a cura que apresentou melhor performance em relação à referência foi a cura através de aspersão de água durante 7 dias (CA₇).

Tendo em vista otimizar-se um tempo de cura em câmara úmida pode-se afirmar que os maiores ganhos em relação à referência, para este caso, foram com 3 dias (CH₃) não ocorrendo expressivos acréscimos de resistência após este tempo de cura.

5.2.3. Resistência estimada 100MPa

Na Tabela 5.2 pode-se verificar os valores de resistência à compressão aos 01, 07, e 28 dias para cada tipo de cura.

Na Figura 5.5 encontram-se os valores de resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos e tempos de duração de cura.

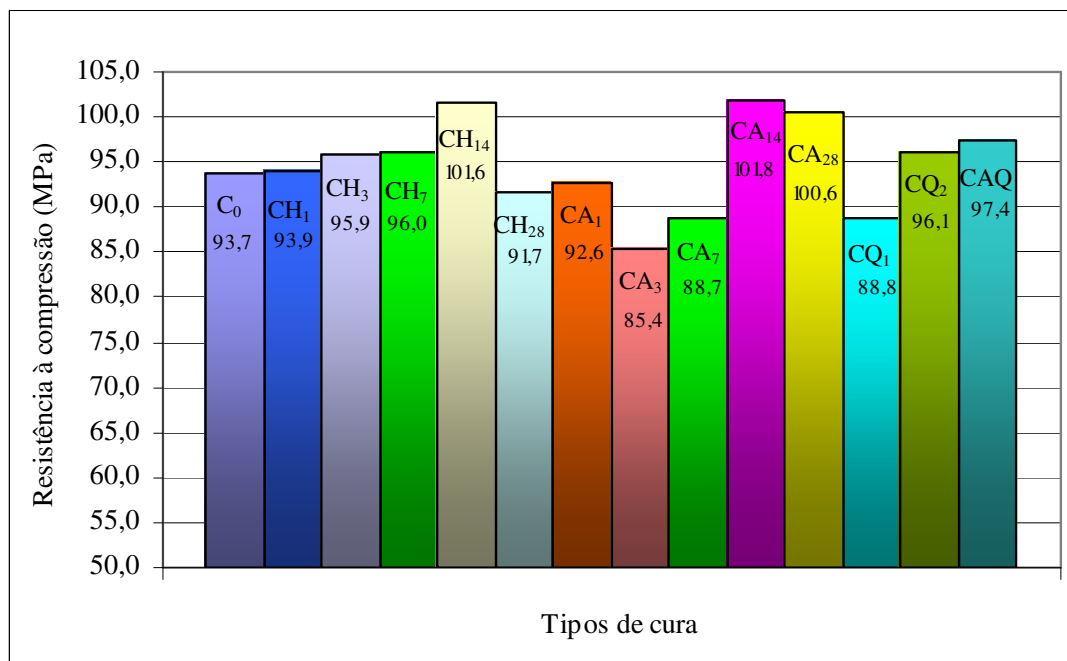


Figura 5.5 – Resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de cura pa resistência estimada 100 MPa.

De acordo com a Figura 5.5, para o concreto de resistência estimada em 100 MPa o tipo de cura que levou a maiores resistências à compressão aos 28 dias foi a cura úmida por 14 dias, tanto em câmara úmida (CH₁₄ = 101,6MPa) quanto através de aspersão de água (CA₁₄ = 101,8MPa).

Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.6 apresenta as estimativas da média global.

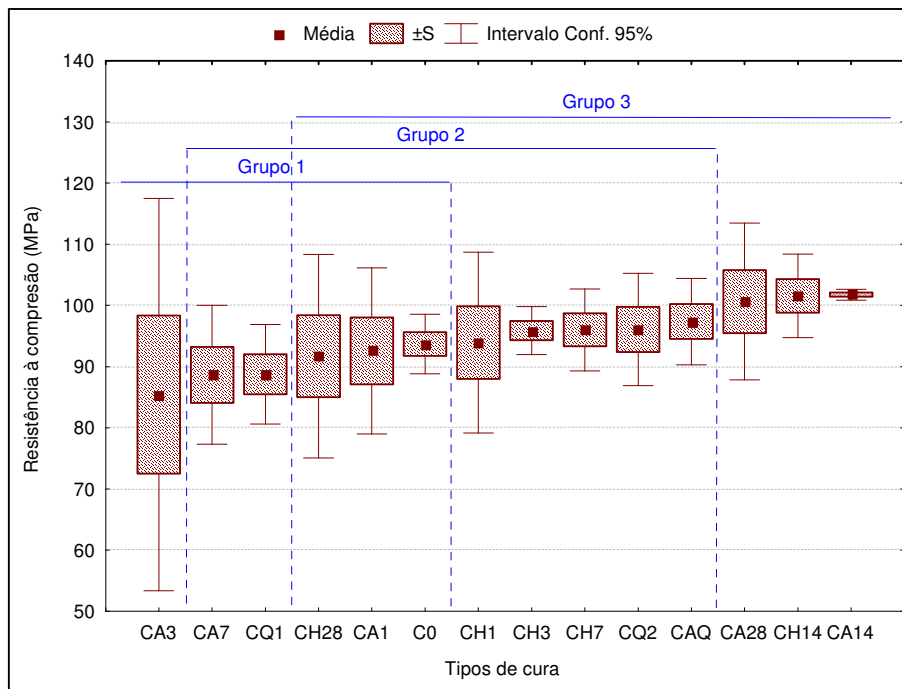


Figura 5.6 – Estimativa da média global para os valores de resistência à compressão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 5.6, no agrupamento de médias realizado tem-se a existência de 3 grupos. Nota-se que os procedimentos de cura que levaram aos maiores acréscimos de resistência para CAD foram CA₂₈, CH₁₄ e CA₁₄, tipos de curas em câmara úmida e através de aspersão de água.

Pode-se observar no caso da cura em câmara úmida que, à medida que aumenta o tempo de cura, até os 14 dias, tende a crescer a resistência. Como nas outras resistências estimadas (60 e 80 MPa), os corpos de prova que ficaram na câmara úmida até a data do ensaio (CH₂₈ = 91,7MPa) obtiveram resistência praticamente igual aos que estavam expostos ao ambiente (C₀ = 93,7MPa) provavelmente também porque, no momento do ensaio estes se encontravam saturados.

A cura CQ₂ (96,1MPa) apresentou muito pequeno crescimento de resistência em relação à referência (C₀ = 93,7MPa), já a cura CQ₁ (88,8MPa) apresentou resistência

bastante inferior. Este comportamento reforça a pode indicar a necessidade de fornecimento de água, nas primeiras idades do CAD (AÏTCIN, 2000).

A cura mista (CAQ = 97,4MPa) superou em 3,9% ao referência ($C_0 = 93,7\text{MPa}$).

Em relação à viabilidade de aplicação da cura em obra, a cura que apresentou melhor performance em relação à referência foi a cura com aspersão de água durante 14 dias (CA₁₄).

Tendo em vista otimizar-se um tempo de cura em câmara úmida pode-se afirmar que os maiores ganhos em relação à referência, para este caso, foram com 14 dias (CH₁₄) não ocorrendo expressivos acréscimos de resistência após este tempo de cura.

Pode-se dizer com base nestes resultados que curas através de aspersão de água durante 14 a 28 dias podem incrementar ganhos de resistência.

5.2.4. Análise do desempenho dos tipos de cura na resistência à compressão

A resistência com 01 dia de idade dos concretos de 80 e 100 MPa não foi significativamente influenciada pela cura, apresentando pequeno acréscimo e pequeno decréscimo respectivamente. Já para 60MPa ocorre um aumento de 13,8% com a cura úmida. Os resultados para a resistência estimada 60MPa indicaram a necessidade de novos ensaios, haja visto que os resultados para as análises nestas pesquisa foram atípicos.

Foi observado um crescimento significativo da resistência entre as idades de 7 e 28 dias. Isto confirma as observações de Carrasquillo *et al.* (1981) que estudou a evolução da resistência com a idade de concretos de alta (>60MPa), média (41 a 62MPa) e baixa (21 a 41MPa) resistência, e notou uma maior velocidade de ganho de resistência nas primeiras idades para o concreto de maior resistência. Este comportamento pode ser justificado pelo uso da sílica ativa como adição mineral, à proximidade das partículas de cimento no concreto fresco decorrente da baixa relação a/agl (LARRARD; MALIER, 1992), o alto calor de hidratação devido ao elevado consumo de cimento (ACI 363-R, 1991) e também pela eficiência do superplastificante na dispersão destas partículas.

Abaixo analisa-se os principais resultados de resistência à compressão aos 28 dias (fc_{28}), data escolhida por vários autores e normas para avaliação do desempenho de concretos e também utilizada para análises desta pesquisa.

Na Tabela 5.3 apresentam-se os percentuais de crescimento de fc_{28} dos diferentes tipos de cura estudados em relação à referência (C_0).

Tabela 5.3 – Porcentagem média de acréscimo de resistência em relação à referência.

<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Acréscimo de resistência em relação à referência (%)</i>												
	<i>CH₁</i>	<i>CH₃</i>	<i>CH₇</i>	<i>CH₁₄</i>	<i>CH₂₈</i>	<i>CA₁</i>	<i>CA₃</i>	<i>CA₇</i>	<i>CA₁₄</i>	<i>CA₂₈</i>	<i>CQ₁</i>	<i>CQ₂</i>	<i>CAQ</i>
60	2,1	10,0	11,9	11,3	1,7	1,9	8,9	3,4	12,0	1,4	5,3	1,9	8,1
80	13,1	15,2	16,4	10,1	3,7	13,9	12,8	23,4	18,1	14,0	0,0*	0,0*	4,8
100	0,2	2,3	2,3	8,4	0,0*	0,0*	0,0*	0,0*	8,6	7,4	0,0*	2,6	3,9
Média	5,1	9,2	10,3	9,9	1,8	5,3	7,2	8,9	12,9	7,6	1,8	1,5	5,6

* Não houve percentual de acréscimo de resistência em relação à referência.

Observa-se na Tabela 5.3 que, para as resistências estudadas, as curas CA₇, CH₃, CH₁₄, CH₇ e CA₁₄, foram as que apresentaram, em média, os maiores crescimentos, sendo respectivamente, 8,9%, 9,2%, 9,9%, 10,3% e 12,9%.

Para a resistência estimada **60MPa** o tipo de cura que mais influenciou a resistência à compressão foi a cura úmida. Os tipos de cura que resultaram em maiores acréscimos de resistência em relação à referência foram os tipos CA₁₄ (12,2%), CH₇ (11,9%), CH₁₄ (11,3%), CH₃ (10,0%), CA₃ (8,9%) e CAQ (8,1%). Os tipos de cura que resultaram em pequenos acréscimos foram CH₁ (2,6%), CA₁ (1,9%) e as curas químicas (CQ₁ = 5,3% e CQ₂ = 2,4%).

O tipo de cura que mais influenciou a resistência à compressão dos concretos de resistência estimada **80MPa** foi também a cura úmida. Os tipos de cura que resultaram em maiores acréscimos de resistência em relação à referência foram os tipos CA₇ (23,4%), CA₁₄ (18,1%), CH₇ (16,4%), CH₃ (15,2%), CA₁ (13,9%), CH₁ (13,1%), CA₃ (12,8%) e CH₁₄ (10,1%). Os tipos de cura que menos influenciaram a resistência à compressão foram CAQ (4,8%) e as curas químicas, que resultaram até mesmo em resistências inferiores à referência (CQ₁ e CQ₂).

A cura úmida foi também o tipo de cura que mais influenciou o concreto de resistência estimada **100MPa**, sendo os maiores acréscimos de resistência promovidos pelas curas CA₁₄ (8,6%) e CH₁₄ (8,4%). Os tipos de cura que menos influenciaram a resistência à compressão foram CH₁ (0,2%), CH₃ (2,3%), CH₇ (2,5%), CQ₂ (2,6%), CAQ (3,9%) e a cura química CQ₁, que resultou em resistência inferior à referência.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 pode-se observar os acréscimos de resistência em relação a referência (C0) para a cura em câmara úmida e para a cura através de aspersão de água.

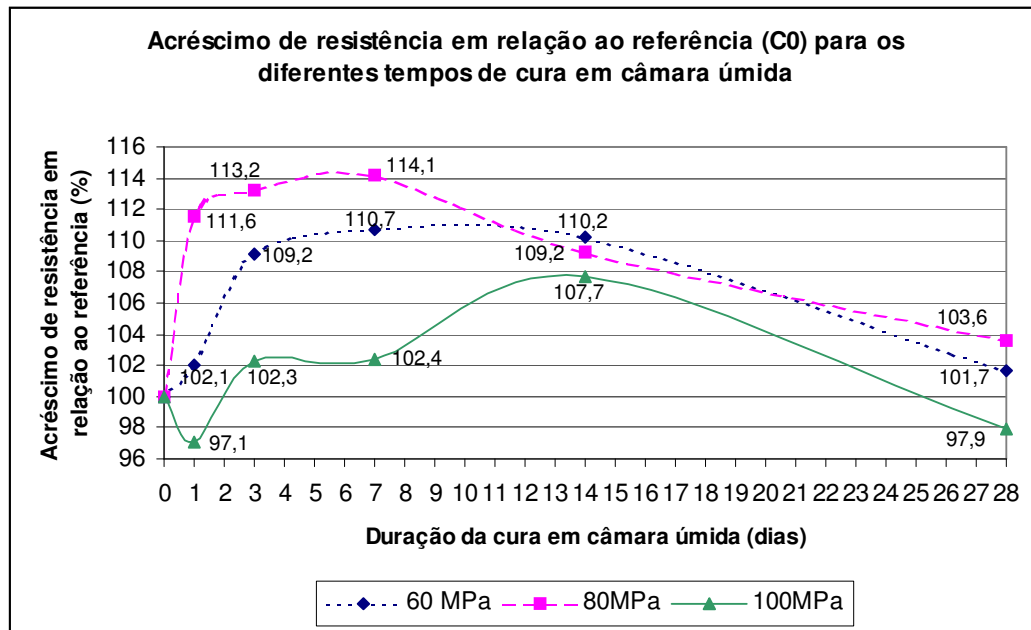


Figura 5.7 – Acréscimos de resistência à compressão, em porcentagem, dos diferentes tempos de duração de cura em câmara úmida, em relação à referência (C0).

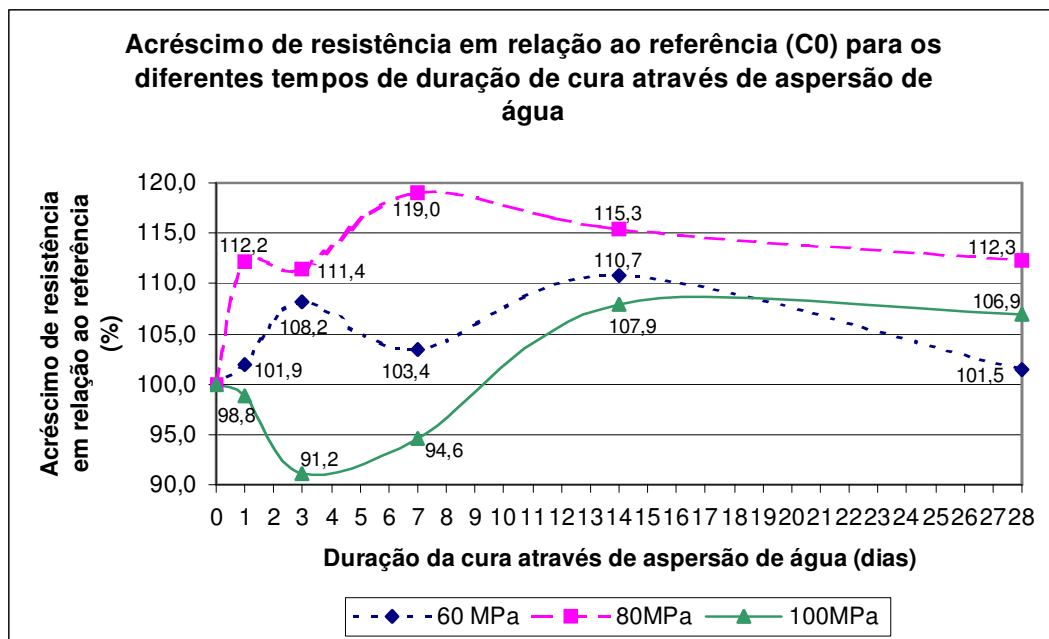


Figura 5.8– Acréscimos de resistência à compressão, em porcentagem, dos diferentes tempos de duração de cura através de aspersão de água, em relação à referência (C0).

O tempo de duração de cura em câmara úmida que resultou num maior acréscimo de resistência à compressão foi de 7 dias para os concretos com resistência estimada de 60 e 80 MPa e de 14 dias para o concreto de 100 MPa. Foi necessário um maior tempo de cura

para o concreto se 100 MPa, provavelmente devido à maior quantidade de cimento presente no traço.

Já o tempo de duração de cura através de aspersão de água que resultou num maior acréscimo de resistência à compressão foi de 7 dias para o concreto com resistência estimada de 80MPa e de 14 dias para os concretos de 60 e 100MPa.

A Figura 5.9 mostra o gráfico do acréscimo de resistência à compressão para os diferentes tipos de cura.

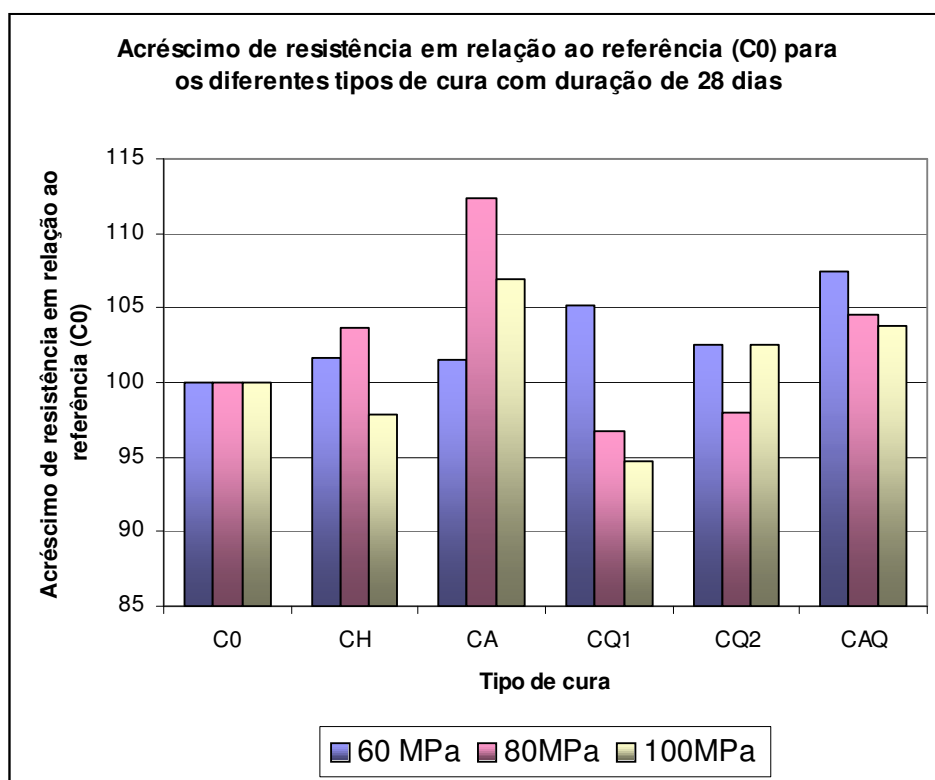


Figura 5.9 – Acréscimo de resistência à compressão, em porcentagem, para os diferentes tipos de cura

Pode-se observar na Figura 5.9 que, para o concreto de 60 MPa, o tipo de cura que resultou num maior acréscimo de resistência, em relação ao referencial (C0), foi a cura mista (CAQ) e para o de 80 e 100MPa, a cura através de aspersão de água.

Na Figura 5.10 apresenta-se o gráfico para as curas de melhor desempenho e C₀ com correlações entre os valores estimados e obtidos nos ensaios, onde observa-se que o tipo CA₁₄ (cura úmida através de aspersão de água durante 14 dias) apresentou-se como o procedimento de melhor desempenho quanto ao crescimento da resistência, de uma forma geral, para todas as classes de resistências.

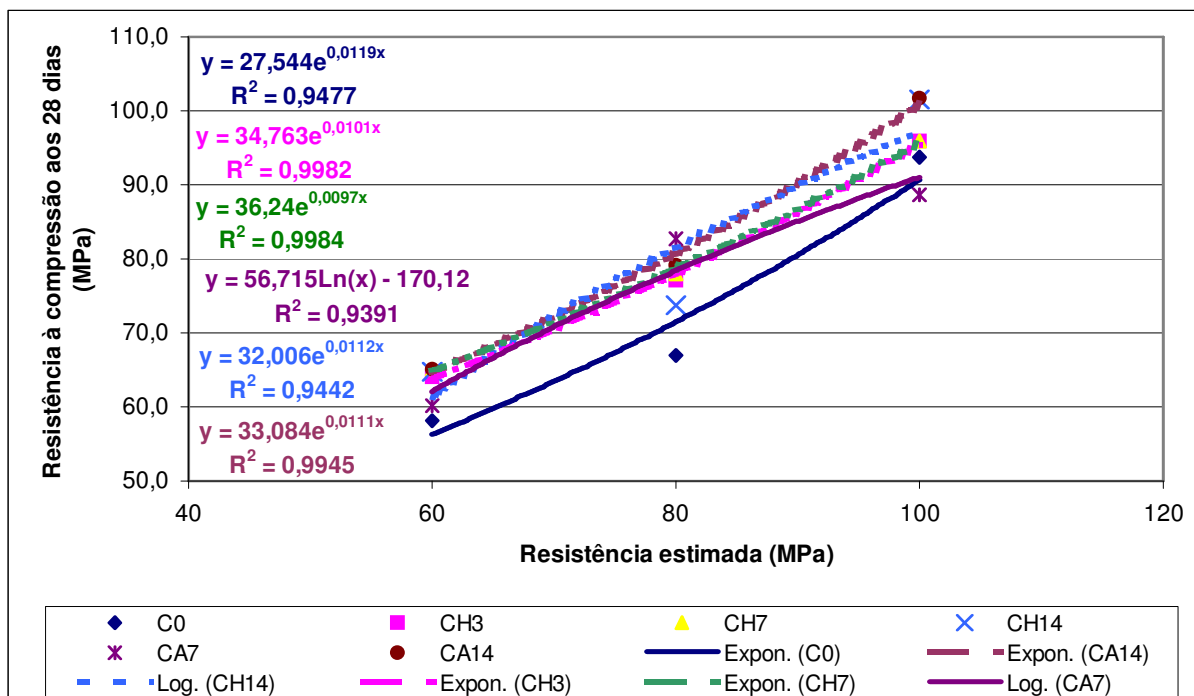


Figura 5.10 – Correlação entre a resistência à compressão e resistência estimada para os melhores tipos de curas.

5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 07 e 28 dias podem ser observados no Anexo B.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os valores das médias aritméticas dos corpos de prova ensaiados, aos 07 e 28 dias respectivamente, para determinação da resistência à tração na flexão para cada resistência estimada e os valores do quociente da resistência à tração na flexão pela resistência à compressão, para os tipos de cura estudados: C₀, CH₂₈, CA₇, CQ₁, CQ₂ e CAQ.

Tabela 5.4 – Resultado de resistência à tração na flexão aos 07 dias.

<i>Tipo de Cura</i>	<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Compressão (f_{c7})</i>	<i>Tração (f_{t7})</i>	<i>f_{t7}/f_{c7} (%)</i>
C ₀	60	48,4	4,10	8,5
	80	58,4	4,74	8,1
	100	70,9	5,57	7,9
CH ₂₈	60	49,1	6,32	12,9
	80	63,9	7,44	11,6
	100	69,3	8,06	11,6
CA ₇	60	47,8	3,87	8,1
	80	56,2	5,35	9,5
	100	67,0	6,53	9,7
CQ ₁	60	47,0	4,13	8,8
	80	61,0	4,67	7,7
	100	70,6	5,26	7,5
CQ ₂	60	50,1	4,35	8,7
	80	60,5	4,47	7,4
	100	72,3	5,28	7,3

Tabela 5.5 – Resultado de resistência à tração na flexão aos 28 dias.

<i>Tipo de Cura</i>	<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Compressão (f_{c28})</i>	<i>Tração (f_{t28})</i>	<i>f_{t28}/f_{c28} (%)</i>
C ₀	60	58,2	4,81	8,3
	80	67,0	5,82	8,7
	100	93,7	6,14	6,6
CH ₂₈	60	59,2	7,40	12,5
	80	69,5	9,04	13,0
	100	91,7	8,92	9,7
CA ₇	60	60,2	5,69	9,5
	80	82,7	6,31	7,6
	100	88,7	6,10	6,9
CQ ₁	60	61,3	5,32	8,7
	80	64,8	5,88	9,1
	100	88,8	6,07	6,8
CQ ₂	60	59,6	5,00	8,4
	80	65,7	6,43	9,8
	100	96,1	5,83	6,1
CAQ	60	62,9	5,17	8,2
	80	70,2	6,32	9,0
	100	97,4	6,39	6,6

Na Tabela 5.4, observa-se que, para o concreto de resistência estimada 60 MPa os valores de relação f_t/f_c , aos 07 dias, variaram de 8,1% a 12,9%, para o de 80 MPa os valores variaram de 7,4% a 11,6% e para o de 100 MPa os valores variaram de 7,3% a 11,6%.

Já aos 28 dias, observando a Tabela 5.5, para o concreto de resistência estimada 60 MPa os valores de relação f_t/f_c variaram de 8,2% a 12,5%, para o de 80 MPa os valores variaram de 7,6% a 13,0% e para o de 100 MPa os valores variaram de 6,1% a 9,7%.

As fórmulas para concretos convencionais, ajustadas para previsão da resistência à tração a partir da resistência à compressão, não servem para concretos de alto desempenho, pois a relação f_c/f_t normalmente diminui com o acréscimo da resistência à compressão ou decréscimo da relação água/aglomerante (ACI 363-R, 1991; DAL MOLIN, 1995). De acordo com as Tabelas 5.4 e 5.5, pode-se observar que, para os concretos produzidos, foi possível verificar o decréscimo da relação f_t/f_c com o aumento da resistência à compressão, como o esperado.

5.3.1. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 60 MPa

Na Figura 5.11 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura na resistência à tração na flexão aos 28 dias.

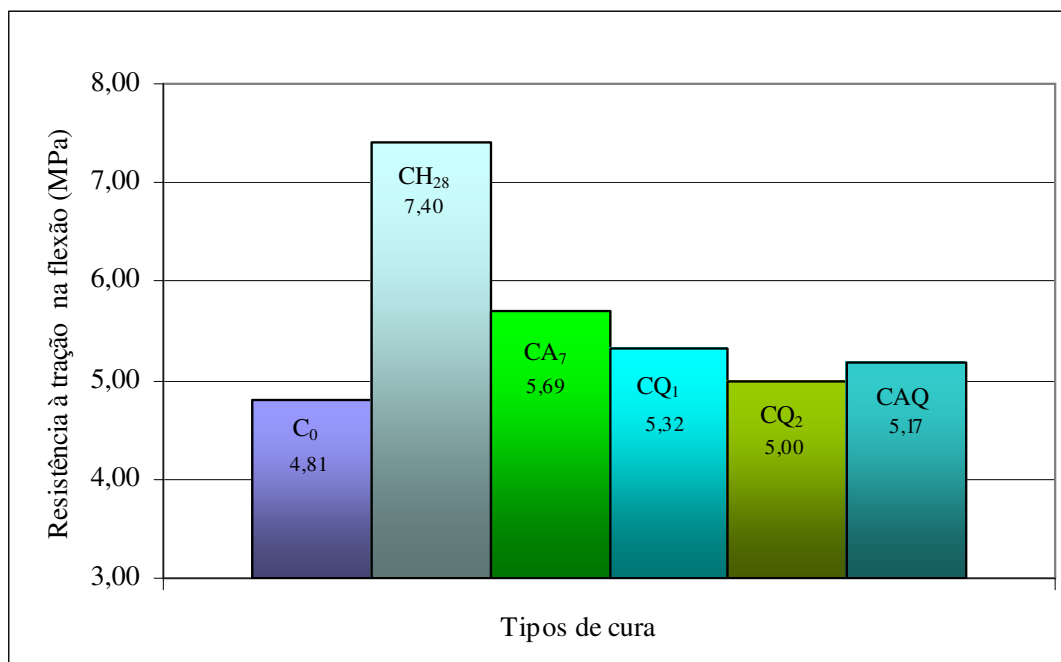


Figura 5.11 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 60 MPa.

Observando a Figura 5.11 nota-se que o tipo de cura que mais influenciou a resistência à tração na flexão foi o CH₂₈. Porém isto pode ter acontecido devido à condição de saturação do corpo de prova durante a realização do ensaio. Neville (1997) afirma que,

prismas deixados secos antes do ensaio têm uma resistência à tração na flexão menor do que outro ensaiado em condição úmida. Essa diferença é devida a tensões de trações induzidas pela retração antes da aplicação da carga, que dá origem a tração na borda. Deve ser lembrado que esse efeito é diferente da influência da cura sobre a resistência à compressão (NEVILLE, 1997). Excluindo-se então os valores de resistência à tração do tipo de cura CH₂₈, a cura que levou a maiores resistências à tração na flexão aos 28 dias foi a cura através de aspersão de água durante 7 dias (CA₇ = 5,69MPa).

Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.12 apresenta as estimativas da média global.

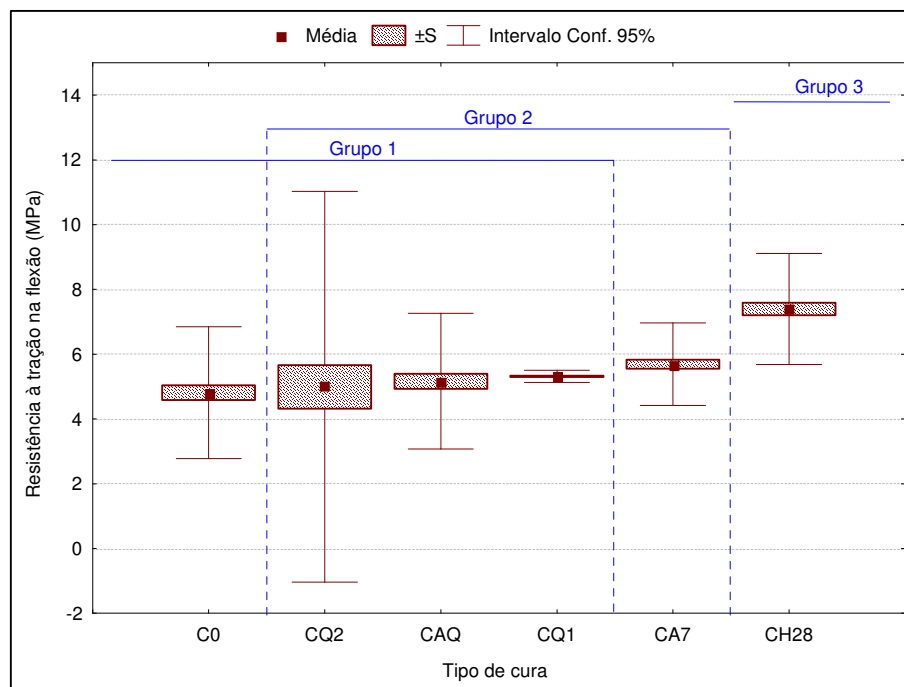


Figura 5.12 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 5.12, no agrupamento de médias realizado tem-se a existência de 3 grupos.

A resistência à tração na flexão dos corpos de prova curados com membrana química (CQ₁ = 5,32MPa e CQ₂ = 5,00MPa) e cura mista (CAQ = 5,17MPa) apresentaram resistências pouco superiores em relação à referência (C₀ = 4,81MPa).

Com relação à viabilidade da aplicação da cura em obra, as curas que apresentou a melhor performance em relação à referência foi a curas com aspersão de água CA₇.

5.3.2. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 80 MPa

Na Figura 5.13 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura na resistência à tração na flexão aos 28 dias.

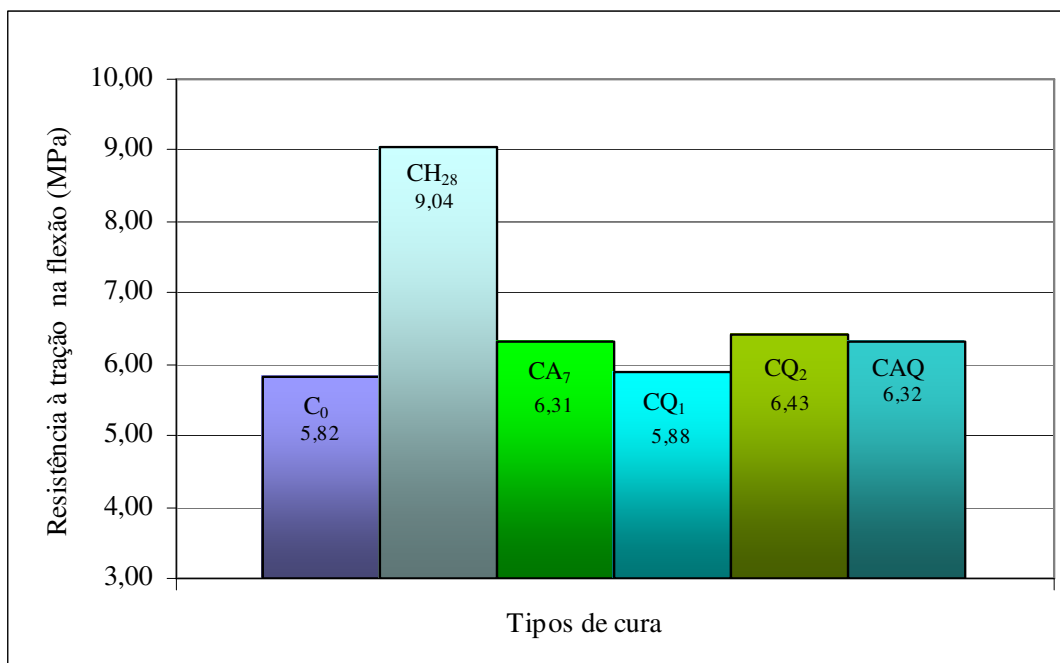


Figura 5.13 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura.

Observando a Figura 5.13 nota-se também que o tipo de cura que mais influenciou a resistência à tração na flexão foi o CH₂₈. Dentre os outros tipos de cura a que apresentou o melhor desempenho em relação o de referência (C₀ = 5,82MPa) foi a cura química com membrana à base de borracha clorada (CQ₂ = 6,43MPa) seguida da cura mista (CAQ = 6,32 MPa) e da cura através de aspersão de água durante 7 dias (CA₇ = 6,31MPa). Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.14 apresenta as estimativas da média global.

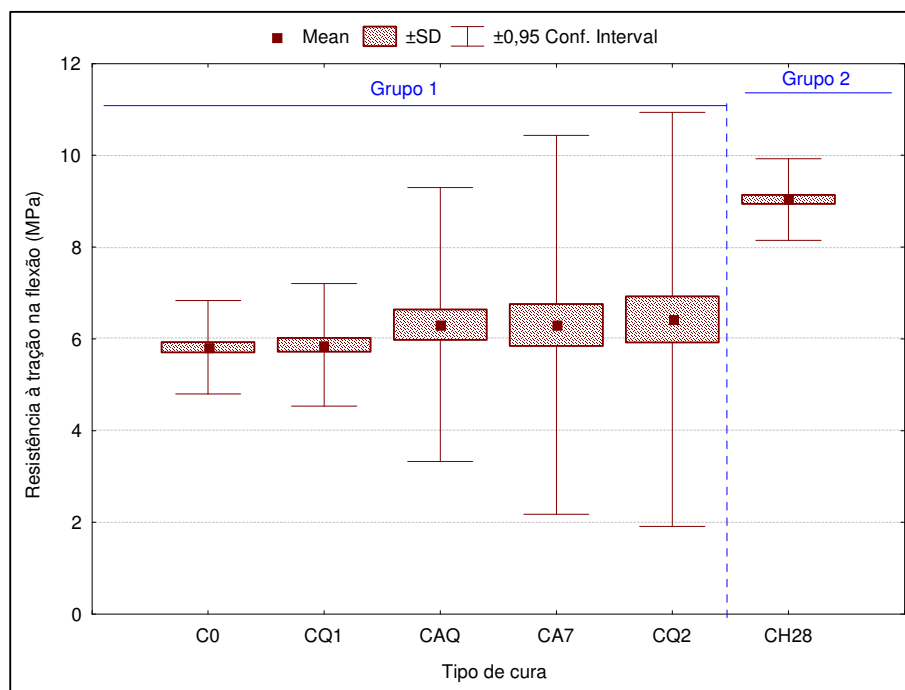


Figura 5.14 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 5.14, no agrupamento de médias realizado tem-se a existência de 2 grupos. Observa-se que não houve expressivos ganhos de resistência à tração na flexão para os diferentes tipos de cura, exceto para o CH₂₈.

Com relação a viabilidade da aplicação da cura em obra a cura que apresentou melhor performance em relação à referência foram as curas com aspersão de água CA₇.

5.3.3. Tração na flexão na amostra com resistência estimada 100 MPa

Na Figura 5.15 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura na resistência à tração na flexão aos 28 dias.

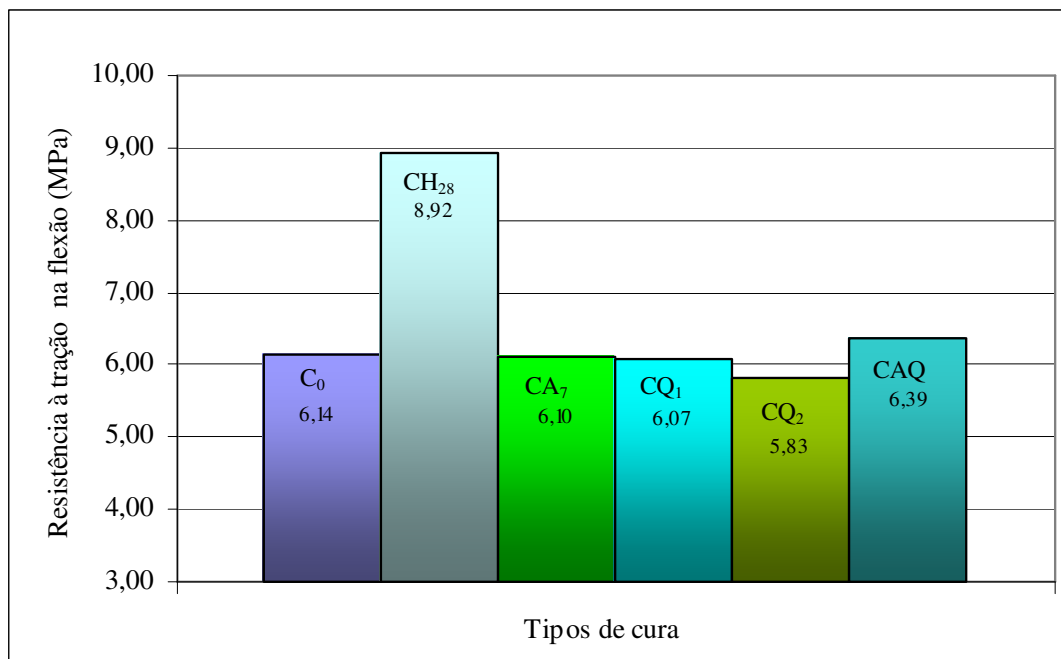


Figura 5.15 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 100 MPa.

Observando a Figura 5.15 nota-se também que o tipo de cura que influenciou a resistência à tração na flexão foi o CH₂₈. Para o concreto de resistência estimada 100 MPa, exceto o tipo de cura mista (CAQ = 6,39MPa), todos os tipos de cura levaram a pequenos decréscimos de resistências à tração na flexão aos 28 dias (CA₇ = 6,10MPa, CQ₁ = 6,07MPa e CQ₂ = 5,83MPa) e em relação à referência (C₀ = 6,14MPa).

Realizou-se a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si. A Figura 5.16 apresenta as estimativas da média global.

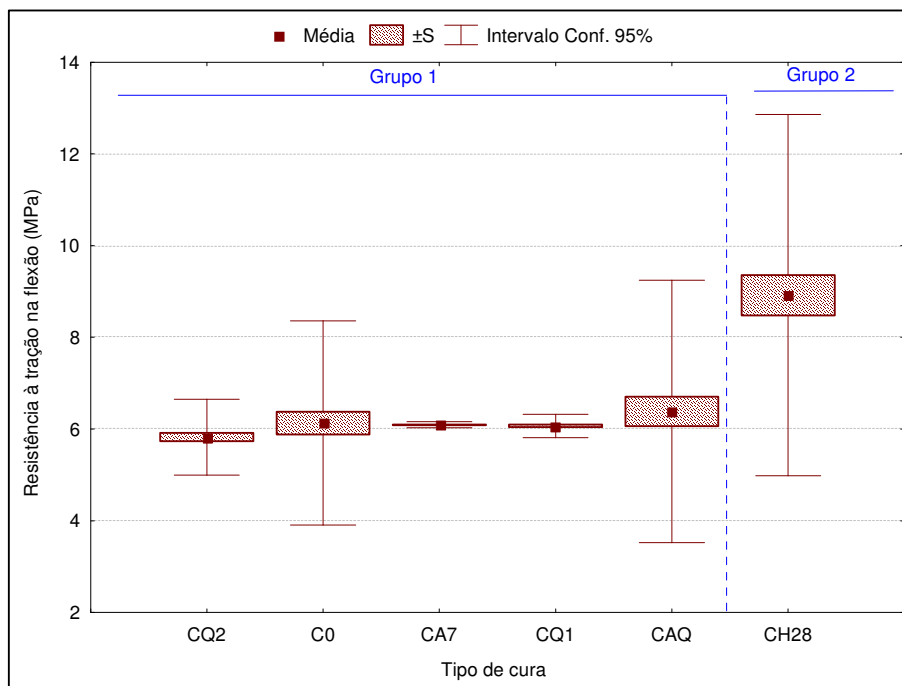


Figura 5.16 – Estimativa da média global para os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias, com seu desvio padrão e intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 5.16, no agrupamento de médias realizado tem-se a existência de 2 grupos distintos. Observa-se que não houve expressivos ganhos de resistência à tração na flexão para os diferentes tipos de cura (Grupo 1) com exceção ao Grupo II (CH₂₈).

Com relação a viabilidade da aplicação da cura em obra a cura que apresentou melhor performance em relação à referência foi a cura através de aspersão de água por 7 dias (CA₇).

5.3.4. Análise do desempenho dos tipos de cura na resistência à tração na flexão

A Tabela 5.6 apresentam as porcentagens de acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência (C₀).

Tabela 5.6 – Porcentagem média de acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência.

Resistência estimada aos 28 dias (MPa)	Acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência (C_0) (%)				
	CH_{28}/C_0	CA_7/C_0	CQ_1/C_0	CQ_2/C_0	CAQ/C_0
60	53,8	18,3	10,6	4,0	7,5
80	55,3	8,4	1,0	10,5	8,6
100	45,3	0,0*	0,0*	0,0*	4,1
Média	51,5	8,9	3,9	4,8	6,7

* Não houve percentual de acréscimo de resistência em

relação à referência.

A cura que apresentou maior aumento de resistência à tração na flexão foi CH_{28} , devido provavelmente aos aspectos já comentados anteriormente. Deve-se considerar que este trabalho objetiva alternativas de cura para CAD moldado *in loco* e, nesta situação a cura em cura úmida é impraticável.

Neste sentido, faz-se aqui uma análise das curas mais efetivas à resistência à tração na flexão para CAD moldado no local. Então pode-se dizer que para as resistências estimadas 60 e 80 a cura CA_7 promoveu acréscimo de resistência significativo. Para a resistência estimada 100MPa o único tipo de cura que resultou em acréscimo de resistência foi a cura mista (CAQ), mesmo assim não sendo tão significativo.

A influência da cura na resistência à tração na flexão segue o comportamento verificado na resistência à compressão, visto que os tipos de cura que mais influenciaram estas duas propriedades mecânicas foi a cura úmida através de aspersão de água seguida pela cura mista (CAQ).

5.4. MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Os resultados de módulo de deformação aos 07 e 28 dias podem ser observados no Anexo C.

A Tabela 5.7 apresenta os valores da média aritmética dos corpos de prova ensaiados para determinação do módulo de deformação aos 7 e 28 dias.

Tabela 5.7 – Resultado de módulo de deformação aos 7 e 28 dias.

<i>Tipo de Cura</i>	<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão obtida (MPa)</i>		<i>Módulo de deformação (GPa)</i>	
		<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>
C ₀	60	48,4	56,2	26,4	28,4
	80	58,4	74,4	24,4	30,6
	100	70,9	91,4	29,1	34,8
CH ₂₈	60	49,1	54,4	23,6	28,8
	80	63,9	78,0	27,6	33,1
	100	69,3	86,7	28,2	32,9
CA ₇	60	47,8	76,8	22,0	31,4
	80	56,2	79,1	27,2	34,1
	100	67,0	94,0	28,7	34,4
CQ ₁	60	47,0	59,0	27,3	30,0
	80	61,0	67,1	28,6	30,7
	100	70,6	95,8	28,3	32,4
CQ ₂	60	50,1	60,7	24,4	29,0
	80	60,5	76,3	25,5	34,1
	100	72,3	86,1	29,4	32,9
CAQ	60	-	60,0	-	28,5
	80	-	79,4	-	32,5
	100	-	99,8	-	34,7

De acordo com a Tabela 5.7, é possível observar que, aos 7 dias, para os concretos produzidos, os valores do módulo de deformação se situaram no intervalo de 22,0 a 29,4GPa. Aos 28 dias estes situaram-se no intervalo de 28,4 a 34,8 GPa. Estes valores são comuns ao CAD devido a maior rigidez da argamassa e maior aderência da pasta-agregado (ALMEIDA, 1992).

5.4.1. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 60 MPa

Na Figura 5.17 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura módulo de deformação aos 28 dias.

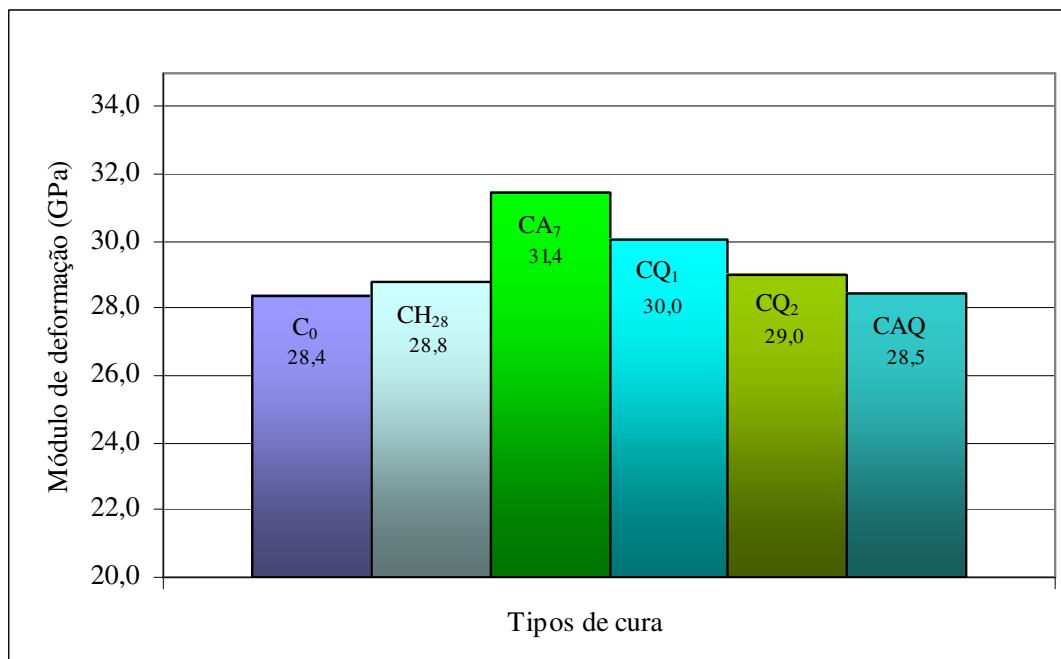


Figura 5.17 – Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 60 MPa.

Observando a Figura 5.17 nota-se que não houve diferenças significativas entre os tipos de cura analisados, porém a cura CA₇ (31,4GPa) foi o tipo que promoveu o maior acréscimo em relação à referência (C₀ = 28,4GPa).

Neville (1997) afirma que não se acredita que as condições e a cura propriamente dita tenham influência sobre o módulo de deformação, senão através da influência da cura sobre a resistência.

Segundo Farias *et al.* (2004), o módulo de deformação do concreto depende dos módulos de deformação da pasta e dos agregados utilizados. No que diz respeito à pasta de cimento, essencialmente depende da porosidade do concreto, da relação água/cimento, adições minerais e aditivos químicos, que permitem a obtenção de uma matriz mais densa.

Já as características dos agregados graúdos no módulo de deformação exercem uma particular influência no concreto de alto desempenho. Há vários estudos que demonstram que concretos, podem apresentar o mesmo valor de resistência à compressão, preparados com diferentes litologias, no entanto apresentam diferentes valores de módulo de elasticidade (ACITO; GUERRINI, 1999; CETIN; CARRASQUILO, 1998; GUTIERREZ; CANOVAS, 1995).

Neste experimento não houve variação de materiais, o que pode justificar a proximidade dos valores de módulo de deformação para os diferentes tipo de cura.

5.4.2. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 80 MPa

Na Figura 5.18 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura módulo de deformação aos 28 dias.

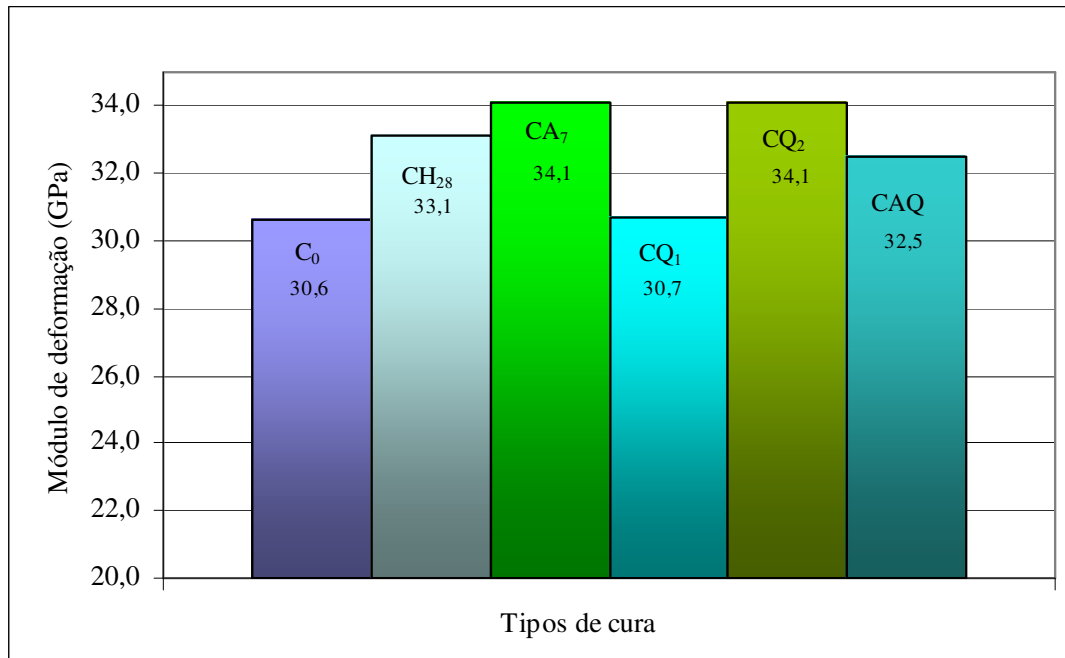


Figura 5.18 – Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura para resistência estimada 80 MPa.

Observando a Figura 5.18, os tipos de cura CA₇ (34,1GPa) e CQ₂ (34,1GPa) foram os que promoveram melhores desempenhos em relação à referência (C₀ = 30,6GPa), para resistência estimada 60MPa.

5.4.3. Módulo de deformação para CAD com resistência estimada 100 MPa

Na Figura 5.19 é possível visualizar a influência dos diferentes tipos de cura módulo de deformação aos 28 dias.

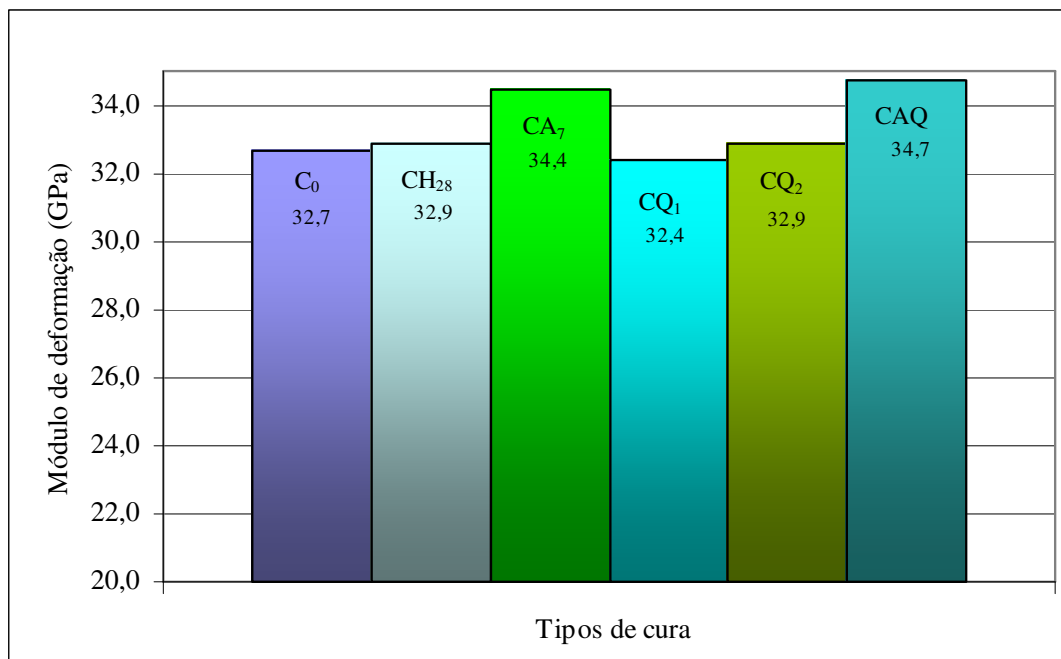


Figura 5.19– Módulo de deformação aos 28 dias para diferentes tipos de cura.

Através da Figura 5.19, no caso dos concretos de alto desempenho com resistência estimada 100MPa, observa-se que os tipos de cura que se destacaram, em relação à referência ($C_0 = 32,7\text{GPa}$) foram cura através de aspersão de água durante 7 dias ($CA_7 = 34,4\text{GPa}$) e a cura mista ($CAQ = 34,7\text{GPa}$) .

5.4.4. Análise do desempenho dos tipos de cura no módulo de deformação

A Tabela 5.8 apresenta as porcentagens de incrementos de módulo de deformação em relação à referência.

Tabela 5.8 – Porcentagem média de acréscimo de resistência à tração na flexão em relação à referência.

Resistência estimada aos 28 dias (MPa)	Incremento de módulo de deformação em relação à referência (%)				
	CH ₂₈ /C ₀	CA ₇ /C ₀	CQ ₁ /C ₀	CQ ₂ /C ₀	CAQ/C ₀
60	1,4	10,6	5,6	2,1	0,4
80	8,2	11,4	0,3	11,4	6,2
100	0,6	5,2	0,0*	0,6	6,1
Média	3,4	9,1	2,0	4,7	4,2

* Não houve percentual de acréscimo em relação à referência.

Pode se dizer que para todas as resistências estimadas a cura CA₇ promoveu o maior acréscimo de módulo de deformação (E_c) médio (9,1%).

Segundo Zain; Radin (2000), o tipo de cura influencia no módulo de deformação do concreto de alto desempenho. O tipo de retração que mais influencia no CAD é a autógena. Neste tipo de concreto, os capilares são muito finos. À medida que a água tende a deixar o concreto, desenvolvem-se meniscos em capilares cada vez mais finos, sendo desenvolvidas forças capilares, propiciando a retração autógena, o que tende a decrescer a sua resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Sendo assim, é fundamental fornecer água para o concreto durante a sua cura. Portanto, a cura essencial para o CAD é a úmida. Os autores sugerem que o período mínimo de cura úmida seja de 7 dias.

5.4.5. Resistência à compressão x Módulo de deformação

Na Figura 5.20 está apresentada a correlação obtida entre a resistência à compressão e módulo de deformação, ambos aos 28 dias, para as resistências estimadas (60, 80 e 100MPa) e para todos os tipos de cura.

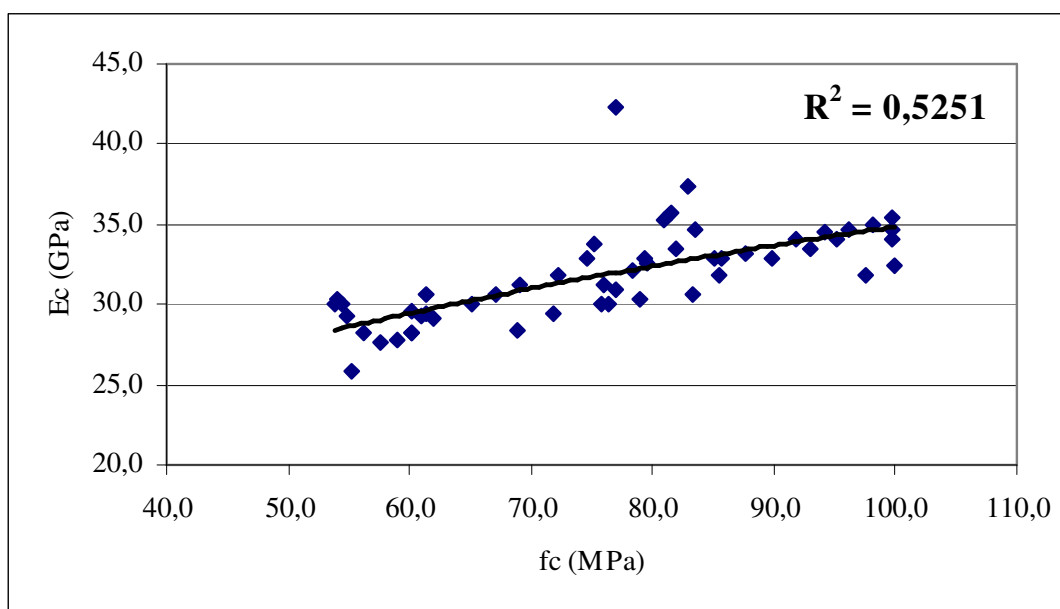


Figura 5.20 – Correlação do módulo de elasticidade e resistência à compressão.

O módulo de deformação manteve-se em uma faixa de 28,4 GPa a 34,8 GPa, mesmo nas resistências mais elevadas. Observa-se no gráfico da figura 5.20, que a medida

que aumenta-se f_{c28} também tem-se o aumento no E_{c28} . Com isso, pode-se deduzir que o módulo aumenta conforme a resistência. Estes valores de módulo de deformação (E_c) podem ser atribuídos à baixa porosidade da matriz que conseqüentemente é mais rígida e a zona de transição que é melhorada com a adição de pozolanas. Esta última faz com que as duas fases matriz/agregado trabalhem juntas formando um corpo mais rígido e monolítico. Deste modo, no concreto de alto desempenho, o agregado influencia de forma mais significativa no aumento do módulo de deformação.

O valor do R^2 (0,5251), indica que não há uma equação que defina a correlação entre f_c e E_c para os concretos de alto desempenho estudados. Outros autores (DAL MOLIN; MONTEIRO, 1996; ZAIN; RADIN, 2000, FARIAS *et al.*, 2004) também indicam que para E_c , devido a não ocorrência de correlações significativas este deva ser ensaiado a cada utilização de CAD e que não sejam utilizadas equações matemáticas para estimá-lo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fato de que para as três propriedades mecânicas estudadas em todas as classes de CAD (60, 80 e 100 MPa) a cura ao ar (sem cura - C_0) ter apresentado os menores valores evidencia a necessidade de se promover a cura no CAD em regiões com condições ambientais semelhantes as da pesquisa, ou seja, quentes e secos.

Ressalta-se inicialmente que a condição de referência, nesta pesquisa, foi específica, ou seja, concretos sem cura colocados em ambiente seco ($h < 50\%$) e quente ($t > 25^\circ\text{C}$). Diante disto, as considerações a cerca dos resultados dos experimentos, quanto aos tipos e tempos de duração de cura ficam limitadas a esta condição.

Deve-se dizer, no entanto, que em muitas regiões do Brasil, como é o caso de Goiânia nos meses de maio a setembro, e em muitos outros locais do mundo, encontra-se, por longos períodos, esta situação climática. Desta forma, os valores encontrados aqui podem colaborar com a escolha de alternativas de cura para CAD em regiões, como por exemplo, Oriente Médio, centro da Espanha, região central norte-americana, norte africano, entre outras.

Nos experimentos realizados confirmou-se pesquisas anteriores (DAL MOLIN, 1995; ZAIN; RADIN, 2000; AİTCIN, 2000) no que se refere a influência da cura nas propriedades mecânicas do CAD, principalmente na resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

As curas úmidas (em câmara úmida e através de aspersão de água) foram as que promoveram maiores aumentos na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão. Já para o módulo de deformação a variável cura não foi significativa.

Destaca-se também a cura mista que promoveu para as propriedades mecânicas estudadas, acréscimos de valores significativos em relação à referência.

Os dois tipos de curas químicas, apesar da membrana química à base de parafina ter custo inferior à base de borracha clorada, para o caso de concreto de alto desempenho, não resultaram em acréscimos significativos de resistências, apresentando até mesmo, às vezes, valores inferiores à referência.

Quanto ao tempo de cura, no caso das curas úmidas os maiores acréscimos na resistência à compressão foi de 12,9% (CA_{14} – cura através de aspersão de água durante 14

dias), na resistência à tração na flexão de 8,9% e no módulo de deformação de 9,1% (CA₇ – cura através de aspersão de água durante 7 dias).

No caso de CAD, nas primeiras idades evidencia-se a necessidade de fornecimento de água, pois também sem esta, a água disponível para a hidratação pode ser insuficiente. A cura úmida nas primeiras idades também auxilia a prevenir a retração autógena.

De uma forma geral pode-se dizer, com base nos resultados dos experimentos, que os concretos curados através de aspersão de água por períodos entre 7 e 14 dias foram os que promoveram maiores acréscimos nas propriedades mecânicas resistência à compressão e resistência à tração na flexão, a considerar a execução de CADs moldados no local. A partir de 14 dias de cura, como pôde ser observado nos resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de deformação, o CAD já atinge altas resistências o que pressupõe baixíssima permeabilidade. Neste caso, a partir daí pouco influenciaria a cura úmida porque a água não mais conseguiria penetrar.

6.1. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Devido às limitações impostas à pesquisa bem como questões advindas dos resultados obtidos sugere-se que seja dada continuidade ao estudo da cura no concreto de alto desempenho (CAD), realizando pesquisas como:

- Influência do tipo e tempo de duração da cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em climas de baixa temperatura e alta umidade relativa do ar;
- Influência da cura do concreto de alto desempenho (CAD) nas propriedades ligadas à durabilidade;
- Influência da cura do concreto de alto desempenho em amostras de tamanho real;
- Influência da cura do concreto de alto desempenho contendo diferentes tipos de adições minerais;
- Influência da cura em CAD pré-moldado.

ANEXO A

Resultados Ensaio de Resistência à compressão

<i>Tipo de cura</i>	<i>Resistência estimada (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			
		<i>1 dia</i>	<i>3 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>
C ₀	60	24,7	43,1	48,3	58,1
		24,2	41,6	49,3	58,0
		22,7	40,1	47,6	58,4
	80	22,2	50,1	58,6	68,6
		22,4	49,6	57,1	68,6
		22,2	51,1	29,6	63,8
	100	51,8	72,5	82,7	95,7
		53,3	76,0	79,9	91,8
		51,6	68,6	79,6	93,6
CH ₁	60	-	-	-	60,9
		-	-	-	60,2
		-	-	-	57,1
	80	-	-	-	73,6
		-	-	-	74,8
		-	-	-	78,9
	100	-	-	-	93,9
		-	-	-	88,0
		-	-	-	99,9
CH ₃	60	-	-	-	62,4
		-	-	-	65,3
		-	-	-	64,4
	80	-	-	-	78,6
		-	-	-	78,2
		-	-	-	74,8
	100	-	-	-	97,0
		-	-	-	94,1
		-	-	-	96,6
CH ₇	60	-	-	-	61,7
		-	-	-	69,9
		-	-	-	63,8
	80	-	-	-	83,2
		-	-	-	78,6
		-	-	-	72,3
	100	-	-	-	98,7
		-	-	-	93,3
		-	-	-	96,0
CH ₁₄	60	-	-	-	63,8
		-	-	-	64,1
		-	-	-	66,5
	80	-	-	-	78,9
		-	-	-	68,7
		-	-	-	73,8
	100	-	-	-	98,8
		-	-	-	104,3
		-	-	-	101,6

<i>Tipo de cura</i>	<i>Resistência estimada (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			
		<i>1 dia</i>	<i>3 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>
CH ₂₈	60	27,2	43,4	50,8	53,6
		26,7	43,1	48,3	62,1
		26,9	43,6	48,3	61,8
	80	22,7	52,6	64,5	68,9
		22,9	52,8	63,3	67,9
		23,2	54,3	63,5	71,8
	100	47,8	76,1	83,2	99,1
		52,8	63,6	83,0	90,1
		50,3	73,1	69,2	86,0
CA ₁	60	-	-	-	60,5
		-	-	-	57,5
		-	-	-	59,9
	80	-	-	-	77,9
		-	-	-	77,6
		-	-	-	73,3
	100	-	-	-	86,3
		-	-	-	96,3
		-	-	-	95,1
CA ₃	60	-	-	-	59,4
		-	-	-	65,9
		-	-	-	64,8
	80	-	-	-	73,6
		-	-	-	78,1
		-	-	-	75,2
	100	-	-	-	91,5
		-	-	-	70,6
		-	-	-	94,2
CA ₇	60	-	45,9	48,6	59,1
		-	45,1	48,8	58,3
		-	46,6	45,9	63,3
	80	-	48,3	55,8	86,0
		-	50,8	55,6	80,2
		-	51,6	57,1	81,8
	100	-	67,5	69,0	92,7
		-	68,9	70,1	89,6
		-	66,4	76,7	83,7
CA ₁₄	60	-	-	-	66,5
		-	-	-	62,4
		-	-	-	66,6
	80	-	-	-	81,2
		-	-	-	77,5
		-	-	-	78,7
	100	-	-	-	102,1
		-	-	-	101,4
		-	-	-	101,8

<i>Tipo de cura</i>	<i>Resistência estimada (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			
		<i>1 dia</i>	<i>3 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>
CA ₂₈	60	-	-	-	58,5
		-	-	-	58,4
		-	-	-	60,2
	80	-	-	-	72,6
		-	-	-	79,2
		-	-	-	77,4
	100	-	-	-	94,7
		-	-	-	104,1
		-	-	-	103,1
CQ ₁	60	-	42,4	49,1	55,0
		-	43,4	46,3	66,8
		-	43,4	45,6	62,1
	80	-	52,3	62,5	56,1
		-	53,3	60,3	70,4
		-	52,3	60,1	68,0
	100	-	70,6	82,2	92,5
		-	76,6	74,9	87,4
		-	76,3	64,1	86,4
CQ ₂	60	-	43,9	48,8	57,4
		-	44,1	52,1	59,5
		-	42,4	49,3	62,0
	80	-	50,8	60,3	66,5
		-	51,1	61,8	64,7
		-	51,3	59,3	65,8
	100	-	76,4	73,0	94,4
		-	79,1	78,7	93,5
		-	77,5	72,4	100,3
CAQ	60	-	-	-	60,0
		-	-	-	64,2
		-	-	-	64,4
	80	-	-	-	74,9
		-	-	-	71,1
		-	-	-	64,5
	100	-	-	-	94,1
		-	-	-	99,3
		-	-	-	98,7

ANEXO B

Resultados Ensaio de Resistência à tração na flexão

<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à tração na flexão obtida para cada tipo de cura (MPa)</i>					
		<i>C₀</i>	<i>CH₂₈</i>	<i>CA₇</i>	<i>CQ₁</i>	<i>CQ₂</i>	<i>CAQ</i>
60	07	3,72	6,36	3,93	4,41	4,58	-
		4,48	6,28	3,80	4,11	4,12	-
	28	4,97	7,53	5,59	5,33	4,52	5,33
		4,65	7,26	5,79	5,30	5,47	5,00
80	07	4,91	7,50	5,56	4,72	4,55	-
		4,57	7,38	5,13	4,62	4,39	-
	28	5,74	8,97	5,98	5,77	6,78	6,08
		5,90	9,11	6,63	5,98	6,07	6,55
100	07	6,58	8,20	7,31	6,86	6,91	-
		7,03	8,80	7,34	6,65	6,87	-
	28	6,31	8,61	6,10	6,05	5,89	6,61
		5,96	9,23	6,09	6,09	5,76	6,16

ANEXO C

Resultados Ensaio de Módulo de Deformação

<i>Resistência estimada aos 28 dias (MPa)</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>Módulo de deformação para cada tipo de cura (MPa)</i>					
		<i>C₀</i>	<i>CH₂₈</i>	<i>CA₇</i>	<i>CQ₁</i>	<i>CQ₂</i>	<i>CAQ</i>
60	07	24,8	22,5	21,4	26,7	25,9	-
		26,4	24,8	22,3	26,0	23,9	-
		27,9	22,5	22,4	29,2	23,3	-
	28	27,6	30,4	32,9	30,0	28,3	29,3
		29,3	25,9	30,4	30,7	29,1	28,3
		28,2	30,0	31,0	29,4	29,6	27,8
80	07	23,7	25,8	28,2	29,9	27,4	-
		26,3	27,7	25,0	27,0	25,3	-
		23,3	29,3	28,5	29,0	23,9	-
	28	28,4	32,6	31,8	31,3	30,0	37,4
		32,1	33,8	34,7	30,0	42,3	29,4
		31,2	32,9	35,7	30,7	30,0	30,6
100	07	31,1	32,3	32,9	30,5	31,7	-
		30,7	35,0	30,4	29,2	27,5	-
		29,7	30,7	31,0	31,9	29,7	-
	28	35,3	33,5	34,5	32,5	32,8	34,1
		34,0	33,4	34,7	31,8	32,8	34,6
		35,0	31,8	34,1	32,9	33,1	35,4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. CD-rom: *Concreto de Alto Desempenho*, São Paulo: Nutau, 1997.
- ACITO, M.; GUERRINI, G. L. *On the correlation between the modulus of elasticity and the compressive strength in VHSC*. In: 5th International Symposium on utilization of high strength/high performance concrete – Sandefjord-Noruega, Proceedings, v. 2, 1999, 947-955.
- AGÊNCIA AMBIENTAL. Goiás. Disponível em:
<http://www.agenciaambiental.go.gov.br/geogoiias>>Acesso em: 20/01/2004.
- AGOSTINI, L. R. S.; NUNES, N. L. Método de cura para concreto de alta resistência. *Revista Ibracon*, ago/set, p. 23-30, São Paulo, 1996
- AİTCIN, P-C. Developments in the application of high-performance. *Construction and Building Materials*, v. 9, n. 1, p. 13-17, 1995.
- AİTCIN, P-C. *Concreto de alto desempenho*. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000. 660 p.
- ALBINGER, J., MORENO, J. High strength concret: Chicago style. *Concret Construction*, 26 (3), March, 1991, 241-5.
- ALMEIDA, L. E. D. *et al.* O uso do concreto convencional e alta resistência no dimensionamento de estruturas de edifícios. In: REUNIÃO DO IBRACON, 44, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 2002, CD-rom.
- ALMEIDA, I. R. *Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características*. Lisboa 1990. Tese (Doutorado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal.
- ALMEIDA, I. R. Concretos de alto desempenho: A evolução tecnológica dos concretos tradicionais. In: SEMINÁRIO FLUMINENSE DE ENGENHARIA, 1, 1992, Niterói. *Anais...* Niterói 1992, p. 113-116.
- ALVES, V. R. *Tipos de cimento e utilizações*. Goiânia, 1997. 74p. Projeto final (Título de Engenheiro Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.
- ALVES, M. F. *Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência*. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Standard practice for curing concrete – 1992. MCP, CD-ROM, p.308(1)-308(11).
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. Committee 363 R. State –of-the-art report on high-strength concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*, Detroit, 1991, part 1. 48p.

- ANDRIOLO, F. R.; SGARBOSA, B. C. São Paulo – 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Confeção e Cura de Concretos Cilíndricos e Prismáticos*. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado; procedimento*. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregado para Concretos – Especificação*. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7217: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7219: Agregado Miúdo - Teor de Materiais Pulverulentos*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Argamassas e Concretos – Determinação da Resistências à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7223: Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7251: Determinação da Massa Unitária de Agregados em Estado Solto*. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação*. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência*. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9776: Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregado Miúdo por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833: Concreto Fresco – Determinação da Massa Específica e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro, 1991.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11686: Concreto Fresco – Determinação do Teor de Ar pelo Método Pressométrico*. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto - Determinação de Resistência à Tração na Flexão em Corpos de Prova Prismáticos*. Rio de Janeiro, 1994b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13956: Sílica Ativa para uso em Cimento Portland, Concreto, Argamassa e Pastas de Cimento Portland*. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação de Absorção de Água*. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 137: Argamassa e Concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland*. Rio de Janeiro, 1997.
- BACHE, H. H. Densified cement/ultra fine particle-based materials Ottawa, June, p. 1-35, 1981.
- BALAYSSAC, J. P.; DETRICHE, C. H.; DIAFAT, N. Influence de la durée d'une cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d'usage courant. *Materials and Structures*, 30, p.284-292, 1997.
- BARBOSA, M. P., AKASAKI, J. L., ALCÂNTARA, M. A. M., SALLES, F. M., SILVA, V.M. A influência do processo de cura nas propriedades mecânicas dos concretos de elevado desempenho. In: REUNIÃO DO IBRACON, 41, 1999, Salvador. *Anais...* Salvador: 1999.
- BATTAGIN, A. F.; CURTI, R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C. Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: 2002.
- BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros – 1987.
- BAUER, R. J. F., CURTI, R., MARTINS, A., TAKASHIMA, S. Estudo de característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura. In: REUNIÃO DO IBRACON, 41, 1999, Salvador. *Anais...* Salvador: 1999.
- BITTENCOURT, R. M. *et al.* Mass Concrete Mixtures Based on Fineness Modulus and Geometrical Gradation. *Journal of Materials in Engineering*, v. 13, n. 1, p. 33-40, 2001.

- BLICK, R. L., PETERSON, C. F.; WINTER, M. E. Proportioning and controlling high-strength concrete, ACI SP-121, p.21-31, 1974.
- BUCCIN, A. G. C. *Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares*. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R. G. High reactivity metakaolin: a new generation admixture. *Concrete Int November 1994*, p. 37-40.
- CANOVAS, M. F. *Hormigon*. Madrid, 1996.
- CANOVAS, M.F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo. Ed. Pini, 1988.
- CANOVAS, M. F. Prevenir o curar?: una decisión no siempre fácil. In: Congresso Iberoamericano de Patología de las Construcciones e Congresso de Control de calidad, 50 e 70, Montevideu, 1999. *Anais...* Montevideu. 1998. v.1, p.85-92.
- CARETTE, G. G. MALHOTRA, V. M. Log-term strength development of silica fume concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SLAG AND SILICA FUME SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4. Istanbul, Turkey, 1992. *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 1017-1044 (*ACI Special Publications*, 132).
- CARRASQUILLO, P. M.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. Properties of high strength concrete subject to short-term loads. *ACI Materials Journal*, p.171-181, May/June 1981.
- CERVO, T. C., BALBO, J. T. Influência dos métodos de cura na resistência à tração na flexão de concretos de alto desempenho para pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 46, 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: 2004, CD-rom.
- CETIN, A.; CARRASQUILLO, R. L. High performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. *ACI Materials Journal*, May/Jun 1998, v. 95, n° 3, p.252-261.
- CHORINSKY, E. G. F. *Repair systems for high-strength concrete*. Chemotechnik Abstatt GmbH, w. Germany, 1990.
- COMITÉ EURO INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. Durable concrete structure, Second edition, *Boletim n.183*, 1989.
- COUTINHO, A. S. *Fabrico e propriedades do betão*. LNEC, Vol. I, 1973, 610p.
- COUTO, A. B. P. *Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

- DAL MOLIN, D. C. C. *Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica*. 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. *Estudo do Módulo de Deformação de Concretos de Alta Resistência com e sem Adições de Sílica Ativa*. In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.213-224.
- DAL MOLIN, D. C. C., VIEIRA, F. M. P., WOLF, J. *Concreto de Alta Resistência*. CD-rom: Concreto de Alto Desempenho, São Paulo: Nutau/USP, 1997.
- DORIAN, A. Tempo – *Clima mais seco dos últimos 30 anos*. Disponível em: <http://www.opopular.com.br> >Acesso em: 28/09/2004.
- ESCANDEILLAS, G.; MUNOZ, P.; PONS, G. *Traitements thermiques des bétons – Que peut-on dire du comportement des bétons à hautes performances?* Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999, p. 132-120, spécial XIX.
- FERREIRA, M. M. F.; FONTE, A. O. C.; ATHAYDE, A. Estudo comparativo entre a utilização de concretos convencionais e de alto desempenho em estrutura de edifícios altos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...*Foz do Iguaçu: 2001, CD-rom.
- GALVÃO J. C. A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; GARCIA, C. M.; JOUKOSKI, A. Desempenho elétrico e mecânico de concretos fabricados sob diferentes temperaturas de mistura e condições de cura: estudo preliminar. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, Belo Horizonte, 2002. *Anais...* Belo Horizonte: 2002.
- GEYER, A. L. B., MEIRELES, L. R., VALINOTE, O.L. Efeito da cura em concretos executados em região de baixa umidade relativa do ar ($h < 45\%$). *A Construção em Goiás*. n. 435, p. 4-8, Agosto/2003.
- GUTIÉRREZ, P. A.; CANOVAS, M. F. *The modulus of elasticity of high performance concrete*. *Materials and Structures*, 1995, nº 28, p.559-568.
- HARTMANN, C. T. *Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L. Pilares com f_c 125 MPa: recorde mundial em Concreto de alto desempenho colorido. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42, Fortaleza, 2000. *Anais...* Fortaleza, CE.2000.
- HELAND, S. High strength concrete used in highway pavements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, California, *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1990. (ACI Special Publication, 121).

- HELENE, P. R. L. Palestra: *Concreto de Alto Desempenho*. In: HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 3, 2002, Recife.
- HO, D.W.S.; CHIRGWIN, G.J. A performance specification for durable concrete *Construction and Building Materials*, v.10, n.6, p.375-379, 1996.
- HOLANDA, F. G.; VASCONCELOS, G. R. L. *Cura térmica de elementos estruturais pré-moldados na construção da hidrelétrica de Tucuruí*. In: IBRACON, 1981.
- HOWARD, N. L.; LEATHAM, D. M. The production and delivery of high-strength concrete. *Concrete International*, v.11, n.4, p.26-30, April 1989.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia .Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. “Water-entrained Cement – Based Materials, Part I”, Cement and concrete research, Vol. 31, nº 4, p. 647-654, 2000.
- KHAYAT, K. H.; AİTCIN, P. C. Sílica fume in concrete – an overview. In: International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 4., 1992, Istanbul, Turkey. *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 835-872 (ACI Special Publication, 132).
- LACERDA, C. S.; HELENE, P. Metacaulim – A nova opção para os concretos de alto desempenho. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: 2002.
- LAPLANTE, P. *Propriétés mécaniques des bétons durcissants: Analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances*. Thèse de l’ENPC. Paris, 1993.
- de LARRARD, F.; ITHURRALDE, G.; ACKER, P.; CHAWEL, D. High performance concrete for a nuclear containment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, California, *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1990. (ACI Special Publication, 121).
- de LARRARD, F.; MALIER, Y. Engineering properties of very high performance concrete. In: MALIER, Y. (editor). *High performance concrete – from material to structure*. London, E FN Spon, 1992. p. 85-114.
- LIBÓRIO, J. Concreto de alto desempenho – Uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis. *Concreto*, n. 35, p. 78-87, jun, 2004.
- LIMA, F. B. *Pilares de concreto de alto desempenho: Fundamentos e experimentação*. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- LIMA, J. M. L.; PACHA J. *Patologias das estruturas de concreto*. Disponível em: <http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/causas.htm>. Atualizado em 25/12/2001 Acesso em 14/03/2005.

- MALDONADO, N. G.; HELENE, P. R. L. HSC designed by three mixture proportioning methods? How much different are they? In: HIGH PERFORMANCE CONCRET, 3, 2002, Recife. *Proceedings...* Recife: 2002. p. 311-326.
- MALHOTRA, V. M. *et al. Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Ottawa, Canadá, 1987.
- MALHOTRA, V. M. Superplasticizers: A global review with emphasis on durability and innovative concretes. Ottawa. V. M. Malhotra Ed. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE. 3. *Proceedings*. Ottawa, 1989, p. 1-18.
- MALHOTRA, V. M.; METHA, P. K. *Pozolanic and Cementitious Materials – Advanced in Concrete Technology*. Amsterdam: OPA, 1996. Vol. 1. 171 p.
- MBT. *Soluções completas para construção*. MBT Brasil, 2003.
- MATTER, B. Concreto de Alta Resistência. *Revista IMCYC*, México, Vol. 8, nº 43, Mar/Abr. 1970, p.25-83.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MEHTA, P. K.; AÏTCIN, P-C. Principles underlying production of High-Performance Concrete. *Cement, Concrete & Aggregates*, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990.
- MINDESS, S. Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview. In: SYMPOSIUM ON VERY HIGH STRENGTH CEMENT-BASED MATERIALS, Boston, 1984, *Proceedings...* Pittsburg: MRS, 1985. p.53-68.
- MORENO, J. High-strength concrete in Chicago high-rise buildings in Concrete Structures for the future, *Proceedings of IABSE Symposium*, Versailles, Paris, IABSE-AIPC-IVBH, Zurich, ISBN 3-85748-053-1, p. 407-12, 1987.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. *Planejamento e avaliação de experimentos*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. (CE-17/87).
- NAWA, T.; EGUCHI, H.; OKKUBO, M. Effect of fineness of cement and fluidity of cement paste and mortar, *Transactions of JSCE*, 13, 199-213, 1991.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Concrete Technology*. England: *Longman Scientific & Technical*, 1987. 439 p.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini. 1997.
- OLLIVIER, J. P. *Durability of concrete*. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Urbana, 1998. (Material bibliográfico da disciplina).

- OMAR, M. Y. M.; DONIZETH, R.; FLEURY, R. H. C. G. O.; MOURO, V. C.; GEYER, A. L. B. Estudo comparativo entre a utilização de concretos convencionais e de alto desempenho em estrutura de edifícios na região de Goiânia - Goiás. *A Construção em Goiás*. n. 455, p. 04-11, abril/2005.
- O'REILLY DÍAZ, V. *Método de dosagem de concreto de elevado desempenho*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998. 122 p.
- PAPADAKIS, V. G. Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 29, p.79-86, 1999.
- PARROT, L. J. *The properties of high strength concrete*. CCA, Technical report TRA 417, 1969, 14p.
- PARROT, L.J. Influence of cement type and curing on the drying and air permeability of cover concrete, *Magazine of Concrete Research*, 47, no 171, p. 103-111, 1995.
- PEREIRA, A.C.; CUNHA, M.F.; OLIVEIRA, V. *Concreto de alto desempenho*. Goiânia, 1997. 152p. Projeto de conclusão de curso – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.
- PETERMAN, M. B.; CARRASQUILLO, R. L. *Production of high-strength concrete*. Austin: University of Texas, 1986. 278p.
- PIRES, M.M. Sistemas de escoramento e cura do concreto e sua relação com o desempenho das estruturas. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 41, Salvador, 1999. *Anais*. Salvador: 1999.
- PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. *Concreto armado: Propriedades dos materiais*. São Carlos:1986.
- PINTO, R. O. *Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para concreto de alto desempenho (CAD) empregando materiais da região de Goiânia*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B. *Aplicação de diferentes procedimentos de cura no concreto de alto desempenho (CAD)*. *A Construção em Goiás*. n. 431, p.9-13, 2003.
- RAMIRES, M. V. V. *Estudo da influência da cura na resistência à compressão em concreto de alta resistência*. Porto Alegre, 1993. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- RIPPER, E. *Como evitar erros na construção*. São Paulo: Ed. Pini, 1984.
- ROMERO, M. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. Projeto Editores Associados, São Paulo. 128p. 1988.

- RONCERO, J. *Effect of superplasticizers on the behaviour of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes*. 2000. 189 p. Tese (Doutorado) – Universitat Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- RONNEBERG, H.; SANDVIK, M. High strength concrete for North Sea Platforms. *Concrete International*, v.12, n.1, p.29-34, Jan. 1990.
- ROUGERON, P.; AİTCIN, P. C. Optimization of a high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 16, December, 115-24, 1994.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2001, 23, p. 441-454.
- SALVADOR FILHO, J. A. A., BARBOSA, M. P. Análise das propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho submetido à cura térmica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 42, 2000, Fortaleza. *Anais...* Salvador: 2000.
- SATO, N. M. N. *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. São Paulo, 1998. 163 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SERRA, G. G. A pedra artificial. *Téchne*, v. 7, n. 27, p. 12-16, mai/jun, 1997.
- SILVA, C. A. R. *Departamento de Geologia de Engenharia*. Cortesia de Furnas, 2003.
- SIMPLÍCIO, M. A. S. *Comportamento de vigas de concreto de alto desempenho com pequenos percentuais de armadura transversal*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1999.
- SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo. Ed. Pini, 1998.
- SPEGLICH, M.E.; DUCATTI, V.A. Verificação da influência do tipo de cura na resistência à compressão do concreto de alto-desempenho. In: REIBRAC, 390, 5-8 agosto 1997, São Paulo. *Anais*. São Paulo, SP.1997.v.2, p.611-626.
- SWAMY, R. N. *et al. Cement Replacment Materials*. Surrey University Press. London, 1986.
- TAN, K.; GJORV, O.E. Performance of concrete under different curing conditions. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.3, p.355-361, 1996.
- TORALLES CARBONARI, B. M. *Estúdio paramétrico de variedades Y componentes relativos a la dosificación y produccioón de hormigones de altas prestaciones*. Barcelona, 1996. 174p. Tese (Doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha.

- WEBER, S.; REINHARDT, H. W. "A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing", *Advanced Cement-Based Materials*, Vol. 6, nº 2, p. 59-68, 1997.
- WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996, 26 (10), p. 1537-44.
- ZAIN, M. F. M.; RADIN, S. S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperatura range 20°C to 50° C. *Cement and Concrete Research*, v.30, p. 1283-1287, 2000.
- ZAIN, M. F. M.; SAFIUDDIN, Md; MAHMUD, H. Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios. *Cement and Concrete Research*, v.30, p.1501-1505, 2000.