

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Civil

**CURA TÉRMICA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO:
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS UTILIZANDO O
MÉTODO DA MATURIDADE**

ENG. JOSÉ AMÉRICO ALVES SALVADOR FILHO

Ilha Solteira - SP

1210001237



**CURA TÉRMICA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO:
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS UTILIZANDO O
MÉTODO DA MATURIDADE**

ENG. JOSÉ AMÉRICO ALVES SALVADOR FILHO

1210001237



Proc. 040/2001-URD 116/01

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
<i>02/10/01</i>	<i>30/10/01</i>
REGISTRADO POR	TOMEIO
<i>Ailza</i>	<i>Te. 1237</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>hlooad ant R. 12.00</i>	

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

30101018

ORIENTADORA: Profa. Dra. Mônica Pinto Barbosa.

MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO

Ilha Solteira
Outubro de 2001



CURA TÉRMICA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO:
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS UTILIZANDO O
MÉTODO DA MATURIDADE

ENG. JOSÉ AMÉRICO ALVES SALVADOR FILHO

Salvador Filho, José Américo Alves
S182c Cura térmica dos concretos de alto desempenho : análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade / José Américo Alves Salvador Filho. Ilha Solteira, 2001
vi, 91p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Concentração : Estrutura, 2001

Orientador: Mônica Pinto Barbosa

Bibliografia: p.87-91

1.Cura térmica do concreto 2.Concreto de alto desempenho 3.Método da maturidade

**“Cura Térmica dos Concretos de Alto
Desempenho: Análise das Propriedades
Mecânicas Utilizando o Método da Maturidade”**

JOSÉ AMÉRICO ALVES SALVADOR FILHO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL (ME).

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.ª Dr.ª Mônica Pinto Barbosa – orientadora/FE/UNESP

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto - UFSC

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki – FE/UNESP

Ilha Solteira – SP, outubro de 2001

1999

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

A meus pais,

José Américo e Maria Lúcia.



AGRADECIMENTOS

A Profa. Dra. Mônica Pinto Barbosa, pela sua orientação competente e incentivadora, que muito contribuiu para a realização desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel, pelo subsídio financeiro no início desta pesquisa.

A Camargo Corrêa Cimentos, Carborundum do Brasil, Holdercim, MBT do Brasil e Pedreira Três Irmãos pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo auxílio na aquisição de equipamentos.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil – LECEC, na figura do Eng. Flávio Moreira Sales, pela troca de experiências e importantes contribuições para este trabalho.

Aos técnicos Gilberto, Michelan e Ronaldo, pela colaboração, dedicação e apoio técnico na realização do programa experimental.

Aos amigos Adriano, Aloísio, César, Claudiomiro, Cláudio, Humberto e Maria Francisca, com quem dividi bons momentos durante o curso.

A Janaina, que sempre soube me dar amor, carinho, compreensão e estímulo.

Aos meus pais, pelo apoio total e irrestrito em todas as fases da minha vida, pela educação e pelo exemplo de vida.

A todos que de alguma forma colaboraram na elaboração desse trabalho.



RESUMO

SALVADOR FILHO, J. A. A. (2001). *Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Mecânicas Utilizando o Método da Maturidade*. Ilha Solteira. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental das propriedades mecânicas de Concretos de Alto Desempenho – CAD, fabricados com diferentes adições de sílica ativa e submetidos a cura térmica a vapor.

A cura térmica é um processo utilizado para acelerar o ganho de resistência à compressão do concreto nas primeiras idades, e foi analisada em duas fases distintas. Na primeira delas, foram avaliadas as propriedades mecânicas – Resistência à Compressão (f_c), Resistência à Tração (f_t) e Módulo de Elasticidade (E_c) – de amostras de concreto cujas adições de sílica ativa variam em 0%, 8%, 10% e 12% para ciclo térmico de 5 horas a 80°C e amostras com adição de 10% de sílica ativa variando os ciclos térmicos em 5, 6, 8 e 9 horas.

Em uma segunda fase, as propriedades mecânicas das amostras com 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa foram avaliadas para ciclo térmico de 6 horas a 80°C utilizando o método da maturidade.

Os resultados obtidos permitem avaliar a aplicabilidade do método da maturidade na cura de concretos de alto desempenho. A influência da adição de sílica ativa no comportamento das propriedades mecânicas dos concretos curados termicamente foi investigada.

Palavras-Chave: Concreto de Alto Desempenho; Cura Térmica; Energia Aparente de Ativação; Método da Maturidade; Propriedades Mecânicas; Sílica Ativa.



ABSTRACT

SALVADOR FILHO, J. A. A. (2001). *Steam Curing on High-Performance Concrete: Mechanical Properties Analysis Using the Maturity Method*. Ilha Solteira. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

This work presents the results of an experimental study about mechanical properties of High Performance Concrete – HPC, manufactured with different silica fume additions and submitted to steam curing.

The steam curing is a process used to accelerate the concrete compressive strength in first ages, and it was analyzed in two different phases. At first, it were analyzed the mechanical properties - Compressive Strength (f_c), Tensile Strength (f_t) and Elasticity Modulus (E_c). It was used concrete specimens with silica fume additions vary according the values of 0%, 8%, 10% and 12% for 5 hours thermal cycles at 80°C. And also, the concrete specimens with 10% silica fume addition were submitted to thermal cycles varied into 5, 6, 8 and 9 hours.

In a second phase, the mechanical properties of the specimens with 0%, 10% and 20% of silica fume addition were analyzed for thermal 6 hours cycle at 80°C using the maturity method.

The results allow avoid the maturity method applicability on High Performance Concrete curing. The steam-cured concrete mechanical properties behavior was investigated in conditions where the influence of silica fume addiction was presents.

Keywords: High-Performance Concrete; Steam Curing; Maturity Approach; Apparent Activation Energy; Mechanical Properties; Silica Fume.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	5
2.1. RESUMO HISTÓRICO	6
2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES	7
2.2.1. <i>Cimento</i>	7
2.2.2. <i>Relação Água/Cimento - A/C</i>	8
2.2.3. <i>Aditivos</i>	9
2.2.4. <i>Adições Minerais</i>	10
2.2.5. <i>Agregados</i>	12
2.3. PROPRIEDADES DO CAD	12
2.3.1. <i>Vantagens de Utilização</i>	13
2.3.2. <i>Resistência do Concreto</i>	14
2.3.3. <i>Módulo de Elasticidade</i>	16
2.3.4. <i>Coefficiente de Poisson</i>	17
2.3.5. <i>Durabilidade</i>	18
2.4. PERSPECTIVAS DO CAD	18
3. CURA TÉRMICA DO CONCRETO	20
3.1. GENERALIDADES	20
3.2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	21
3.2.1. <i>Enrijecimento, Pega e Endurecimento</i>	22
3.3. EFEITOS DA CURA TÉRMICA	23
3.4. CONCEITO DE MATURIDADE	26
3.4.1. <i>Método da Maturidade</i>	26
3.4.2. <i>Funções de Maturidade</i>	31
3.4.3. <i>Aplicação na Construção Civil</i>	33



4. A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CAD SUBMETIDO A CURA TÉRMICA	35
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	36
4.1.1. <i>Cimento</i>	36
4.1.2. <i>Sílica Ativa</i>	37
4.1.3. <i>Superplastificante</i>	37
4.1.4. <i>Agregados</i>	37
4.2. COMPOSIÇÃO DO CONCRETO	38
4.3. CURA TÉRMICA DO CONCRETO.....	39
4.3.1. <i>Ciclo Térmico</i>	40
4.4. PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS	41
4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.5.1. <i>Resistência à Compressão – f_c</i>	44
4.5.2. <i>Resistência à Tração – f_t</i>	48
4.5.3. <i>Relação Percentual entre f_c e f_t</i>	51
4.5.4. <i>Módulo de Elasticidade – E_c</i>	53
4.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
5. O MÉTODO DA MATURIDADE NA ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD .	58
5.1. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO.....	59
5.1.1. <i>Determinação Experimental da E_a</i>	60
5.1.2. <i>Resultados Obtidos</i>	62
5.1.3. <i>Análise dos Resultados de E_a</i>	68
5.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD	70
5.2.1. <i>Programa Experimental</i>	70
5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
5.3.1. <i>Resistência à Compressão – f_c</i>	73
5.3.2. <i>Resistência à Tração – f_t</i>	75
5.3.3. <i>Módulo de Elasticidade – E_c</i>	77
5.3.4. <i>Coefficiente de Poisson – μ</i>	80
5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
6.1. CONCLUSÕES	83
6.2. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO	85
7. BIBLIOGRAFIA	87
7.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
7.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	91



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Zona de Transição Pasta-Agregado.....	11
Figura 4.1: Câmara de Cura Térmica.....	40
Figura 4.2: Tubulação Interna do Aparelho de Cura Térmica	40
Figura 4.3: Ciclo térmico.....	41
Figura 4.4: Ensaio de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson	42
Figura 4.5: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa	45
Figura 4.6: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa.....	46
Figura 4.7: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa.....	47
Figura 4.8: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos Apenas a Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa.....	47
Figura 4.9: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa.....	49
Figura 4.10: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa	49
Figura 4.11: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD - Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa.....	51
Figura 4.12: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa.....	51
Figura 4.13: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidos a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa.....	54
Figura 4.14: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa	54
Figura 4.15: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD - Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa.....	55
Figura 4.16: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa.....	56
Figura 5.1: Ruptura dos CPs Cúbicos 5x5x5 cm	61



Figura 5.2: Amostras de Argamassa Colocadas em Banho Térmico	61
Figura 5.3: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-0	64
Figura 5.4: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-0.....	65
Figura 5.5: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-10.....	65
Figura 5.6: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-10.....	65
Figura 5.7: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-20.....	66
Figura 5.8: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-20.....	66
Figura 5.9: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-0	67
Figura 5.10: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-10	68
Figura 5.11: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-20	68
Figura 5.12: Novo Aparelho de Cura Térmica	70
Figura 5.13: Testemunhos para Controle da Temperatura de Cura.....	72
Figura 5.14: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Resistência à Compressão.....	74
Figura 5.15: Comportamento da Resistência à Compressão Durante a Cura Térmica.....	74
Figura 5.16: Resistência à Compressão versus Idade Equivalente a 80°C.....	75
Figura 5.17: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Resistência à Tração.....	76
Figura 5.18: Comportamento da Resistência à Tração Durante a Cura Térmica	77
Figura 5.19: Resistência à Tração versus Idade Equivalente a 80°C.....	77
Figura 5.20: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Módulo de Elasticidade	78
Figura 5.21: Comportamento do Módulo de Elasticidade durante a Cura Térmica.....	79
Figura 5.22: Módulo de Elasticidade versus Idade Equivalente a 80°C	79
Figura 5.23: Comportamento do Coeficiente de Poisson durante a Cura Térmica	81
Figura 5.24: Coeficiente de Poisson versus Idade Equivalente a 80°C.....	81



LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: DIFERENTES CLASSES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	15
TABELA 4.1: CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO UTILIZADO.....	36
TABELA 4.2: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA UTILIZADA.....	37
TABELA 4.3: CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO.....	38
TABELA 4.4: CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO.....	38
TABELA 4.5: COMPOSIÇÃO DOS CONCRETOS ANALISADOS.....	38
TABELA 4.6: N.º DE CPs MOLDADOS NOS ENSAIOS.....	43
TABELA 4.7: RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CAD SUBMETIDO A DIFERENTES TIPOS DE CURA COM VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SÍLICA ATIVA.....	44
TABELA 4.8: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CAD COM 10% DE SÍLICA ATIVA SUBMETIDO A CURA ÚMIDA E A DIFERENTES CICLOS DE CURA TÉRMICA.....	46
TABELA 4.9: RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DO CAD SUBMETIDO A DIFERENTES TIPOS DE CURA COM VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SÍLICA ATIVA.....	48
TABELA 4.10: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CAD COM 10% DE SÍLICA ATIVA SUBMETIDO A CURA ÚMIDA E A DIFERENTES CICLOS DE CURA TÉRMICA.....	50
TABELA 4.11: RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE F_c E F_T DO CAD SUBMETIDO A CURA ÚMIDA E CURA TÉRMICA COM VARIAÇÃO DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA.....	52
TABELA 4.12: RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE F_c E F_T DO CAD COM 10% DE SÍLICA ATIVA SUBMETIDO A CURA ÚMIDA E CURA TÉRMICA COM VARIAÇÃO DA DURAÇÃO DO CICLO.....	52
TABELA 4.13: MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CAD SUBMETIDO A DIFERENTES TIPOS DE CURA COM VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SÍLICA ATIVA.....	53
TABELA 4.14: MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CAD COM 10% DE SÍLICA ATIVA SUBMETIDO A CURA ÚMIDA E A DIFERENTES CICLOS DE CURA TÉRMICA.....	55
TABELA 5.1: TRAÇOS DE ARGAMASSA ANALISADOS.....	61
TABELA 5.2: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES ISOTÉRMICAS DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA ANALISADOS.....	63
TABELA 5.3: VALORES DA TAXA CONSTANTE – K – OBTIDOS PARA OS MODELOS ANALISADOS.....	64
TABELA 5.4: VALORES DE ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO PARA OS MODELOS ANALISADOS.....	66
TABELA 5.5: VALORES DE ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO ADOTADOS.....	69
TABELA 5.6: TRAÇOS DE CAD ANALISADOS.....	71



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	- Associação Brasileira do Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- American Concrete Institute
ARI	- Alta Resistência Inicial
ASTM	- American Society for Testing Materials
BHP	- Beton de Hautes Performances
CAD	- Concreto de Alto Desempenho
CAR	- Concreto de Alta Resistência
CEB	- Comitê Euro-International du Beton
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
CP	- Corpo de Prova
FEIS	- Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira
FHP	- Freiesleben-Hansen e Pederson
HPC	- High-Performance Concrete
IBRACON	- Instituto Brasileiro do Concreto
LECEC	- Laboratório CESP de Engenharia Civil
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	- Norma Brasileira
NIST	- National Institute of Standards and Technology
NR	- Norma Regulamentadora
UNESP	- Universidade Estadual Paulista



LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Fator de Frequência
A/A	- Relação Água/Aglomerantes
A/C	- Relação Água/Cimento
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
E	- Energia de Ativação
Ea	- Energia Aparente de Ativação
E_c	- Módulo de Elasticidade
f_c	- Resistência à Compressão
f_{c∞}	- Resistência Última à Compressão
f_r	- Módulo de Ruptura
f_t	- Resistência à Tração
k	- Taxa Constante
M	- Fator de Maturidade
pH	- Potencial Hidrogênio
R	- Constante Universal dos Gases
t	- Idade
t₀	- Idade em que Inicia o Desenvolvimento da Resistência
t_e	- Idade Equivalente
T	- Temperatura
T₀	- Temperatura de Base
T_a	- Temperatura Média
T_r	- Temperatura de Referência
μ	- Coeficiente de Poisson



1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland, material definido como mistura de aglomerante hidráulico, agregados e água, já vem sendo usado a quase dois séculos, embora a preocupação quanto as suas características mecânicas só tenha se intensificado no século XX. São essas características, sobretudo a resistência à compressão, que dão parâmetros ao dimensionamento estrutural do concreto armado.

O aprimoramento das características dos materiais constituintes do concreto levou nas últimas décadas a uma tendência internacional de se produzir concretos estruturais com resistências à compressão cada vez maiores, mas também com durabilidade superior em ambientes agressivos. O concreto com essas características, definido como Concreto de Alto Desempenho – CAD, tem composição semelhante à dos concretos comuns, diferenciado pela baixa relação água/cimento – *A/C* – e pela adição de aditivos minerais, como a sílica ativa, e pela adição de aditivos químicos, denominados superplastificantes.

As propriedades mecânicas do concreto são de grande importância na correta proporção das seções projetadas e no estudo de seu comportamento estrutural. Além da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, deve-se dar atenção à resistência à tração. Sabe-se que as fissuras só ocorrem quando as tensões excedem o limite de resistência à tração. Diminuir a abertura de fissuras é uma preocupação dos construtores e projetistas, pois estas facilitam a penetração dos agentes agressivos que podem comprometer a durabilidade da estrutura e por reduzir a área útil da peça quando submetida a tensões de flexão. Além disso, um grande número de parâmetros de dimensionamento está



relacionado com a resistência à tração do concreto, entre eles a armadura mínima de flexão, cisalhamento e tração.

Outra propriedade mecânica que deve ser levada em consideração é o módulo de elasticidade do concreto. Ele é um fator básico no cálculo de perdas de protensão, da tração de pilares esbeltos e no cálculo de deformações das estruturas de concreto.

O interesse no estudo dos efeitos da cura térmica nas propriedades mecânicas do Concreto de Alto Desempenho - CAD - surge a partir da evolução dos materiais constituintes do concreto e dos métodos de produção da construção civil.

A cura térmica é uma técnica que usualmente é utilizada na produção de peças pré-moldadas em larga escala. O uso desta técnica deve ser estudado e avaliado de maneira que seus efeitos nas propriedades do CAD resultem em um material confiável. A execução de elementos pré-moldados envolve atividades, tais como preparação dos moldes, montagem da armadura, lançamento e adensamento do concreto, acabamento, cura do concreto e desmoldagem. Em todo o processo de produção, a cura do concreto se mostra como a atividade mais demorada, recebendo assim a denominação de “tempo morto” (de Melo, 1996).

De modo geral, a cura é realizada na produção de peças pré-moldadas por meio de aspersão, imersão em tanques com água, processos de cura térmica ou cura química com a impermeabilização das superfícies com pintura.

Para reduzir o chamado “tempo morto” na pré-fabricação é necessário acelerar a cura do concreto lançado nos moldes. Isso pode ser feito de várias maneiras: utilizando cimentos de alta resistência inicial – ARI; aditivos aceleradores; e sobretudo, associando-se o acréscimo de temperatura – cura térmica. Eventualmente, tem sido interessante combinar o uso do cimento ARI com o acréscimo de temperatura, ou seja, aplicando a cura térmica (de Melo, 1996). Este último procedimento é muito utilizado na produção de peças pré-moldadas, onde procura-se liberar o molde e a peça pré-fabricada o mais rápido



possível para que o processo de produção inicie novamente. Por essa razão, a cura do concreto assume grande importância, determinando o tempo de ocupação dos moldes.

No caso de processos que incrementam a temperatura para acelerar a cura do concreto, deve-se considerar o perigo da evaporação de parte da água necessária à hidratação do cimento, a qual pode provocar microfissuração. Este fato, quando não devidamente equacionado pode tornar o processo ineficaz, não se atingindo o objetivo inicial, qual seja, acelerar a cura do concreto e reduzir o tempo para desforma com garantia de qualidade do produto.

As vantagens oferecidas pela utilização da cura térmica devem ser comparadas com os efeitos provocados às propriedades do CAD a longo prazo. Se por um lado existem as vantagens de se obter uma resistência mínima para desforma, manuseio ou utilização mais cedo, por outro, este tipo de cura provoca alguns efeitos no concreto, a saber: alterações na microestrutura do concreto; aumento da porosidade; e menor potencial de resistência à compressão.

Estudar o efeito da cura térmica nas propriedades mecânicas do Concreto de Alto Desempenho foi então objetivo principal deste trabalho experimental, elaborado em duas etapas. Numa primeira etapa, estudou-se o efeito da adição de porcentagens diferentes de sílica ativa na composição do concreto, variando-se o tempo de cura. Na segunda fase, avaliou-se esse mesmo efeito utilizando o método da maturidade.

O método da maturidade foi desenvolvido na década de 50 para estimar o efeito da temperatura de cura do concreto na sua resistência à compressão. Atualmente, vem sendo empregado para avaliação do tempo necessário para desforma, aplicação de cargas de protensão ou de construção, entre outras atividades construtivas. Porém, este método pode modelar qualquer propriedade física ou mecânica relacionada ao grau de hidratação do cimento além de estimar somente a resistência à compressão. (Pinto, 2000)



1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Faz-se neste item uma apresentação sucinta do conteúdo referente a cada capítulo. Os capítulos foram organizados objetivando-se a compreensão dos conceitos abordados e do assunto a ser discutido.

Assim, no capítulo 2 apresentam-se algumas considerações sobre o concreto de Alto Desempenho, de seus materiais constituintes, de suas propriedades mecânicas e durabilidade, e perspectiva de sua aplicabilidade na construção civil com base em bibliografia publicada nos últimos anos.

O capítulo 3 traz em seu conteúdo considerações sobre a cura térmica, sua influência nas reações de hidratação do cimento, as vantagens de sua utilização e efeitos no concreto. Também é apresentado neste capítulo um breve histórico do método da maturidade e sua utilização na análise do desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto.

A primeira fase do estudo das propriedades mecânicas do CAD está apresentada no capítulo 4. Nele foram descritos o programa experimental desenvolvido e os resultados obtidos para análise das propriedades mecânicas do CAD – Resistência à Compressão - f_c , Resistência à Tração - f_t - e Módulo de Elasticidade - E_c , dos concretos elaborados com variação de sílica ativa em 0%, 8%, 10% e 12%, para ciclos térmicos variando entre 5, 6, 8 e 9 horas.

No capítulo 5 as propriedades mecânicas do CAD foram avaliadas sob a luz do conceito da maturidade. Foram estudados concretos com adições de sílica ativa variando em 0%, 10% e 20 %, submetidos a ciclos térmicos de 6 horas a 80°C. Neste estudo, os resultados foram analisados em termos de idade equivalente, segundo modelo proposto por Freiesleben-Hansen e Pederson – FHP. Para tanto, foi determinada a Energia Aparente de Ativação – E_a – da argamassa dos concretos ali estudados.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as considerações finais dos resultados obtidos e as propostas para o prosseguimento de pesquisas nessa área.



2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Problemas decorridos em infra-estruturas feitas de concretos usuais, que em geral não cumprem sua vida útil, deram maior destaque a concretos de maior durabilidade nas últimas décadas. Este quadro fez com que a durabilidade seja o problema mais representativo dos concretos usuais. Assim, tornou-se necessário projetar concretos com maior durabilidade em ambientes agressivos sem deterioração prematura.

Isto se tornou possível com o aprimoramento das características dos materiais constituintes do concreto, que o levou a atingir resistências mais elevadas, durabilidade superior em condições ambientais severas e uma boa trabalhabilidade. Estas propriedades caracterizam o Concreto de Alto Desempenho – CAD, cuja resistência elevada é decorrente da relação água/cimento – A/C – reduzida e da utilização de materiais cimentantes adicionais, tipicamente usados para produzir um material mais durável.



2.1. RESUMO HISTÓRICO

O concreto de cimento Portland é utilizado como material de construção civil desde meados do século XIX, e os primeiros edifícios em concreto armado foram construídos há pouco mais de um século. Os concretos de alta resistência - CAR - surgiram na década de 50 e sua definição tem mudado ao longo dos anos. Neste período, concretos com resistência à compressão de 34 MPa eram considerados de alta resistência. Nos anos 60, concretos com resistência de 41 MPa a 52 MPa eram usados comercialmente e na década de 70 já se produzia concreto com 62 MPa (Flor, 1994).

O Concreto de Alto Desempenho - CAD - surgiu como uma evolução tecnológica dos concretos, fruto da pesquisa aplicada e resultado da introdução conjunta, dentre as matérias primas básicas dos concretos, de superplastificantes e, principalmente, da sílica ativa.

Os superplastificantes foram utilizados pela primeira vez no início da década 70 na Alemanha e Japão com a finalidade de aumentar a fluidez do concreto. Inicialmente, estes materiais eram utilizados para facilitar o lançamento do concreto sem riscos de segregação e perda de resistência que ocorre quando se adiciona mais água no concreto. Durante os anos 80, com a utilização de dosagens superiores às recomendadas, foi descoberta a possibilidade de se reduzir a relação água/cimento - A/C - até 0,30 e obter abatimento inicial de 200 mm (Aïtcin, 2000).

No fim da década de 70, iniciou-se a utilização da sílica ativa na Escandinávia como material cimentício suplementar. Este material começou a ser usado desta forma na América do Norte apenas na década de 80 (Aïtcin, 2000). A sílica ativa, que, devido sua ação pozolânica, teor de sílica e seu pequeno diâmetro, confere maior resistência e durabilidade ao concreto, se tornou popular entre os construtores e fabricantes na produção do CAD.



2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES

A produção de Concretos de Alto Desempenho - CAD - é possível devido o aperfeiçoamento dos materiais constituintes, tais como os aditivos minerais - sílica ativa - e químicos - superplastificantes - adicionados em sua composição. A adição da sílica ativa vem sendo usada para melhorar as propriedades do concreto, tais como a resistência à compressão, a resistência à abrasão e durabilidade. As partículas extremamente finas da sílica ativa reduzem a exsudação, de modo que não permitem o aprisionamento de água sob as partículas maiores de agregado graúdo. Em consequência, fica reduzida a porosidade na zona da interface pasta-agregado. A reação subsequente da sílica ativa resulta uma menor porosidade do concreto (Neville, 1997), conforme descrito no item 2.2.4. O uso de aditivos plastificantes surge como alternativa válida para compatibilizar os efeitos opostos da relação *A/C* reduzido na trabalhabilidade e resistência do concreto. As propriedades do CAD também dependem das características do cimento utilizado e da qualidade de seus agregados.

2.2.1. Cimento

Mehta e Aïtcin (1990) comentam que com qualquer tipo de cimento é possível produzir concretos de alta resistência, sendo preferível, no entanto, o cimento Portland comum e aqueles com elevados teores de silicatos.

Deve ser feita uma seleção cuidadosa do tipo de cimento para a produção do CAD. Quando se trata de cimento Portland, não são todos os tipos de cimento que apresentam as características necessárias para atender as necessidades de projeto. Pode-se selecionar cimentos com quantidades maiores de silicato tricálcico - C_3S - em sua composição, como também cimento com adições para melhorar sua durabilidade tais como escória, pozolana, cinza volante, filer, entre outros.



Devido a maior quantidade de cimento na composição do CAD, deve-se optar por cimentos que atendam as condições reológicas para uma boa trabalhabilidade do material (Aïtcin, 2000).

2.2.2. Relação Água/Cimento - A/C

A relação água/cimento - A/C - é de grande importância, pois a resistência inicial e a permeabilidade do concreto em endurecimento são quase que inteiramente função das ligações criadas pela hidratação inicial do cimento Portland contido no aglomerante (Aïtcin, 2000).

A água é um dos principais componentes do concreto por ser responsável pela reologia do material em estado fresco e por produzir as reações de hidratação simultaneamente. A condição ideal para o concreto seria adicionar somente água suficiente para desenvolver sua resistência máxima. Porém, com os materiais disponíveis, não é possível atender as necessidades de trabalhabilidade para o lançamento com essa quantidade de água. Qualquer quantidade de água adicional utilizada para aumentar a trabalhabilidade do concreto não será ligada ao cimento, causando porosidade de sua pasta e prejudicando as propriedades mecânicas e a durabilidade.

O CAD atende não somente à condição de alta resistência mecânica mas também de durabilidade, uma vez que é um concreto executado com baixa relação A/C. Este é um fator chave no controle da porosidade e da permeabilidade de um concreto e conseqüentemente da sua durabilidade. Porém, a utilização da relação A/C muito baixa somente é possível com a adição de aditivos redutores de água - superplastificantes - para manter a trabalhabilidade do concreto.



2.2.3. Aditivos

Para proporcionar ao concreto diversas melhorias, sejam físicas ou econômicas, são usados os aditivos. Os aditivos podem ser definidos como produtos químicos que, exceto em casos especiais, são adicionados à mistura de concreto. Geralmente adiciona-se teor não maior do que 5% em relação à massa de cimento durante a mistura ou durante a mistura complementar antes do lançamento do concreto com finalidade de se obterem modificações específicas, ou modificações das propriedades normais do mesmo (Neville, 1997). As finalidades para as quais os aditivos são geralmente empregados no concreto incluem melhora da trabalhabilidade, aceleração ou redução do tempo de pega, controle do desenvolvimento da resistência, e melhora da resistência à ação do gelo, à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado, e à soluções ácidas e sulfatadas (Metha e Monteiro, 1994)

Nos Concretos de Alto Desempenho são utilizados aditivos superplastificantes, que são redutores de água com efeito muito mais intenso que os plastificantes normais.

Os aditivos superplastificantes são relativamente novos, pois surgiram a partir da década de 70. Com eles, foi possível avançar na tecnologia do concreto e dosagem do CAD. Esses aditivos permitem elaborar concretos com baixíssimo teor de água. A redução considerável da quantidade de água, com conseqüente redução no fator A/C , no concreto provoca um conseqüente aumento de sua resistência.

Existem quatro categorias principais de superplastificantes:

- Condensados sulfonados de melamina-formaldeído - Melamínicos;
- Condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos - Naftalenos;
- Condensados de lignossulfatos modificados - Lignosulfonatos;
- Poliacrilatos.

Os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente, usando um processo complexo de polimerização. Têm baixo teor



de impurezas, de modo que, mesmo em dosagens elevadas, não apresentam efeitos colaterais prejudiciais.

O principal efeito das moléculas de superplastificante é o de se enrolarem em volta das partículas de cimento, conferindo-lhes uma carga altamente negativa de modo que elas passam a se repelir. Isto resulta numa defloculação e dispersão das partículas de cimento (Neville, 1997), e conseqüente aumento da trabalhabilidade.

2.2.4. Adições Minerais

As adições minerais são materiais misturados ao cimento Portland que contribuem com o aumento da resistência do concreto. Algumas adições possuem propriedades cimentícias por si só, outras têm propriedades cimentícias latentes, outras contribuem para a resistência do concreto por meio de seu comportamento físico. A maioria das adições minerais possuem em sua composição alguma forma de sílica vítrea reativa que, na presença de água, pode combinar com a cal proveniente das reações de hidratação, formando silicato de cálcio hidratado, C-S-H, principal elemento do concreto endurecido.

Como exemplos de adições minerais mais importantes, pode-se citar a pozolana, a sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, entre outras. A contribuição dessas adições para o concreto é promover a redução da porosidade proporcionada pela reação pozolânica e pelo efeito de microfíler. Outras vantagens observadas são a facilidade em se obter resistências mais elevadas, diminuição das dosagens de aglomerantes e redução significativa na permeabilidade.



Sílica Ativa

A sílica ativa - SiO_2 - é um produto mineral extraído da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. Possuem forma de partículas esféricas extremamente pequenas, e seu pequeno tamanho acelera as reações com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido na hidratação do cimento Portland.

Por ser extremamente fina, a sílica ativa tem uma massa unitária muito baixa, em torno de 200 kg/m^3 a 300 kg/m^3 . Em geral, as partículas de sílica ativa tem diâmetro menor que $0,1 \mu\text{m}$ (Neville, 1997).

A sílica ativa, quando adicionada ao cimento, age ativamente em concretos e argamassas, conferindo-lhes alta resistência, baixa permeabilidade, e, por conseqüência, maior durabilidade. Em certos casos, o uso da sílica ativa permite outros benefícios como a redução da exsudação e a melhoria da coesão da mistura.

Em decorrência da redução da exsudação, a sílica ativa não permite a presença de água aprisionada em torno das partículas maiores de agregado graúdo. Desta forma, fica reduzida a porosidade na zona de interface, em relação ao que ocorre com um concreto sem sílica ativa. Segundo Neville (1997), a reação subsequente da sílica ativa resulta numa porosidade ainda menor na região da interface, que em conseqüência deixa de ser a mais suscetível quanto à resistência e à permeabilidade, como mostra a figura 2.1.



Figura 2.1: Zona de Transição Pasta-Agregado

Fonte: Camargo Corrêa Cimentos

2.2.5. Agregados

A seleção do agregado graúdo na composição do CAD ganha grande importância à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta. A resistência da argamassa dos concretos usuais é menor que a resistência do agregado graúdo, assim, a resistência do agregado não é de grande importância para esses tipos de concreto. Porém, a resistência do agregado utilizado no CAD pode ser da mesma ordem de grandeza ou até menor que a resistência de sua argamassa, tornando o agregado graúdo o elo mais fraco do concreto, onde a ruptura se iniciará sob uma alta tensão. Além da resistência dos agregados, a interface entre os agregados e a argamassa pode ser afetada por fatores relativos ao agregado, tais como a textura superficial, formato e granulometria. Estes fatores alteram o nível de tensão ao qual as microfissuras iniciam, o que afeta o módulo de elasticidade, a forma da curva de tensão-deformação e a resistência à compressão do CAD (Aïtcin, 2000).

A seleção dos agregados graúdos deve ser feita depois de um exame cuidadoso da mineralogia e da petrografia, para assegurar que todas as partículas são resistentes o suficiente para evitar a ruptura precoce do CAD (Aïtcin, 2000). Também é importante que os agregados estejam limpos, de forma que aumente a resistência na zona de transição pasta-agregado.

A seleção do agregado miúdo não interfere significativamente nas propriedades do CAD. Porém, segundo Aïtcin (2000), como a grande quantidade de finos e materiais aglomerantes utilizadas no CAD impede a segregação, o módulo de finura do agregado miúdo pode ser maior, diminuindo a quantidade de água necessária para a mistura.

2.3. PROPRIEDADES DO CAD

O comportamento de concreto endurecido pode ser caracterizado por suas propriedades mecânicas e durabilidade. Propriedades relativas ao comportamento



mecânico do concreto incluem a Resistência à Compressão - f_c , Resistência à Tração - f_t , Módulo de Elasticidade - E_c - e Coeficiente de Poisson - μ , resistência à fadiga e ao cisalhamento. A evolução ocorrida nas características mecânicas dos concretos vem também, e principalmente, acompanhada de uma evolução positiva nas demais propriedades, especialmente aquelas relacionadas à durabilidade. A durabilidade está diretamente ligada à permeabilidade, que no CAD pode ser 10.000 vezes inferior à permeabilidade dos concretos usuais (Helene, 1997). O CAD apresenta também menor permeabilidade, resistência ao desgaste gelo-degelo, resistência à abrasão, assim como menor carbonatação, retração e difusão de cloretos.

2.3.1. Vantagens de Utilização

O CAD é um material com resistência à compressão muito superior à dos concretos usuais, o que proporciona uma grande redução da dimensão dos elementos estruturais, principalmente dos pilares. Isso permite projetos com áreas úteis mais amplas, principalmente nos térreos e subsolos onde os pilares apresentam as cargas mais elevadas.

O CAD bem proporcionado pode apresentar boa trabalhabilidade, mesmo com baixa relação A/C , o que possibilita concretagens mais fáceis, mesmo com fôrmas complexas, peças esbeltas ou armaduras muito densas. As características reológicas do CAD permitem também este ser lançado por bombeamento.

A durabilidade pode ser citada como uma das principais vantagens da utilização do CAD. Como o CAD exige menor manutenção no sentido de controlar o processo de carbonatação da matriz e de oxidação das armaduras, este material permite o emprego de estruturas de concreto aparente. As superfícies aparentes do CAD são menos porosas, reduzindo a absorção de umidade e a formação de fungos, assim como mantendo por muito mais tempo o aspecto original. A menor permeabilidade confere maior proteção às armaduras evitando o aparecimento de óxido de ferro na superfície (Serra, 1997).



Dentre as vantagens da utilização do CAD, as principais são:

- Maior durabilidade;
- Ganho de área útil;
- Redução do peso total da estrutura;
- Redução do número de pilares;
- Redução global no custo da obra.

Estas vantagens tornaram a utilização do concreto um material viável em projetos onde apenas era possível o uso de estruturas metálicas ou protendidas.

2.3.2. Resistência do Concreto

A resistência do concreto depende de vários fatores inclusive as propriedades e proporções de seus materiais constituintes, grau de hidratação, entre outros.

As propriedades dos materiais constituintes que afetam a resistência são a qualidade do agregado graúdo, da argamassa e as características da interface pasta-agregado - propriedades interfaciais, ou zona de transição. Estas propriedades, no entanto, dependem das características estruturais microscópicas como a porosidade total, tamanho e formato dos poros, distribuição dos vazios e morfologia dos produtos de hidratação, além da ligação entre os componentes sólidos.

Resistência à Compressão

Nas primeiras idades, o CAD pode atingir resistências elevadas, podendo-se encontrar na literatura composições de CAD que alcançam resistências em torno de 30 MPa com um dia de idade, submetido a condições de cura especificados por norma (Meneghetti et al, 1999; Pinto, 1997). Por outro lado,



difícilmente o CAD desenvolve resistências necessárias para as atividades construtivas antes de 12 horas, por exemplo, a temperatura ambiente. Este fato possivelmente ocorre devido à adição de superplastificantes em altos teores, que retardam as reações iniciais de hidratação do concreto, retardando a pega. Segundo Uchikawa et al (1992, apud Meneghetti, 1999), os superplastificantes a base de naftaleno podem interagir com o C_3A e diminuir substancialmente a taxa de hidratação superficial inicial. Porém, uma vez iniciadas, estas ocorrem de maneira muito rápida.

A longo prazo, a resistência à compressão do CAD é influenciada diretamente pelos materiais selecionados para sua composição, fazendo que esta propriedade varie entre 50 MPa até, em certos casos, acima de 250 MPa (Aïtcin, 2000).

A tabela 2.1 mostra as diferentes classes de CAD, onde a classe I abrange resistências entre 50 MPa e 75 MPa, a classe II 75 MPa e 100, a classe III 100 MPa e 125 MPa, a classe IV 125 MPa e 150 MPa e a classe V refere-se ao CAD com resistências acima de 150 MPa. Estas resistências correspondem aos valores obtidos em corpos de prova - CPs - 100 x 200 mm aos 28 dias curados sob condições de norma. Os limites propostos, usados para definir essas cinco classes, não deveriam ser considerados absolutos, mas limites médios que podem apresentar pequena variação de um lugar para outro (Aïtcin, 2000).

Tabela 2.1: Diferentes Classes do Concreto de Alto Desempenho.

Resistência à Compressão - MPa	50	75	100	125	150
Classe do Concreto de Alto Desempenho	I	II	III	IV	V

Fonte: Aïtcin (2000)

Assim como para os concretos usuais, a resistência à compressão do CAD aumenta à medida que a relação A/C diminui. Porém, quando os agregados graúdos não são mais resistentes o suficiente em comparação com a resistência da pasta de cimento hidratado, a resistência à compressão do CAD não aumenta significativamente à medida que a relação A/C diminui. Neste caso, a única



maneira de aumentar a resistência desse CAD é, por conseguinte, trocar o tipo de agregado graúdo (Aitcin, 2000).

Resistência à Tração

A resistência à tração, em certos casos, rege o comportamento da ruptura do concreto e afeta algumas propriedades tais como a rigidez, aderência aço-concreto, e a durabilidade. Também é de importância com respeito ao comportamento de concreto sob tensões cisalhantes. A determinação da resistência à tração do concreto pode ser realizada pelos ensaios de tração direta - tração axial - ou de tração indireta. Esta última pode ser determinada pelo teste de tração por compressão diametral, também chamada "*brazilian test*" ou fendilhamento - f_t , e pelo ensaio de tração na flexão, também denominado módulo de ruptura - f_r .

Silva et al (2001) realizou um programa experimental extenso para estudar as propriedades mecânicas do CAD. Os concretos investigados apresentaram resistência à compressão, entre 80 a 95 MPa aos 28 dias, para concretos com abatimento de 20 ± 2 cm e relação água/aglomerante - A/A - igual a 0,29. A resistência à tração na flexão, aos 28 dias, variou de cerca de 8 a 10 MPa e a resistência à tração por compressão diametral ficou em torno de 5 MPa, na mesma idade.

2.3.3. Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade do concreto é bastante influenciado pelas propriedades da pasta de cimento e pela rigidez dos agregados utilizados. O CAD tem certas características que são bastante relacionadas a estes fatores, como por exemplo, a baixa relação água/aglomerantes e uma melhor seleção dos agregados utilizados. Devido a isto, segundo o Bulletin d'Information do CEB 197 (1990, apud Simplício, 2000), algumas expressões que fornecem o módulo de



elasticidade devem ser reexaminadas. Algumas pesquisas realizadas neste sentido concluíram que as expressões empregadas por diversos códigos e normas são conservadoras quando aplicadas a concreto de alto desempenho (Simplício, 2000). A maioria das expressões empregadas para o cálculo do módulo de elasticidade são baseadas apenas na resistência à compressão do concreto, sem levar em consideração os demais fatores influentes, por isto, torna-se necessário verificar a validade destas expressões aplicadas ao CAD, embora as normas européias e americanas já limitem as formulações apresentadas, e, em certos casos, apresentam novas equações para o CAD.

2.3.4. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson sob condições de carregamento uniaxial é definido como a relação entre as deformações longitudinais e transversais do concreto. A aplicação de uma carga de compressão provoca deformações laterais de tração, que são associadas à ruptura do concreto. Para um material isotrópico com comportamento elástico linear, o coeficiente de Poisson é constante, mas, no concreto, pode ser influenciado por condições específicas. No entanto, para tensões para as quais é linear a relação entre a tensão aplicada e a deformação longitudinal, o valor do coeficiente de Poisson é aproximadamente constante (Neville, 1997).

São encontrados dados limitados sobre o coeficiente de Poisson do concreto em geral e do CAD em particular. Em geral, o coeficiente de Poisson do CAD é semelhante aos valores atingidos pelos concretos usuais - 0,15 a 0,20 (Zia et al, 1997). Segundo Aitcin (2000), existem poucos registros do coeficiente de Poisson na literatura devido aos diversos parâmetros envolvidos no ensaio, e os valores encontrados na literatura variam desde 0,18 a 0,32 para o CAD. Resultados obtidos por Persson (1999) indicam que o coeficiente de Poisson do CAD é ligeiramente menor que o dos concretos usuais. Os valores obtidos variaram entre 0,13 e 0,16 para o CAD com adições de 5% a 10% de sílica ativa.



2.3.5. Durabilidade

A menor permeabilidade do CAD torna-o resistente ao ataque por agentes externos. Há ainda indícios de que os poros remanescentes sejam menos contínuos, mais segmentados ou obstruídos, o que confere com a baixa permeabilidade dos CAD (Almeida, 1997). Devido a baixa porosidade e permeabilidade, o CAD é um material com maior resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, o fato que favorece a resistência contra a corrosão das armaduras.

Da mesma forma, o CAD também apresenta maior resistência a carbonatação, por dificultar o ataque de agentes agressivos gasosos como o CO_2 . A baixa permeabilidade também impede que a água penetre no concreto, limitando a mobilidade de íons, o que torna o CAD mais resistente ao risco de reação álcali-agregado. A resistência à abrasão do CAD é maior que a dos concretos convencionais, não somente devido à alta resistência do concreto, mas também devido à boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz, que impedem o desgaste diferencial da superfície (Neville, 1997).

Estas características tornaram o CAD um material procurado pela maior durabilidade, e não somente pela elevada resistência mecânica, como poderia ser esperado.

2.4. PERSPECTIVAS DO CAD

As vantagens oferecidas pela utilização dos concretos de Alto Desempenho e a maior disponibilidade de seus materiais constituintes tornaram este material uma realidade na construção civil, proporcionando uma série de benefícios.

Além das vantagens técnicas já apresentadas anteriormente, sabe-se que a aplicação do CAD pode diminuir o custo global das obras. Um estudo de viabilidade econômica, realizado por (Dal'Molin, et al, 1997), apresentou uma



tendência de redução de custos com o aumento da resistência do concreto, chegando a 12% do valor total da estrutura elevando a resistência característica do concreto de 21 MPa para 60 MPa.

Segundo Simplício (2000), as evoluções do material e suas aplicações também já ocorreram, principalmente no que tange aos concretos leves de alto desempenho - que aliam as elevadas resistências e durabilidade ao reduzido peso próprio, aos CAD com fibras - que conferem maior ductilidade ao material - e ao concreto projetado de alto desempenho - que amplia a aptidão do material aos serviços de recuperação, reforço e contenção de estruturas. Desta maneira, as possibilidades de aplicação do CAD se tornam cada vez mais amplas, fazendo-se necessário um acompanhamento em pesquisa para que se possa obter o máximo de vantagens sobre este material.



3. CURA TÉRMICA DO CONCRETO

3.1. GENERALIDADES

Atualmente, as evoluções apresentadas por arquitetos, engenheiros, fornecedores e construtores requerem otimização da mão de obra e inovação dos equipamentos. Desta forma, surgem técnicas construtivas modernas exigindo maior rapidez e qualidade, envolvendo uma série de providências a respeito da organização do local da construção, estudos de tempos e minoração das operações.

A obtenção das propriedades esperadas para o concreto fabricado deve ser garantida pela cura realizada em ambiente apropriado durante as primeiras fases do endurecimento.

A cura é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade do concreto. Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou 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. A cura com água é necessária para garantir o mais alto grau de hidratação possível e para obter a maior resistência e a menor permeabilidade possível (Neville. 1997).



A cura térmica surgiu como uma técnica que busca otimizar os processos construtivos. Seu objetivo principal é o ganho de resistência suficientemente alta para que o concreto possa ser manuseado nas primeiras idades. Suas vantagens operacionais e econômicas, sobretudo para os fabricantes de peças pré-moldadas, podem ser resumidas na possibilidade de rápida desforma e manuseio, na redução do tempo de cura e, conseqüentemente, redução da área de estoque além do aumento da rotatividade dos moldes. Enfim, é um processo altamente compensador para obras que utilizam grande quantidade de peças pré-moldadas.

3.2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, quando misturado à água, adquire propriedades adesivas aglomerando areia e agregado graúdo na mistura do concreto. Isso acontece porque a reação química do cimento com a água, comumente chamada de hidratação do cimento, gera produtos que possuem características de pega e endurecimento.

O cimento Portland pode ser considerado, numa primeira aproximação, como composto essencialmente por silicatos, aluminatos e impurezas. Os silicatos presentes no cimento Portland são: silicato dicálcico - C_2S - e silicato tricálcico - C_3S . Os aluminatos são: aluminato tricálcico - C_3A - e ferroaluminato tetracálcico - C_4AF -. As chamadas impurezas do cimento Portland - sulfatos, álcalis, cal livre, sílica não reativa, periclase, etc. - não são normalmente consideradas nas reações de hidratação. Todavia, quando observado mais de perto o papel dessas impurezas na reação de hidratação, percebe-se que seu papel não é sempre tão desprezível (Aitcin, 2000). Para controlar a pega e o endurecimento do cimento, geralmente é adicionado o sulfato de cálcio.

O processo de hidratação consiste na ocorrência de reações simultâneas dos compostos anidros com a água, pois o cimento Portland é composto de uma mistura heterogênea de vários compostos. Entretanto, as velocidades de reação de cada um desses compostos são distintas.



Os aluminatos são conhecidos por hidratarem muito mais rapidamente do que os silicatos. As reações de hidratação destes compostos determinam as características da pasta de cimento, como o enrijecimento - perda de consistência - e a pega - solidificação. Os silicatos, que compõe aproximadamente 75% do cimento Portland comum, têm um importante papel na determinação das características de endurecimento - taxa de desenvolvimento da resistência. (Mehta e Monteiro, 1994).

Durante a hidratação das fases puras, a hidratação dos silicatos resulta na formação, por um lado, de um silicato de cálcio hidratado, que é escrito na forma abreviada como C-S-H e, por outro lado, de portlandita, Ca(OH)_2 . O C_3A , na presença do sulfato de cálcio e da água, é transformado em etringita - $\text{C}_3\text{A.CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$, e mais tarde no monosulfoaluminato - $\text{C}_3\text{A.CaSO}_4.12\text{H}_2\text{O}$ - quando não existir mais sulfato de cálcio.

3.2.1. Enrijecimento, Pega e Endurecimento

De acordo com as proporções respectivas de cada uma das fases do cimento, a quantidade de água usada, a área específica do cimento, a temperatura inicial do concreto e a temperatura ambiente, será desenvolvido no concreto mais ou menos calor e mais ou menos resistência. Por conseguinte, um meio simples de observar a evolução da resistência do concreto é observar a evolução da temperatura do concreto e vice-versa (Aïtcin, 2000).

Para aplicação em tecnologia de concreto, é interessante rever os aspectos físicos tais como enrijecimento, pega, e endurecimento que são diferentes manifestações na evolução dos processos químicos.

Enrijecimento é a perda de consistência da pasta plástica de cimento, e está associado ao fenômeno de perda de abatimento no concreto. É a água livre na pasta de cimento que é responsável pela sua plasticidade. A perda gradual de água livre no sistema devido à reações iniciais de hidratação, adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade, como etringita e o



C-S-H, e a evaporação causam o enrijecimento da pasta e, finalmente, a pega e o endurecimento (Mehta e Monteiro, 1994).

O termo pega implica na solidificação da pasta plástica de cimento, ou seja, a mudança do estado fluido para um estado rígido. O começo da solidificação, chamado início de pega marca o ponto no tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Conseqüentemente serão muito difíceis o lançamento, compactação e acabamento do concreto após este estágio. A pasta não se solidifica repentinamente; necessita de um tempo considerável para tornar-se totalmente rígida. O tempo necessário para solidificar completamente marca o tempo de fim de pega.

Durante a pega, a pasta de cimento Portland adquire uma determinada resistência. Porém é importante distinguir a pega do endurecimento. Na tecnologia do concreto, o endurecimento é definido como o fenômeno de ganho de resistência com o tempo. Durante o mesmo, ocorre o preenchimento progressivo dos espaços vazios na pasta com os produtos de hidratação, resultando no decréscimo da porosidade, da permeabilidade, e em um acréscimo da resistência e durabilidade.

3.3. EFEITOS DA CURA TÉRMICA

A cura térmica funciona como aceleradora das reações de hidratação do cimento. Uma temperatura mais alta durante e depois do contato inicial entre o cimento e a água reduz a extensão do período de latência de modo que a estrutura total da pasta de cimento hidratada se define mais cedo (Neville 1997).

Durante o estágio inicial das reações de hidratação, a temperatura afeta não só a taxa de hidratação - ou seja, o desenvolvimento das reações de hidratação, mas também as características e posicionamento dos produtos conseqüentes destas reações. Com a grande velocidade inicial de hidratação não há tempo suficiente para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento e para uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais,



como ocorre a temperaturas mais baixas (Verbeck e Helmuth 1968). Os produtos da hidratação se posicionam junto aos grãos de cimento dificultando os processos subseqüentes. Neste caso, o material terá uma porosidade maior e por conseqüência menor potencial para resistência à compressão do que em baixas temperaturas.

Com respeito à cura térmica, deve-se tomar cuidado com a temperatura a ser utilizada. Temperaturas muito altas podem afetar a microestrutura do concreto, causando microfissuras em sua superfície (Hasni et al, 1991).

De Melo et al (2000) desenvolveram um estudo experimental, com o objetivo principal de analisar a redução na resistência final e os compostos hidratados, formados ao longo do tempo após a cura térmica. Considerou-se a influência das adições – escória de alto forno e sílica ativa – e da duração de ciclos térmicos que variam entre 3 horas e 12 horas. A análise da microestrutura foi baseada em observações feitas através da microscopia eletrônica de varredura - MEV. As imagens em MEV mostram que a queda na resistência mecânica para a amostra sob cura térmica está relacionada a uma ruptura na interface pasta-agregado, levando em conta que a ruptura ocorre no próprio agregado para a amostra sob cura normal. Destaca-se a presença das carapaças vazias ao redor dos grãos anidros de cimento à idade de 28 dias, sendo mais freqüentes nas amostras com adições. Esse fenômeno também deve afetar negativamente a resistência mecânica por facilitar a propagação das microfissuras nessas regiões.

Kjellsen (1996) estudou os efeitos de diversos regimes de temperatura da cura do CAD na microestrutura e composição do C-S-H. Verificou que a matriz da pasta de cimento não sofreu influência significativa da temperatura de cura do concreto de alto desempenho, porém apresentou maior porosidade que o mesmo concreto quando submetido a cura em temperaturas menores.

Num estudo da cura térmica com a temperatura máxima variando entre 60°C e 95°C realizado por Zhang e Gjorv (1991), utilizando cimentos compostos com vários teores de escória - 35% a 70% - são destacados alguns pontos que são de interesse nesta pesquisa. Por exemplo, foi encontrado que não há diferenças significativas entre resultados obtidos entre 28 dias e 90 dias,



indicando que a resistência máxima é atingida aos 28 dias e também que a temperatura de cura mais conveniente para os cimentos com escória é de 80°C.

Em temperaturas de hidratação à 23°C o C-S-H é distribuído de forma uniforme na pasta endurecida devido à presença de sílica ativa, enquanto na presença de escória o C-S-H aparece em forma cristalina mais alongada. Em temperaturas elevadas de cura - 70°C - resulta em menores cristais de C-S-H, mas numerosos depósitos na pasta como um todo, os quais podem ser totalmente consumidos pela reação pozolânica em intervalos de tempo de até 550 dias, dependendo da quantidade de adição presente no sistema e da relação água/aglomerante. A presença da sílica ativa tem um efeito pronunciado no refinamento da estrutura dos poros e na homogeneização da distribuição dos hidratados (Cao e Detwiler, 1995), o que de certa forma acaba compensando os efeitos indesejáveis da cura acelerada - perda potencial de resistência à compressão nas idades avançadas.

Estudando o concreto submetido a diversos ciclos, Kanda et al (1992) concluíram que a resistência aos 7 dias é tanto maior quanto maior for a temperatura. No entanto, aos 28 dias, há uma inversão dos valores. A menor temperatura na cura conduz a uma resistência maior que o concreto curado a temperaturas elevadas. A temperatura afeta a resistência última - $f_{c\infty}$ - que o material atingirá.

Alguns estudos indicam que o Concreto de Alto Desempenho sofre menor redução da resistência quando comparado aos concretos normais (Laamanen et al 1992), embora outros indicam que se pode obter elevadas variações de resistência dependendo da temperatura de cura (Pinto e Hover 1996). Esta aparente discordância pode ser resultante da utilização de Concreto de Alto Desempenho com composições diferentes e inclusão de aditivos diversos, entre outros fatores.



3.4. CONCEITO DE MATURIDADE

Quando se estuda a influência da temperatura no desenvolvimento de alguma propriedade física ou mecânica do concreto, deve-se avaliar esta influência com auxílio do conceito de maturidade. O método da maturidade estima o desenvolvimento das propriedades do concreto relacionando-as com o histórico de temperaturas durante a cura. Para tanto, o cálculo é realizado através de equações de maturidade em que são envolvidos o tempo e a temperatura. Este conceito começou a ser introduzido desde a década de 50 (Saul 1951) para estimar a resistência do concreto após um período de cura a alta temperatura. Este pesquisador relacionou o conceito de maturidade com a resistência à compressão, denominada por ele de lei do ganho de resistência com maturidade. Segundo Saul (1951), uma mesma mistura de concreto com um mesmo fator de maturidade - medido como função de temperatura e tempo - tem aproximadamente a mesma resistência qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o fator de maturidade. Com o passar dos anos, outros pesquisadores desenvolveram o método inicialmente proposto por Saul.

Na realidade, o conceito de maturidade é bem mais abrangente e pode ser aplicado a concretos de qualquer resistência e ao desenvolvimento de diversas propriedades mecânicas ou físicas do material (Pinto 2000).

3.4.1. Método da Maturidade

McIntosh (1949) sugeriu inicialmente que a taxa de ganho de resistência do concreto é diretamente proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura abaixo da qual as reações de hidratação não ocorrem, indicando a temperatura de $-1,1^{\circ}\text{C}$ para esta última temperatura.

Nurse (1949) também sugeriu que o simples produto do tempo e temperatura seria capaz de acessar os efeitos de cura a vapor no ganho de



resistência à compressão. Este acreditava que este procedimento seria capaz de levar em consideração agregados diferentes e misturas diversas.

O fator de maturidade pode ser calculado a partir de um histórico de temperaturas, utilizando uma função de maturidade. A função de Nurse-Saul (1) é apresentada a seguir:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Onde:

$M(t)$ = Fator de Maturidade à idade t - °C.h;

Δt = Intervalo de tempo - horas;

T_a = Média da temperatura em um intervalo de tempo Δt - °C;

T_0 = Temperatura de base - °C.

A função de Nurse-Saul (1) é baseada em observações empíricas. Quando amostras de diferentes concretos são colocados sob temperaturas distintas nas primeiras idades, a Função de Nurse-Saul não representa corretamente o efeito da temperatura de cura no ganho de resistência. Entretanto, a função de Nurse-Saul foi muito difundida devido sua simplicidade (Carino, 1991).

Rastrup (1954) introduziu o termo de idade equivalente - t_e . Neste caso, admiti-se que o concreto atinge o mesmo grau de maturidade que atingiria caso tivesse sido mantido continuamente a uma temperatura de referência até a idade t_e . Usualmente utiliza-se a temperatura de 20°C como temperatura de referência. Neste caso, calcula-se o tempo necessário para atingir-se o mesmo grau de maturidade que seria atingido caso a temperatura durante a cura do concreto permanecesse constante a 20°C.

A função de Nurse-Saul em idade equivalente assume a seguinte forma:

$$t_e = \sum_0^t \frac{T - T_0}{T_r - T_0} \Delta t \quad (2)$$



Onde:

T_r = Temperatura de referência (°C)

t_e = Idade equivalente na temperatura de referência T_r - horas.

A função de Nurse-Saul é baseada em observações empíricas e leva em consideração a influência da temperatura no desenvolvimento da resistência a partir de uma função matemática simples, tornando-a muito difundida no meio técnico. Entretanto, quando amostras de diferentes concretos são colocadas sob temperaturas distintas nas primeiras idades, a função de Nurse-Saul não representa corretamente o efeito da temperatura de cura no ganho de resistência. Isto se deve ao fato de que a função de Nurse-Saul não tem nenhuma relação com os processos reais físicos e químicos da hidratação do cimento além da temperatura de base - T_0 .

Arrhenius introduziu o conceito de energia de ativação - E - em equações químicas. Para ocorrer uma reação química, as moléculas necessitam possuir uma quantidade mínima de energia cinética para poder transformar os reagentes em produtos. A hidratação do cimento, que é uma reação exotérmica, os reagentes estão em estado de energia superior aos dos produtos. A energia de ativação é então a diferença entre o nível de energia necessário para ocorrência da reação e o nível de energia dos reagentes, ou seja, é a quantidade a mais de energia que os reagentes devem adquirir para dar início à reação. Segundo Arrhenius, a velocidade de uma reação química é função da chamada taxa constante - k - conforme a equação abaixo:

$$k = Ae^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (3)$$

Onde:

k = Taxa constante;

E = Energia de ativação;

R = Constante universal dos gases - 8.314 J/K mol;

T = Temperatura absoluta - K;

A = constante ou fator de frequência.

O fator de frequência - A - está relacionado com a frequência das colisões entre as moléculas, transferindo energia cinética e com a probabilidade de que essas colisões ocorram em orientações favoráveis para o início das reações químicas, com os átomos posicionados de tal forma a possibilitar novas ligações.

Quanto mais elevada é a temperatura, maior é o número de moléculas que possuem energia cinética mínima e, portanto, mais produtos são formados, processando a reação mais rapidamente.

A influência da temperatura é indicada pela energia de ativação. Quanto maior for o valor de E, mais energia cinética é necessária para o início da reação, significando que a velocidade da reação será significativamente afetada pela temperatura.

O termo Energia Aparente de Ativação - Ea - é mais apropriado quando se trata de hidratação do cimento. As diversas reações químicas envolvidas na hidratação ocorrendo simultaneamente conduzem a um "valor médio" para energia de ativação. Então, a hidratação do cimento Portland é vista como a única reação com Energia Aparente de Ativação.

Freiesleben-Hansen e Pederson (1982, apud Carino, 1991) definiram uma função de maturidade a partir da relação entre as velocidades de hidratação do cimento na temperatura desejada e na temperatura de referência - T_r -, segundo a seguinte fórmula:

$$\frac{k}{k_{T_r}} = \frac{Ae^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}}{Ae^{\left(-\frac{E_a}{RT_r}\right)}} = e^{\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right)} \quad (4)$$

Onde:

k_{T_r} = Taxa constante à temperatura T_r .

Em idade equivalente, a função de maturidade de Freiesleben-Hansen e Pederson - FHP - assume a seguinte forma:

$$t_e = \sum e^{-\left[\frac{E_a}{R}\left(\left(\frac{1}{T_a}\right) - \left(\frac{1}{T_r}\right)\right)\right]} \Delta t \quad (5)$$

Onde:

t_e = Idade equivalente à temperatura de referência T_r - horas;

E_a = Energia aparente de ativação - kJ/mol;

T_a = Média da temperatura em um intervalo de tempo Δt - K;

T_r = Temperatura de referência - K;

Δt = Intervalo de tempo - horas.

A função de FHP, embora seja de maior complexidade, é a que representa melhor o real efeito da temperatura na velocidade das reações de hidratação do cimento. Entretanto, para sua utilização, é necessário o conhecimento prévio da Energia Aparente de Ativação das reações de hidratação do cimento. O procedimento ASTM C 1074 (1998) sugere valores de E_a entre 40 a 50 kJ/mol para cimento Tipo I americano.

A utilização deste método considera a temperatura do concreto com sendo a única variável que afeta o ganho de resistência ao longo do tempo. Fatores como composição dos materiais, proporção da mistura, condições de umidade, ou outros fatores que possam influenciar o ganho de resistência não são levados em consideração.

No entanto este método possui um grande horizonte, já que a maturidade está relacionada com o desenvolvimento do grau de hidratação do cimento. Então, qualquer propriedade física ou mecânica que esteja relacionada com o grau de hidratação, a princípio poderia ser modelada pelo método da maturidade.

A ASTM C 1074 (1998) fornece o procedimento para se estimar a resistência do concreto por meio do método da maturidade. Este procedimento pode ser usado para estimar *in-loco* a resistência do concreto que permite executar atividades construtivas tais como remoção das formas, aplicação de cargas de protensão, etc. As limitações mais significativas para este procedimento são, segundo esta norma:



1. O concreto deve ser mantido em condições que permitem a hidratação do cimento;
2. O método não prevê a longo prazo os efeitos da temperatura a que foi submetido nas primeiras idades;
3. O método necessita ser acrescido de outras indicações da resistência potencial da mistura de concreto.

A precisão da resistência estimada depende da determinação da função da maturidade particular para os materiais utilizados.

O cálculo do valor da maturidade é realizado a partir das medidas do histórico de temperatura do concreto por meio de duas funções alternativas. Uma das funções, que calcula o fator de maturidade adquirido pelo concreto, é a função de Nurse-Saul (1) ou em termos de idade equivalente de acordo com a equação de FHP (2). Este método requer estabelecer uma relação entre a resistência e a maturidade da composição de concreto em laboratório e assim determinar o histórico de temperatura para alcançar determinada resistência.

Pesquisas usando argamassas de baixa relação água/cimento - A/C - confirmam que o método da maturidade pode ser usado para estimar o ganho de resistência durante a cura para composições de baixa relação A/C (Carino et al 1992). Observou-se que a resistência a longo prazo de argamassas de baixa relação A/C não foram afetadas de maneira significativa pelas altas temperaturas de cura.

3.4.2. Funções de Maturidade

Pesquisas na Cornell University estudaram o uso do método da maturidade em concretos de alto desempenho (Pinto e Hover, 1996). A função de maturidade baseada na equação de Arrhenius (ASTM C 1074, 1998) foi usada para calcular o efeito da temperatura no ganho de resistência. Este trabalho envolveu cinco tipos diferentes de condições de cura para que abrangesse várias condições de campo.



Foram utilizados cimento Portland Tipo I americano e adição de sílica ativa de 10% da massa de cimento na composição do CAD.

Pinto e Hover consideraram três diferentes funções para representar o desenvolvimento da resistência como função do fator de maturidade:

1. Equação exponencial sugerida por Freiesleben-Hansen e Pederson (Carino 1991):

$$f_c = f_{c\infty} e^{\left(\frac{\tau}{M}\right)^\alpha} \quad (6)$$

Onde:

M = Fator de maturidade;

f_c = Resistência a um dado fator de maturidade M;

$f_{c\infty}$ = Resistência a uma maturidade infinita;

τ = Constante de tempo;

α = Parâmetro de forma

2. Função "linear-hiperbólica" que incorpora o conceito de maturidade "offset" (Knudsen, 1984):

$$f_c = f_{c\infty} \frac{k(M - M_0)}{1 + k(M - M_0)} \quad (7)$$

Onde:

M_0 = Fator de maturidade "offset" - onde começa o desenvolvimento da resistência;

k = Constante

3. Equação "parabólica-hiperbólica" proposta por Knudsen (1984):

$$f_c = f_{c\infty} \frac{\sqrt{k(M - M_0)}}{1 + \sqrt{k(M - M_0)}} \quad (8)$$



A intensidade da evolução da resistência devido à temperatura da cura difere para os três modelos resistência-maturidade. Os resultados obtidos por Pinto e Hover (1996) vão de encontro com os obtidos por Carino et al. (1992), que concluiu que a temperatura de cura não afeta significativamente a resistência limite de argamassas de alta resistência. Desta forma, são necessárias pesquisas adicionais para alcançar um consenso se a temperatura inicial da cura afeta a resistência de concretos de alto desempenho (Meeks e Carino 1999).

3.4.3. Aplicação na Construção Civil

Os procedimentos para a utilização do método da maturidade estão dispostos na ASTM 1074 (1998). Esta norma permite ao usuário expressar a maturidade em termos do fator temperatura-tempo - M , por meio da equação de Nurse-Saul (1), ou em termos de idade equivalente - t_e , usando a equação FHP (equação 5).

Esta norma estabelece os procedimentos para aplicar as relações entre resistência à compressão e maturidade, e estimar a resistência à compressão *in loco*. Além disso, também traz o procedimento para a determinação da Energia de Aparente de Ativação - E_a .

Desde que seja realizada a estimativa da relação entre a resistência à compressão e a maturidade em laboratório, a aplicação do método da maturidade em campo pode ser realizada apenas monitorando o histórico de temperaturas do concreto *in situ*. O fator de maturidade obtido em campo pode ser convertido em resistência à compressão a partir das relações obtidas em laboratório como método não destrutivo de determinação da resistência à compressão.

O monitoramento da temperatura pode ser feito com sensores colocados no concreto, ainda em estado fresco logo após a moldagem, e posicionados onde as condições de temperatura de cura são menos favoráveis e/ou as cargas estruturais são mais críticas. Este procedimento é importante para que não haja



problemas na estimativa do tempo necessário para o início de operações tais como descimbramento e aplicação de cargas de protensão.

Entretanto, a potencialidade deste método é muito maior do que somente estimar a resistência à compressão, já que quando utilizado de forma apropriada a maturidade está relacionada com o desenvolvimento do grau de hidratação. Desta forma, qualquer propriedade física ou mecânica que seja relacionada com o grau de hidratação, a princípio poderia ser modelada pelo método da maturidade. (Pinto, 2000). Devido a esta perspectiva, o método da maturidade foi utilizado nesta pesquisa como ferramenta para a análise das propriedades mecânicas do CAD submetido à cura térmica.



4. A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CAD SUBMETIDO A CURA TÉRMICA

Neste capítulo está apresentado o programa experimental elaborado para a primeira fase do estudo das propriedades mecânicas do Concreto de Alto Desempenho - CAD - submetido ao processo de cura térmica a vapor, sem levar em consideração o método da maturidade.

Foram analisadas as Resistências à Compressão - f_c , Resistência à Tração - f_t - e Módulo de Elasticidade - E_c - das amostras de concreto fabricadas com adição de sílica ativa variando entre 0%, 8%, 10% e 12%.

Os ciclos de cura térmica tiveram variação de 5, 6, 8 e 9 horas. A análise dos resultados obtidos nesta primeira fase levou a determinação do ciclo térmico e das porcentagens de adição de sílica ativa da Segunda fase desta pesquisa, onde os resultados foram analisados sob a luz do conceito da maturidade.



4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Numa primeira etapa, estão apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados na composição dos concretos estudados.

4.1.1. Cimento

O cimento utilizado, classificado pela NBR 5733 (1991) como sendo do tipo ARI - Alta Resistência Inicial - possui em sua composição silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e filer carbonáceo, entre outros constituintes. As principais características desse tipo de cimento estão apresentadas na tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1: Características do Cimento Utilizado

Resistência à Compressão					
Idade - dias	3	7	28	90	
Tensão - MPa	37,6	47,4	52,1	60	
Finura Blaine	Finura #325	Densidade Aparente	Densidade Absoluta	Tempos de Pega	
cm ² /g	%	g/cm ³	g/cm ³	Início min.	Fim min.
4073	1,3	1,13	3,09	118	160

O cimento CP V ARI PLUS é produzido atendendo as especificações e parâmetros da NBR 5733 (1991). O teor de silicato tricálcico - C₃S - contido no cimento está entre 59% e 60% segundo o fabricante.

4.1.2. Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada na fabricação do concreto, apresenta em sua composição sílica amorfa, óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio. Suas propriedades, prescritas pelas normas NBR 13956 e NBR 13957, estão apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características Físicas e Químicas da Sílica Ativa Utilizada

Densidade Aparente ⁽¹⁾	0,29 kg/m ³
Massa Específica ⁽¹⁾	2,13 kg/m ³
Superfície Específica	20.200 m ² /kg
Formato da Partícula	esférico
Diâmetro Médio	0,2 µm
Teor de SiO₂	> 85%
Umidade	< 3%
Equivalente Alcalino	< 0,5%

Fonte: Camargo Corrêa Cimentos

⁽¹⁾ Dados obtidos em laboratório

4.1.3. Superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante Rheobuild 1203, fabricado pela Masterbuilders. Este superplastificante é do tipo naftaleno, cuja densidade é de 1,21 g/cm³ e cujo pH varia entre 9,0 ± 1,0.

4.1.4. Agregados

Foi utilizada na preparação do concreto areia originária das margens do rio Tietê, e apresenta as seguintes características descritas na tabela 4.3.

O agregado graúdo utilizado foi a brita basáltica originária da pedreira Três Irmão – Andradina - SP – cujas características são apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.3: Características do Agregado Miúdo

Diâmetro máximo	1,19 mm
Módulo de finura	224
Densidade aparente	1,51 g/cm ³
Peso específico	2,75 g/cm ³
Absorção	2,75%

Tabela 4.4: Características do Agregado Graúdo

Diâmetro máximo	12,70 mm
Módulo de finura	698
Densidade aparente	1,49 g/cm ³
Peso específico	2,70 g/cm ³
Absorção	2,70%

4.2. COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

A composição dos concretos analisados, apresentada na tabela 4.5, teve a porcentagem de adição de sílica ativa variando entre 0%, 8% 10% e 12% em relação ao consumo de cimento.

Tabela 4.5: Composição dos Concretos Analisados

Material	C-0 kg/m ³	C-8 kg/m ³	C-10 kg/m ³	C-12 kg/m ³
Cimento	418,9	410,9	409,3	407,7
Brita 1	1279,3	1254,8	1250,0	1245,2
Areia	660,3	647,7	645,2	642,7
Água	142,9	140,2	139,6	139,1
Sílica ativa	-	32,9	40,9	48,9
Superplastificante	9,2	13,5	13,5	13,4
A/C		0,34		
A/C efetiva		0,22		

O concreto foi fabricado em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 500 litros, obedecendo ao seguinte procedimento:

- Introdução da areia, agregados, cimento e sílica ativa;
- Mistura a seco durante 5 minutos;
- Introdução da água com $\frac{1}{3}$ do superplastificante e mistura por mais 4 minutos;
- Introdução do restante do superplastificante - $\frac{2}{3}$ - e mistura por mais 2 minutos.

Foram fabricados Corpos de Prova - CPs - de dimensões 100 x 200 mm para análise da Resistência à Compressão - f_c - e Resistência à Tração - f_t - e de dimensões 150 x 300 mm para análise do Módulo de Elasticidade - E_c . O adensamento mecânico foi realizado em mesa vibratória elétrica.

4.3. CURA TÉRMICA DO CONCRETO

Para a realização da cura térmica a vapor foi construída uma câmara de cura térmica segundo o modelo adotado pela Ferronorte para ensaios de campo na fabricação de dormentes de concreto. Esta câmara, equipada com tubulação de ferro fundido para permitir a circulação constante do vapor em seu interior, permitiu a colocação de termopares para o monitoramento da temperatura no seu interior.

A figura 4.1 apresenta a primeira câmara elaborada a partir de um tambor de 200 litros, pintado internamente com tinta epóxi para evitar a corrosão e revestido externamente com manta de fibro-carbono para diminuir a perda de calor com o meio externo. O vapor é gerado a partir de um reservatório de água instalado na parte inferior, equipado com uma resistência de 2500 W. Tubos de ferro fundido fazem a ligação entre o reservatório de água e a câmara de cura térmica, ilustrados pela figura 4.2. A manutenção da temperatura foi realizada por um termostato instalado no interior da mesma.



Figura 4.1: Câmara de Cura Térmica



Figura 4.2: Tubulação Interna do Aparelho de Cura Térmica

4.3.1. Ciclo Térmico

Os ciclos de cura térmica aplicados ao CAD são aplicados de acordo com o esquema disposto na figura 4.3.

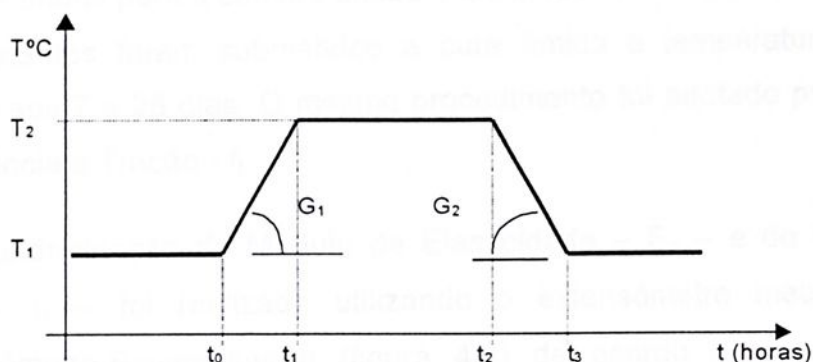


Figura 4.3: Ciclo térmico

Onde:

t_0 – Período de espera;

t_1 – Período de aquecimento;

t_2 – Período de manutenção da temperatura;

t_3 – Período de resfriamento;

T_1 – Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

T_2 – Temperatura máxima atingida no ciclo ($^{\circ}\text{C}$);

G_1 – Gradiente de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$);

G_2 – Gradiente de resfriamento ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$).

4.4. PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

A determinação das propriedades mecânicas das amostras analisadas - Resistência à Compressão - f_c - e Resistência a Tração - f_t - foram realizadas segundo a prescrição da Norma Brasileira NBR 5739 (1994) e NBR 7222 (1994) respectivamente.

Para cada amostra de concreto, foram moldados 15 corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm para cada um dos ensaios de resistência, ou seja, 15 para os ensaios de f_c e 15 para ensaios de f_t . Deste montante - 15 CPs - para cada ensaio, 9 CPs foram colocados em cura térmica durante um ciclo térmico de 6 horas. Ao final deste ciclo, foram ensaiados 3 CPs enquanto os 6 CPs restantes

foram transferidos para a câmara úmida e ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias. Os 6 CPs restantes foram submetidos a cura úmida a temperatura ambiente e ensaiados aos 7 e 28 dias. O mesmo procedimento foi adotado para os ensaios de Resistência à Tração - f_t .

A determinação do Módulo de Elasticidade - E_c - e do Coeficiente de Poisson - μ - foi realizada utilizando o extensômetro mecânico do tipo Compressômetro-Expansômetro (figura 4.4) de acordo com o procedimento descrito na NBR 8522 (1984). As leituras de deformações foram feitas a partir de relógios comparadores analógicos instalados no aparelho.

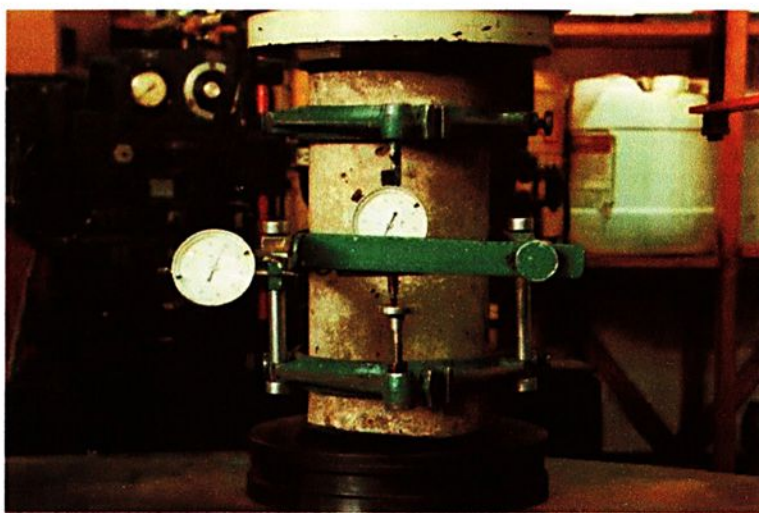


Figura 4.4: Ensaio de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

Para os ensaios de E_c foram fabricados 10 CPs de dimensões 150 x 300 mm. Devido a limitação de espaço da câmara de cura térmica, foram colocados apenas 6 CPs para cura térmica a 80°C, dos quais 2 CPs foram ensaiados imediatamente após o ciclo térmico e os CPs restantes foram colocados em câmara úmida e ensaiados aos 7 e 28 dias. Os 4 CPs restantes foram colocados em câmara úmida e ensaiados aos 7 e 28 dias.

A tabela 4.6 apresenta a distribuição dos CPs ensaiados para cada propriedade analisada nesta primeira fase do estudo.

Tabela 4.6: N.º de CPs Moldados nos Ensaiois

Cura	Idade	f_c	f_t	E_c e μ
Térmica	Após o Ciclo	3	3	2
	7 dias	3	3	2
	28 dias	3	3	2
Úmida	7 dias	3	3	2
	28 dias	3	3	2
Total		15	15	10



4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão - f_c , Resistência à Tração - f_t - e Módulo de Elasticidade - E_c - das amostras analisadas na primeira fase desta pesquisa. Para cada uma das propriedades citadas, os dados estão dispostos primeiramente para os concretos submetidos a 5 horas de cura térmica, variando-se a percentagem de sílica ativa adicionada nos teores de 0%, 8%, 10%, 12%. Em seguida estão apresentados os valores obtidos para os ciclos térmicos de 5, 6, 8 e 9 horas para o concreto com adição de 10% de sílica ativa.

4.5.1. Resistência à Compressão - f_c

Ciclo Térmico: 5 horas

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão - f_c - das amostras de CAD submetido a tratamentos térmicos de 5 horas e à cura úmida a temperatura ambiente estão apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Resistência a Compressão do CAD Submetido a Diferentes Tipos de Cura com Variação da Percentagem de Sílica Ativa

Tipo de Cura	Idade	Variação da % Sílica Ativa			
		C-0 MPa	C-8 MPa	C-10 MPa	C-12 MPa
Térmica	5 horas	37,18	42,95	40,57	46,75
	7 dias	44,20	53,03	55,55	57,40
	28 dias	48,02	55,77	56,01	57,93
Úmida	7 dias	61,79	69,82	73,27	77,51
	28 dias	68,39	85,29	80,34	88,43



A figura 4.5 apresenta o comportamento gráfico da evolução da resistência à compressão dessas amostras quando submetidas a cura térmica de 5 horas. Observa-se neste gráfico que logo após cada um dos ciclos houve um ganho de resistência significativo em todas as composições. Com o ciclo térmico fixado em 5 horas, foram alcançadas resistências que variaram entre 37 MPa e 46 MPa segundo o tipo de composição (tabela 4.7). A composição C-10, com adição de 10% de sílica ativa, apresentou um ganho de resistência à compressão menor que as composições C-8 e C-12 logo após o ciclo térmico. Entretanto, todas as composições com adição de sílica ativa submetidas a cura térmica alcançaram os mesmos patamares de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

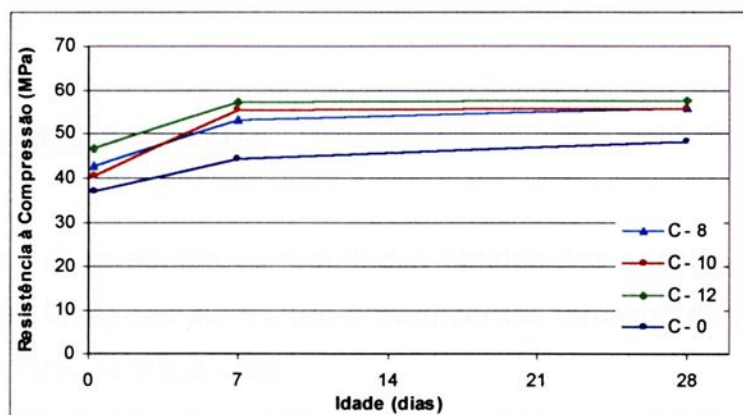


Figura 4.5: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa

Ao analisar os resultados dos concretos submetidos apenas a cura úmida a temperatura ambiente (tabela 4.7 e figura 4.6), percebe-se que a composição com adição de 10% de sílica ativa obteve a menor resistência à compressão aos 28 dias. Este fato vem de encontro aos valores obtidos para a mesma amostra quando submetida a cura térmica.

As amostras C-0 e C-10, submetidas à cura térmica, alcançaram aos 28 dias resistência à compressão em torno de 70% da resistência das amostras quando submetidas apenas a cura úmida, enquanto que para as amostras C-8 e C-12, esta variação ficou em torno de 65 %.

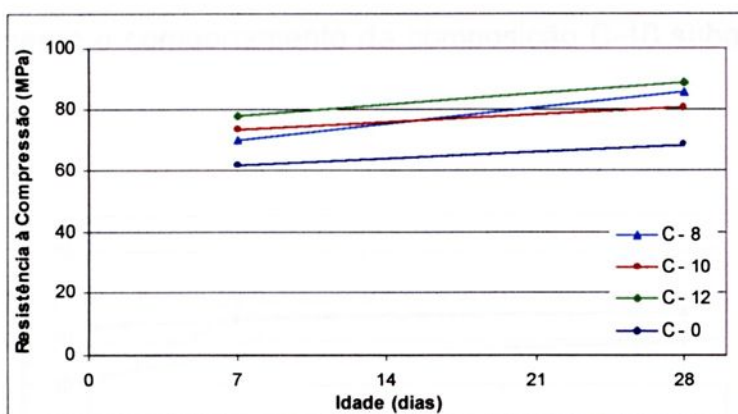


Figura 4.6: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa

Ciclo Térmico: 5, 6, 8 e 9 horas

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão das amostras submetido a tratamentos térmicos de 5, 6, 8 e 9 horas com adição de 10% de sílica ativa.

Tabela 4.8: Resistência à Compressão do CAD com 10% de Sílica Ativa Submetido a Cura Úmida e a Diferentes Ciclos de Cura Térmica

Idade		5 horas	6 horas	8 horas	9 horas
Térmica	Após o Ciclo - MPa	40,57	42,25	53,29	52,90
	7 dias - MPa	55,55	46,96	54,89	58,47
	28 dias - MPa	56,01	49,40	56,15	59,66
Úmida	7 dias - MPa	73,27	64,81	74,97	76,36
	28 dias - MPa	80,34	84,05	81,14	81,07

No gráfico da figura 4.7 pode-se observar que o ganho de resistência dos CPs evolui juntamente com o aumento do período de exposição das amostras à cura térmica. O comportamento da resistência à compressão se mostrou distinto em todas as amostras. O ganho de resistência com o tempo se mostrou menos



intenso para as amostras que foram submetidas a ciclos térmicos mais longos. A figura 4.8 apresenta o comportamento da composição C-10 submetida apenas a cura úmida.

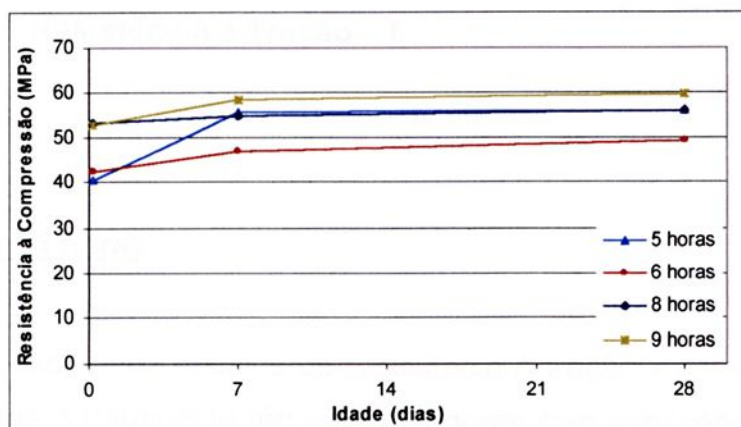


Figura 4.7: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa

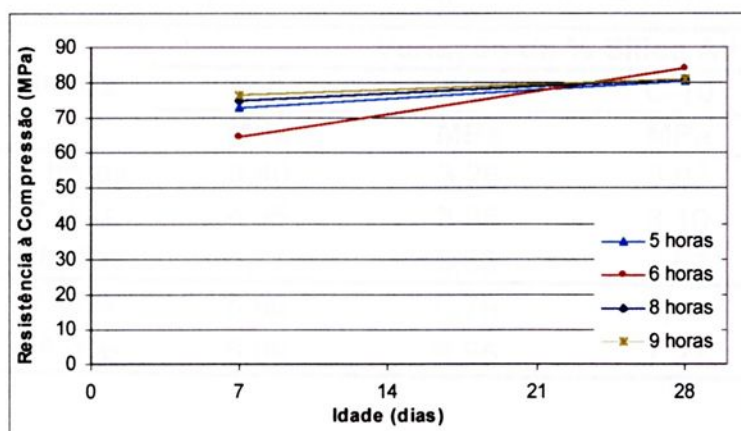


Figura 4.8: Comportamento da Resistência à Compressão das Amostras de CAD Submetidos Apenas a Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa

Nos ensaios realizados, as amostras de CAD tratado termicamente obtiveram resistências aos 28 dias variando em uma faixa de 58% a 74%, dependendo do período do ciclo térmico quando comparadas à resistência para a mesma idade das amostras submetidas apenas a cura úmida (tabela 4.8). As amostras submetidas a ciclos térmicos mais prolongados obtiveram resistências

maiores. Por outro lado, não houve alteração significativa nos valores de resistência obtidos logo após o ciclo térmico.

4.5.2. Resistência à Tração – f_t

Ciclo Térmico: 5 horas

Os resultados dos ensaios de resistência à tração – f_t – das amostras de CAD submetidas a tratamento térmico de 5 horas com variação da percentagem de sílica ativa estão dispostos na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resistência a Tração do CAD Submetido a Diferentes Tipos de Cura com Variação da Percentagem de Sílica Ativa

Tipo de Cura	Idade	Variação da % Sílica Ativa			
		C-0 MPa	C-8 MPa	C-10 MPa	C-12 MPa
Térmica	5 horas	3,40	3,28	3,07	3,68
	7 dias	4,35	3,28	3,10	3,87
	28 dias	4,77	3,52	3,62	3,81
Úmida	7 dias	5,86	5,79	6,63	6,46
	28 dias	6,09	6,55	7,21	7,86

Na figura 4.9 são apresentadas as variações da resistência à tração do CAD quando submetido a este tratamento térmico. Os resultados obtidos mostram comportamentos distintos entre as amostras com e sem adição de sílica ativa.

Entre as amostras com adição de sílica ativa, a composição C-12 foi a que apresentou o maior ganho de resistência à tração. Entretanto, o aumento de resistência entre 7 e 28 dias foi discreto para essas amostras.



Na figura 4.10 estão relacionadas à variação da resistência à tração das amostras de CAD submetidas apenas à cura úmida.

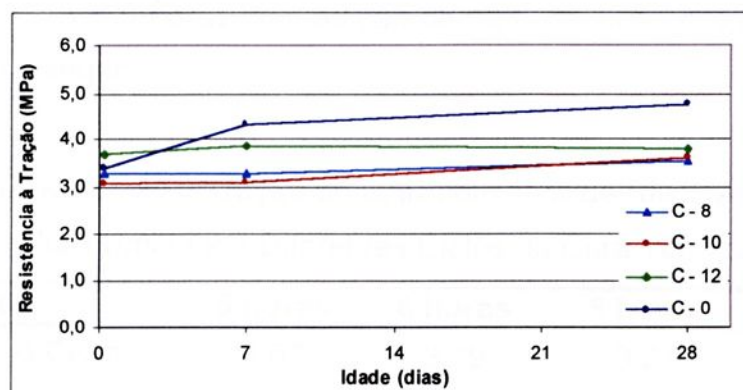


Figura 4.9: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa

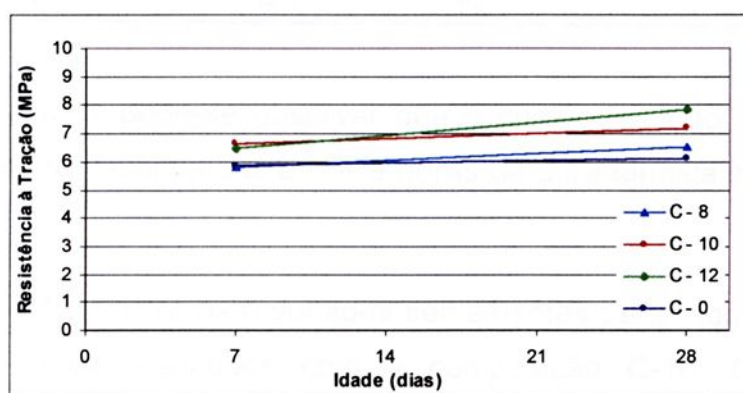


Figura 4.10: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa

O ganho de resistência à tração das amostras submetidas a cura térmica aos 28 dias foi de 78,3% 53,8%, 50,3% e 48,5% para as composições C-0, C-8, C-10 e C-12 respectivamente em relação à resistência à tração destas amostras submetidas apenas a cura úmida. Percebe-se que houve um ganho percentual de resistência à tração inversamente proporcional ao teor de sílica ativa adicionada ao CAD.

Ciclo Térmico: 5, 6, 8 e 9 horas

Os resultados obtidos nos ensaios de f_t do CAD submetido a tratamentos térmicos de 5, 6, 8 e 9 horas com adição de 10% de sílica ativa estão dispostos na tabela 4.10 a seguir.

Tabela 4.10: Resistência à Tração do CAD com 10% de Sílica Ativa Submetido a Cura Úmida e a Diferentes Ciclos de Cura Térmica

	Idade	5 horas	6 horas	8 horas	9 horas
Térmica	Após o Ciclo	3,07	3,79	3,27	3,33
	7 dias	3,10	3,96	3,91	3,63
	28 dias	3,62	4,19	4,37	4,56
Úmida	7 dias	6,63	6,43	6,04	6,35
	28 dias	7,21	6,88	6,88	7,44

Na figura 4.11 pode-se observar que o comportamento da resistência à tração das amostras submetidas a 8 e 9 horas de cura térmica são semelhantes entre si.

A figura 4.12 mostra os resultados semelhantes para todos os ensaios de resistência à tração realizados com a composição C-10. O CAD tratado termicamente obteve resistências aos 28 dias de 52,35%, 59,39% 61,33% e 56,76% para os ciclos de 5, 6, 8 e 9 horas respectivamente em relação à resistência aos 28 dias obtida pelos CPs submetidos à cura úmida.

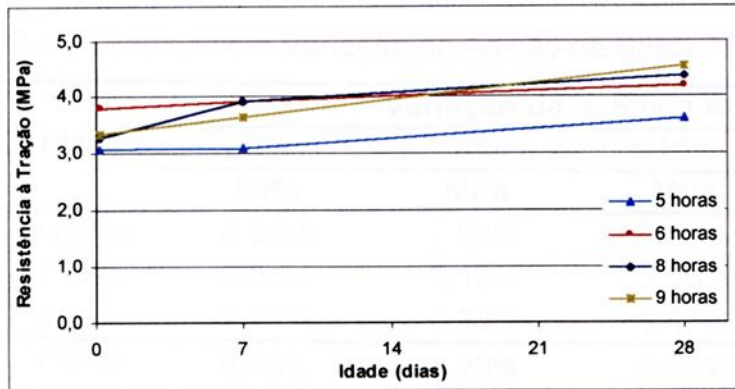


Figura 4.11: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD - Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa

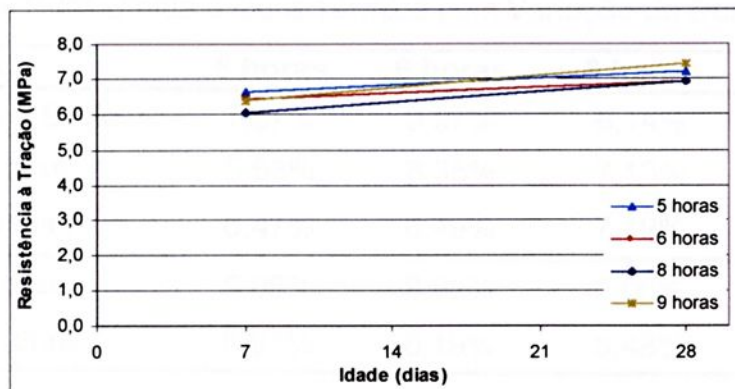


Figura 4.12: Comportamento da Resistência à Tração das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa

4.5.3. Relação Percentual entre f_c e f_t

Nas tabelas a seguir são apresentadas as relações percentuais entre a resistência à compressão e à tração das amostras de concreto submetidas a cura térmica e a cura úmida. Primeiramente são apresentados os resultados das amostras submetidas a 5 horas de cura térmica para as composições C-0, C-8, C-10 e C-12 (tabela 4.11). Em seguida, os resultados das amostras com adição de 10% de sílica ativa submetidas a ciclos de 5, 6, 8 e 9 horas (tabela 4.12).

Tabela 4.11: Relação Percentual entre f_c e f_t do CAD Submetido a Cura Úmida e Cura Térmica com Variação da Adição de Sílica Ativa

Tipo de Cura	Idade	Variação da % Sílica Ativa			
		0%	8%	10%	12%
		MPa	MPa	MPa	MPa
Térmica	5 horas	8,99%	7,64%	7,57%	7,87%
	7 dias	9,84%	6,19%	5,58%	6,74%
	28 dias	9,93%	6,32%	6,47%	6,58%
Úmida	7 dias	9,48%	8,29%	9,05%	8,34%
	28 dias	8,90%	7,67%	8,97%	8,88%

Tabela 4.12: Relação Percentual entre f_c e f_t do CAD com 10% de Sílica Ativa Submetido a Cura Úmida e Cura Térmica com Variação da Duração do Ciclo

	Idade	5 horas	6 horas	8 horas	9 horas
Térmica	Após o Ciclo	7,57%	8,97%	6,14%	6,30%
	7 dias	5,58%	8,35%	7,13%	6,21%
	28 dias	6,47%	8,49%	7,79%	7,64%
Úmida	7 dias	9,05%	9,92%	8,06%	8,31%
	28 dias	8,97%	8,19%	8,48%	9,17%

Nota-se que a relação entre as resistências à compressão e à tração diminui quando é efetuada a cura térmica das composições com adição de sílica ativa - C-8, C-10 e C-12. As amostras de CAD submetidas a cura úmida atingiram resistência à tração em torno de 8,5% de sua resistência à compressão. Quando submetidas a tratamento térmico, esta relação cai para 6,7% da resistência à compressão. Por outro lado, a composição C-0 manteve a relação entre f_c e f_t em torno de 9,5% em ambos os processos de cura.



4.5.4. Módulo de Elasticidade – E_c

Ciclo Térmico: 5 horas

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade - E_c - dos concretos submetidos a 5 horas de cura térmica - tabela 4.13. A figura 4.13 apresenta o comportamento desta propriedade para as diferentes composições estudadas quando submetidas a cura térmica. Neste gráfico, observa-se que o módulo de elasticidade apresentou comportamento distinto entre todas as composições analisadas. A composição C-10 atingiu valores superiores aos demais em todas as idades, que variou em torno de 43 GPa. As composições C-8 e C-12 apresentaram valores menores do módulo, e um discreto aumento aos 28 dias.

Tabela 4.13: Módulo de Elasticidade do CAD Submetido a Diferentes Tipos de Cura com Variação da Percentagem de Sílica Ativa

Tipo de Cura	Idade	Variação da % Sílica Ativa			
		0%	8%	10%	12%
		GPa	GPa	GPa	GPa
Térmica	5 horas	33,17	26,95	44,31	19,06
	7 dias	41,24	24,54	44,87	19,71
	28 dias	45,65	30,34	42,36	26,90
Úmida	7 dias	51,14	48,91	54,80	53,27
	28 dias	51,60	53,80	56,97	58,68

Observando-se o gráfico da figura 4.14, observa-se um comportamento semelhante do módulo de elasticidade de todas as composições analisadas quando submetidas apenas a cura úmida. Neste gráfico, o valor do módulo de elasticidade variou em torno de 55 GPa em todas as composições.

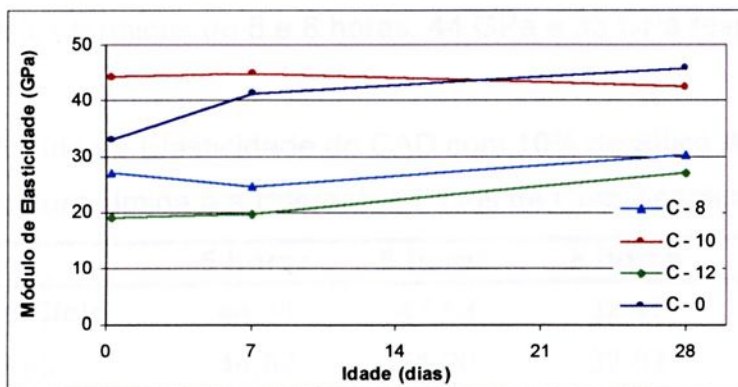


Figura 4.13: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidas a Ciclo Térmico de 5 horas Variando a Percentagem de Sílica Ativa

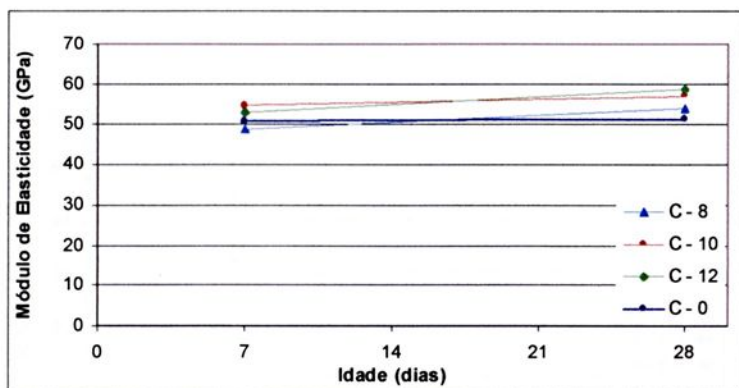


Figura 4.14: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidas Apenas à Cura Úmida Variando a Percentagem de Sílica Ativa

Ciclo Térmico: 5, 6, 8 e 9 horas

A tabela 4.14 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade - E_c - da composição C-10 quando submetida a ciclos térmicos de 5, 6, 8 e 9 horas. Estes valores foram plotados no gráfico da figura 4.15. Neste gráfico, percebe-se que os ciclos térmicos mais curtos implicam em valores maiores para o módulo de elasticidade. Observa-se também que o valor do



módulo de elasticidade não sofre variação ao longo do tempo para as amostras submetidas a ciclos térmicos de 5 e 8 horas, 44 GPa e 33 GPa respectivamente.

Tabela 4.14: Módulo de Elasticidade do CAD com 10% de Sílica Ativa Submetido a Cura Úmida e a Diferentes Ciclos de Cura Térmica

	Idade	5 horas	6 horas	8 horas	9 horas
Térmica	Após o Ciclo	44,31	47,53	32,47	22,81
	7 dias	44,87	51,20	32,82	28,29
	28 dias	42,36	43,15	33,58	21,72
Úmida	7 dias	54,80	55,09	50,33	49,23
	28 dias	56,97	51,40	55,47	54,23

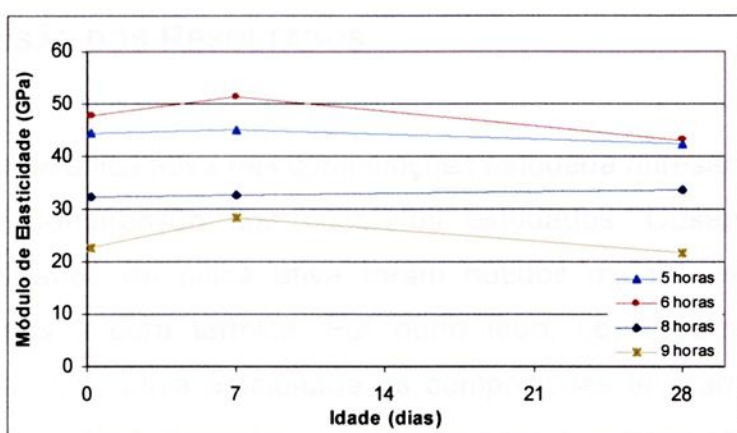


Figura 4.15: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD - Ciclos Térmicos: 5, 6, 8 e 9 horas - 10% de Sílica Ativa

Os ciclos de 5 e 6 horas não apresentaram variação no módulo de elasticidade aos 28 dias. Entretanto, o valor de E_c foi superior para o ciclo de 6 horas logo após o ciclo térmico e aos 7 dias. Observa-se também a diminuição do valor do módulo de elasticidade com o aumento do tempo de permanência da amostra em cura térmica. A figura 4.16 a seguir apresenta os resultados de módulo de elasticidade das amostras C-10 submetidas apenas a cura úmida.



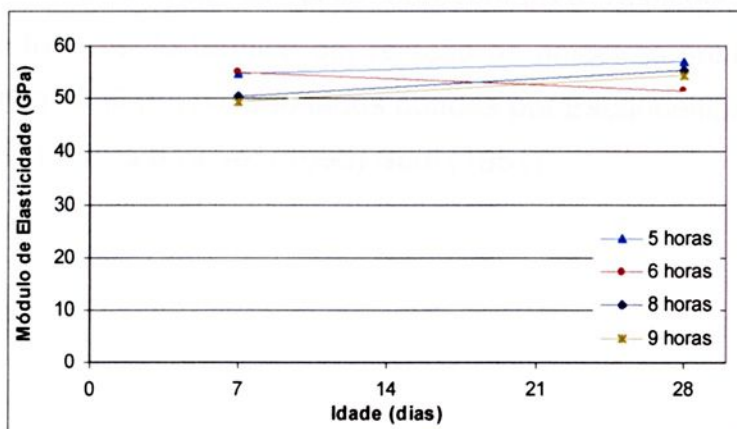


Figura 4.16: Evolução do Módulo de Elasticidade das Amostras de CAD Submetidos Apenas à Cura Úmida - 10% de Sílica Ativa

4.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A adição de sílica ativa nas composições estudada apresentou benefícios à Resistência à Compressão nos concretos estudados. Observa-se que com maiores quantidades de sílica ativa foram obtidos maiores resultados desta propriedade após a cura térmica. Por outro lado, observou-se que menores quantidades de sílica ativa adicionada às composições levaram a valores de f_t menores (figura 4.10). A Resistência à Tração para a composição C-0 foi menos influenciada pela cura térmica aos 7 e 28 dias.

A influência da duração da cura térmica foi mais sensível nos resultados de Módulo de Elasticidade - E_c - em relação às demais propriedades estudadas em todas as idades.

Os valores de f_c e f_t alcançados pelas composições com adição de sílica ativa - C-8, C-10 e C-12 - aos 28 dias foram bastante próximos. Este fato fez com que esta pesquisa prosseguisse com misturas cujas taxas de adição de sílica ativa fossem mais distantes na análise das propriedades do CAD utilizando o conceito da maturidade.

Todas as amostras de CAD apresentaram resistências aos 28 dias afetadas pelo tratamento térmico em relação às amostras submetidas apenas a cura úmida. Isso confirma os resultados obtidos por Escandeillas (1997) Lindgar e Sellevold (1993), Pinto e Hover (1996) Saul (1951).

3.1.1.1.1. O Efeito da Maturação na Análise das Propriedades Mecânicas do CAD

Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa realizada em um laboratório de pesquisa em materiais de construção civil, com o objetivo de avaliar o efeito da maturação das amostras de CAD em relação às propriedades mecânicas.

Os resultados obtidos demonstram que o aumento da maturação das amostras de CAD resulta em um aumento das propriedades mecânicas.

Conclui-se que a maturação das amostras de CAD resulta em um aumento das propriedades mecânicas, sendo que este aumento é diretamente proporcional ao tempo de maturação.



5. O MÉTODO DA MATURIDADE NA ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD

A Influência da utilização do processo de cura térmica em Concretos de Alto Desempenho, fabricados com diferentes porcentagens de sílica ativa, é avaliada neste capítulo sob a luz do conceito da maturidade pela análise de suas propriedades mecânicas.

Esta análise foi realizada segundo o procedimento determinado pela ASTM, baseado no conceito de idade equivalente proposto por FHP.

A Energia Aparente de Ativação – E_a – foi determinada experimentalmente, conforme os procedimento ASTM 1074 (1998) para cada amostra de concreto, fabricado com diferentes adições de sílica ativa – 0%, 10% e 20%.

Onde:

E_a = energia aparente de ativação (kJ/mol);

R = constante dos gases;

T = temperatura absoluta (K);

$\ln f$ = logaritmo natural da função de distribuição de probabilidade;

$\ln f_0$ = constante.

A Energia Aparente de Ativação – E_a – é determinada pela relação entre a temperatura e compressão (idade de cura) para o concreto em pelo menos três condições isotérmicas. Para cada condição isotérmica, é calculada a taxa de cura $\ln f$ e essa é plotada como função do inverso da temperatura, como equação natural na equação 10, da Arrhenius (equação 10), da seguinte forma:



5.1. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A utilização do Método da Maturidade seguindo o modelo proposto por FHP necessita da determinação de parâmetros referentes aos traços estudados como a Energia Aparente de Ativação do concreto – E_a . Encontra-se na literatura valores para energia de ativação em torno de 57 kJ/mol (Carino, 1991) para concretos fabricados com cimento americano, classificado segundo a ASTM como cimento Tipo III, cuja composição mais se aproxima a do cimento CPV ARI Plus utilizado nesta pesquisa. A ASTM 1074 (1998) apresenta um método de estimativa da E_a a partir do desenvolvimento da resistência à compressão da argamassa do concreto estudado em condições isotérmicas. Neste método, é usado um modelo linear hiperbólico de desenvolvimento da resistência à compressão em condições isotérmicas, baseado no modelo proposto por Carino (equação 7) dado pela equação 9 a seguir.

$$f_c = f_{c\infty} \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (9)$$

Onde:

f_c = média da resistência à compressão dos cubos;

t = idade da amostra;

$f_{c\infty}$ = limite de resistência;

t_0 = idade em que inicia o desenvolvimento da resistência;

k = taxa constante.

A Energia Aparente de Ativação – E_a – é determinada pela relação entre a resistência à compressão e idade da argamassa do concreto em pelo menos três condições isotérmicas. Para cada condição isotérmica, é calculada a taxa constante – k , que é plotada como função do inverso da temperatura, como logaritmo natural da equação 3 de Arrhenius (equação 10), da seguinte forma:

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{Ea}{RT} \quad (10)$$

Onde:

A = Constante;

Ea = Energia Aparente de Ativação – kJ/mol;

R = Constante Universal dos Gases – 8,314 J/(mol.K);

T = Temperatura Absoluta do Concreto – K.

Assim, a energia aparente de ativação – Ea – pode ser calculada como o valor negativo da inclinação da reta obtida no gráfico de Arrhenius, dividida pela constante universal dos gases – R. Nesta pesquisa foram determinados os valores da taxa constante para o modelo hiperbólico-linear (equação 7) e modelo Parabólico-Hiperbólico proposto por Knudsen (equação 8). Foram adotados os valores de Ea obtidos pela melhor interpolação no gráfico de Arrhenius.

5.1.1. Determinação Experimental da Ea

Através da análise dos resultados obtidos na primeira etapa desta pesquisa, onde o comportamento da resistência à compressão para as amostras com adição de sílica ativa entre 8%, 10% e 12% ficou muito próximo, optou-se nesta segunda fase trabalhar com faixas mais largas de adição. Desta forma, as amostras de argamassa analisadas variaram de 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa denominados por A-0, A-10 e A-20 respectivamente.

O método de determinação da energia aparente de ativação do concreto proposto pela ASTM 1074 (1998) é realizado a partir da resistência à compressão da argamassa do concreto. Os traços da argamassa do CAD analisado nesta pesquisa estão apresentados na tabela 5.1.

As amostras de argamassa foram colocadas em moldes cúbicos 5 x 5 x 5 cm e os ensaios de ruptura (figura 5.1) obedeceram as prescrições da ASTM 109

(1987). Estas amostras permaneceram nos moldes até o instante da primeira ruptura em câmara úmida a 30°C, e em câmara térmica a 55°C e 80°C. Após atingirem a resistência de 4 MPa, estas foram retiradas dos moldes e colocadas em banho térmico em cada temperatura de controle (figura 5.2).

Tabela 5.1: Traços de Argamassa Analisados

Material	A-0 kg/m³	A-10 kg/m³	A-20 kg/m³
Cimento	796,05	762,06	731,55
Areia	1254,95	1201,36	1153,27
Água	271,59	260,00	249,59
Sílica ativa	0	76,21	146,59
Superplastificante	17,48	25,10	30,98

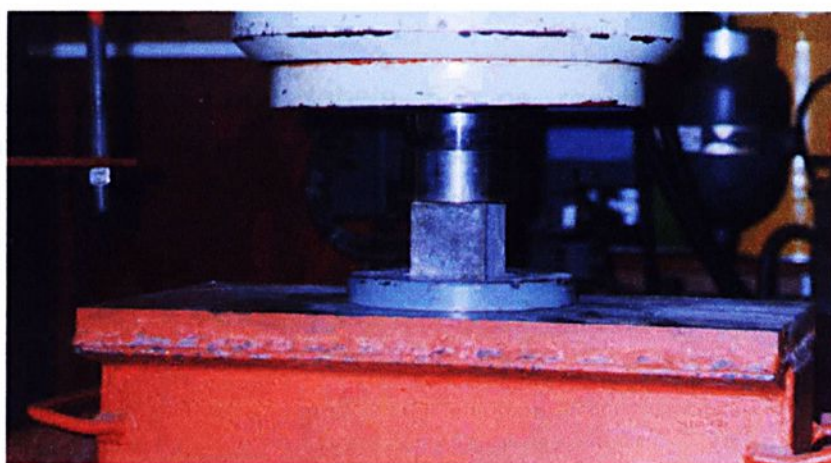


Figura 5.1: Ruptura dos CPs Cúbicos 5x5x5 cm

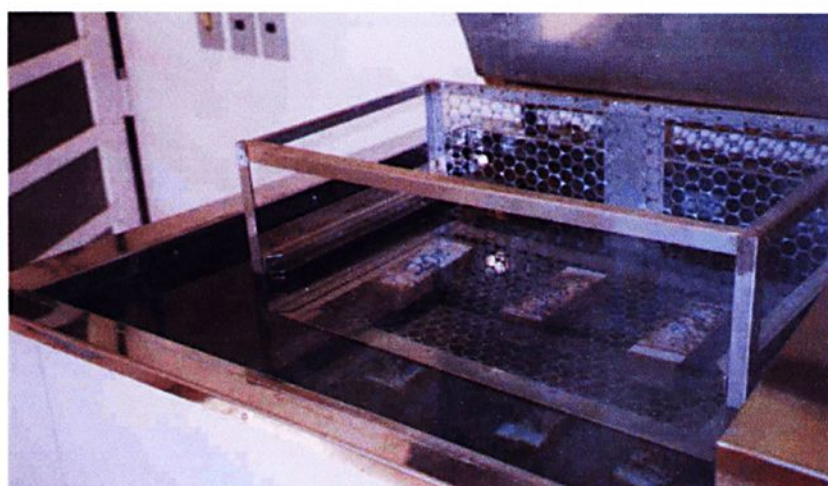


Figura 5.2: Amostras de Argamassa Colocadas em Banho Térmico

Inicialmente foi determinada a idade em que as amostras de argamassa atingiram 4 MPa a cada temperatura, sendo esta a primeira idade de ruptura. Foram realizadas cinco rupturas subseqüentes, cujas idades eram aproximadamente o dobro da idade anterior. Na análise dos resultados foram aproveitados os valores das quatro últimas rupturas.

Foi fabricada uma nova amostra de argamassa e o processo foi repetido. Para o cálculo da E_a , foram utilizados os quatro primeiros resultados, totalizando 8 pontos para interpolação.

5.1.2. Resultados Obtidos

Estão apresentados na tabela 5.2 os resultados de resistência à compressão dos traços de argamassa analisados e as respectivas idades para as temperaturas de controle: 30°C, 55°C e 80°C.



Tabela 5.2: Resistência à Compressão em Diferentes Condições Isotérmicas dos Traços de Argamassa Analisados

Traço A-0					
30°C		55°C		80°C	
Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa
0,35	4,13	0,19	5,33	0,14	4,96
0,69	34,67	0,38	42,67	0,27	44,80
1,39	50,93	0,74	54,67	0,43	56,53
2,78	57,33	1,47	59,20	0,86	59,73
1,39	50,40	0,75	56,00	0,54	58,40
2,78	59,20	1,50	60,00	1,08	61,87
5,56	64,27	2,94	63,20	1,72	64,80
11,11	73,33	5,89	64,27	3,44	63,20

Traço A-10					
30°C		55°C		80°C	
Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa
0,36	4,80	0,19	4,80	0,17	4,40
0,72	34,93	0,38	52,53	0,35	41,33
1,44	51,20	0,75	62,80	0,60	42,40
2,89	61,60	1,50	65,60	1,19	51,33
1,64	51,20	0,81	58,00	0,69	49,33
3,28	65,07	1,51	60,80	1,39	56,27
6,56	64,00	3,22	73,87	2,39	54,40
13,11	74,93	6,44	62,13	4,78	53,47

Traço A-20					
30°C		55°C		80°C	
Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa	Idade dias	f _c MPa
0,38	6,80	0,20	6,67	0,15	3,89
0,76	39,20	0,40	51,20	0,30	45,87
1,51	55,73	0,81	71,20	0,60	58,67
3,03	63,60	1,81	79,47	1,19	61,07
1,54	53,60	0,86	68,80	0,64	57,20
3,08	65,33	1,72	73,20	1,28	57,60
6,17	66,67	3,44	80,00	2,56	59,47
12,33	72,40	6,89	82,67	5,11	64,00

O item A1.1.8.1 do Anexo A1 da ASTM 1074 (1998) permite o cálculo da taxa constante – k – por meio de programa computacional que permite a



interpolação de uma dada equação. Desta forma, foi utilizado o software Origin 5.0 para o cálculo das variáveis envolvidas nos modelos de ganho de resistência estudados. Os resultados do cálculo do valor da taxa constante estão dispostos na tabela 5.3.

Os resultados de k foram plotados no gráfico de Arrhenius (figuras 5.3 a 5.8). O valor da Ea foi obtido dividindo-se o valor negativo da inclinação do gráfico obtido na interpolação linear do gráfico de Arrhenius. O valor de Ea adotado nesta pesquisa é dado pelo resultado cuja interpolação obteve melhor ajuste – R².

Tabela 5.3: Valores da Taxa Constante – k – Obtidos para os Modelos Analisados

Traço	Temperatura °C	Hiperbólico - Linear 1/horas	Parabólico - Hiperbólico 1/horas
A-0	30	2,20	1,76
	55	9,70	36,77
	80	14,98	61,99
A-10	30	2,02	2,10
	55	10,24	4,57
	80	20,83	30,39
A-20	30	2,14	4,53
	55	7,64	29,39
	80	24,22	71,59

A seguir estão dispostos os gráficos de Arrhenius para cada um dos modelos estudados (figuras 5.3 a 5.8)

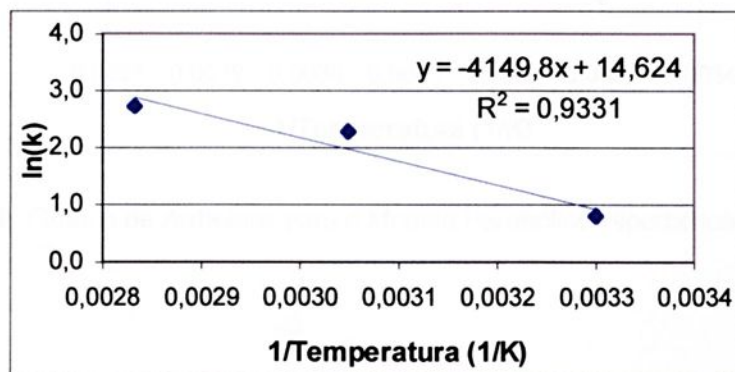


Figura 5.3: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-0



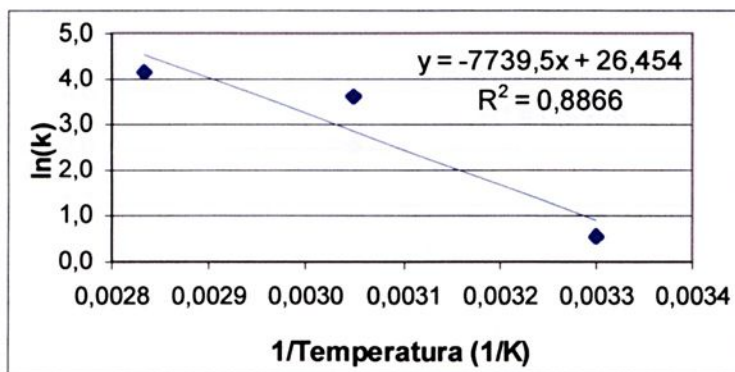


Figura 5.4: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-0

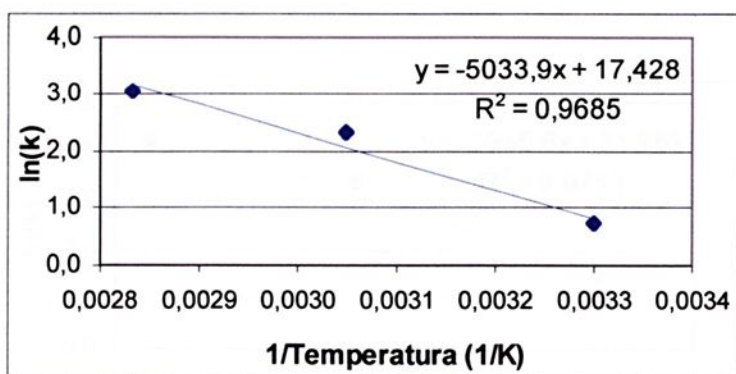


Figura 5.5: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-10

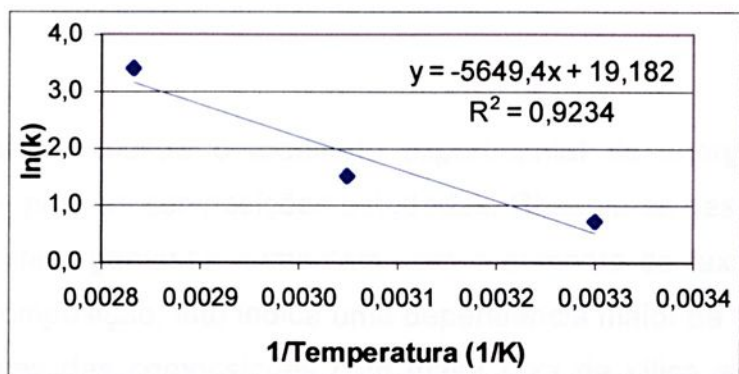


Figura 5.6: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-10

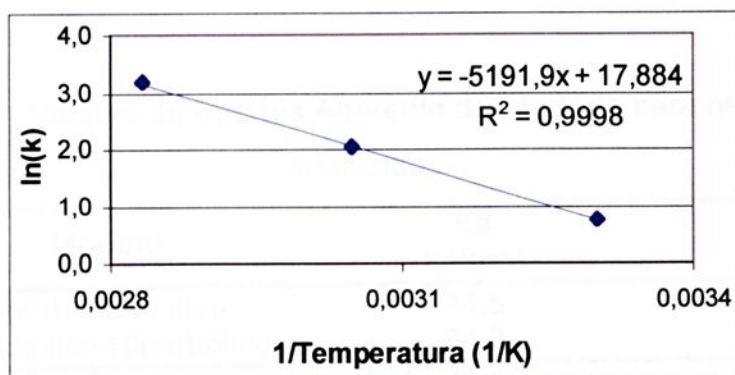


Figura 5.7: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Hiperbólico-Linear Traço A-20

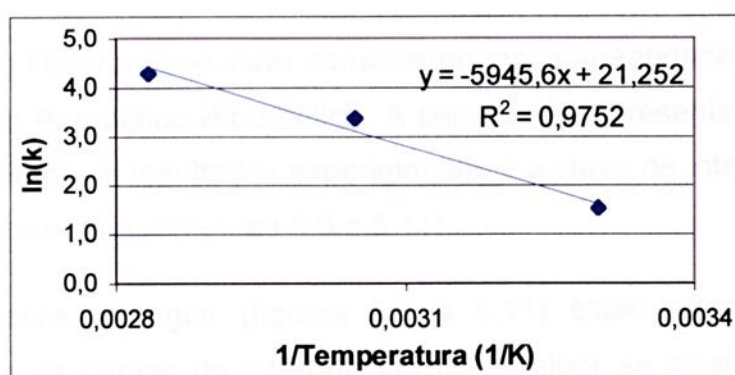


Figura 5.8: Gráfico de Arrhenius para o Modelo Parabólico-Hiperbólico Traço A-20

A tabela 5.4 mostra o resultado experimental da energia aparente de ativação – E_a – para as composições estudadas. Observa-se nesta tabela que os valores de E_a da argamassa aumentam com o aumento da taxa de sílica ativa adicionada à composição. Isto indica uma dependência maior da temperatura nas reações químicas das composições com maior taxa de sílica ativa. Os valores adotados para o cálculo da idade equivalente pela função de FHP (equação 5) nesta pesquisa são os que obtiveram menor valor de R^2 .

Tabela 5.4: Valores de Energia Aparente de Ativação para os Modelos Analisados

Traço	Modelo	Ea kJ/mol	R ²
A-0	Hiperbólico-Linear	34,5	0,9331
	Parabólico-Hiperbólico	64,3	0,8866
A-10	Hiperbólico-Linear	41,9	0,9685
	Parabólico-Hiperbólico	47,0	0,9234
A-20	Hiperbólico-Linear	43,2	0,9998
	Parabólico-Hiperbólico	49,4	0,9752

O modelo Hiperbólico-Linear demonstrou maior linearidade dos valores de k, que o modelo Parabólico-Hiperbólico. A seguir, são apresentados os gráficos onde estão plotados os resultados experimentais e a curva de interpolação com o modelo Hiperbólico-Linear (figuras 5.9 a 5.11).

Nos gráficos a seguir (figuras 5.9 a 5.11) estão plotados os pontos experimentais e as curvas de interpolação que melhor se ajustaram a estes – modelo Linear-Hiperbólico.

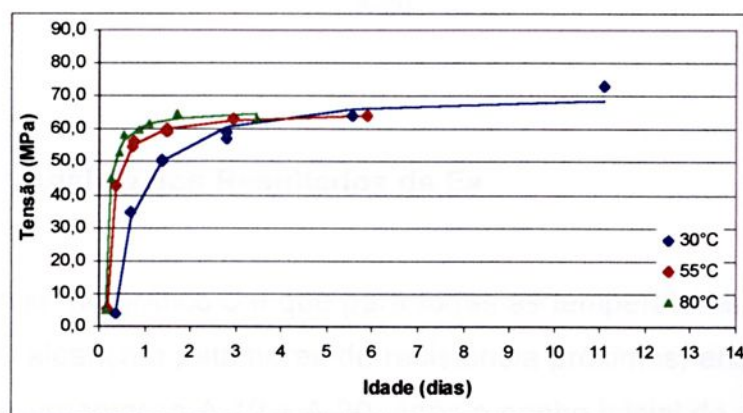


Figura 5.9: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-0



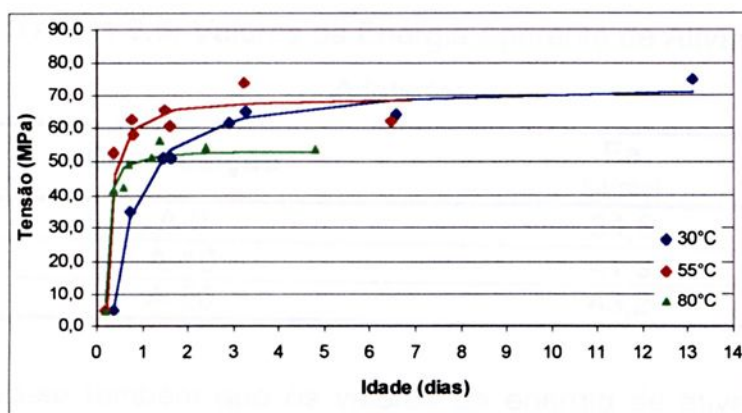


Figura 5.10: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-10

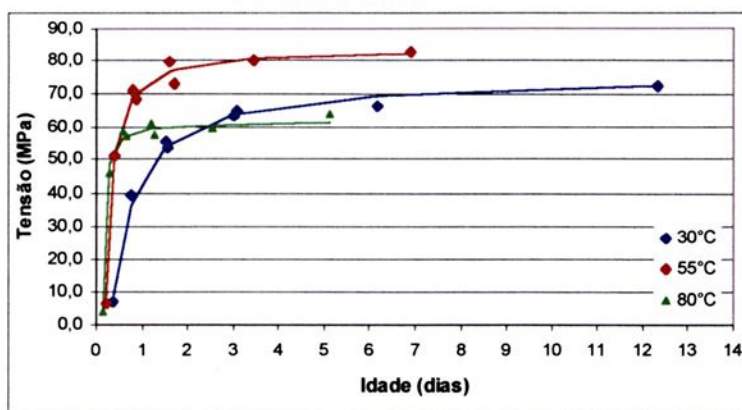


Figura 5.11: Resistência à Compressão para as Temperaturas de Controle – Traço A-20

5.1.3. Análise dos Resultados de Ea

Observa-se no gráfico 5.9 que para todas as temperaturas as amostras de argamassa A-0 alcançam patamares de resistência próximos, enquanto que para as amostras de argamassa A-10 e A-20, após o ganho inicial de resistência, esta se estabilizou em patamares distintos, sendo que para as amostras a temperatura de 80°C apresentou resultados menores. A tabela 5.5 apresenta os valores de Ea adotados para a análise das propriedades mecânicas do CAD utilizando o método da maturidade.



Tabela 5.5: Valores de Energia Aparente de Ativação
Adotados

Composição	Ea kJ/mol
A-0	34,5
A-10	41,9
A-20	43,2

Observa-se também que os valores da energia de ativação do concreto aumentaram com o aumento da taxa de sílica ativa adicionada à composição. Isto indica uma dependência maior da temperatura nas reações químicas das composições com maior taxa de sílica ativa.

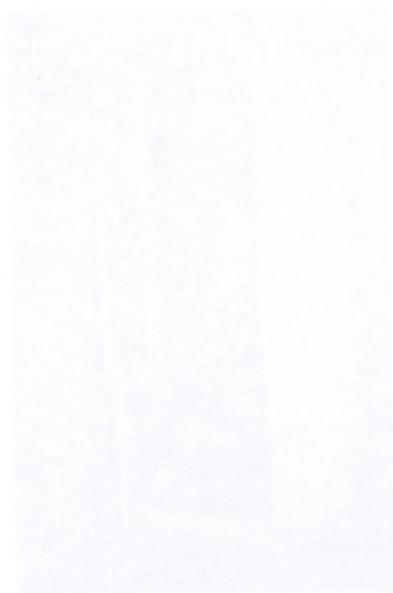


Figura 3.12: Mapa Acústico de Curo Térmico

5.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CAD

As propriedades mecânicas do CAD foram avaliadas segundo o modelo proposto por FHP, no qual foi aplicado o conceito de idade equivalente. Os Efeitos da cura térmica nas propriedades mecânicas – Resistência à Compressão (f_c), Resistência à Tração (f_t), Módulo de Elasticidade (E_c) e Coeficiente de Poisson (μ) – foram analisadas em termos de idade equivalente a 80°C, durante ciclos térmicos de 6 horas a partir da segunda hora de cura térmica.

5.2.1. Programa Experimental

O programa experimental desta segunda fase obedeceu ao mesmo desenvolvimento descrito no capítulo 4, levando-se em consideração alguns aspectos não previstos na primeira fase. A diferença ficou por parte do aparelho de cura térmica (figura 5.12), elaborado para amenizar as perdas de calor na retirada dos corpos de prova para ensaio e permitindo acomodar um número maior de CPs.



Figura 5.12: Novo Aparelho de Cura Térmica

O aparelho é constituído de um corpo cilindro revestido internamente com fibra cerâmica para diminuir perdas de calor. Seu corpo é apoiado em um suporte e sob este está instalado um reservatório de água onde o vapor é gerado. A água é aquecida por duas resistências de 2500W ligadas em paralelo. O calor é distribuído uniformemente dentro da câmara através de tubos de ferro fundido. A câmara de cura possui três portas que dão acesso a duas prateleiras por porta, onde são colocados os corpos de prova. Um termostato garante que a temperatura permaneça num patamar constante, que neste trabalho foi conservado a 80°C.

Na tabela 5.6 estão apresentadas as composições dos concretos analisados, elaborados com os mesmos materiais descritos no capítulo anterior.

Tabela 5.6: Traços de CAD Analisados

Material	C-0 kg/m³	C-10 kg/m³	C-20 kg/m³
Cimento	418,9	409,3	407,7
Brita 1	1279,3	1250,0	1245,2
Areia	660,3	645,2	642,7
Água	142,9	139,6	139,1
Sílica ativa	-	40,9	48,9
Superplastificante	9,2	13,5	13,4
A/C		0,34	
A/C efetiva		0,22	

O concreto foi fabricado e colocado em moldes metálicos. Após sua fabricação, as amostras foram colocadas em câmara térmica com ambiente saturado com vapor a 80°C. Cada amostra era retirada dos moldes no instante da ruptura. Também foram fabricadas amostras para serem colocadas em cura úmida e testadas a 7 e 28 dias para cada composição. O número de CPs fabricados em cada ensaio está apresentado na tabela 5.7.

As amostras submetidas a cura térmica foram ensaiadas em intervalos de 1 hora, sendo que na primeira hora de cada ciclo, nenhuma das amostras atingiu valores de resistência que permitissem a realização da ruptura. Assim, foram realizadas 5 séries de ruptura para cada ciclo.



Tabela 5.7: N.º de CPs Moldados nos Ensaiois

Cura	Idade	f_c	f_t	E_c e μ
Térmica	2 horas	3	3	2
	3 horas	3	3	2
	4 horas	3	3	2
	5 horas	3	3	2
	6 horas	3	3	2
Úmida	7 dias	3	3	2
	28 dias	3	3	2
Total		21	21	14

Durante a cura, a temperatura foi monitorada por termopares instalados no interior de duas amostras. Para tanto, foi colocado um tubo de cobre de 10 cm nestas amostras para que fosse possível a instalação do termopar. Foram utilizados multímetros digitais com sistema de aquisição de dados para realizar leituras de temperatura em intervalos de 15 minutos (figura 5.13).

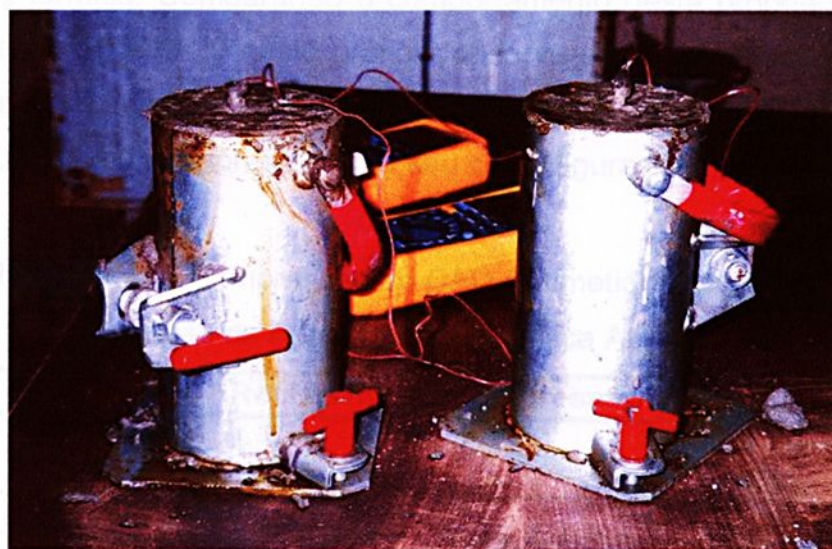


Figura 5.13: Testemunhos para Controle da Temperatura de Cura

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.3.1. Resistência à Compressão – f_c

Os dados apresentados nas tabelas 5.8 mostram a influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão. Percebe-se um ganho alto desta propriedade a partir da segunda hora de cura, culminando em um patamar máximo no ganho de resistência próximo às seis horas de cura. Os ciclos de temperatura para cada ensaio de resistência à compressão podem ser observados na figura 5.14.

A figura 5.15 apresenta o comportamento da resistência à compressão durante a cura térmica. Comparando o comportamento desta propriedade entre as composições C-10 e C-20 neste gráfico, observa-se que a composição C-10 atingiu resistências mais elevadas com o tempo, apesar de ter sido submetida a temperaturas um pouco inferiores durante seu ciclo (figura 5.14).

Tabela 5.8: Resistência a Compressão do CAD Submetido a Cura Térmica com Variação da Porcentagem de Sílica Ativa

Idade	Resistência à Compressão		
	C-0	C-10	C-20
horas	MPa	MPa	MPa
2:00	0,56	1,49	0,99
3:00	17,76	19,76	10,93
4:00	27,42	31,7	23,85
5:00	31,19	38,24	35,01
6:00	31,77	38,92	37,82

Tabela 5.9: Resistência à Compressão do CAD Submetido a Cura Úmida

Idade	Resistência à Compressão		
	C-0	C-10	C-20
dias	MPa	MPa	MPa
7	53,4	76,3	79,6
28	72,7	90,2	79,5



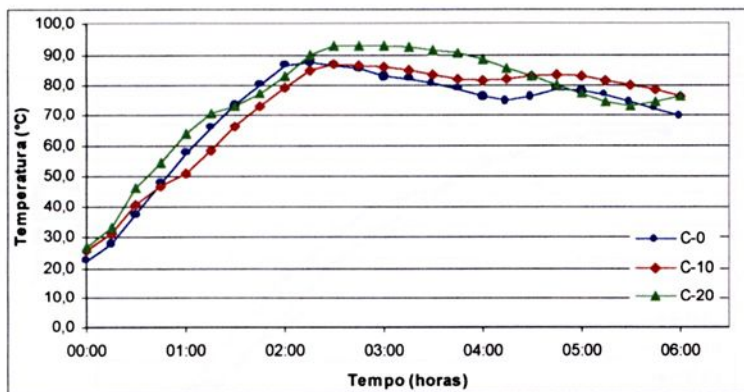


Figura 5.14: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Resistência à Compressão

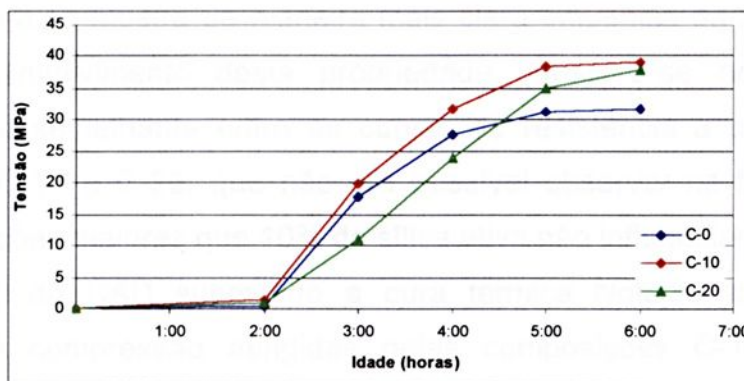


Figura 5.15: Comportamento da Resistência à Compressão Durante a Cura Térmica

Quando estes dados são plotados em termos de idade equivalente a 80°C, as diferenças entre as temperaturas dos ciclos não influenciam na análise. O gráfico de resistência à compressão em função da idade equivalente apresentado na figura 5.16 mostra um comportamento um pouco distinto da resistência à compressão das composições estudadas em relação ao gráfico da figura 5.15. Quando colocado em termos de idade equivalente, o ganho de resistência inicia-se na primeira hora de cura, ou seja, o período de elevação da temperatura, que ocorreu durante as primeiras horas de cura (figura 5.14), é calculado pela fórmula de FHP como se a temperatura fosse constante – 80°C – resultando em um período mais curto de tempo para que se inicie o ganho de resistência. Assim, as

resistências indicadas em todas as idades foram antecipadas, fazendo com que o gráfico esteja deslocado para a esquerda.

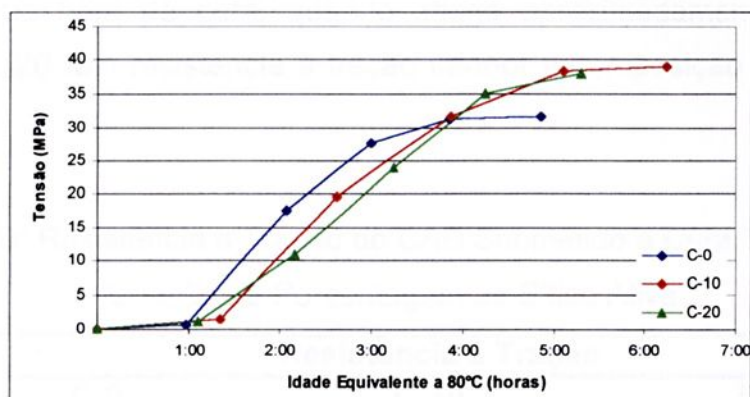


Figura 5.16: Resistência à Compressão versus Idade Equivalente a 80°C

A figura 5.16 mostra de maneira mais clara influência da adição de sílica ativa no desenvolvimento desta propriedade. Observa-se nesta figura um comportamento semelhante entre as curvas de resistência à compressão das composições C-10 e C-20, que não era possível observar na figura 5.15. Isto indica que adições maiores que 10% de sílica ativa não influenciam na resistência à compressão do CAD submetido a cura térmica. Nota-se também que as resistências à compressão atingidas pelas composições C-10 e C-20 são inferiores à composição C-0 até a quatro horas de idade equivalente a 80°C, quando atingem aproximadamente 32 MPa.

5.3.2. Resistência à Tração – f_t

Estão apresentados na tabela 5.10 os resultados da resistência à tração do CAD durante o ciclo térmico de 6 horas. A tabela 5.11 relaciona os resultados para as amostras mantidas em cura úmida ao 7 e 28 dias. As temperaturas registradas em cada ensaio estão dispostas na figura 5.17.

O desenvolvimento da resistência à tração segue uma tendência similar à da resistência à compressão. Observando a figura 5.18, percebe-se que a

resistência à tração da composição C-0 é maior que à da composição C-10 até a quarta hora de cura térmica, quando estas atingem aproximadamente 3,5 MPa. A composição C-20 tem resistência à tração inferior à composição C-0 até pouco antes da quinta hora de cura, quando atinge aproximadamente 3,6 MPa. A composição C-20 tem resistência à tração inferior à composição C-10 em todas as idades.

Tabela 5.10: Resistência a Tração do CAD Submetido a Cura Térmica com Variação da Porcentagem de Sílica Ativa

Idade horas	Resistência à Tração		
	C-0 MPa	C-10 MPa	C-20 MPa
2:00	0,21	0,10	0,09
3:00	2,78	1,41	1,12
4:00	3,65	3,49	2,56
5:00	3,82	4,64	4,22
6:00	3,94	5,13	4,41

Tabela 5.11: Resistência à Tração do CAD Submetido a Cura Úmida

Idade dias	Resistência à Tração		
	C-0 MPa	C-10 MPa	C-20 MPa
7	6,8	6,3	7,5
28	6,6	6,9	7,5

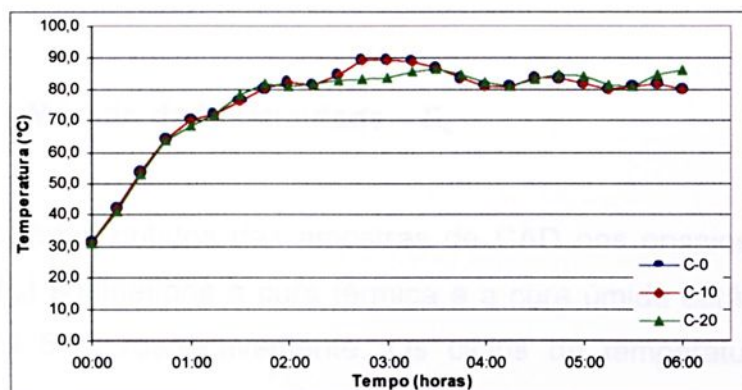


Figura 5.17: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Resistência à Tração



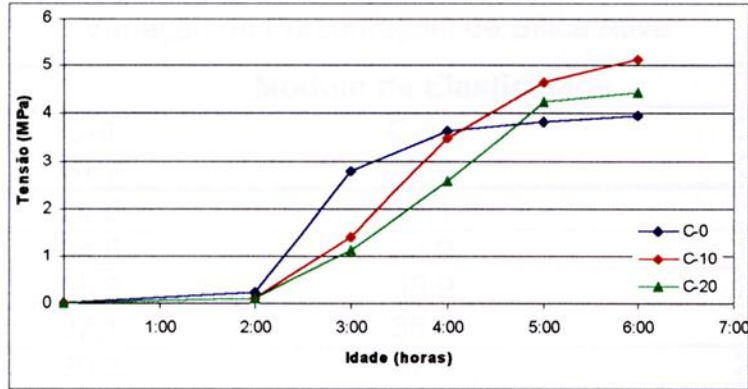


Figura 5.18: Comportamento da Resistência à Tração Durante a Cura Térmica

O gráfico da figura 5.19 mostra o comportamento da resistência à tração em termos de idade equivalente a 80°C. Observa-se pouca diferença em relação à figura 5.18, à não ser pelo deslocamento das curvas para a esquerda.

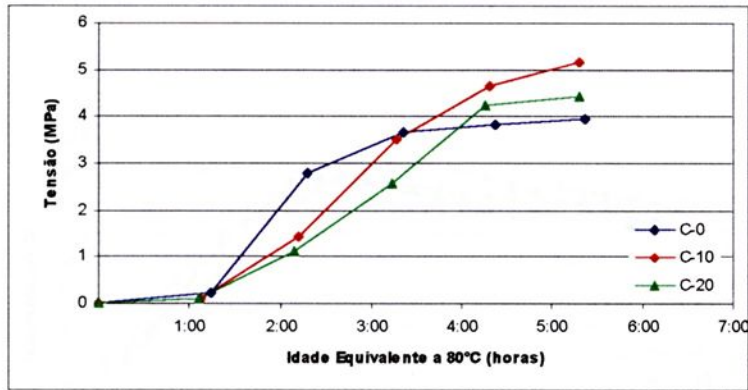


Figura 5.19: Resistência à Tração versus Idade Equivalente a 80°C

5.3.3. Módulo de Elasticidade – E_c

Os resultados obtidos das amostras de CAD nos ensaios de Módulo de Elasticidade (E_c) submetidos a cura térmica e a cura úmida estão dispostos nas tabelas 5.12 e 5.13 respectivamente. Os ciclos de temperaturas para estes ensaios estão dispostos na figura 5.20 a seguir.



Tabela 5.12: Módulo de Elasticidade do CAD Submetido a Cura Térmica com Variação da Porcentagem de Sílica Ativa

Idade	Módulo de Elasticidade		
	C-0	C-10	C-20
horas	GPa	GPa	GPa
2:00	24,5	13,1	5,5
3:00	34,5	32,9	12,3
4:00	35,8	35,9	23,1
5:00	37,1	38,6	27,9
6:00	39,3	47,2	25,3

Tabela 5.13: Módulo de Elasticidade do CAD Submetido a Cura Úmida

Idade	Módulo de Elasticidade		
	C-0	C-10	C-20
dias	GPa	GPa	GPa
7	54,94	56,53	50,16
28	59,30	60,28	53,44

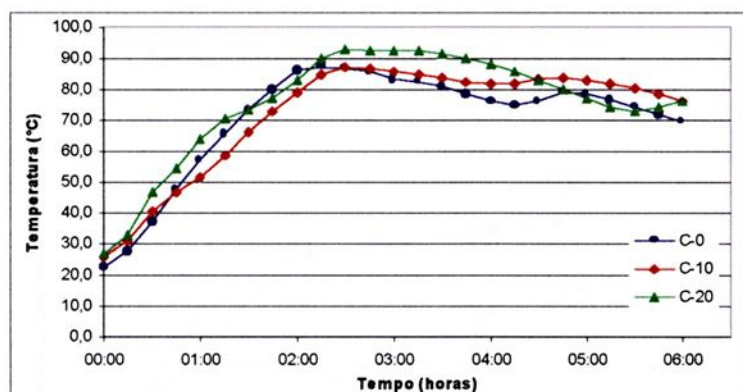


Figura 5.20: Temperaturas Registradas Durante o Ensaio de Módulo de Elasticidade

O comportamento do Módulo de Elasticidade durante a cura térmica das amostras analisadas pode ser observado na figura 5.21. A amostra C-0 apresentou valores de módulo de elasticidade mais alto até a quinta hora de cura, enquanto a amostra C-20 obteve resultados inferiores às demais em todas as idades.

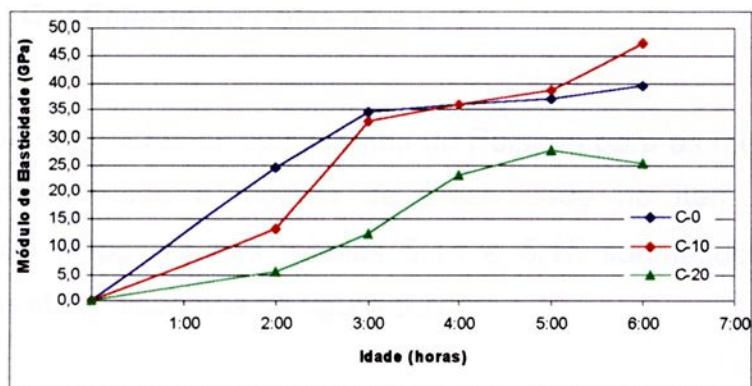


Figura 5.21: Comportamento do Módulo de Elasticidade durante a Cura Térmica

Na figura 5.22, os valores de módulo de elasticidade foram plotados em função da idade equivalente a 80°C. Neste gráfico, as composições C-0 e C-10 apresentaram valores próximos para as mesmas idades equivalentes. Porém, no início do ciclo térmico o módulo de elasticidade se mostrou um pouco mais alto para a mistura C-0, enquanto que, no fim do ciclo, esta situação se inverte com valores mais elevados desta propriedade para a amostra C-10. Estas amostras apresentaram resultados mais elevados de módulo de elasticidade que os obtidos com a amostra C-20.

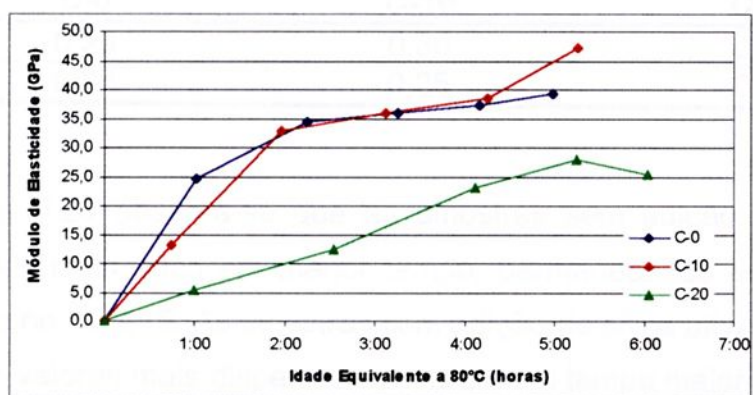


Figura 5.22: Módulo de Elasticidade versus Idade Equivalente a 80°C



5.3.4. Coeficiente de Poisson – μ

Foram determinados os coeficientes de Poisson para as mesmas amostras em que foi determinado o módulo de elasticidade no item anterior, cujos resultados estão dispostos nas tabelas 5.14 e 5.15 submetidos aos mesmos ciclos de temperatura dispostos na figura 5.20.

Tabela 5.14: Coeficiente de Poisson do CAD Submetido a Cura Térmica com Variação da Porcentagem de Sílica Ativa

Idade dias	Coeficiente de Poisson		
	C-0	C-10	C-20
2:00	0,15	0,07	0,01
3:00	0,16	0,19	0,02
4:00	0,14	0,16	0,16
5:00	0,16	0,14	0,16
6:00	0,16	0,27	0,14

Tabela 5.15: Coeficiente de Poisson do CAD Submetido a Cura Úmida

Idade dias	Coeficiente de Poisson		
	C-0	C-10	C-20
7	0,29	0,30	0,26
28	0,24	0,25	0,25

Na figura 5.23 observa-se que as amostras sem adição de sílica ativa atingiram valores mais altos em menor tempo, permanecendo em um patamar constante em torno de 0,15. As amostras com adição de sílica ativa – C-10 e C-20 – apresentaram valores mais dispersos e levaram um tempo maior para atingirem o patamar médio.

Quando analisado em relação à idade equivalente, o ganho inicial do coeficiente de Poisson se mostra semelhante entre as amostras C-0 e C-10. A amostra C-20 apresentou um ganho mais lento para esta propriedade, que se estabiliza em aproximadamente quatro horas.

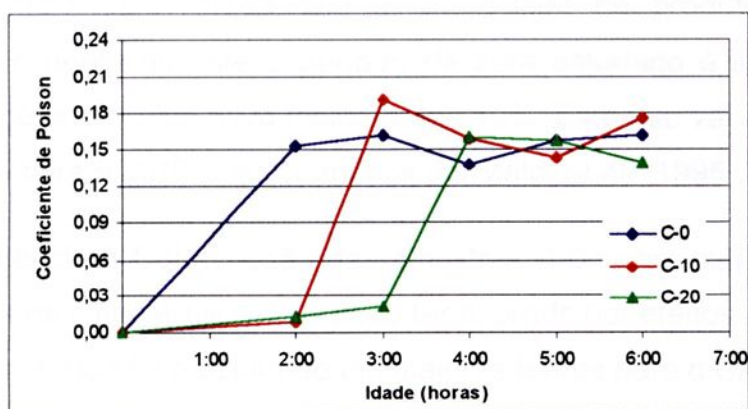


Figura 5.23: Comportamento do Coeficiente de Poisson durante a Cura Térmica

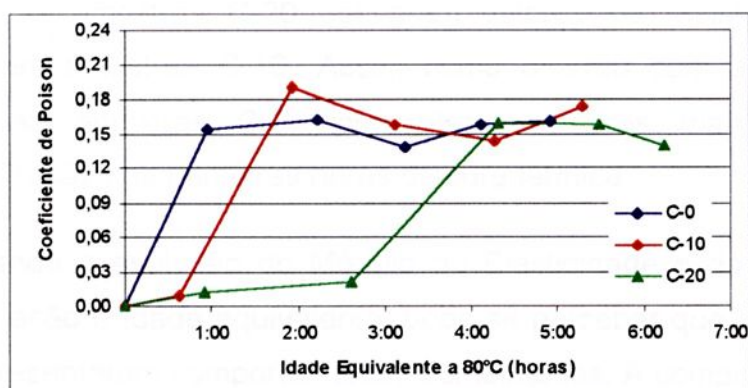


Figura 5.24: Coeficiente de Poisson versus Idade Equivalente a 80°C

5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A utilização do método da maturidade em termos de idade equivalente nos mostra de forma mais clara o comportamento das propriedades estudadas. Com o método da maturidade, foi possível avaliar a real influência das adições de sílica ativa durante o período de cura térmica estudado.

Observou-se que o comportamento da Resistência à Compressão das amostras C-20 foi semelhante aos resultados obtidos com a composição C-10. De acordo com os resultados obtidos, adições maiores que 10% de sílica ativa no CAD não trazem maiores benefícios quando este é submetido a este tipo de

tratamento térmico. Isso indica que a quantidade de produtos gerados na hidratação do cimento durante o período de cura estudado é insuficiente para reagir com adições de sílica ativa maiores que 10%. Este fato vai ao encontro dos resultados com cura a 20°C e 50°C obtidos por Wild, et al (1995).

A Resistência à Compressão das amostras C-0 foram maiores durante as primeiras horas de ciclo térmico. Isto pode ter ocorrido por efeitos retardadores do superplastificante, que foi adicionado em maiores teores para o CAD com maiores adições de sílica ativa.

A adição de sílica ativa trouxe maiores Resistências à Tração a longo prazo, porém as amostras C-20 obtiveram valores de resistência à tração menores que as amostras C-10. Assim como ocorreu com a Resistência à Compressão, as amostras C-0 apresentaram valores mais elevados de Resistência à Tração nas primeiras horas de cura térmica.

Observando a evolução do Módulo de Elasticidade e do Coeficiente de Poisson em relação à idade equivalente, pode-se perceber que as composições C-0 e C-10 apresentaram comportamentos semelhantes. A composição com 20% de adição de sílica ativa – C-20 – não apresentou benefício para estas propriedades do CAD quando submetido a cura térmica.

A determinação do Coeficiente de Poisson, que envolve determinações simultâneas de carga axial, de deformações axiais e de deformação transversal a velocidade constante não é fácil, segundo Aitcin (2000). Os valores encontrados sobre esta propriedade na literatura são limitados e às vezes contraditórios.

As dificuldades encontradas nos ensaios de E_c e μ , em que foi utilizado um compressômetro-expansômetro analógico, não permitiram que estes atingissem a mesma dinâmica imposta nos ensaios de f_c e f_t . Como as leituras eram realizadas de maneira manual, foi despendido muito tempo entre as leituras dos corpos de prova, não sendo possível realizá-las exatamente no intervalo de tempo previsto. Estas dificuldades podem ser contornadas com a utilização de equipamento eletrônico para a realização das leituras de maneira mais ágil e com maior exatidão.



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a influência da porcentagem de sílica ativa nas propriedades mecânicas do CAD submetido a cura térmica a vapor. O programa experimental foi elaborado em duas etapas: na primeira fase foi avaliado o comportamento do CAD variando a adição de sílica ativa em 0%, 8%, 10% e 12%, mantendo o ciclo térmico a 80°C em 5 horas.

Foi possível observar que as composições com maiores adições de sílica ativa obtiveram melhores resultados de Resistência à Compressão a longo prazo. Porém, este efeito foi contrário para a Resistência à Tração, pois as amostras com adições mais elevadas de sílica ativa apresentaram menores valores para esta propriedade.

Em seguida, foi mantida a adição de sílica ativa em 10% e os ciclos variaram em 5, 6, 8 e 9 horas. Destes ensaios pode-se concluir que ciclos mais longos de cura térmica a vapor resultaram em ganho de resistência com o tempo menos intenso. Conclui-se também que os resultados de Módulo de Elasticidade das amostras submetidas a ciclos mais longos apresentam-se inferiores.

Nesta primeira fase, todas as amostras de CAD apresentaram suas propriedades aos 28 dias afetadas pelo tratamento térmico em relação às amostras submetidas apenas a cura úmida. Isso confirma os resultados obtidos

por Escandeillas (1997) Lindgar e Sellevold (1993), Pinto e Hover (1996) Saul (1951).

Na segunda etapa da pesquisa foi avaliada a influência da adição de sílica ativa em amostras com faixas de adição maiores – 0%, 10% e 20% – fixando-se o ciclo térmico em 6 horas a 80°C, utilizando o método da maturidade. A determinação experimental da Energia Aparente de Ativação – E_a – foi feita seguindo o procedimento ASTM 1074 (1998) para as três composições avaliadas em 3 condições isotérmicas: 30°C, 55°C e 80°C.

A utilização do método da maturidade em termos de idade equivalente nos mostrou de maneira mais clara o comportamento das propriedades estudadas, possibilitando avaliar a real influência das adições de sílica ativa durante o período de cura térmica estudado. Na avaliação da influência da sílica ativa no CAD submetido a cura térmica utilizando o método da maturidade, as seguintes conclusões podem ser levantadas:

O comportamento da Resistência à compressão do CAD não apresentou diferença entre as amostras com 10% e 20% de adição de sílica ativa, que atingiram resistências semelhantes em todas as idades equivalentes. A Resistência à Compressão no fim do ciclo térmico estudado é maior para as amostras com adição de sílica ativa, para a relação A/C utilizada.

Analisando a Resistência à Tração, pode-se dizer que a adição de 10% de sílica ativa atingiu um patamar máximo para esta resistência no fim do ciclo térmico de 6 horas, adições mais elevadas atingiram valores menores desta propriedade.

Os valores obtidos para o Módulo de Elasticidade mostraram um comportamento semelhante entre as amostras com 0% e 10% de sílica ativa, enquanto que as amostras com 20% de adição atingiram resultados inferiores em todas as idades equivalentes a 80°C.

As amostras de CAD obtiveram resultados de Coeficiente de Poisson em torno de 0,15 no fim do ciclo para todas as adições de sílica ativa estudadas. Por outro lado, as amostras com maiores adições de sílica ativa levaram maior tempo



para atingir este patamar. Este fenômeno pode ter ocorrido devido às propriedades retardadoras do superplastificante, que é encontrado em concentrações mais elevadas nas composições com maior quantidade de sílica ativa.

As amostras sem adição de sílica ativa atingiram resultados maiores em todas as propriedades estudadas nas primeiras horas dos ciclos térmicos. Observa-se também que os valores da energia de ativação do concreto aumentaram com o aumento da taxa de sílica ativa adicionada à composição. Isto indica uma dependência maior da temperatura nas reações químicas das composições com maior taxa de sílica ativa. Isto pode ser explicado pelos efeitos retardadores do superplastificante, que foi adicionado em maiores teores para o CAD com maiores adições de sílica ativa.

6.2. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO

Para continuação deste trabalho, algumas propostas são aqui apresentadas:

- Em relação aos ciclos térmicos, outras temperaturas de cura devem ser utilizadas na avaliação da influência da cura térmica nas propriedades do CAD, buscando atingir patamares de resistência mecânica mais elevados para o concreto submetido a este processo;

- Estudar a influência nas propriedades mecânicas do CAD, de diferentes porcentagens de adições e de diferentes tipos de superplastificante, justificada pela influência deste componente na taxa de hidratação superficial do cimento, poderá levar a melhores resultados quando se utiliza a cura térmica;

- Além das propriedades mecânicas, devem ser avaliadas também as propriedades relacionadas com a durabilidade do CAD submetido a cura térmica, tais como: porosidade, permeabilidade, resistência a ácidos e sulfatos, retração, carbonatação, reações álcali-agregados, abrasão, entre outras;



- A determinação da taxa constante – k – pode ser avaliada não apenas por meio da resistência à compressão da argamassa do concreto estudado. Podem ser determinadas taxas constantes e, conseqüentemente, Energias de Ativação Aparentes específicas para cada propriedade estudada, seguindo o método proposto pela ASTM;

- Estudar a Energia Aparente de Ativação E_a – para diferentes composições de concreto visando a continuidade da utilização do método da maturidade como ferramenta de avaliação das propriedades mecânicas deste material;

- Uma investigação científica mais afinada sobre o comportamento do Módulo de Elasticidade – E_c – e do Coeficiente de Poisson – μ – do concreto quando submetido a cura térmica, utilizando extensômetros elétricos e leituras automatizadas que permitam maior precisão dos resultados, se faz necessária. A utilização da instrumentação analógica nesta pesquisa é suscetível à falha humana, e pode ter levado à limitação da precisão dos resultados.

A contribuição deste trabalho veio no sentido de analisar as propriedades mecânicas do Concreto de Alto Desempenho, elaborado com materiais disponíveis na região noroeste do Estado de São Paulo, quando submetidos a cura térmica a vapor, para uma aplicabilidade em estruturas pré-moldadas. A motivação deste tema surgiu do estagio realizado por este autor, junto a CONPREM e a CONSTAN na fabricação de dormentes para a FERRONORTE, ganhando fôlego ao se utilizar os estudos de Carino, Hover e Pinto numa investigação científica mais aprimorada sobre o comportamento deste material, com compromisso de engenharia.



7. BIBLIOGRAFIA

7.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. PINI 2000. 667p.
- ALMEIDA, I. R. **Concretos de alto desempenho: A evolução tecnológica dos concretos tradicionais**. IBRACON, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5733 EB2**: Cimento Portland de alta resistência inicial: procedimento. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: procedimento. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral: procedimento. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama - Tensão-deformação: procedimento. Rio de Janeiro, 1984.
- ASTM C 109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in or 50-cm cube specimens), ASTM C 109-87, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1987.
- ASTM C 1074 Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM C 1074-98, Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1998.
- BARBOSA, M. P. **Uma contribuição experimental e numérica sobre estruturas de concreto armado de alto desempenho: estudo da aderência-ancoragem e do comportamento de vigas fletidas**. 1998. 174



p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira.

CAO, Y.; DETWILER, J. R. Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures. **Cement and Concrete Reserach**, v. 25, n. 3, p.627-638, 1995.

CARINO, N. J. The maturity method. In: **CRC Handbook on nondestructive testing of Concrete**, V. M. Malhotra and N. J. Carino. eds. CRC Press: 1991. p. 101-146.

CARINO, N. J., KNAB, L. I., CLIFTON, J. R. **Applicability of the maturity method to high-performance concrete**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1992. 64p, ref. NISTIR 4819.

DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, F. M. P.; WOLF, J. **Concreto de alta resistência**. IBRACON, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, 1997

DE MELO, A. B. **Estudo da cura térmica (Vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados**, 1996. 217p. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DE MELO, A. B., LIBÓRIO, J. B. L., SILVA, I. J. Evidências da perda de resistência mecânica final devido à cura térmica observadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Instituto Brasileiro do Concreto, 2000.

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, Spécial XIX, 1997. p. 123-130, ref 4040.

FERRARI, A. F. **Propriedades mecânicas do concreto de elevado desempenho fabricado com diversos materiais**. 1995. 167 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FLOR, J. M. **Propriedades mecânicas do concreto de alta resistência a baixas idades**. 1994. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KANDA, T., SAKURAMOTO, F., SUZUKI, K. Compressive strength of silica fume concrete at higher temperatures. In: International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pouzzolans, 4., 1992, Istanbul, **Proceedings...** Istanbul: ACI, 1992. ref. SP-132-59

HASNI, L.; GALLIAS J. L. & SALOMON, M. Influence of the curing method on the durability of high performance concretes. In: International Conference



Durability of Concrete, 3., 1991, Montreal, **Proceedings...** Montreal: ACI, 1991.

HELENE, P. R. L. **Concreto de elevado desempenho: O material para construção das obras nos anos 2000.** IBRACON, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, 1997.

KJELLEN, O. K. Heat curing and post-heat curing regimes of high performance concrete: influence on microstructure and C-S-H composition. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 2, p. 295-307, 1996.

KNUDSEN, T. The dispersion Model for Hidratation of Portland Cement: I General Concepts, **Cement and Concrete Research**, v. 14, p. 622-630, 1984.

LAAMANEN, P. H. et al. Heating curing of concrete with and without condensed silica fume – Effect of early temperature history on compressive strength, In: International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pouzzolans, 4., 1992, Istanbul, **Proceedings...** Istanbul: ACI, 1992. ref. SP-132-56

LINDGAR J., SELLEVOLD E.J. Is Hight-Strength Concrete More Robust Against Elevated Curing Temperatures? **High Strength Concrete**, v. 2. Lillehammer. Norvège. p. 810, 1993.

McINTOSH, J.D., Electrical curing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 1,n. 1, p. 21-28, 1949.

MEEKS, K. W.; CARINO, N. J. **Curing of high-performance concrete: report of the state-of-the-art.** Gaithersburg: NIST, 1999. 191p. Available: <<http://ciks.cbt.nist.gov/~carino/nistir6295.html>>

MENEGHETTI, L. C.; Padaratz, I. J.; Prudêncio Jr., L. R. Evolução da resistência à compressão de concretos convencional e de alta resistência – Efeito da presença de superplastificante e sílica ativa. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999.

METHA, P. K.; AITCIN, P. C. Principles underlying the production of high-performance concrete cement. **ASTM Concrete and Aggregates Journal**, Philadelphia, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ed. PINI, 1994. 573 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

NURSE, R.W. Steaming curing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v.1, n. 2, 1949, p. 79-88.

PERRSON, B. Poisson's ratio of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p 1647-1653.



- PINTO, R. C. A. **The effect of curing temperature on the development of mechanical properties of fresh and hardened high-strength silica fume mixtures – a maturity approach.** 1997. 293p. Dissertation (Doctor of Philosophy) Faculty of Graduate School, Cornell University, Cornell.
- PINTO, R. C. A. O método da maturidade e sua utilização em construção civil. In: Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, 29, 2000, Punta Del Este. **Anais...** Punta del Este: 2000.
- PINTO, R. C. A.; HOVER, K.C. Further studies on the utilization of maturity functions to a high strength concrete mixture. In: International Symposium of High-Strength/High-Performance Concrete, 4., 1996, Paris. **Proceedings...** Pariss: 1996. p. 711-718.
- Rastrup, E. Heat hydration in concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v.6, n. 17, 1954, p. 79-92.
- SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 2, n. 6, 1951, p. 127-140.
- SERRA, G. G. **Concreto de alto desempenho e a nova arquitetura.** IBRACON, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, 1997.
- SIMPLÍCIO, M. A. S. Propriedades do concreto de alto desempenho. 8p. 2000. Disponível: <<http://www.altodesempenho.faihtweb.com/>>
- SILVA, E. F.; SILVA, R. M.; Oliveira, M. O. F. Resistência à tração por compressão diametral e por flexão de prismas em concretos de alto desempenho. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.
- VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. Structure and physical properties of cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1968. p. 1-32.
- WILD, S.; SABIR, B. B.; KHATIB, J. M. Factors influencing strength development of concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, 1995, v. 25, p 1567-1580.
- ZIA, P.; AHMAD S.; LEMING M. **High-performance concretes: a state-of-art report (1989-1994).** McLean: Federal Highway Administration, 1997. Available: <<http://www.tfhrc.gov/structur/hpc/hpc2/contnt.htm>>
- ZHANG, M.; GJORV, O. E. Effect of silica fume on cement hydration in low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, 1991, 9. 800-808.



7.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS .**NBR 5738** Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 1991.

ESCANDEILLAS, G. **Contribution a l'optimisation des betons: recherche d'un beton a haute resistance apres etuvage**. Feder Beton - LMDC, 1993.

EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. Ed. PINI, São Paulo, 1997.

GARDNER, N. J. Effect of temperature on the early-age properties of type I, type III, and type I/fly ash concretes. **ACI Materials Journal** Farmington Hills,, v. 87, n. 1, p. 68-78, 1989.

JACOBSEN, S., SELLEVOLD, E. J. Frost /salt scaling of concrete: Effect of curing temperature and condensed silica fume on normal and high strength concrete. In: International Conference Durability of Concrete, 3., 1991, Montreal, **Proceedings...** Montreal: ACI, 1991.

KLIEGERT, P. Effect of mixing and curing temperature on concrete strength. **Journal of the American Concrete Institute**, Farmington Hills, v. 29, n. 12, p. 1063-1081, 1958.

MAMILLAN, M. Traitement thermique des bétons. **Le Béton Hydraulique**, Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.

OLUOKUNM F. A., BURDETTE, E. G., DEATHERAGE, J. H. Early-age concrete strength prediction by maturity : Another look. **ACI Materials Journal**, local, v. 87, n. 6, p. 565-572, 1990.

SAUL, A. G. A. Steam curing and this effects upon mix design. In: Symposium on Mix and Quality Control of Concrete, 1954, London, **Procedins...**, London: 1954, p. 132-142.

TANK, R. C.; CARINO, N. J. Rate Constant Functions for Strengt Development of Concrete. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 88, n. 1, p. 74-83, 1991.



unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dec.feis.unesp.br

