



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

DENILSON PEREIRA GONÇALVES

ESTUDO DE UM REATOR SOLAR HÍBRIDO PARA CURA ACELERADA DO
CONCRETO EM ÁGUA MORNA

SÃO CRISTÓVÃO, SE - BRASIL
NOVEMBRO DE 2012

DENILSON PEREIRA GONÇALVES

ESTUDO DE UM REATOR SOLAR HÍBRIDO PARA CURA ACELERADA DO
CONCRETO EM ÁGUA MORNA

Orientador: Prof. Dr. Paulo Mário Machado Araújo
Coorientadora: Prof. Dr^a. Silvia Maria de Souza Selmo

SÃO CRISTÓVÃO, SE - BRASIL
NOVEMBRO DE 2012

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

G635e Gonçalves, Denilson Pereira
Estudo de um reator solar híbrido para cura acelerada do
concreto em água morna / Denilson Pereira Gonçalves ; orientador
Paulo Mário Machado Araújo. – São Cristóvão, 2012.
108 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –
Universidade Federal de Sergipe, 2012.

1. Cimento Portland. 2. Materiais – Testes. 3. Reator solar híbrido.
I. Araújo, Paulo Mário Machado, orient. II. Título.

CDU 666.942

ESTUDO DE UM REATOR SOLAR HÍBRIDO PARA CURA ACELERADA DO
CONCRETO EM ÁGUA MORNA

DENILSON PEREIRA GONÇALVES

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Mário Machado Araújo

Prof. Dr. Sandro Grisa

Profa. Dra. Ângela Sales

SÃO CRITÓVÃO, SE - BRASIL

NOVEMBRO DE 2012

Resumo da Dissertação apresentada ao P²CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais (Msc.)

ESTUDO DE UM REATOR SOLAR HÍBRIDO PARA CURA ACELERADA DO CONCRETO EM ÁGUA MORNA

Denilson Pereira Gonçalves

Novembro de 2012

Orientador: Prof. Dr. Paulo Mário Machado Araújo

Coorientadora: Prof. Dr^a. Silvia Maria de Souza Selmo

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

O concreto de cimento Portland é o material mais consumido no mundo depois da água, devido à sua versatilidade de moldagem, resistência e durabilidade como material estrutural. A cura é o procedimento que visa manter o concreto saturado de água nas suas primeiras idades e é essencial para garantir as reações de hidratação do cimento, promovendo a sua consolidação como rocha artificial. A cura realizada através de procedimentos controlados é fundamental para se promover ou medir o desempenho potencial do concreto, tanto de resistência como de durabilidade. A cura do concreto é, portanto, uma variável importante de ser controlada nas obras, nos ensaios de controle de qualidade do material, em processos de pré-fabricação ou ainda em pesquisas. Por outro lado, o prazo normal e ideal de cura do concreto, que dura 28 dias, é excessivo em todas as situações citadas, sendo usual a predição da resistência por prazos menores ou por cura acelerada do concreto. Neste trabalho, o objetivo principal foi projetar e testar um reator solar híbrido para promover a cura acelerada do concreto em água morna, por método modificado do Tipo A ASTM C 684:1999, visando uma futura evolução para um método de ensaio brasileiro, que possa ser utilizado em controle de qualidade do concreto. Os desafios principais do projeto foram solucionar o controle e a distribuição da temperatura no interior do reator para testar a redução do tempo de cura de concreto

e de pastas de cimento Portland, de 28 dias, em água a 23°C, para até 7 dias em água à temperatura morna de 35°C.

O reator foi montado em laboratório e consiste de um aquecedor solar acoplado a um tanque lacrado, isolado e que deve manter a água morna na temperatura indicada. Deve utilizar ao máximo a energia solar, ou seja, com maior aproveitamento das energias renováveis e limpas. Contou-se, também, com o apoio de um aquecedor elétrico e um gerador para suprir energia em dias nublados, ou em uma eventual falta de energia por parte da distribuidora local ou manutenção do sistema elétrico.

A pasta de cimento estudada teve a proporção água/cimento variando entre 0,25 e 0,35, e a evolução da hidratação foi monitorada tanto por análise termogravimétrica, quanto por ensaios de resistência à compressão. Os corpos-de-prova curados no reator a 35°C, inicialmente obedeceram ao intervalo de cura do método A da ASTM (0 a 24h) e, nas mesmas pastas, foram testadas três alternativas de adaptação do ensaio acelerado (24h a 48h; 24 h a 72h e 24 h a 168 h), pois o prazo de 0 a 24 h é uma situação apenas viável em laboratório. Os corpos-de-prova submetidos à cura normal (23°C) foram ensaiados a 7 e 28 dias. Concluiu-se que houve evolução da hidratação nos três períodos de cura acelerada testados, mas, até o prazo 24 h a 168 h de cura acelerada foi insuficiente para as pastas alcançarem a resistência de cura normal, a 28 dias.

Abstract of Master Dissertation presented to P²CEM/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Materials Science and Engineering (Msc.)

STUDY OF A HYBRID SOLAR REACTOR FOR ACCELERATED CURING
OF CONCRETE IN WARM WATER

Denilson Pereira Gonçalves
November, 2012

Advisors: Prof. Dr. Paulo Mário Machado Araújo
Co Advisors: Prof. Dr^a. Silvia Maria de Souza Selmo

Department: Materials Science and Engineering

The Portland cement concrete material is the most consumed after the water worldwide due to their versatility molding, strength and durability as a structural material. The curing is the procedure that aims to keep the concrete saturated with water in their early ages and it is essential to ensure the reactions of cement hydration, promoting its consolidation as artificial rock. Curing accomplished through controlled procedures is essential to promote or measure the performance potential of concrete, both resistance and durability. The curing of concrete is therefore an important variable to be controlled in the works, in assays for quality control of the material in manufacturing processes of prefabricateds or also in research. Moreover, the normal period and ideal curing concrete that lasts 28 days is in excess in all cases cited, so it is usual the prediction of the strength by early ages or shorter periods by accelerated curing of the concrete. In this work, the main objective was to design and test a hybrid solar reactor to promote accelerated curing of concrete in warm water, a modified method of the Type A ASTM C 684:1999, seeking a future evolution to a Brazilian test method that can be used in quality control of concrete. The major design challenges were address control and distribution of the temperature inside the reactor and to test the time reduction of curing Portland cement pastes from 28 days in water at 23°C to 7 days in water at warm 35°C.

The reactor was assembled in the laboratory and consists of a solar water heater attached to a sealed tank, and that alone should keep the warm water at the temperature indicated. Should make maximum use of solar energy, ie, with greater use of renewable

and clean energy. Account is also supported by an electric heater and a generator to supply power on cloudy days or in a possible power outage by the local distributor or maintenance of the electrical system.

The water/cement ratio of the cement pastes studied ranged between 0.25 and 0.35 kg/kg and the development of hydration was monitored both by thermogravimetric analysis and by tests of compression strength. The sample tests pastes cured in the reactor at 35°C, initially followed the curing range of ASTM Method A (0 to 24h) and they also were tested in the other three options for adapting the accelerated test (24 to 48 h, 24 h to 72h and 24 h to 168 h), because the period 0-24 h is only feasible in a laboratory situation. The sample test pastes underwent cure (23°C) were tested at 7 and 28 days. It was concluded that there were changes in hydration during the three tested accelerated periods, but even within 24 h to 168 h accelerated curing the pastes not achieved the strength of normal curing after 28 days.

Dedico esse trabalho de dissertação à minha esposa Pauline, às minhas filhas Bianca e Vallentina, que graças a elas a minha vida tem sentido e valor. Aos meus orientadores Paulo Mário e Silvia Selmo, pois, sem a competência e sabedoria destes mestres não enxergaria tão longe.

Agradecimentos

Sempre vou iniciar meus agradecimentos à minha esposa que me envolve de coragem e me protege com suas palavras de força e esperança, mesmo tendo que absorver toda a carga de responsabilidade do nosso lar nas horas em que eu estou dedicado ao trabalho de pesquisar. Peço sempre a DEUS que proteja minha esposa e minhas filhas e mantenha-as ao meu lado para que minha vida tenha sentido.

A minha sogra Leda Pereira Nogueira e ao meu sogro Paulo Nogueira Fontes que sempre me incentivaram na luta pelo conhecimento e trabalho e são um exemplo de família e de profissional.

A meu cunhado Adle Saulo, minha cunhada Carolina e minha sobrinha Laiza pelos incentivos, palavras de carinho e conforto e aos dias de lazer juntos, graças a esses dias eu renovava minhas energias.

Agradeço aos meus orientadores, Paulo Mário Machado Araújo e Silvia Maria de Souza Selmo, pela dedicação, paciência, comprometimento e respeito tanto na orientação deste trabalho quanto na vida.

Aos meus colegas Dárcio e Andréa que sempre estiveram dispostos a me ensinar e ajudar nas atividades práticas e de interpretação de gráficos e imagens.

Aos meus colegas de profissão Irai e Magnânimo Gilderlan, pelas palavras de apoio e de incentivo e pelas várias dúvidas de matemática e de função de segunda ordem.

Ao meu coordenador Anderson Ezequiel pela compreensão e ajuda na confecção dos meus horários de trabalho.

Aos membros da secretaria do P²CEM, em particular à Kaká, pela sua dedicação que sempre tem com todos os alunos do programa, você realmente é admirável.

Aos meus professores do Núcleo de Ciência e Engenharia de Materiais pela dedicação ao ensino do saber.

À empresa Sonda Engenharia pela disponibilidade dos seus funcionários e de sua estrutura sempre que foi preciso e possível.

À empresa REDIMIX pela liberação de material e mão de obra e conhecimento dos seus engenheiros.

E a todos que me ajudaram direta ou indiretamente na conclusão desta dissertação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem de concreto, interface pasta agregado – MEV, ampliação 110 X. [8]	30
Figura 2: Ar aprisionado à pasta de cimento após preenchimento do molde.....	31
Figura 3: Resistências à compressão e linhas de tendência de concretos produzidos com CP III sem sílica ativa [20]......	35
Figura 4: Resistências à compressão e linhas de tendência de concretos produzidos com CP III com sílica ativa [20].	35
Figura 5: Ciclo empregado para a cura térmica a vapor [12].	38
Figura 6: Detalhes da cura térmica rústica [6]......	41
Figura 7: Adaptação de uma piscina plástica para funcionar como tanque de cura térmica, no laboratório da Escola Politécnica da USP, com aquecimento de água por resistência elétrica a ($35 \pm 3^{\circ}\text{C}$) e controle por termostato. [5]......	47
Figura 8: Imagem ilustrativa de aquecedor solar clássico do mercado	54
Figura 9: Representa o reservatório térmico em vista superior e em corte seccional transversal.[35].....	56
Figura 10: Representa a tampa do reservatório térmico em vista superior e em vista lateral esquerda.[35].....	56
Figura 11: Representa o coletor solar em vista frontal e em vista de corte seccional vertical.[35].....	57
Figura 12: Aplicação de tinta a base de água na superfície interna da caixa de isopor utilizada como tanque de cura do reator.	60
Figura 13: Orifícios para a conexão da caixa de aquecimento, sensor e termômetro....	61
Figura 14: Grade geral à esquerda e grade geral acomodada no interior da caixa de isopor (reator híbrido solar)......	61
Figura 15: Caixa de aquecimento que acomoda uma barra aquecedora e um sensor de temperatura.	62
Figura 16: Fixação dos trilhos e encaixe dos equipamentos como CLP, cartão, fusível, entre outros.	62
Figura 17: Montagem do painel de controle.	63
Figura 18: CLP, Circuito Lógico Programável.	64
Figura 19: Sistema montado, em armação metálica, em pleno funcionamento.	65

Figura 20: Formas de corpos de prova depois do adensamento e com placas de vidro no topo.....	68
Figura 22: Pasta de cimento após a mistura de 15 min sendo colocada nas formas padrão que medem 100 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro.....	69
Figura 23: Máquina utilizada para retificar os topos dos corpos de prova de pasta de cimento.....	70
Figura 24: Gaiola geral de alumínio projetada para manter a separação dos pares de corpos de prova de concreto no reator solar híbrido, todos cilíndricos e com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.	73
Figura 25: Gaiola individual para acomodação de dois corpos de prova de concreto e que garante uma distância de 50 mm em todas as suas direções.....	73
Figura 26: Vista superior do compartimento de corpos de prova de concreto, no reator solar híbrido.	74
Figura 29: Distribuição da temperatura no tanque com alimentação central, passados 5 min com fluxo de entrada de 10 l/min e mais 30 s' de período de paralisação. Esquerda: Tubo de entrada. Centro: Tubo de entrada com defletor. Direita: Placa defletora de entrada.[14].....	77
Figura 27: Reservatório de aquecimento que inclui barra aquecedora, sensor de temperatura e bombeamento por ar-comprimido.....	79
Figura 31: Bombeamento utilizando borbulhamento conhecido como “Air Lift Pumping”. [13].....	80
Figura 32: Visão lateral do reator híbrido solar e do segundo tanque que armazena água quente para ser usada na reposição da temperatura do reator híbrido solar.	81
Figura 33: Desvio Relativo Máximo para a relação a/c 0,35 (DRM). A última idade de 168 horas neste gráfico se refere à ensaio de pastas com cura normal, e as demais são relativas à cura no reator solar híbrido.	83
Figura 34: Porcentagem de resistência à compressão simples relativa à cura normal a 28 dias.....	84
Figura 35: Resistência média à compressão simples das pastas para um intervalo de 7 dias.....	85

Figura 33: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,25 curadas em tanque a temperatura normalizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C com secagem em estufa e sem secagem em estufa.	86
Figura 34: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,35 curadas em tanque a temperatura normalizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C.....	87
Figura 35: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,35 curadas em tanque a temperatura normalizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C durante 7 dias.	88
Figura 36: Imagem de MEV de pó de cimento (75µm) (cura em reator durante 168 horas) e relação a/c 0,25.	89
Figura 37: Imagem de MEV de lascas de cimento (cura em reator durante 168 horas) e relação a/c 0,25.....	90
Figura 38: MEV de amostras, LP3 (a, b) e LP66 (c, d, e, f). Fonte: Jornal of Cristal Growth “Evolução da microestrutura de massa de cal sobre o envelhecimento”. [36]..	91
Figura 39: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no reator solar híbrido de acordo com a ASTM C 684 tipo A, com duração da cura de 24 horas e relação a/c 0,35.....	92
Figura 40: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no reator solar híbrido com duração da cura de 168 horas e relação a/c 0,35.....	93
Figura 41: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no tanque normalizado há 25°C, com duração da cura de 168 horas e relação a/c 0,35.	93
Figura 42: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no tanque normalizado, com duração da cura de 28 dias e relação a/c 0,35.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Interpretação simplificada de análise termogravimétrica de pastas de cimento Portland. [7]	32
Tabela 2: Resultado dos testes de resistência à compressão de AHMED (1990).	36
Tabela 3: Comparação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a prevista, pelo estudo de AHMED (1990).	37
Tabela 4: Tipos e procedimentos da cura acelerada (ASTM C 684:1999).....	39
Tabela 5: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote treinamento de Cavalcante Filho (2010), indicando-se em tabela menor a relação entre as resistências acelerada (24/48 h e temperatura ambiente até 7 dias) e a obtida por cura normal (28 dias).....	42
Tabela 6: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote 1 de Cavalcante Filho (2010), indicando-se em tabela inferior a relação entre as resistências acelerada (24/48 h e temperatura ambiente até 7 dias) e a obtida por cura normal (28 dias).....	43
Tabela 7: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote 2 de Cavalcante Filho (2010), indicando-se em tabela inferior a relação entre as resistências acelerada (24/48 h e temperatura ambiente até 7 dias) e a obtida por cura normal (28 dias).....	44
TABELA 8: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote treinamento de Cavalcante Filho (2010), segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006).	45
TABELA 9: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote 1 de Cavalcante Filho (2010), segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006).	45
Tabela 10: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote 2 de Cavalcante Filho (2010), segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006).	46
Tabela 11: Resultados do ensaio de resistência à compressão, segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos dos seis caminhões do lote analisado por Cafange (2011).	50

Tabela 12: Cálculo da resistência característica estimada à compressão ($f_{ck,est}$), segundo a ABNT NBR 12655 (2006), por amostragem parcial e total dos concretos do lote analisado, na pesquisa de Cafange (2011).	51
Tabela 13: Resistência relativa das várias idades de cura acelerada em relação a 28 dias de cura normal na pesquisa de Cafange (2011).	51

LISTA DE ABREVIACOES

LEM = Laboratório de energia e materiais

f_{ck} = Resistência a compressão

$f_{ck,est}$ = Resistência a compressão estimada

MEV = Microscopia eletrônica de varredura

TG = Termogravimetria

DTG = Termogravimetria derivada

AMB = Em temperatura ambiente

SIL AMB = Com presença de sílica em temperatura ambiente

CP = Cimento Portland

CP V-ARI PLUS

CP V-ARI RS = Cimento Portland de resistência inicial rápida para áreas marítimas

ABNT = Associao brasileira de normas técnicas

NBR = Norma brasileira

$f_{c,n,m}$ = Força de resistência do concreto  compressão, n = prazo de cura, m = normal ou acelerada

$f_{c,n}$ = Força de resistência do concreto  compressão, n = prazo de cura

PVC = Policloreto de polivinila

PET = Politereftalato de etileno

RTD = Sensor de temperature resistivo

CLP = Circuito lógico programável

PT100 = Sensor de temperatura resistivo que apresenta resistência de 100Ω a 0°C

CP II F 32 = Cimento Portland classe 2 com adição de fíler com resistência máxima de 32 MPa

a/c = água/cimento

DRM = Desvio relativo máximo

C-S-H = Silicato de cálcio hidratado

LP3 = Laudo de pasta curada por um período de 66 meses

LP66 = Laudo de pasta curada por um período de 3 meses

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. A IMPORTÂNCIA DO CONCRETO PARA O SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
1.2. OBJETIVO	20
1.3. JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO	20
1.3.1. <i>Aplicar o conhecimento sobre aquecedores solares do Núcleo de Engenharia</i> <i>Mecânica da UFS em equipamento para cura acelerada do concreto</i>	20
1.3.2. <i>Agilizar o controle de qualidade do concreto</i>	22
1.3.3. <i>Padronizar método pouco agressivo de cura acelerada do concreto</i>	24
1.3.4. <i>Previsão ágil de comportamento de novos concretos em estudos de dosagem</i>	25
1.4. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. TÓPICOS SOBRE CONCRETO DE INTERESSE AO ESTUDO NO REATOR	27
2.1.1. <i>Constituintes do concreto</i>	27
2.1.2. <i>Microestrutura do concreto endurecido</i>	28
2.1.3. <i>Alguns métodos de cura acelerada do concreto</i>	32
2.1.3.1. O efeito da temperatura de cura	33
2.1.3.2. A cura térmica em estufa de Ahmed (1990).....	36
2.1.3.3. A cura térmica a vapor de Camarini (1995)	37
2.1.3.4. Métodos de cura acelerada da ASTM C 684 (1999)	38
2.1.4. <i>A pesquisa de Cavalcante Filho (2010) com três lotes de concreto dosados em</i> <i>centrais de João Pessoa/PB</i>	40
2.1.5. <i>A pesquisa de Cafange (2011) com um lote de concreto dosado em central de São</i> <i>Paulo/SP</i>	46
2.2. ENSAIOS REALIZADOS NAS PASTAS DE CIMENTO.....	51
2.3. O REATOR SOLAR DO NÚCLEO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFS	54
2.3.1. <i>O aquecedor solar clássico do mercado</i>	54
2.3.2. <i>Características</i>	55
3. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DO REATOR.....	59
3.2. MONTAGEM DO REATOR SOLAR HÍBRIDO.....	60
3.3. PASTAS DE CIMENTO COMPARADAS QUANTO À CURA TÉRMICA E NORMAL.....	66
3.3.1. <i>Temperatura e períodos de duração da cura no reator</i>	66
3.3.2. <i>Relação água/cimento e processo de moldagem das pastas</i>	66
3.3.3. <i>Ensaio realizados nas pastas</i>	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1. DIRETRIZES DE PROJETO DO REATOR	72
4.1.1. <i>Número e distribuição de corpos de prova dentro do reator</i>	72

4.1.2.	<i>Temperatura do banho térmico na cura amena</i>	74
4.1.3.	<i>Reposição da temperatura em volta de cada corpo de prova</i>	74
4.1.4.	<i>Velocidade de aquecimento</i>	75
4.1.5.	<i>Distribuição da temperatura no interior do reator</i>	76
4.2.	FUNCIONAMENTO DO REATOR HÍBRIDO SOLAR PARA A CURA ACELERADA EM ÁGUA MORNA	78
4.3.	ESTUDO DE CURA EM CORPOS DE PROVA DE PASTAS DE CIMENTO	83
4.3.1.	<i>Resistência à compressão</i>	83
4.3.2.	<i>Análise térmica</i>	85
4.3.3.	<i>Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	88
5.	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6.	BIBLIOGRAFIA	96

1. INTRODUÇÃO

1.1. A importância do concreto para o setor da construção civil

O concreto não é tão resistente nem tão tenaz quanto o aço, então, por que é o material mais largamente usado na Engenharia? Há algumas razões para isso.

Primeiramente, o concreto possui excelente resistência à água. Ao contrário da madeira e do aço comum, a capacidade do concreto de resistir à ação da água, sem deterioração séria, faz dele um material ideal para a produção de estruturas em ambientes externos ou nas mais diversas aplicações em contato com água.

A segunda razão para o uso tão difundido do concreto é a facilidade com que elementos estruturais possam ser executados, numa variedade de formas e tamanhos.

A terceira razão para a popularidade do concreto entre os engenheiros, é que ele é normalmente o material mais barato e mais facilmente disponível em canteiros de obras. O custo atrativo do concreto está relacionado aos componentes básicos que o formam, ou seja, cimento Portland, agregados e água. Mesmo as misturas mais caras e modernas de desempenho diferenciado, obtidas pelo acréscimo de adições minerais e aditivos orgânicos, tem custo ainda atrativo, pois podem produzir concretos especiais para os mais diversos tipos e situações de obras.

Assim, as possibilidades de composição e emprego tornam o concreto um material essencial para o setor da construção civil em qualquer lugar do mundo. No Brasil, isto não é diferente, pela grande quantidade de fábricas de cimento instaladas e disponibilidade de agregados na maior parte do território nacional [1, 2].

1.2. OBJETIVO

Neste trabalho, o objetivo principal foi projetar, montar e operar um reator solar híbrido para promover a cura acelerada do concreto em água morna, por métodos modificados do Tipo A da ASTM C 684:1999, visando uma futura evolução para um método de ensaio brasileiro, que possa ser utilizado em controle de qualidade do concreto.

1.3. Justificativas do estudo

1.3.1. Aplicar o conhecimento sobre aquecedores solares do Núcleo de Engenharia Mecânica da UFS em equipamento para cura acelerada do concreto

O Núcleo de Engenharia Mecânica da UFS, através do LEM (Laboratório de Energia e Materiais), tem desenvolvido pesquisas de utilização da energia solar, como fonte alternativa, para proporcionar melhorias e conforto para as classes sociais mais carentes, seja um simples aquecedor para água de higiene diária, seja como energia renovável de fogões solares, com capacidade de preparar alimentos, de forma rápida e limpa.

Embora a energia solar seja lembrada como fonte de aquecimento e, assim, será aproveitada no decorrer deste trabalho, ela também pode ser aplicada na conservação de alimentos e até na fabricação de gelo, bastando para tal a utilização de equipamentos e dispositivos adequados para estas funções.

Os estudos citados e voltados ao conhecimento da energia solar como energia renovável e de grande eficiência, culminaram na confecção de um sistema de aquecimento de água, confeccionado de forma simples, e com o uso de materiais comuns e melhor adaptados para serem utilizados na região Nordeste, com preço acessível e visando a substituição de chuveiros elétricos nas habitações.

Abastecidos do conhecimento teórico e prático sobre aquecedores solares e de posse de questionamentos e observações feitas por Cavalcante (2010) e Cafange (2011), orientados pela professora Dr^a. Silvia Maria de Souza Selmo, em suas dissertações de mestrado, que envolveram um estudo sobre cura acelerada do concreto, foi então idealizada uma pesquisa de confecção de um reator que funcionasse com a utilização da energia solar em conjunto com a energia elétrica.

Assim, para manter aquecido um volume de água para ser usada na cura de corpos de prova de concreto ou pasta de cimento, surgiu, no Núcleo de Engenharia Mecânica, o primeiro reator solar híbrido para cura de concreto em água morna a 35°C, que é o foco deste trabalho.

O planejamento inicial do estudo envolvia a caracterização de um lote de concreto por cura térmica e cura normal, em parceria com uma empresa de controle tecnológico da cidade de Aracaju/SE. Mas, suspeitou-se que poderia haver problemas com relação às instalações de cura normal da empresa, pois eram muito próximas a uma cura térmica em água morna, já que seus tanques de cura ficavam expostos à insolação forte da região em período de verão. Isto foi constatado após a realização de alguns testes

preliminares, comparativos ao banho térmico no laboratório, por período de 1 a 7 dias, e apresentados no Anexo 1 e Anexo 2.

Na sequência, buscou-se o apoio da principal empresa produtora de concreto da cidade, para a caracterização do lote de concreto, mas não houve sucesso no desenvolvimento da parceria, o que só foi informado ao pesquisador em prazo muito tardio, em relação ao cronograma de trabalho.

O estudo em corpos de prova de concreto planejado inicialmente para fazer uso do reator em condições ideais de operação não pode ser levado a cabo, pelas razões acima citadas.

Um estudo de pastas foi então realizado já em prazo muito próximo ao de conclusão do mestrado, e não pode ser conclusivo quanto a um método alternativo de cura em temperatura amena, em substituição ao Tipo A ASTM C 684:1999. A principal razão para isto foi a dispersão de resultados de resistência à compressão entre corpos de prova, devido principalmente a problemas de ar aprisionado nas pastas e de falta de estanqueidade das fôrmas.

1.3.2. Agilizar o controle de qualidade do concreto

O uso do concreto como material estrutural e suas vantagens são de largo conhecimento na Engenharia, porém o seu emprego requer habilidade e tempo, nas condições correntes de produção e concretagem. O modo como o concreto é lançado nas formas de uma estrutura e o tempo que ele suporta ser trabalhado é finito e cobra prática dos profissionais envolvidos.

Uma vez realizada a concretagem, as empresas produtoras de concreto, as construtoras e as empresas de controle tecnológico (laboratórios especializados) se deparam com outro fator importante para se alcançar a qualidade final do concreto endurecido, a cura. Seja na estrutura produzida em campo, seja em corpos de prova moldados durante a concretagem para se atestar a qualidade do concreto utilizado.

O termo cura do concreto trata dos procedimentos destinados a prover a hidratação do cimento Portland, consistindo do controle do tempo, temperatura e condições de umidade, imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas.[1]

Após moldado o concreto, a obra precisa aguardar que o concreto esteja resistente o suficiente para ser desmoldado e consiga suportar o seu peso e das estruturas que darão continuidade à obra. Este mesmo tempo de espera supracitado serve também para

que as empresas de controle tecnológico possam avaliar a qualidade potencial do concreto lançado na obra. Caso o concreto seja reprovado, por haver resultados de corpos de prova moldados e cálculo de $f_{ck,est}$ (resistência característica à compressão estimada) inferiores ao valor da resistência característica de projeto (f_{ck} , resistência característica do concreto à compressão), o produtor do concreto, construtor e projetista da estrutura precisarão tomar providências para que seja contornado o problema, tornando o tempo uma variável desconfortável nesse processo, pois a obra avançou, enquanto se realizou a cura dos corpos de prova em laboratório à temperatura ambiente.

Tendo em vista estes problemas, as empresas de controle tecnológico do concreto trabalham em geral com duas idades de cura, 7 dias e 28 dias, para que a obra possa dar prosseguimento, mesmo antes de transcorrido os 28 dias de cura. “A ideia de se fazer a previsão da resistência à compressão de cimentos ou concretos a 28 dias de idade sob cura padrão, a partir de resultados obtidos sob as mesmas condições, porém em idades mais baixas, parece ser adotada por forças das circunstâncias, na prática das construções de concreto ou na aceitação de partidas de cimento em canteiros de obra”, dizia o Eng. Carlos Eduardo de Siqueira Tango, ao discorrer sobre este tema na sua dissertação de mestrado em 1983. [4]

Assim, a cura acelerada do concreto em temperatura amena precisa ser mais estudada em equipamentos de preço atrativo, para que empresas de concretagem, de concreto tecnológico, construtoras e centros de pesquisa disponham de tecnologias alternativas e promissoras para o controle de qualidade do concreto em tempo ágil e compatível com a velocidade das obras atuais.

O objetivo de encontrar uma forma de cura do concreto com um tempo menor do que o previsto em obra é de permitir que seja possível uma tomada de decisão, caso algo tenha saído errado, ou providenciar uma possível modificação, amenizando problemas futuros, que apenas são confirmados após quatro semanas, em condições de cura normal do concreto.

Cabe salientar que as normas brasileiras de concreto estão sempre atualizadas no que diz respeito aos mais variados itens da tecnologia de produção e controle desse material, mas isto não acontece para a cura acelerada do concreto, pois não há norma brasileira em vigor no momento.

Nem mesmo os métodos preconizados de cura acelerada pela norma ASTM C 684:1999 são praticáveis na maioria das situações. O método A, por exemplo, pode ter duração de tempo (0 a 24 h) insuficiente, para concretos com aditivos retardadores ou de outros tipos, que controlem o calor de hidratação e que podem ser usados em centrais dosadoras. Já os demais métodos acelerados da citada norma envolvem temperatura elevada e são agressivos à microestrutura do concreto.

Em resumo, o cumprimento do prazo mínimo necessário para se aguardar a maturidade do concreto, com cura à temperatura ambiente, que é de 28 dias, dificulta o alcance dos objetivos do seu controle de qualidade, pois o ritmo das obras atuais é muito maior. Logo, é necessário avançar em novos métodos de cura do concreto, que não sejam agressivos à sua microestrutura e possam ser adotados por laboratórios comerciais e centros de pesquisa.

1.3.3. Padronizar método pouco agressivo de cura acelerada do concreto

Pesquisas recentes demonstraram que a aplicação da temperatura amena ditada pelo método A da ASTM C 684, de $35\text{C}^{\circ} \pm 3\text{C}^{\circ}$, por um tempo mais prolongado do que as 24 horas iniciais do concreto, viabilizou a cura acelerada de quatro lotes de concreto dosados em central e lhes conferiu valores de resistência característica estimada à compressão superior ao estabelecido em projeto, em prazo de 7 dias. Todavia, o procedimento principal adotado pelos pesquisadores citados utilizou metodologia mista de cura, sendo inicialmente acelerada por prazos até 72 h e depois em temperatura ambiente até 7 dias. Eles salientaram a necessidade de prosseguimento das pesquisas utilizando um prazo de sete dias, como vem sendo aplicado nos canteiros de obras para a predição da evolução da resistência do concreto, porém com a aplicação da cura acelerada em água morna durante todo o período de cura.[5, 6]

Com base nos estudos anteriores, nasceu a ideia desta pesquisa que teve como base projetar um equipamento de controle exato de temperatura e estudar um método prático e fácil de cura, onde os corpos de prova sejam mantidos imersos em água, a uma temperatura amena de $35\text{C}^{\circ} \pm 3\text{C}^{\circ}$, entre 24 h e 7 dias, prevendo-se que a microestrutura consiga se desenvolver e maturar de forma tão eficiente quanto a desenvolvida por cura normal até 28 dias e com isto seja alcançada a equivalência de resistência à compressão em corpos de prova curados por ambos os processos.

É importante, observar que, para efeito de controle de qualidade do concreto, não é necessário haver a equiparação de resistências entre os dois tipos de cura, mas somente que a cura acelerada entre 24 h e 7 dias viabilize a obtenção de resistência à compressão superior à especificada em projeto (f_{ck}), quando forem seguidos procedimentos adequados nas etapas anteriores de produção do material.

1.3.4. Previsão ágil de comportamento de novos concretos em estudos de dosagem

O desenvolvimento atual da tecnologia do concreto está essencialmente baseado no uso de aditivos e adições para conferir propriedades especiais ao material, em termos de desempenho e qualidade.

Aditivos são substâncias adicionadas intencionalmente ao concreto, com a finalidade de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização. O aditivo nunca pretenderá corrigir defeitos intrínsecos ao concreto, provenientes de dosagem incorreta ou colocação mal feita. [10]

Uma gama de materiais está sendo incorporada ao concreto com os mais variados interesses ou objetivos, seja para aumentar o volume da mistura ou compensar o uso do cimento, baixando o custo do concreto, ou simplesmente para melhorar a sua pega ou equalizar uma forte reação exotérmica inicial, evitando uma alta liberação de calor latente, entre outros motivos.

Também o mercado dispõe cada vez mais de cimentos e agregados com características bastante distintas dos disponíveis em décadas passadas, com aumento de finura e mudanças de composição mineralógica.

Tudo isto requer maior agilidade de procedimentos experimentais de misturas em laboratórios, para se atender às indústrias fornecedoras de cimento, agregados, aditivos e adições, ou às empresas produtoras de concreto, na previsão de resistência ou outras propriedades de concretos especiais.

Enfim, um novo método acelerado de cura do concreto em temperatura amena pode ser muito útil para aplicação em estudos de dosagem de concretos especiais, ou daqueles que façam usos de materiais alternativos, pois poderá antecipar em prazo de 7 dias as propriedades de concretos em estágios mais avançados de hidratação.

1.4. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação traz na introdução as justificativas e os objetivos do trabalho buscando um melhor entendimento do tema e dos resultados alcançados. No capítulo seguinte buscamos estudar a problemática através de estudos anteriores, de artigos publicados, e de livros que tratam do tema, como também, por intermédio de trabalhos correlatos, informações de interesse, entre outros. No terceiro capítulo foi descrito todos os métodos e os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova, os materiais empregados na confecção do reator solar híbrido. Dentro do capítulo quatro encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e nas análises de termogravimetria, as discursões sobre os resultados dos ensaios, a montagem do reator solar híbrido e sua operação. Por fim, o capítulo de conclusão e considerações finais, abordando os pontos importantes e trazendo sugestões para prosseguimento dos estudos. Na sequência estão as revisões bibliográficas e os anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tópicos sobre concreto de interesse ao estudo no reator

Dado o caráter interdisciplinar da pesquisa, este capítulo apenas resume os tópicos básicos relativos à tecnologia do concreto de interesse ao trabalho.

2.1.1. Constituintes do concreto

O concreto de construção civil é usualmente produzido pela mistura homogênea de cimento Portland, água, agregados graúdo e miúdo, podendo conter aditivos e adições.

Ao conjunto cimento mais água dá-se a denominação de pasta; adicionando um agregado miúdo à pasta, obtém-se a argamassa, e considera-se o concreto como uma argamassa à qual foi adicionada um ou mais agregados graúdos [10].

A ASTM C 150 define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio para retardar o tempo de pega, como um produto de adição [1].

Os agregados miúdos, com dimensão máxima característica menor que 4,8mm, são geralmente chamados de areia, pois procedem de rio ou cavas, enquanto os agregados graúdos são de maiores dimensões e são chamados de britas, sendo produzidos em pedreiras [1].

Modernamente, há outros dois constituintes no concreto, os aditivos e as adições, destinados a melhorar ou conferir propriedades especiais ao conglomerado, tais como, diminuição do calor de hidratação, maior plasticidade quando fresco, rápido aumento da resistência quando endurecido, impermeabilidade, aumento da durabilidade, etc. Os aditivos são adicionados em baixo teor, e as adições em maior teor, sendo ambos citados em porcentagem do cimento. Adições podem ser ativas (substituem parcialmente o cimento) ou inertes, que substituem parcialmente o agregado miúdo [5].

O cimento Portland, depois de misturado aos agregados graúdos e miúdos, recebe uma quantidade de água pré-estabelecida, que tem como principal objetivo hidratar o cimento, formar a pasta e envolver os agregados, encher os vazios entre as suas partículas e conferir coesão à mistura fresca e a sua capacidade de manuseio. [1, 2, 10]

Assim que o cimento Portland recebe a água, as reações químicas de hidratação da pasta são ativadas e inicia-se um tempo para que essa pasta perca sua possibilidade de

manuseio, ou seja, sua trabalhabilidade e capacidade de adensamento nas formas e adquira resistência crescente ao longo do tempo.

O tempo para o concreto perder trabalhabilidade é conhecido por pega e é bastante estudado pela Ciência e Engenharia dos Materiais. Entender o que se passa neste tempo não é suficiente para que se possa trabalhar com o concreto. É preciso aprender a comandar este tempo, o que se faz pelo uso de aditivos retardadores ou multifuncionais, que são muito utilizados para concretos dosados em central e produzidos em cidades de clima quente, situação muito comum no Brasil.

Isto aumenta a dificuldade na precisão do tempo de pega de qualquer concreto, seja em campo, seja em laboratório e ensaios que envolvam o manuseio do concreto em transcurso de pega, como é o caso do método A de cura da ASTM C 684:1999, que exigem procedimentos especiais que nem sempre são aplicáveis a pesquisas e muito menos a rotinas de controle tecnológico.

2.1.2. Microestrutura do concreto endurecido

Do ponto de vista macroscópico, o concreto de cimento Portland é formado pela pasta de cimento endurecida, com seus poros e água livre ou de constituição e pelos agregados.

Após endurecida, conforme aumenta a idade do concreto, a pasta de cimento completa suas funções e passa a aglutinar definitivamente os agregados, promovendo ao conjunto resistência a esforços mecânicos, uma certa impermeabilidade e durabilidade frente a agentes agressivos [5]. A pasta de cimento é, portanto, a responsável pela evolução e consolidação da microestrutura do concreto.

Os agregados de rocha britada e de boa qualidade participam da formação do concreto como material volumoso, resistente às tensões de compressão, flexão, tração, abrasão, entre outras, e são unidos pela pasta de cimento, que deve ser igualmente resistente e consolidar o conglomerado. Não devem existir reações entre a pasta de cimento e os agregados, mas sim uma relação de enchimento, ancoragem e coesão entre suas partículas.

A microestrutura dos agregados depende principalmente da sua origem mineralógica.

O agregado tem sua participação na formação do concreto, não só como material volumoso e inerte, mas, também, como material resistente que tem propriedades

granulométricas, porosidade, módulo de elasticidade, entre outras. Essas características podem contribuir positiva ou negativamente na resistência final do concreto. Porém, como o objetivo do trabalho visa controlar a temperatura e sua distribuição no interior do reator para promover a aceleração da cura através da maturação da microestrutura da pasta de cimento, os agregados não serão observados com a importância devida, ficando a pasta de cimento como principal produto de análise da eficiência do reator solar híbrido.

A microestrutura da pasta de cimento depende, essencialmente, da composição do cimento Portland empregado e da quantidade de água usada no seu preparo, através da relação água/cimento em massa, bem como da natureza e teor de adições ou aditivos, se forem empregados. A quantidade de água em relação ao cimento ou total de aglomerantes (incluindo adições ativas) define a porosidade final da pasta e as suas propriedades para aglutinação dos agregados empregados (zona mais ou menos resistente). Aditivos são em geral muito usados nos concretos atuais e também afetam a microestrutura da pasta, de modos variados conforme a sua ação e idade da hidratação.

O processo de hidratação e aumento de resistência mecânica da pasta, com a idade do concreto, ocorre pela formação inicial de sulfoaluminatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e do gel cimentício de silicato de cálcio hidratado C-S-H, que são os três principais produtos da hidratação da pasta. A 28 dias de idade da pasta, ela pode alcançar 70 a 80 % do seu grau de hidratação final, o que depende do tipo e da finura do cimento, da relação água/cimento, da temperatura de cura e da presença de adições e aditivos [23, 29, 30].

Mas, os estudos da microestrutura dos concretos usuais (de resistência baixa a média) mostram que, além do meio denso de pasta hidratada e dos agregados, há uma zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados graúdos, como ilustra a Figura 1, que é mais porosa e pode controlar a resistência mecânica e várias propriedades do concreto endurecido [9].

Essa região mais porosa tem origem no acúmulo da água de amassamento do concreto fresco na superfície dos agregados, pois isto provoca aumento localizado da relação água/cimento, uma deposição inicial de grandes cristais da pasta, liberados nas primeiras idades de hidratação do cimento Portland. Na zona de transição, encontra-se também formação de microfissuras devido ao processo de secagem e resfriamento da

pasta, o que comprova o fato do concreto ser mais frágil do que os seus constituintes separados [1].

Nessa região predominam principalmente sais de sulfoaluminatos (etringita, monossulfato) e hidróxido de cálcio, liberados na hidratação do cimento Portland. Já o CSH se localiza nas regiões mais densas da pasta, mas pode alcançar e extinguir a zona de transição se for baixa a relação água/cimento do concreto [1]. Havendo adições finas ativas na composição, há densificação da zona de transição.

Assim, se houver redução controlada da quantidade de água de amassamento do concreto pelo uso de aditivos redutores de água, pode haver melhorias significativas na redução da porosidade da zona de transição até a sua completa extinção em concretos de alta resistência.

Pesquisas definem a zona de transição como sendo o elo frágil da matriz cimentícia e como a fase limitante da resistência do concreto [1, 2].

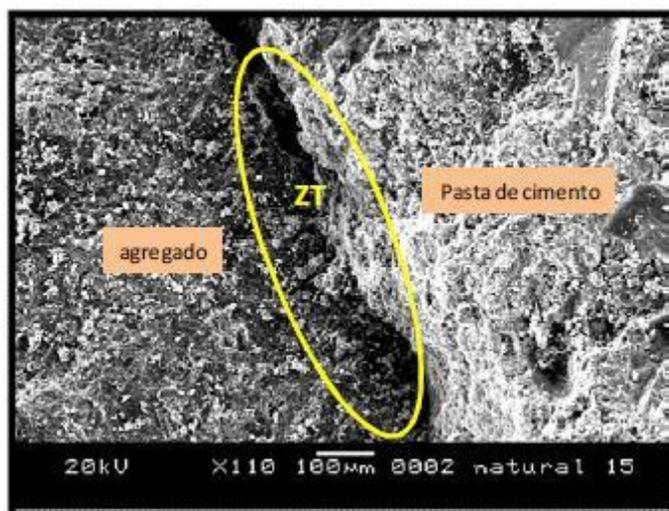


Figura 1: Imagem de concreto, interface pasta agregado – MEV, ampliação 110 X. [9]

A microestrutura da pasta de cimento também reserva outros pontos de fragilidade, como os diversos tipos de vazios que a compõem logo após a hidratação. Estes vazios têm uma grande relação com a quantidade de água utilizada para a formação da pasta, relação água/cimento, que por sua vez se transformam em poros e espaços intermoleculares entre os cristais formados. A água retida nestes pequenos vazios pode ser fixada por pontes de hidrogênio em meso e microporos e a sua remoção, sob certas condições, pode contribuir para a retração por secagem e diminuição da resistência mecânica por fluência. Em resumo, esses vazios capilares, formados pelos espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta e os produtos de

hidratação, são responsáveis pela variação na densidade e a formação de porosidade na pasta. Essa porosidade, a depender do tamanho dos poros, é responsável pela diminuição da resistência mecânica, pelo aumento da permeabilidade à água, da retração por secagem e da deformação por fluência. Por fim, podem-se classificar os vazios de maiores dimensões como sendo de ar aprisionado (em geral irregulares como mostrado na Figura 2) ou de ar incorporado (de formação mais esférica e decorrentes do uso de aditivos). Em geral, ambos afetam negativamente a resistência mecânica e a impermeabilidade da pasta de cimento [1].



Figura 2: Ar aprisionado à pasta de cimento após preenchimento do molde.

Dada a natureza essencialmente heterogênea do concreto, o estudo da sua microestrutura é bastante complexo e pode, na maioria das vezes, não ser representativo, sendo muito usual o estudo científico através da análise de pastas e argamassas. Todavia, os estudos em pastas e argamassas também devem ser interpretados com cautela, pois igualmente não representam a microestrutura do concreto.

Segundo bem resumem [23], “*O processo de hidratação do cimento pode ser avaliado diretamente, utilizando-se as técnicas de microscopia ótica ou análise de difração de raios X, e indiretamente, pela determinação do calor desenvolvido na hidratação, pelas técnicas de análise térmica diferencial e termogravimétrica, e pela resistência à compressão. As técnicas de análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG e DTG) têm sido utilizadas por vários pesquisadores, obtendo-se a quantidade de água quimicamente combinada referente aos hidratos.*”

Na avaliação da hidratação de pastas de cimento, que interessa investigar ao se estudar processos de cura acelerada como feito nesta pesquisa, uma das técnicas experimentais comparativa de análise mais simples pode ser a termogravimetria (TG ou ATG) e termogravimetria derivada (DTG). Mas, a interpretação precisa dos resultados de TG e DTG pode ser complexa, de forma ideal deve ser aplicada simultaneamente com outras técnicas de análise da microestrutura e observou-se que as faixas de temperatura adotadas por cada pesquisador variam um pouco segundo a bibliografia de referência [7, 13, 23].

Na sua tese, [7], por exemplo, resumiu a interpretação das suas análises termogravimétricas pelas seguintes variações de massa da pasta em função da temperatura, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Interpretação simplificada de análise termogravimétrica de pastas de cimento Portland [7].

<i>Faixa de temperatura (*)</i>	<i>Reação interpretada</i>
< 80 °C	Perda de água livre da pasta
80°C a 400°C	Perda de água total combinada
400°C a 550°C	Desidroxilação do Ca(OH) ₂
550°C a 800°C (*)	Descarbonatação de CaCO ₃

Obs: (*) Intervalos podem variar segundo o autor considerado, e a descarbonatação final do CaCO₃ pode, inclusive, ocorrer em temperaturas mais elevadas.

2.1.3. Alguns métodos de cura acelerada do concreto

O objetivo da cura é manter o concreto saturado de água, ou o mais próximo possível da saturação, para que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, sejam progressivamente preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento, até uma condição estável de maior compacidade [6].

É necessário um período mínimo de 7 dias de cura úmida para concretos de cimento Portland comum, em situação de campo. De fato, a idade de 28 dias é o prazo ideal adotado por normas para a cura da maior parte dos concretos, sendo referência para a grande parte das especificações e projetos que envolvem a aplicação de concreto [1].

A cura térmica ou acelerada do concreto tem como objetivo principal tornar mais rápido o processo de maturação dos concretos para se alcançar uma resistência mecânica mínima desejada, em um curto período de tempo.

Os métodos acelerados de cura envolvem a modificação da temperatura do concreto, seja em câmaras úmidas, de vapor, em tanques ou em reatores, com o objetivo de fornecer energia térmica suficiente para agilizar ou antecipar o amadurecimento do concreto, através da antecipação das reações químicas de hidratação do cimento.

A cura térmica é principalmente usada por empresas de pré-fabricação de peças de concreto, transportadas posteriormente a obras, para aumentar a utilização de fôrmas, de leitos de protensão e equipamentos de cura por intervalos mais frequentes, diminuindo as áreas de estocagem e permitindo colocar peças em serviço em um período menor do que se fosse utilizada a cura convencional. [12]

2.1.3.1. O efeito da temperatura de cura

A elevação da temperatura acelera as reações químicas de hidratação do cimento Portland favorecendo as resistências iniciais do concreto sem efeito prejudicial sobre as resistências a idades subsequentes. Embora aumente as resistências logo às primeiras idades, uma temperatura mais alta pode prejudicar a resistência após os 7 dias de idade. Isso acontece devido a uma hidratação inicial rápida, que aparentemente forma produtos com uma estrutura física mais porosa, de modo que uma fração dos poros permanecerá sempre não preenchida [11].

As temperaturas favoráveis a uma boa cura situam-se no intervalo de 15 a 35°C, pois abaixo de 15°C as reações de hidratação ocorrem lentamente, dificultando o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades. Já em temperaturas mais altas, acima de 35°C, as reações de hidratação ocorrem de maneira mais rápida, promovendo uma redução da resistência final. Esse efeito foi observado por Verbeck e Helmut que sugeriram que a hidratação rápida a temperaturas mais altas retarda a hidratação subsequente e produz uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta. Isso se deve a que, com uma 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. [19]

De acordo com alguns pesquisadores, a temperatura de cura afeta a taxa de desenvolvimento da resistência e acredita-se que nem a estrutura química, nem a física, dos produtos de hidratação são radicalmente afetadas pela temperatura até aproximadamente 45°C [5].

Pesquisas exemplificam a cura acelerada em ambiente de vapor de água a temperatura de 70° C, sob pressão ou não, favorecendo a rápida maturação do concreto, que atinge, após 1 dia de cura, resistências que podem ser parecidas com aquelas desenvolvidas aos 28 dias, quando for utilizada cura úmida normal [8].

Outros estudos, sobre cura acelerada, afirmam que, na temperatura de 80°C, pode haver queda de resistência do concreto em relação ao curado por cura normal à temperatura ambiente. Essa perda de resistência pode ser atribuída a uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação, por causa da rápida hidratação inicial dos compostos, por aumento da porosidade [20].

A cura térmica, mesmo limitando-se a temperatura do concreto no máximo a 70°C, implicará em que o cimento se hidrate com cristais mais graúdos, com menor interpenetração, o que resultará em resistência potencialmente menor do concreto nas idades avançadas (comparativamente com a resistência esperada, se a cura fosse realizada com temperaturas entre 20°C e 30°C), segundo recapitula [5].

Em resumo, o aumento da temperatura irá promover a aceleração inicial das reações de hidratação do cimento Portland, mas a microestrutura formada poderá não ser tão compacta e resistente quanto aquela obtida por cura à temperatura ambiente, principalmente, nas idades mais avançadas do concreto e conforme demonstram muitos trabalhos realizados, que trabalharam com a temperatura de 80 °C, [20], no intervalo de 4 horas após o início de pega do cimento (cerca de 8h) e elevação da temperatura à taxa de 20 °C/h. O concreto com cura térmica foi comparado ao curado ao ar ambiente segundo ilustra a Figura 3.

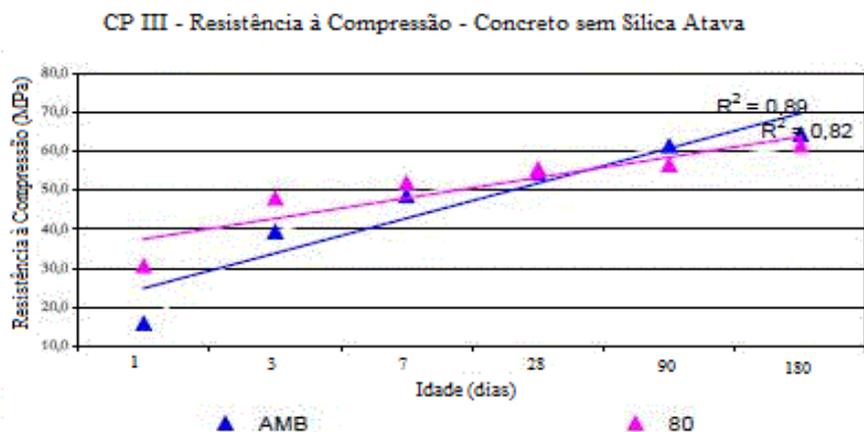


Figura 3: Resistências à compressão e linhas de tendência de concretos produzidos com CP III sem sílica ativa [20].

Nesse estudo, a resistência dos corpos de prova de concreto sem sílica ativa, curados à temperatura ambiente (AMB), se equipararam aos submetidos à cura acelerada, entre 7 e 28 dias. Já para concreto com sílica ativa o crescimento de resistência por cura ao ar ambiente (AMB) foi mais lento e só houve equiparação de resistência a 28 dias, como ilustra a Figura 4. Observar também que não houve evolução significativa de resistência dos concretos com cura acelerada entre 3 e 7 dias, com ou sem sílica ativa.

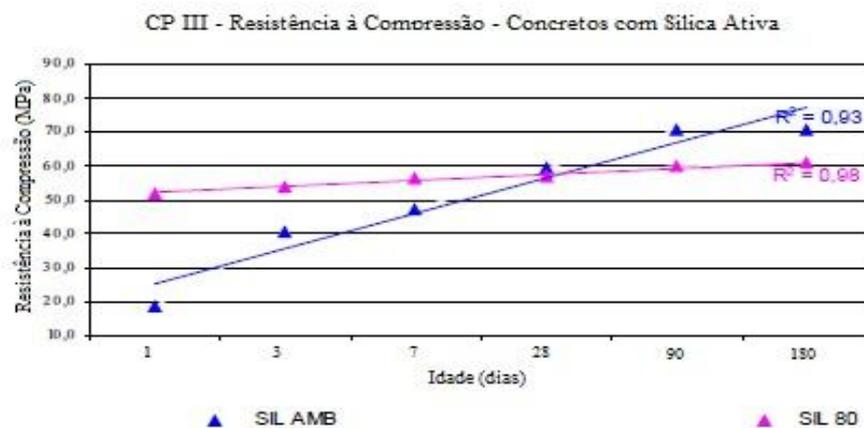


Figura 4: Resistências à compressão e linhas de tendência de concretos produzidos com CP III com sílica ativa [20].

2.1.3.2. A cura térmica em estufa de Ahmed (1990)

O autor estudou a predição da resistência à compressão de concreto a 28 dias por corpos de prova curados até 29 horas, sendo 25 h saturados e protegidos pela forma de moldagem e depois expostos em estufa por quatro intervalos de tempo e três valores de temperatura; respectivamente, 1, 2, 3 e 4 h, a 50 °C, 75 °C e 90 °C [38].

No seu estudo, foram usadas quatro misturas de concreto com relação água/cimento fixa em 0,65 e consumo de cimento variando entre 250 e 400 kg/m³.

A Tabela 2 ilustra os resultados experimentais obtidos de resistência e a partir dos quais, o autor construiu as curvas de correlação com os erros bastante satisfatórios segundo a Tabela 3 [38].

Assim, concluiu ser possível obter curvas de correlação excelentes entre as resistências aceleradas pelo método explicado e a resistência à compressão a 28 dias, sendo suficientes as curas aceleradas entre 1 e 3 horas de estufa para a obtenção das curvas de correlação. Destaca o autor que as melhores curvas de correlação foram obtidas ao se fazer uso simultâneo dos resultados nas três faixas de temperatura [38].

Tabela 2: Resultado dos testes de resistência à compressão [38].

Número da Mistura	Temperatura de Cura da Estufa, °C	Resistência à Compressão Acelerada *, MPa				Resistência à Compressão aos 28 Dias, MPa
		Tempo [†] (horas)				
		26	27	28	29	
I	50	6,10	6,37	6,97	6,63	16,58
II		6,43	6,45	7,08	7,54	18,17
III		5,83	5,95	6,36	6,60	20,82
IV		6,10	6,67	7,08	8,28	21,80
I	75	7,42	7,76	8,28	8,54	16,58
II		8,23	8,72	8,76	9,59	18,17
III		8,29	9,90	10,03	10,04	20,82
IV		8,09	9,90	10,01	10,10	21,80
I	90	7,85	8,42	8,69	9,38	16,58
II		7,90	9,15	9,39	9,54	18,17
III		7,90	9,68	9,94	10,13	20,82
IV		7,54	7,72	7,85	9,27	21,80

* Média de dois cubos

† Idade (horas) = 25 + tempo de cura em estufa

Tabela 3: Comparação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a prevista [38].

Número da Mistura	Temperatura de Cura da Estufa, °C	Resistência à Compressão, MPa		% Diferença
		28 Dias Cura Úmida	Predição por Equação de Regressão	
I	50	16,58	16,78	+ 1,2
II		18,17	18,15	- 0,1
III		20,82	20,68	- 0,7
IV		21,80	21,83	+ 0,1
I	75	16,58	16,50	- 0,5
II		18,17	18,13	- 0,2
III		20,82	20,74	- 0,4
IV		21,80	21,73	- 0,3
I	90	16,58	16,37	- 1,3
II		18,17	17,89	- 1,5
III		20,82	20,39	- 2,1
IV		21,80	21,82	+ 0,1

O objetivo de descrever aqui os procedimentos de cura térmica adotados, [38], não é tanto para discutir os seus resultados, mas sim para ilustrar o quanto precisam ser controladas as instalações e os procedimentos, quando a cura acelerada é realizada apenas com algumas horas nas idades iniciais do concreto, o que dificulta o seu emprego em rotinas de controle tecnológico.

2.1.3.3. A cura térmica a vapor de Camarini (1995)

As câmaras de cura eram de fibrocimento e equipadas com resistências para o aquecimento da água no seu interior, cujo nível regulava o gradiente de elevação de temperatura. Um termostato controlava a temperatura máxima do vapor adotada no trabalho experimental. A temperatura máxima empregada foi de 60°C. Os corpos-de-prova eram mantidos sobre uma grelha, seus moldes eram cobertos por placas de vidro para minimizar a evaporação da água de amassamento e fora do alcance da água; dessa maneira, ficavam submetidos apenas ao vapor de água, sob pressão atmosférica, na temperatura máxima desejada [12].

A cura térmica respeitou o seguinte ciclo, representado pela Figura 5:

a) tempo de espera (t_0): coincidente com o início de pega de cada cimento, que foi de 120 minutos para o CP V-ARI PLUS, de 140 minutos para o CP V-ARI RS e de 160 minutos para o CP III-AF;

- b) período de elevação da temperatura (t_1): aumento gradual e controlado da temperatura de cura, num gradiente de 20°C/h , até atingir o valor máximo de 60°C ;
- c) regime isotérmico (t_2): manutenção da temperatura de 60°C por 2 horas; e,
- d) período de esfriamento (t_3): diminuição da temperatura, num gradiente controlado de 20°C/h .

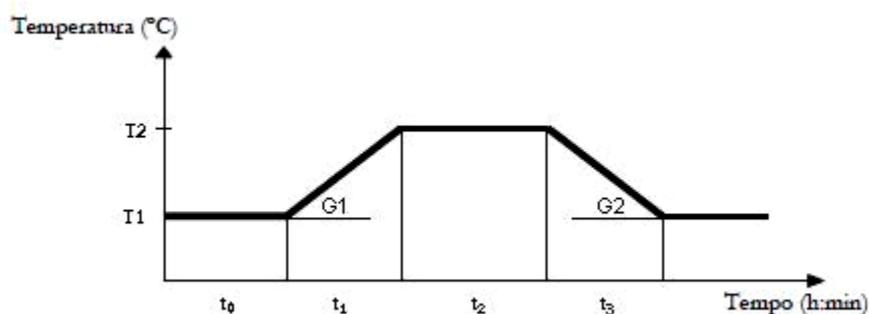


FIGURA 5: Ciclo empregado para a cura térmica a vapor [12].

Os corpos-de-prova foram desmoldados com 24 horas e permaneceram expostos a ambiente de laboratório até a data de ensaio, numa temperatura média de 25°C e umidade relativa próxima de 60%. Nenhum outro procedimento de cura se seguiu ao tratamento térmico.[12]

2.1.3.4. Métodos de cura acelerada da ASTM C 684 (1999)

A ASTM C 684 (1999) – *Standard practice test method for making accelerated curing, and testing concrete compression test specimens* é uma das normas que classifica, didaticamente, quatro métodos de cura acelerada do concreto, conforme a Tabela 4, sendo que três utilizam temperatura alta ou procedimentos complexos de execução e apenas um é de fácil execução, em temperatura amena.

TABELA 4: Tipos e procedimentos da cura acelerada (ASTM C 684:1999)

Procedimento		Moldes	Origem da aceleração da resistência	Temperatura de cura acelerada °C (°F)	Idade para início da cura acelerada	Duração da cura acelerada	Idade de ensaio
A	Água quente	Reutilizáveis ou descartável	Calor de hidratação	35 (95)	Imediatamente após moldagem	23,5 h ± 30 min	24 h ± 15 min
B	Água fervente	Reutilizáveis ou descartável	Água fervente	Ebulição	23 h ± 30 min após moldagem	3,5 h ± 5 min	28,5 h ± 15 min
C	Autógena	Uso único	Calor de hidratação	A temperatura inicial do concreto é aumentada pelo calor de hidratação	Imediatamente após moldagem	48 h ± 15 min	49 h ± 15 min
D	Alta temperatura e pressão	Reutilizáveis	Calor e pressão externos	150 (300)	Imediatamente após moldagem	5 h ± 5 min	5,25 h ± 5 min

Na cura acelerada pelo método A da ASTM, conforme a Tabela 4, os corpos de prova são imersos em água aquecida à temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante $23,5\text{h} \pm 0,5\text{h}$, período este iniciado logo após a moldagem dos corpos-de-prova. Os corpos de prova devem ser acomodados no reator com espaçamento de 100 mm entre eles e 100 mm de cobertura de água.

A função principal do aquecimento moderado da água usada no procedimento A é conservar o calor gerado na hidratação do cimento Portland. O método A da ASTM 684:99, devido à baixa temperatura do aquecimento da água, não agride a estrutura interna do concreto. Trata-se de método aprovado por estudos americanos, já há algumas décadas e atestado por pesquisadores, que afirmam que os ensaios de resistência acelerada com este método podem ser uma alternativa confiável para o controle rotineiro da qualidade de concretos estruturais [1].

Na norma ASTM C 684:99, o procedimento tipo A enfatiza o uso de molde apropriado para a cura do corpo de prova com uma duração de 24 horas a uma temperatura de 35°C logo após a moldagem. Os corpos de prova não entram em contato com a água do banho, o que reforça a duração da cura ser de apenas um dia e o ganho de resistência ser baixo.

Porém, para que a cura tenha início logo após a moldagem de corpos-de-prova do concreto, isto requer a adoção de procedimentos especiais em campo ou laboratório, seja para formas, ou para que um tanque com aquecimento térmico possa ser instalado, o que pode dificultar a adoção desta cura de forma rotineira.

Assim, o programa experimental de Cavalcanti Filho (2010) e de Cafange (2011), com resultados resumidos a seguir, bem como o desta dissertação, avaliaram a cura

térmica do Tipo A por procedimentos alternativos derivados do método original, em que os corpos de prova são submetidos à cura térmica, após 1 dia de idade do concreto, e até 7 dias, por serem mais fáceis de serem reproduzidos por laboratórios de controle de qualidade.

2.1.4. A pesquisa de Cavalcante Filho (2010) com três lotes de concreto dosados em centrais de João Pessoa/PB

A pesquisa de Cavalcante Filho (2010) foi realizada em condições de campo, sendo um dos objetivos prospectar as possibilidades de modificação do método A da norma ASTM C 684 (1999).

Devido à existência de apenas três centrais dosadoras de concreto na cidade de João Pessoa/PB, no ano de 2008, a seleção das duas principais foi feita a partir da produção mensal de concreto e da disponibilidade de fornecerem concreto de f_{ck} 30 MPa, em duas obras de edifício de múltiplos andares. Cada central tinha capacidade de produção instalada de 8000 m³ por mês.

Na obra 1, foram caracterizados dois lotes da mesma central dosadora e com amostragem de seis caminhões-betoneira por lote, assim identificados: Lote treinamento em 7/11/2008 e Lote 1 em 14/01/2009. O lote treinamento foi de concretagem de 71 m³ de concreto (10 caminhões-betoneira e mais um complemento) e foi caracterizado por amostragem parcial de seis caminhões, moldando-se diversos corpos de prova. O lote 1 também foi de concretagem de outros 71 m³ de concreto (10 caminhões-betoneira e mais um complemento) e foi da mesma forma caracterizado por amostragem parcial de seis caminhões.

Na obra 2, foi amostrado apenas um lote de outra central dosadora (Lote 2 – 27/11/08). O lote estudado foi de 40 m³ de concreto (cinco caminhões-betoneira) e foi caracterizado por amostragem de todos os cinco caminhões.

Para avaliação do concreto endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, conforme a ABNT NBR 5738 (2003). De cada caminhão-betoneira amostrado, foram moldados dois corpos de prova para cada tipo de cura e idade de ensaio.

A cura convencional dos corpos-de-prova, pela ABNT NBR 5738 (2003) foi por total imersão em tanque de água saturada de cal após 24 h de moldados até idades de 7, 28, 63 e 91 dias.

Nas curas aceleradas da pesquisa, a água, do tanque similar ao de cura convencional do trabalho, foi aquecida por meio de uma resistência elétrica, em temperatura estimada de $(35 \pm 3)^\circ\text{C}$, conforme a Figura 6. O controle de temperatura foi executado manualmente, com o uso de aquecedor resistivo e um termômetro imerso entre os corpos-de-prova [6].



FIGURA 6: Detalhes da cura térmica rústica [6].

O primeiro procedimento de cura acelerada foi o executado de forma mais similar ao tipo A da ASTM C 684 (1999) e testado em ensaio de compressão simples a 1 dia. No segundo procedimento de cura térmica, a cura acelerada foi postergada para o período de 24 horas a 48 horas (24/48 horas) após a moldagem, sendo que nas primeiras 24 horas os corpos-de-prova foram mantidos nas fôrmas em campo, e o transporte para o laboratório foi realizado em idade superior a 16 h das concretagens. Neste segundo procedimento acelerado, os corpos-de-prova após o período de cura térmica entre 24 e 48 horas, permaneceram ainda em água, a temperatura ambiente, até 7 dias de idade. A razão de se estender o prazo de cura até 7 dias se deu como uma forma de compensar o retardo de 24 horas no início da cura térmica [6].

A tabela 5, tabela 6 e tabela 7 apresentam os resultados das resistências à compressão nas idades analisadas e com os três tipos de cura testados nos lotes treinamento, lote 1 e lote 2. Conforme a ABNT NBR 12655 (2006), a resistência do exemplar de cada caminhão-betoneira é o maior entre os dois valores obtidos, e esses valores são apresentados de forma sublinhada nas tabelas citadas. As médias, os valores máximo e mínimo, os desvios padrão e os coeficientes de variação foram calculados em função do maior valor entre os corpos-de-prova irmãos.

Pode-se ainda observar que as resistências relativas entre a cura acelerada de 24/48 com cura em água à temperatura ambiente até 7 dias, em relação à cura normal a 28 dias, apresentaram valores muito próximos, variando em média entre 0,86% e 0,93%.

Mas, a relação entre a resistência a 7 dias por cura normal com a resistência a 28 dias também foi alta nos lotes 1 e 2, variando entre 0,74% e 0,82%. Todavia a cura normal se deu por imersão em tanque externos da empresa sem controle exato de temperatura. Como os ensaios ocorreram em época de verão, é muito provável que mesmo a temperatura do tanque de cura tenha sido bem superior ao normatizado de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

TABELA 5: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote treinamento [6].

Caminhão	Corpo-de-prova	$f_{c7 \text{ acel}}$	f_{c28}	Caminhão	Corpo-de-prova	$f_{c7 \text{ acel}}/f_{c28}$
1	1	<u>30,3</u>	36,6	1	1	0,72
	2	30,1	<u>42,3</u>		2	-
2	3	<u>31,4</u>	29,9	2	3	0,89
	4	31,2	<u>35,4</u>		4	-
3	5	<u>33,6</u>	<u>39,4</u>	3	5	0,85
	6	33,0	37,9		6	-
4	7	<u>28,9</u>	31,8	4	7	0,78
	8	28,8	<u>37,2</u>		8	-
5	9	<u>33,0</u>	<u>31,9</u>	5	9	1,03
	10	31,7	28,4		10	-
6	11	<u>34,9</u>	36,8	6	11	0,91
	12	34,6	<u>38,2</u>		12	-
Média entre os maiores valores (Mpa)				Valor médio da relação		0,86
		32,0	37,4			
Valor máximo (MPa)		34,9	42,3	Desvio Padrão		0,11
Valor mínimo (MPa)		28,9	31,9			
Desvio padrão para os maiores valores (MPa)		2,2	3,5	Coeficiente de Variação		0,13
Coeficiente de variação para os maiores valores (MPa)		7%	9%			

TABELA 6: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote 1 [6].

Caminhão	Corpo-de-prova	f_{c1} (MPa)	f_{c1acel} (MPa)	f_{c7} (MPa)	f_{c7acel} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{c63} (MPa)	f_{c91} (MPa)
		1	1	18,4	27,7	23,6	34,1	31,6
	2	19,3	28,5	23,7	34,3	32,4	40,2	39,5
2	3	20,0	31,2	23,1	30,3	35,6	40,9	37,4
	4	19,2	30,5	24,4	28,5	37,1	40,5	40,7
3	5	18,5	28,2	27,0	29,9	32,4	39,0	40,0
	6	16,4	27,5	29,7	28,5	26,7	41,8	40,7
4	7	16,6	23,1	30,9	28,7	30,2	27,0	37,0
	8	17,2	24,0	26,3	31,0	31,8	38,6	36,0
5	9	14,4	23,4	27,4	28,3	29,7	35,4	37,5
	10	15,1	20,5	26,8	30,0	35,4	36,6	38,8
6	11	18,6	25,7	26,5	30,2	31,0	41,3	43,7
	12	19,0	24,8	26,3	29,8	28,1	43,2	42,5
Média entre os maiores valores (MPa)		18,2	26,8	27,1	31,0	33,4	40,2	40,6
Valor máximo (MPa)		20,0	31,2	30,9	34,3	37,1	43,2	43,7
Valor mínimo (MPa)		15,1	23,4	23,7	29,9	31,0	36,6	37,0

Caminhão	Corpo-de-prova	Relativo à resistência a 28 dias por normal (f_{c28})					
		f_{c1} / f_{c28}	f_{c1acel} / f_{c28}	f_{c7} / f_{c28}	f_{c7acel} / f_{c28}	f_{c63} / f_{c28}	f_{c91} / f_{c28}
1	1	0,60	0,88	0,73	1,06	1,24	1,32
	2	-	-	-	-	-	-
2	3	0,54	0,84	0,66	0,82	1,10	1,10
	4	-	-	-	-	-	-
3	5	0,57	0,87	0,92	0,92	1,29	1,26
	6	-	-	-	-	-	-
4	7	0,54	0,75	0,97	0,97	1,21	1,16
	8	-	-	-	-	-	-
5	9	0,43	0,66	0,77	0,85	1,03	1,10
	10	-	-	-	-	-	-
6	11	0,61	0,83	0,85	0,97	1,39	1,41
	12	-	-	-	-	-	-
Valor médio da relação		0,55	0,81	0,82	0,93	1,21	1,22
Desvio Padrão		0,07	0,09	0,12	0,09	0,13	0,13
Coeficiente de Variação		0,12	0,11	0,14	0,10	0,11	0,10

Tabela 7: Resultados do ensaio de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos amostrados do lote 2 [6].

Caminhão	Corpo-de-prova	f_{c1} (MPa)	f_{c1acel} (MPa)	f_{c7} (MPa)	f_{c7acel} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{c63} (MPa)	f_{c91} (MPa)
1	1	14,3	<u>30,3</u>	24,1	<u>30,3</u>	<u>38,6</u>	<u>40,2</u>	<u>40,7</u>
	2	<u>14,3</u>	29,1	<u>26,0</u>	30,1	31,1	38,6	35,1
2	3	<u>14,0</u>	31,8	<u>28,3</u>	<u>33,2</u>	30,2	<u>38,5</u>	38,6
	4	12,1	<u>31,8</u>	27,2	32,5	<u>32,5</u>	38,0	<u>39,4</u>
3	5	2,8	<u>32,8</u>	<u>28,9</u>	<u>33,6</u>	36,5	<u>40,0</u>	<u>42,4</u>
	6	<u>2,9</u>	27,0	28,8	33,0	<u>40,8</u>	38,2	39,8
4	7	<u>15,5</u>	29,2	24,6	29,0	34,2	<u>38,7</u>	<u>39,7</u>
	8	15,2	<u>31,4</u>	<u>28,3</u>	<u>31,7</u>	<u>40,3</u>	36,4	39,5
5	9	13,9	<u>33,9</u>	<u>23,6</u>	<u>32,1</u>	29,4	35,8	36,4
	10	<u>15,7</u>	31,1	23,3	30,4	<u>32,4</u>	<u>39,1</u>	<u>38,0</u>
Média entre os maiores valores (MPa)		12,5	32,0	27,0	32,2	36,9	39,3	40,0
Valor máximo (MPa)		15,7	33,9	28,9	33,6	40,8	40,2	42,4
Valor mínimo (MPa)		2,9	30,3	23,6	30,3	29,4	38,5	38,0

Caminhão	Corpo-de-prova	Relativo à resistência a 28 dias por cura normal (f_{c28})					
		f_{c1} / f_{c28}	f_{c1acel} / f_{c28}	f_{c7} / f_{c28}	f_{c7acel} / f_{c28}	f_{c63} / f_{c28}	f_{c91} / f_{c28}
1	1	0,37	0,78	0,67	0,78	1,04	1,05
	2	-	-	-	-	-	-
2	3	0,43	0,98	0,87	1,02	1,18	1,21
	4	-	-	-	-	-	-
3	5	0,07	0,80	0,71	0,82	0,98	1,04
	6	-	-	-	-	-	-
4	7	0,38	0,78	0,70	0,79	0,96	0,99
	8	-	-	-	-	-	-
5	9	0,48	1,05	0,73	0,99	1,21	1,17
	10	-	-	-	-	-	-
Valor médio da relação		0,35	0,88	0,74	0,88	1,07	1,09
Desvio Padrão		0,16	0,12	0,08	0,12	0,11	0,10
Coeficiente de Variação		0,46	0,14	0,11	0,13	0,11	0,09

No que diz respeito ao cálculo de resistências características estimadas à compressão ($f_{ck,est}$) (resistência característica à compressão estimada) para ambas as situações de cura, os valores constam das Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, e pode-se observar que no caso dos lotes 1 e 2, com resistência característica à compressão de projeto (f_{ck}) (resistência característica do concreto à compressão) de 30 MPa, a cura acelerada realizada poderia praticamente aprovar os lotes de concretagem desde os 7 dias de idade do concreto, agilizando o controle tecnológico do material. Para o lote 2, o resultado de cura acelerada no período de 0/24h foi também satisfatório, mas isto pode ter ocorrido tanto pelas características do concreto, que era de outra central, quanto por mudanças de temperatura no banho térmico, que foi realizado sem o controle necessário como ilustrou a Figura 6.

TABELA 8: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote treinamento, segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006) [6].

Amostragem	Resistência à compressão	Resistência característica à compressão estimada - f_{ckest} (MPa)
Parcial	$f_{c7\text{ acel}}$	27,8
	f_{c28}	30,1

TABELA 9: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote 1, segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006) [6].

Amostragem	Resistência à compressão	Resistência característica à compressão estimada - f_{ckest}
Parcial	f_{c1}	13,8
	$f_{c1\text{ acel}}$	21,7
	f_{c7}	21,6
	$f_{c7\text{ acel}}$	29,7
	f_{c28}	30,4
	f_{c63}	35,0
	f_{c91}	35,1

TABELA 10: Resistência característica estimada à compressão por amostragem parcial dos concretos do lote 2, segundo cálculos pela ABNT NBR 12655 (2006) [6].

Amostragem	Resistência à compressão	Resistência característica à compressão estimada - f_{ckest} (MPa)
Total	f_{c1}	2,9
	$f_{c1\text{ acel}}$	30,3
	f_{c7}	23,6
	$f_{c7\text{ acel}}$	30,3
	f_{c28}	32,4
	f_{c63}	38,5
	f_{c91}	38,0

2.1.5. A pesquisa de Cafange (2011) com um lote de concreto dosado em central de São Paulo/SP

O lote de concretagem da obra escolhida foi de 160,0 m³ (20 caminhões-betoneira) e definiu-se que seria amostrado pelos concretos de seis caminhões-betoneira, produzidos para a referida obra, no decorrer de única data, no mês de agosto/2009.

Por problemas operacionais que ocorreram, os caminhões tiveram que ser amostrados na central dosadora e não na obra. O concreto de cada caminhão amostrado foi caracterizado em prazo compreendido entre 20 a 30 min do início da mistura no caminhão.

Para avaliação do concreto endurecido, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, conforme a ABNT NBR 5738 (2003), nas dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e foram realizados ensaios com cura acelerada e cura normal do concreto. Para cada tipo de cura e idade do concreto no estado endurecido, foram caracterizados dois corpos-de-prova irmãos de cada caminhão-betoneira amostrado do lote.

Foram testados quatro tipos de cura por maturação acelerada, em temperatura amena e a partir do Método A da ASTM C 684 (1999). Nos quatro procedimentos de cura acelerada, os corpos-de-prova foram imersos em água aquecida à temperatura nominal de $(35 \pm 3^\circ\text{C})$.

O quinto procedimento foi o de cura convencional da ABNT NBR 5738 (2003).

A cura convencional dos corpos-de-prova, pela ABNT NBR 5738 (2003) foi por imersão total, em tanque de água saturada de cal, após 24h de moldados até as idades de 28 e 91 dias, quando foram então ensaiados.

Nas curas aceleradas, a água de uma piscina foi aquecida por meio de duas resistências elétricas, conforme ilustra a Figura 7, e o controle de temperatura foi também precário, mas melhorado através de um termostato.



FIGURA 7: Adaptação de uma piscina plástica para funcionar como tanque de cura térmica, no laboratório da Escola Politécnica da USP, com aquecimento de água por resistência elétrica a $(35 \pm 3^\circ\text{C})$ e controle por termostato. [5]

O primeiro procedimento de cura acelerada foi executado de forma comparativa, seguindo o método A da ASTM C 684 (1999), mas apenas verificado para ensaio de resistência à compressão simples a um dia ($f_{c1\text{acel}}$) (resistência à compressão do concreto por ensaio acelerado na idade de 1 dia), pois assim determina esse método. Para este grupo, optou-se pelo transporte dos corpos-de-prova no transcorrer da concretagem para o laboratório, sendo isto feito cerca de 2 a 3 horas após a moldagem, e a cura foi

realizada por prazo nominal de 0/24 horas. Todos os moldes foram colocados dentro de sacos plásticos para evitar que a água do tanque entrasse em contato com a pasta que se encontrava em processo de pega.

O segundo, terceiro e quarto procedimentos de cura térmica, foram propositadamente defasados em relação ao período de cura do Método A da ASTM C 684 (1999), e foram iniciados no dia seguinte da moldagem. Os corpos de prova foram mantidos nas fôrmas na central dosadora, apenas com a proteção por uma lona plástica em ambiente externo, e o transporte para o laboratório foi realizado em idade superior a 16h das concretagens [5].

No segundo procedimento acelerado, os corpos-de-prova foram submetidos a período de cura térmica entre 24/48 horas e foram ensaiados à compressão simples a 2 dias (f_{c2acel}) (resistência à compressão do concreto por ensaio acelerado na idade de 2 dias).

No terceiro procedimento acelerado, os corpos-de-prova foram submetidos à cura térmica entre 24/72 horas e foram ensaiados à compressão simples a 3 dias (f_{c3acel}) (resistência à compressão do concreto por ensaio acelerado na idade de 3 dias).

No quarto procedimento acelerado, os corpos-de-prova após o período de cura térmica entre 24/72 horas, permaneceram ainda em água a temperatura ambiente até 7 dias de idade e prosseguiram então para o ensaio de compressão simples. A razão de se estender o prazo de cura até 7 dias se deu como uma forma de compensar o retardo de 24 horas no início da cura térmica. Em relação à pesquisa de Cavalcante Filho (2010), o prazo de cura térmica foi estendido por 24 horas.

Ressalta-se que as identificações de (0/24, 24/48 e 24/72 horas) são prazos nominais e que foram períodos médios equivalentes a 0/1 dia, 1/2 dias e 1/3 dias.

Cabe observar, ainda, que também se considerou a pesquisa de Cafange (2011) como um estudo exploratório, quanto à aceleração da maturidade do concreto, dada à precariedade no controle da temperatura do banho térmico, e pesquisas a respeito devem prosseguir em outros trabalhos, com melhores equipamentos, como feito por esta pesquisa.

A Tabela 11 apresenta os resultados das resistências à compressão, nas idades e tipos de cura analisados, com as respectivas médias, valores máximos e mínimos, o desvio padrão e o coeficiente de variação nos concretos amostrados. Conforme a ABNT

NBR 12655 (2006), a resistência do exemplar é o maior valor entre os dois irmãos ensaiados simultaneamente, e na Tabela 11 esses valores são apresentados de forma sublinhada. As médias, os valores de máximo e mínimo, o desvio padrão e o coeficiente de variação foram calculados em função da resistência do exemplar.

Na Tabela 11, pode-se observar que a cura térmica realizada para período entre 24/72 h com imersão até 7 dias apresentou resultados bastante satisfatórios para efeito de controle tecnológico do concreto, pois pela simulação de amostragem total do lote, na Tabela 12, ele poderia estar aprovado aos 7 dias, considerando-se a resistência característica de projeto (f_{ck}) (resistência característica do concreto à compressão) igual a 30 MPa. Já por amostragem parcial, que foi a realmente executada, a cura acelerada mostrou-se insuficiente para permitir a aprovação do lote, mas o valor alcançado foi muito próximo. A conclusão foi que a cura acelerada poderia ser estendida por prazo além de 24/72 horas, por exemplo entre 24 h e 7 dias, para se tentar assegurar a maturação do concreto de forma mais apropriada.

TABELA 11: Resultados do ensaio de resistência à compressão, segundo a ABNT NBR 5739 (2007), nos concretos dos seis caminhões do lote analisado [5].

Caminhão	$f_{c1-ace1}$ 0/24h (MPa)	$f_{c2-ace1}$ 24/48h (MPa)	$f_{c3-ace1}$ 24/72h (MPa)	$f_{c7-ace1}$ 24/72h+imersão (MPa)	f_{c28n} (MPa)	$f_{c91ace1}$ 24/72h +imersão (MPa)	f_{c91n} (MPa)	f_{c7obra} (MPa)	$f_{c28obra}$ (MPa)
1A	25,4	28,9	31,4	<u>42,8</u>	<u>48,2</u>	--	--	25,1	<u>39,8</u>
	<u>27,7</u>	<u>29,0</u>	<u>32,7</u>	38,3	45,1	--	--	<u>26,0</u>	38,6
2B	<u>28,5</u>	<u>29,8</u>	<u>33,6</u>	40,1	<u>46,9</u>	--	--	26,0	38,1
	26,9	29,1	33,6	<u>40,2</u>	46,3	--	--	<u>26,5</u>	<u>39,8</u>
3C	<u>24,0</u>	25,7	<u>32,9</u>	<u>38,8</u>	<u>45,2</u>	--	--	23,5	<u>39,8</u>
	23,6	<u>27,0</u>	31,5	38,0	44,0	--	--	<u>24,5</u>	37,5
4D	<u>22,2</u>	<u>22,0</u>	28,2	<u>31,4</u>	39,0	--	--	<u>23,5</u>	<u>37,2</u>
	20,7	20,7	<u>28,6</u>	29,1	<u>39,8</u>	--	--	22,6	35,1
5E	<u>21,4</u>	<u>26,5</u>	<u>34,8</u>	<u>40,4</u>	<u>50,9</u>	--	--	30,2	<u>46,9</u>
	20,4	25,5	34,6	38,9	49,0	--	--	<u>31,0</u>	46,9
6F	<u>20,3</u>	24,5	29,3	35,8	<u>42,2</u>	<u>45,3</u>	45,3	<u>26,0</u>	36,2
	20,2	<u>24,9</u>	<u>30,0</u>	<u>36,3</u>	38,2	42,7	<u>47,1</u>	25,0	<u>38,8</u>
Média dos exemplares (MPa)	24,0	26,5	32,1	38,3	45,5	45,3	47,1	26,3	40,4
Valor máximo dos exemplares (MPa)	28,5	29,8	34,8	42,8	50,9	45,3	47,1	31,0	46,9
Valor mínimo dos exemplares (MPa)	20,3	22,0	28,6	31,4	39,8	42,7	45,3	23,5	37,2
Desvio padrão dos exemplares (MPa)	3,4	2,8	2,3	4,0	4,0	--	--	2,6	3,4
Coefficiente de variação dos exemplares (%)	14%	11%	7%	10%	9%	--	--	10%	8%
Amplitude dos exemplares (MPa)	8	8	6	11	11	3	2	8	10
Intervalo de confiança da média 95% (MPa)	± 3	± 2	± 2	± 3	± 3	--	--	± 2	± 3

A Tabela 13 apresenta a evolução da resistência dos corpos de prova com cura acelerada em função da resistência a 28 dias de idade por cura normal dos corpos-de-prova amostrados dos seis caminhões do lote analisado. A evolução da resistência foi calculada para os maiores valores entre os corpos-de-prova irmãos, e os corpos de prova com cura acelerada de 24/72 e imersão até 7 dias alcançaram em média 84 % da

resistência medida a 28 dias por cura normal, situando-se este valor muito próximo aos obtidos por Cavalcante Filho (2010), que variaram entre 86% e 93%, conforme salientado no item precedente.

TABELA 12: Cálculo da resistência característica estimada à compressão ($f_{ck,est}$), segundo a ABNT NBR 12655 (2006), por amostragem parcial e total dos concretos do lote analisado [5].

Simulação de amostragem	Resistência característica à compressão - $f_{ck,est}$ (MPa)	Simulação de amostragem	Resistência característica à compressão - $f_{ck,est}$ (MPa)
	$f_{c1acel. 0/1}$ 19,5		$f_{c1acel. 0/1}$ 20,3
	$f_{c2acel. 1/2}$ 20,4		$f_{c2acel. 1/2}$ 22,0
Parcial	$f_{c3acel. 1/3}$ 26,3	Total	$f_{c3acel. 1/3}$ 28,6
	$f_{c7acel. 1/7}$ 28,9		$f_{c7acel. 1/7}$ 31,4
	f_{c28n} 36,8		f_{c28n} 39,8

Tabela 13: Resistência relativa das várias idades de cura acelerada em relação a 28 dias de cura normal [5].

Caminhão	$f_{c1acelerado}$ (MPa)	$f_{c1ace.1} / f_{c28n}$	$f_{c2acelerado}$ (MPa)	$f_{c2acel.} / f_{c28n}$	$f_{c3acelerado}$ (MPa)	$f_{c3acel.} / f_{c28n}$	$f_{c7acelerado}$ (MPa)	$f_{c7acel.} / f_{c28n}$	$f_{c28normal}$ (MPa)
1A	27,7	57,5	29,0	60,1	32,7	67,8	42,8	88,7	48,2
2B	28,5	60,7	29,8	63,6	33,6	71,7	40,2	85,6	46,9
3C	24,0	53,2	27,0	59,7	32,9	72,7	38,8	85,9	45,2
4D	22,2	55,8	22,0	55,3	28,6	71,9	31,4	78,9	39,8
5E	21,4	42,1	26,5	52,1	34,8	68,3	40,4	79,5	50,9
6F	20,3	48,2	24,9	59,0	30,0	71,1	36,3	85,9	42,2
Valor médio da relação (%)	-	52,9	-	58,3	-	70,6	-	84,1	-

2.2. Ensaios realizados nas pastas de cimento

A escolha de um material de Engenharia, para uma aplicação específica, deve levar em conta a sua capacidade de resistir a uma força aplicada. A alteração dimensional que resulta da carga aplicada é chamada de deformação, definida pela mudança de comprimento por unidade de comprimento, sendo a carga aplicada é chamada de tensão

(força por unidade de área). As relações tensão-deformação dos materiais são geralmente expressas em termos de resistência, módulo de elasticidade, ductilidade e tenacidade.[1]

Resistência é a medida da tensão exigida para romper o material. No projeto das estruturas de concreto, considera-se o concreto como o material mais adequado para resistir a carga de compressão; é por isso que a resistência à compressão do material é geralmente especificada. Sendo a resistência do concreto obtida em função do processo de hidratação do cimento, o que é relativamente lento, tradicionalmente as especificações e ensaios de resistência do concreto são baseadas em corpos curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de 28 dias.[1]

A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros projetistas e do controle da qualidade. Nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência. Consequentemente, em materiais de várias fases como o concreto, a porosidade de cada componente ou fase de sua estrutura pode se tornar um fator limitante da resistência.[1]

O mais comum de todos os ensaios de concreto endurecido é o de resistência à compressão, em parte porque é um ensaio fácil de ser executado, em parte, porque muitas, embora não todas, das características desejáveis dos concretos são qualitativamente relacionadas com a resistência à compressão; mas principalmente devido à importância intrínseca da resistência à compressão do concreto em projetos estruturais.[11]

Do ponto de vista da determinação da resistência à compressão do concreto, a norma ABNT NBR 5739 (2007) determina os procedimentos de ensaio. Cabe salientar que, embora seja um dos ensaios de mais fácil realização e amplamente adotado, trata-se de uma propriedade de Engenharia bastante complexa, tanto pela distribuição interna das tensões no interior do corpo-de-prova não resultar uniforme, quanto por estar ainda sujeita a considerável influência dos procedimentos de produção do concreto (qualidade e dosagem dos materiais, equipamentos de pesagem e mistura, prazo e volume de amostragem, adensamento, cura, entre outros) e dos procedimentos de ensaio (qualidade das formas, método de adensamento, cura, capeamento, tolerâncias de idade, prensa de ensaio e velocidade de carregamento propriamente ditos). Por esta razão, em geral, sempre a resistência à compressão para uma certa composição ou idade de ensaio é

determinada para um exemplar constituído de pelo menos dois corpos-de-prova, adotando-se o valor mais alto de resistência ou o médio, segundo a finalidade do ensaio.[6]

O processo de hidratação do cimento pode ser avaliado diretamente, utilizando-se as técnicas de microscopia ótica ou análise de difração de raios X, e indiretamente, pela determinação do calor desenvolvido na hidratação, pelas técnicas de análise térmica diferencial e termogravimétrica, e pela resistência a compressão [11; 24; 22]. As técnicas de análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG e DTG) têm sido utilizadas por vários pesquisadores, obtendo-se a quantidade de água quimicamente combinada referente aos hidratos [25; 27; 11; 28; 22]. Através das técnicas DTA e DTG, pode-se observar que os produtos hidratados presentes na matriz perdem a água quimicamente combinada em picos característicos, que podem ocorrer nas faixas de temperatura, conforme segue: silicato de cálcio hidratado, etringita e aluminato de cálcio hidratado – 100-300 °C [31], e hidróxido de cálcio – 425-550 °C [30].

Estudos desenvolvidos utilizando análise termogravimétrica em pastas de cimento mostraram que, na ausência de água livre, a desidratação do silicato de cálcio hidratado inicia-se a partir de 50 °C e que a faixa de decomposição do silicato de cálcio hidratado e etringita é de 50 °C a 200 °C [25, 32]. Dessa forma, se a amostra for seca no máximo até 35 °C, pode-se determinar o teor de água quimicamente combinada de todos os hidratos no intervalo de temperatura entre 50 °C e a temperatura final de decomposição do hidróxido de cálcio, uma vez que, acima da temperatura final de perda de água relativa ao hidróxido de cálcio, não há decréscimo de massa referente a produtos hidratados [25; 26; 32]. Outros pesquisadores utilizam 100 °C e 105 °C, respectivamente, como a temperatura inicial para a determinação do teor de água combinada.[33, 28]

2.3. O reator solar do Núcleo de Engenharia Mecânica da UFS

2.3.1. O aquecedor solar clássico do mercado

A busca por alternativas de aproveitamento da energia solar – limpa e 100% renovável, abundante durante quase o ano todo na região Nordeste – é a base do projeto, que visa o uso de novos materiais para a produção de um sistema de aquecimento de água (coletor + boiler) de custo mais acessível do que as opções hoje existentes no mercado (produtos a base de metais – alumínio + cobre).

A Figura 8 ilustra um esquema de montagem dos diferentes dispositivos utilizados no processo, de aquecimento da água no modelo clássico de aquecedor solar disponível no mercado:

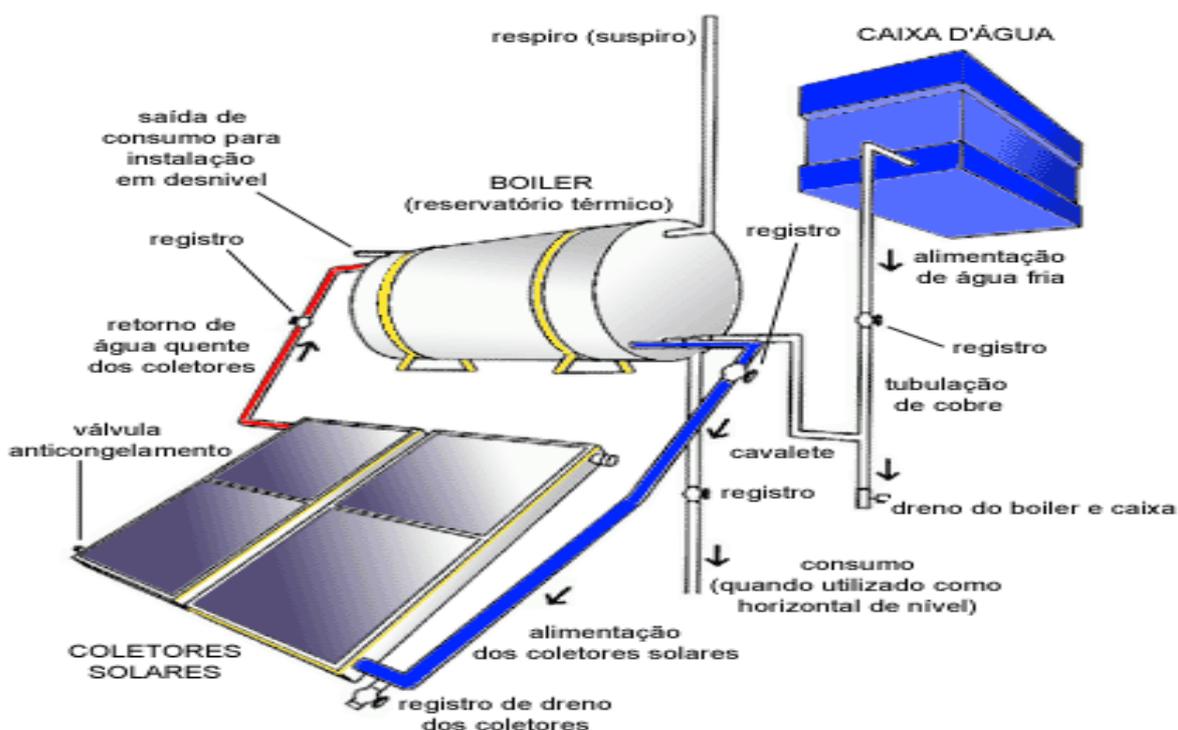


Figura 8: Imagem ilustrativa de aquecedor solar clássico do mercado [39]

O coletor solar, um dos componentes do aquecedor, também pode ser desenvolvido para outras aplicações, tais como produção de gelo, ar condicionado, aquecimento das trepes do fogão e o tratamento do solo (combate a fungos, bactérias e plantas daninhas).

O material utilizado na confecção dos componentes do aquecedor solar de água é comum em diversos setores da economia (construção civil, automóveis, eletrodomésticos) e sua aplicação é usualmente um sinônimo de “plástico reforçado”. Possui características como isolante elétrico, isolante térmico, resistência ao fogo, alta

resistência mecânica e à oxidação, resistência à umidade, baixo custo e peso mínimo, todas bastante apropriadas para uso num coletor solar.

2.3.2. Características

Refere-se a presente invenção a um aquecedor de água (coletor e reservatório térmico), que funciona a energia solar, confeccionado em fibra de vidro e que proporciona excelentes economias no seu custo de produção.

Sabe-se que o sistema solar de aquecimento de água opera pelo princípio do “termosifão”, um sistema auto-regulado constituído de um conjunto de: coletor solar, reservatório térmico e tubulações hidráulicas de conexão. Esse tipo de sistema não utiliza nenhuma bomba hidráulica para fazer a circulação do fluido de trabalho, por este motivo também é chamado de sistema de circulação natural. A circulação inicia-se quando o sol aquece a água no coletor, tornando-a menos densa que a água no fundo do reservatório. Dessa forma uma circulação convectiva surge do fundo do reservatório para a entrada do coletor, da entrada do coletor para saída dele e da saída do coletor para o topo do reservatório respectivamente. Desse modo, o diferencial criado pelos gradientes de temperatura é utilizado para produzir o escoamento do fluido aquecido sem qualquer outra fonte externa de energia além da energia solar.

Com o intuito de melhorar a eficiência deste sistema de aquecimento e de baratear seu custo de produção, desenvolveu-se a invenção do aquecedor de água em resina reforçada com fibra de vidro. Neste caso, observa-se que o grande diferencial do uso da fibra de vidro em relação aos outros materiais já utilizados baseia-se no fato de ser mais leve, mais barato e possuir excelente resistência ao meio de trabalho. A estas vantagens, deve-se acrescentar a facilidade de manuseio do material e de fabricação de equipamentos, pois não exige procedimentos de alta tecnologia.

De fato, o polímero reforçado com a fibra de vidro é um material compósito produzido basicamente a partir da aglomeração de finíssimos filamentos flexíveis de vidro com resina poliéster (ou outro tipo de resina) e posterior aplicação de uma substância catalisadora de polimerização. O material resultante é geralmente altamente resistente, possui excelentes propriedades mecânicas, baixa densidade e enorme durabilidade.

Deve-se ressaltar ainda que a fibra de vidro, na medida em que possui determinadas características mecânicas e físicas (alta resistência à tração, à corrosão, ao

impacto e à flexão), é um material isolante elétrico e térmico. Com essas propriedades, a fibra de vidro torna-se um dos materiais de grande potencial de aplicação em aquecedores solares e que pode representar um menor custo do produto final.

O reservatório e coletor poderão ser melhor compreendidos através das figuras de número Figura 9, Figura 10 e Figura 11 que seguem.

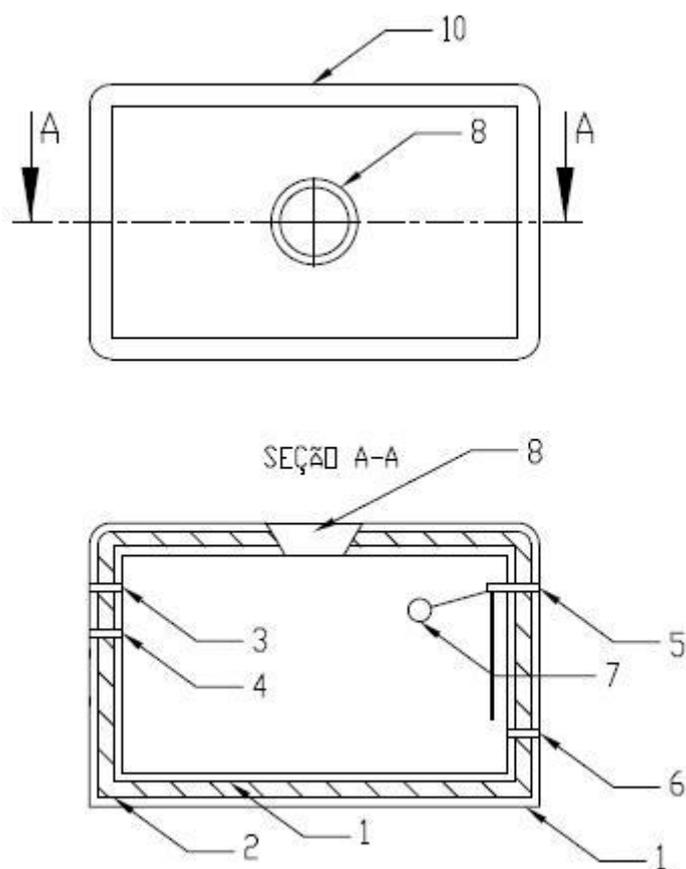


Figura 9: Representa o reservatório térmico em vista superior e em corte seccional transversal.[36]

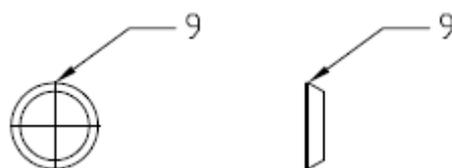


Figura 10: Representa a tampa do reservatório térmico em vista superior e em vista lateral esquerda.[36]

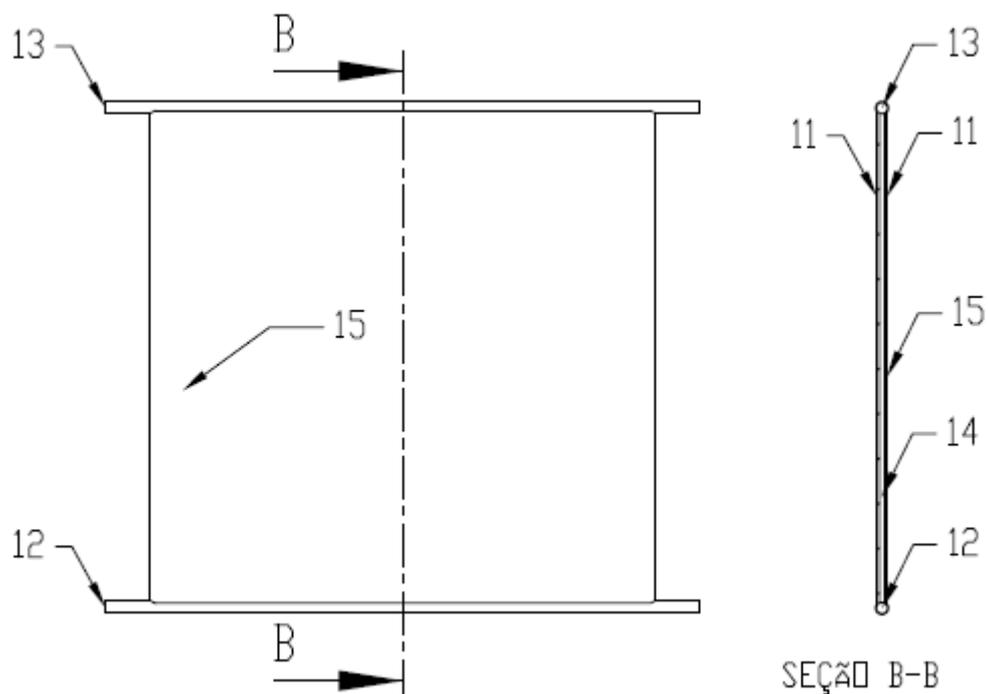


Figura 11: Representa o coletor solar em vista frontal e em vista de corte seccional vertical.[36]

Com referência a estas figuras pode-se observar o reservatório térmico (10), com isolante térmico de poliuretano expandido (2) e recoberto por duas camadas de fibra de vidro interna e externamente (1), dotado de furos para encaixe de tubulações de água. A água quente oriunda do coletor solar entra pelo furo superior (3) e sai com destino para consumo pelo furo inferior (4). A entrada de água fria de origem da caixa d'água residencial entra pelo furo superior (5) e tem saída para o coletor solar pelo furo inferior (6).

Para evitar o descontrole de alimentação de água no reservatório, ele é dotado de uma boia (7) que limita sua capacidade de armazenamento. A abertura (8) permite que sejam efetuadas operações de manutenção interna no reservatório, além de servir como encaixe para a tampa (9) que se faz necessária à manutenção do isolamento térmico.

O coletor solar (15), por onde a água será aquecida e deverá fluir, é dotado de duas camadas de fibra de vidro (11) espaçadas por pequenos tubos de PVC (14), produzindo espaçadores que irão ser dispostos de forma estratégica para garantir que as placas ao se sobreporem uma na outra não se juntem. A alimentação com água fria dar-

se-á por meio da tubulação inferior de PVC (12) e sua saída mediante o processo de termossifão se dá pela tubulação de PVC superior (13).

O funcionamento do sistema de aquecimento solar de água proposto consiste em introduzir água fria que vai se depositando no fundo do reservatório térmico (10) e é expelida pelo furo inferior (6) e entrará, por meio da tubulação de PVC (12), no coletor (15). Após a água fria percorrer o espaço vazado entre as placas de fibras de vidro (11) e trocar calor com a placa aquecida devido à incidência da radiação solar, esta fluirá naturalmente até o início da tubulação de PVC (13) e daí será encaminhada para o reservatório térmico (10), onde deverá permanecer aquecida na sua parte superior, estando disponível para o seu consumo final, através do orifício de saída de água quente (4). A circulação desse sistema ocorre de maneira natural seguindo o termossifão que ocorre devido ao gradiente de temperatura da água.

A instalação do aquecedor solar de água de fibra de vidro poderá ser efetuada de três maneiras principais. A primeira, apoiando-se simplesmente sobre a laje de cobertura da residência. A segunda, embutindo-se no telhado da residência. A terceira simplesmente adaptando o equipamento sobre o telhado da residência. Com referência a instalação das tubulações hidráulicas, esta deverá ser feita sem maiores problemas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais constituintes do reator

O reator foi construído com materiais e equipamentos diversos e quase todos adquiridos em comércio popular local. Dos componentes citados acima não fazem parte o CLP (controlador lógico programável), os sensores resistivos de temperatura (RTD) e o indicador de temperatura que foram adquiridos em lojas específicas da área de automação industrial. Os referidos componentes estão abaixo listados:

- a) Tanque de isopor comercial com as seguintes dimensões externas: 400 mm de profundidade x 870 mm de comprimento x 480 mm de largura;
- b) Um tanque de fibra para armazenamento de água quente, com as seguintes dimensões externas: 400 mm de profundidade x 870 mm de comprimento x 480 mm de largura, conforme apresentado no Capítulo 2, item 2.2.2;
- c) Uma placa coletora solar;
- d) Tubulação de PVC;
- e) Tubulação de nylon;
- f) Tubos para isolamento térmica;
- g) CLP (controlador lógico programável) ;
- h) Controlador de temperatura;
- i) Termopar;
- j) Dois PT100 (termoresistências);
- k) Um cartão de entrada para dois PT100;
- l) Dois relés de estado sólido;
- m) Bomba de fluxo;
- n) Três compressores de ar comprimido, sendo dois simples e um duplo;
- o) Cinco aeradores;
- p) Mangueiras plásticas para a distribuição do ar comprimido;
- q) Barra aquecedora de 1200 W;
- r) Caixa de PVC para a acomodação do circuito elétrico;
- s) Barras de alumínio para a formação da gaiola geral de sustentação e separação dos corpos de prova;
- t) Fios elétricos, botoeiras, disjuntores, entre outros.

A cura do concreto aplicada nos canteiros de obras e por empresas reguladoras, em sua maioria, utiliza a imersão do corpo-de-prova em água saturada com cal. Procedimento que não agrega um gasto significativo à empresa, esse fator tornou a confecção do reator um problema a ser ponderado. Com base neste critério os materiais usados na estrutura do reator foram isopor, pvc e alumínio. O material empregado no controle automático do sistema também foi pensado com esse mesmo intuito, ter o menor custo possível.

Devido a esses fatores, foi observado um número de intercorrências acima do normal por parte dos materiais, obrigando, assim, a tomar medidas corretivas para solucionar alguns problemas inerentes ao material como vazamentos, fragilidade do material, durabilidade, entre outros.

3.2. Montagem do reator solar híbrido

A montagem teve início com a impermeabilização da superfície interna da caixa de isopor utilizando tinta a base de água para evitar que ocorra o vazamento da água necessária para a cura, conforme a Figura 12.



Figura 12: Aplicação de tinta a base de água na superfície interna da caixa de isopor utilizada como tanque de cura do reator.

O passo seguinte foi abrir os orifícios para conectar a caixa de aquecimento, o retorno do segundo tanque de armazenamento de água quente, para o encaixe dos sensores e termômetros.(Figura 13)



Figura 13: Orifícios para a conexão da caixa de aquecimento, sensor e termômetro.

Dando prosseguimento à montagem, passou-se, em seguida, a testar o encaixe da grade de alumínio geral que serve para distribuir e separar as duplas de corpos de prova de forma igualitária dentro do compartimento do reator e, como pode ser visto na Figura 14.



Figura 14: Grade geral à esquerda e grade geral acomodada no interior da caixa de isopor (reator híbrido solar).

Para que haja o controle de alguma variável, é necessário que se tenha a variável e a inversa da variável, ou seja, no controle da temperatura, é necessário que se tenha aquecimento e refrigeração. No caso do reator, foi preciso criar uma maneira de perder calor, para que o controle da temperatura ganhasse exatidão. Para isto, foi construído um compartimento que continha, uma barra aquecedora e um sensor de temperatura. Em seguida essa caixa de aquecimento foi acoplada ao reator, com o uso de cano de PVC comercial, sem especificação para uso com líquidos quentes e aquecidos. Isto possibilitou ao sistema uma perda de calor contínua que serviu como variável de refrigeração para o controle da temperatura, conforme a Figura 15.



Figura 15: Caixa de aquecimento que acomoda uma barra aquecedora e um sensor de temperatura.

A parte final da montagem, e a mais difícil, devido à sua complexidade, foi a instalação elétrica e a programação do CLP (circuito lógico programável). Primeiramente foi preciso fixar os trilhos, onde foi encaixado o CLP, cartão de leitura de temperatura, relé de estado sólido, fonte, entre outros, conforme a Figura 16. O Anexo 3 e Anexo 4 contem a memória de cálculo desta etapa do projeto.

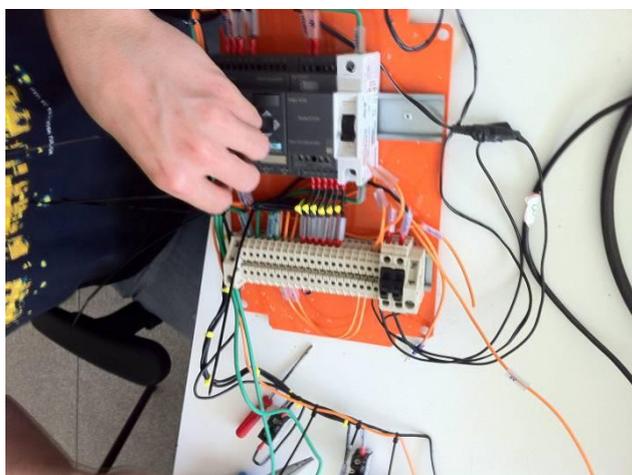


Figura 16: Fixação dos trilhos e encaixe dos equipamentos como CLP, cartão, fusível, entre outros.

Depois de fixados os equipamentos, foram então realizados o cabeamento, testes de continuidade, testes de proteção de sobrecarga e curto circuito e por último foi feita a energização com a programação do CLP, conforme a Figura 17. A vantagem no uso do CLP, está na possibilidade de programar uma infinidade de caminhos para o controle da temperatura sem que seja necessário modificação no circuito elétrico. No circuito tratado neste trabalho, a temperatura está fixa em $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, porém o sistema está

pronto para funcionar com outros níveis de temperatura, bastando apenas uma modificação no programa do CLP. Sabendo que não se pode elevar a temperatura acima de 45°C por conta do material empregado, isopor e tubulação de PVC e cola, caso a temperatura ultrapasse esse valor o material não suportará o nível de temperatura e poderá ocorrer rompimento ou deformação dele.



Figura 17: Montagem do painel de controle.

Na Figura 18 é possível perceber na parte superior do visor que a temperatura da caixa de aquecimento (TEMP AQUECEDOR) está em torno de 37°C. O CLP está programado para prever uma possível variação da temperatura no interior do reator. Este equipamento funciona com sinal digital, por este motivo foi acoplada a ele um

cartão que recebe na sua entrada sinal analógico e o transforma em sinal digital para ser usado pelo CLP. O sinal analógico, diferente do digital, sofre variações no decorrer do tempo. O cartão de leitura de sinal analógico possui uma sensibilidade significativa, com possibilidade de percepção de variação da temperatura abaixo da unidade, ou seja, antes mesmo de ocorrer a perda de 1°C de temperatura, o sistema já enviou um comando de correção desta variável. O que possibilita uma menor oscilação do sinal controlado. Na parte inferior (TEMP TANQ), ou temperatura do reator híbrido solar, é possível observar que o valor da temperatura se encontra em 35°C, que é a temperatura de trabalho do reator híbrido solar, e assim se mantém durante todo o período de cura determinado.



Figura 18: CLP, Circuito Lógico Programável.

A movimentação do líquido no interior do reator para evitar a estratificação e a movimentação com a utilização do método “Air Lift Pumping” utilizou dispersores de bolhas, como pode ser visto na Figura 19 [17].



Figura 19: Dispersor de bolhas usado para aeração ou bombeamento.

Uma vista geral do reator solar híbrido montado pode ser vista na Figura 20 e o item a seguir discute detalhes sobre o seu funcionamento em operação.



Figura 20: Sistema montado, em armação metálica, em pleno funcionamento.

3.3. Pastas de cimento comparadas quanto à cura térmica e normal

3.3.1. Temperatura e períodos de duração da cura no reator

Com base nos resultados precedentes de Cavalcanti Filho (2010) e Cafange (2011), apresentados no Capítulo 2, os seguintes períodos nominais de cura foram estudados no reator à temperatura de 35 °C:

- 0 a 24 horas;
- 24 a 48 horas;
- 24 a 72 horas;
- 24 a 168 horas (1 a 7 dias).

Observa-se que o período de 1 a 7 dias de cura térmica à temperatura morna é o que melhor pode se adequar ao funcionamento comercial de laboratórios de controle tecnológico, dado que a idade de 7 dias de cura normal já é uma prática corrente e, portanto, os ensaios com cura acelerada, em menores idades, aumentariam em pouco o contingente de mão de obra para essa finalidade.

Além disso, as pesquisas precedentes de Cavalcante Filho (2010) e Cafange (2011) alcançaram valores de 84% a 93% da resistência normal do concreto a 28 dias, quando realizaram as curas térmicas por períodos entre 24 e 48 h ou 24 e 72 h seguidos de cura em água à temperatura ambiente até 7 dias.

3.3.2. Relação água/cimento e processo de moldagem das pastas

Duas partidas de cimento foram usadas nas pastas, a saber:

- A primeira foi da marca CIMPOR, tipo CP II F 32, fornecido pela empresa Concreto REDIMIX do Brasil S/A, executando as moldagens no período de 21 de março de 2012 a 22 de maio de 2012.
- A segunda partida foi da marca NASSAU, tipo CP II F 32, executando as moldagens no período de 08 de maio de 2012 a 19 de junho de 2012.

Em todas as pastas preparadas no laboratório de Materiais de Construção e Estrutura (LAMCE/DEC) pelo pesquisador, foi utilizado o aditivo ADIMENT SUPER RD, um superplastificante retardador de pega da Vedacit Impermeabilizantes, em teor de 0,4% sobre a massa do cimento, pois era de uso pela empresa REDIMIX na produção de concreto pré-misturado e foi por ela fornecido.

O pó de cimento fornecido pela empresa REDIMIX foi peneirado para retirar impurezas e partículas de pó de cimento endurecidas, pois, provinha de condições de estocagem em campo e nem sempre isentas de contaminação.

Para ambos os procedimentos de preparo das pastas de cimento, o pó foi separado em porções de 4,5Kg, com o uso de uma balança de precisão. A água foi separada com o uso de uma proveta volumétrica, nos volumes necessário para as relações a/c (água/cimento) de 0,25 e 0,35, o que alcançava 1,125 l e 1,575 l respectivamente. O aditivo utilizado obedeceu a proporção de 0,4%, do peso do pó de cimento, volume usado no preparo do concreto pela empresa REDIMIX. O preenchimento das formas obedeceu uma metodologia de três camadas adensadas com um soquete padrão, e cada camada recebia 30 golpes, ou seja, cada forma recebia ao final do processo de preenchimento 90 golpes com o uso do soquete padrão. Esse adensamento serviu para retirar ar aprisionado à pasta de cimento, durante o processo de mistura. Finalizado o preenchimento, a pasta de cimento em excesso era retirada e uma placa de vidro era colocada no topo do corpo de prova, para evitar a evaporação da água contida na pasta de cimento, o que pode ser observado na Figura 21.

Pela falta inicial de um misturador mecânico, o procedimento de mistura das pastas foi manual e com baixa relação água/cimento (0,25), para não haver exsudação de água, mas considerou-se que foi inadequado. O procedimento de mistura manual foi realizado da seguinte forma:

A água e o pó de cimento foram colocados em uma bacia plástica e com o uso de uma espátula de metal, a mistura foi efetuada, com um tempo de duração de 40 min aproximadamente. Por fim colocou-se o aditivo, e manteve-se a mistura por mais 10 min. Notando uma homogeneização na mistura da pasta de cimento, essa foi então lançada nas formas dos corpos de prova.



Figura 21: Formas de corpos de prova depois do adensamento e com placas de vidro no topo.

Uma vez que foi possível obter um misturador mecânico, outros grupos de corpos de prova de pasta foram moldados com duas relações água/cimento, de 0,25 e um pouco maior (0,35), para se garantir melhor homogeneidade e compactação da pasta. Inicialmente, o procedimento de mistura mecanizado foi excessivamente lento, pois se usou uma quantidade maior de cimento. O procedimento de mistura mecanizado adotado está descrito, com segue:

Para uma relação água/cimento de 0,25, a água foi colocada na cuba da argamassadeira, a máquina foi então ligada na primeira velocidade e com o uso de uma concha de metal o pó de cimento era então adicionado, em pequenas quantidades, à pasta que estava sendo formada e misturada de forma contínua na argamassadeira, até a mistura ser totalmente homogeneizada, com um tempo de duração de 50 min aproximadamente. Por fim colocava-se o aditivo retardador de pega, e mantinha a mistura por mais 10 min, dando um total de 60 min de processo de mistura e homogeneização da pasta de cimento. Essa era então lançada nas formas dos corpos de prova. Deve-se salientar dois fatos: o tempo adotado de 60 minutos de duração da mistura foi excessivo, mas arbitrado por causa da quantidade de cimento usada na argamassadeira, e que o aditivo deveria ter sido adicionado no início da mistura e não no fim.

Para uma relação água/cimento de 0,35, O pó de cimento adquirido no comercio local, da marca NASSAU, não necessitou ser peneirado por estar em embalagem

devidamente lacrada. A água foi colocada na cuba da argamassadeira e em seguida foi adicionado o aditivo. Com uso de uma concha de metal, o pó de cimento era então adicionado à água e ao aditivo. Realizava-se então uma pequena mistura manual inicial, com o uso de uma espátula, para evitar transbordo do pó de cimento e em seguida ligava-se a argamassadeira, na primeira velocidade, até a mistura ser totalmente efetuada, com um tempo de duração de 10 minutos. Essa era então lançada nas formas dos corpos de prova. O preenchimento das formas era realizado de forma contínua sem a necessidade de golpes devido à fluidez da pasta de cimento nesta relação água/cimento de 0,35. O adensamento foi realizado em mesa vibratória dos corpos de prova para retirar o ar aprisionado na pasta de cimento devido ao processo de mistura. Finalizado o preenchimento, a pasta de cimento em excesso era retirada e uma placa de vidro era colocada no topo do corpo de prova para evitar a evaporação da água contida na pasta de cimento (Figura 22).



Figura 22: Pasta de cimento após a mistura de 15 min sendo colocada nas formas padrão que medem 100 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro.

3.3.3. Ensaio realizados nas pastas

Várias análises são utilizadas para comprovação da hidratação de concretos, argamassas e pastas de cimento. O ensaio de compressão simples ou axial é o mais usado por ser de fácil execução e de baixo custo. Há também a análise termogravimétrica ou simplesmente TG, que trabalha com a massa do material, porém, pode ser de difícil análise e interpretação, variando os critérios de interpretação entre autores.

Outra análise que também vem sendo utilizada em estudos de pastas, argamassas e concretos de cimento Portland é a análise da imagem através do emprego de um microscópio eletrônico de varredura ou MEV, que possibilita ao operador uma visão da microestrutura do concreto, das zonas de transição e dos diversos vazios que o compõem. Com o uso do MEV, da marca CARRY SCOPE JCM 5700 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), foram realizadas análises da pasta de cimento nas idades de 24 horas, 168 horas e 28 dias, em caráter complementar.

Em resumo, as pastas produzidas segundo descrito no item 3.3.2 foram submetidas aos seguintes ensaios, para fins comparativos dos dois tipos de cura, térmica e normal.

Resistência à compressão em analogia à NBR 7215, tendo sido testada nos períodos de cura térmica indicados no item 3.3.1 em relação à cura normal a 28 dias de idade (para algumas pastas foi possível realizar também ensaios com cura normal a 7 dias). Para a realização deste ensaio, os corpos de prova tiveram seus topos retificados mecanicamente com a utilização da máquina da Figura 23;



Figura 23: Máquina utilizada para retificar os topos dos corpos de prova de pasta de cimento.

Análise termogravimétrica com o uso do equipamento NETZSCH modelo Júpiter STA 449 F3, que atinge 1550°C de temperatura máxima, com as seguintes características de operação, temperatura inicial ambiente, temperatura final de 1000°C e taxa de aquecimento de 10°C/min. Para esta análise foram usados fragmentos dos ensaios de pasta à compressão imersos em acetona ou álcool p.a. 99,98% para bloquear a hidratação até a data do ensaio, tendo sido cominuídos em almofariz até dimensão

inferior a 75 μm , segundo metodologia [7] e a interpretação da TG foi realizada levando em consideração os critérios observados na revisão bibliográfica [23].

- Microscopia eletrônica de varredura, no equipamento da marca CARRY SCOPE JCM 5700. Para esta análise, as pastas foram conservadas e preparadas nas mesmas condições descritas no parágrafo anterior, mas também foi aplicado o MEV em pasta não cominuída (fragmento inteiro).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Diretrizes de projeto do reator

Os desafios principais do projeto foram o controle e a distribuição da temperatura no interior do reator com corpos de prova cilíndricos de concreto nas suas dimensões usuais, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

A redução do tempo de cura do concreto e pastas de cimento Portland, de 28 dias em água a temperatura ambiente (23°C), para até 7 dias em água à temperatura morna de 35°C, foi também estudada como objetivo secundário, partindo-se dos resultados alcançados nas pesquisas de [6] e [5], resumidos no Capítulo 2.

Por dificuldades encontradas para a confecção dos corpos-de-prova de concreto, a pesquisa em curso utilizou corpos-de-prova de pasta de cimento com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, com o intuito de observar a eficiência do reator solar híbrido através da maturação da microestrutura da pasta de cimento Portland.

4.1.1. Número e distribuição de corpos de prova dentro do reator

O método Tipo A da ASTM C 684:1999 estabelece uma distribuição dos corpos de prova no interior do tanque de cura da seguinte forma: uma distância de 50 mm entre as paredes laterais do tanque e os corpos de prova, uma distância de 50 mm entre a base do tanque e os corpos de prova e uma distância de 100 mm entre corpos de prova.

No reator híbrido solar, a distribuição precisou ser um pouco diferente. Foi estabelecida uma distância de 50 mm em qualquer direção, seja entre as paredes do tanque, seja entre os corpos de prova, uma vez que a água de trabalho se mantém em movimento contínuo, impossibilitando que uma eventual temperatura dissipada por algum corpo de prova possa causar alteração significativa na temperatura de outro corpo de prova que se encontre em sua vizinhança. Com base na norma americana supracitada o reator solar híbrido resultou com uma capacidade de cura de 18 corpos de prova por lote, distribuídos em pares, sendo três linhas por três colunas. Essa distribuição leva em consideração a forma de trabalho aplicada nos canteiros de obras, ou seja, geralmente são confeccionados dois corpos de prova por coleta (1 exemplar). A distribuição dos corpos de prova pode ser visualizada na Figura 24, Figura 25 e Figura 26.



Figura 24: Gaiola geral de alumínio projetada para manter a separação dos pares de corpos de prova de concreto no reator solar híbrido, todos cilíndricos e com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.



Figura 25: Gaiola individual para acomodação de dois corpos de prova de concreto e que garante uma distância de 50 mm em todas as suas direções.



Figura 26: Vista superior do compartimento de corpos de prova de concreto, no reator solar híbrido.

4.1.2. Temperatura do banho térmico na cura amena

O temperatura do banho térmico no reator foi uma constante e mantida em 35°C com uma variação de, no máximo, 1,0°C para mais ou para menos. O objetivo do controle em faixa tão restrita foi proporcionar a menor oscilação possível e garantir que cada corpo de prova em cura recebesse energia térmica no nível pré-estabelecido de 35°C, durante o maior tempo possível, e para que ocorresse a aceleração nas reações químicas da pasta de cimento de modo uniforme.

4.1.3. Reposição da temperatura em volta de cada corpo de prova

Além do controle do tempo de permanência dos corpos de prova imersos no banho térmico e da temperatura no interior do reator, outro fator que poderia causar perturbação, na perfeita cura dos corpos de prova, foi a distribuição da temperatura ao redor de cada corpo de prova.

Visou-se então a um regime constante, de fluxo de água morna, e igual com o mínimo de variação, com a reposição da temperatura em volta de cada corpo de prova no menor intervalo de tempo, mas sem formação de fluxo significativo que pudesse causar lixiviação da superfície do corpo de prova. A movimentação é necessária para evitar a estratificação da temperatura da água no interior do tanque, evitando cura

diferente por diferença de temperatura no interior do reator. Para garantir a distribuição da temperatura ao redor dos corpos de prova, como também em todo o interior do reator, foram instalados quatro aeradores que proporcionaram turbulência suficiente para impedir essa estratificação.

4.1.4. Velocidade de aquecimento

O método A da ASTM C 684:1999 ressalta que a temperatura no interior do reator pode variar $\pm 3^{\circ}\text{C}$, tanto no controle regular de processo, como também ao carregar o reator com os corpos de prova.

Ao se introduzir os corpos de prova no interior do reator há uma variação na temperatura da água de cura, que necessita ser reposta em um prazo máximo de 15 minutos, para evitar atraso nas reações químicas da pasta de cimento, o que poderia causar perda de resistência final do corpo de prova.

O reator solar híbrido, neste projeto, está programado para controlar e manter a temperatura em 35°C e utiliza duas formas de manutenção desta temperatura:

- a) A primeira por substituição de parte da água do reator solar híbrido que se encontra com sua temperatura abaixo dos 35°C necessários, por outra água pré-aquecida e que está armazenada em um tanque reserva isolado termicamente. A água do tanque reserva foi aquecida utilizando energia solar que foi absorvida por placas solares. A técnica usada neste controle será explicada mais adiante.
- b) A segunda forma de reposição da temperatura da água no interior do reator utiliza a energia elétrica por intermédio de um aquecedor resistivo, que transforma a energia potencial em energia térmica.

Ambas as formas de reposição foram projetadas para serem gerenciadas por um CLP da marca Siemens, de forma proporcional e integral, permitindo um controle mais rigoroso e com uma precisão que chega a atingir $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ de variação na temperatura.

4.1.5. Distribuição da temperatura no interior do reator

Outro problema tão importante quanto a temperatura, mas de maior complexidade na sua resolução, foi a distribuição da temperatura de forma homogênea em todos os corpos de prova, sem causar danos aos mesmos.

Como solução para este impasse e após pesquisa em bibliografia especializada, foram encontradas duas técnicas, a primeira é utilizada para extração de minerais, petróleo, líquidos corrosivos, entre outros, a segunda técnica é usada para aeração de extração de tratamento de esgotos e tratamento de água potável.

Para a movimentação da água junto com o aquecimento, foi empregada a primeira técnica, que é conhecida por “air lift pumping” [14] e para a homogeneização da temperatura foi aplicada a segunda técnica, que utiliza ar comprimido, através de dispersores de bolhas que causam uma pequena turbulência na água utilizada na cura dos corpos de prova. As duas técnicas promovem a movimentação de forma laminar, sem causar arraste significativo na superfície dos corpos de prova, e com um mínimo de consumo de energia. O controle da temperatura é uma variável de suma importância no funcionamento do reator, como já mencionado em itens anteriores.

Embora o método A da ASTM C 684:1999 permita que a variação da temperatura oscile entre $\pm 3^{\circ}\text{C}$, quanto menor for essa oscilação melhor será o rendimento e menor será a variação nas propriedades microestruturais do material que está sendo curado, e a possibilidade de repetição do experimento com variação mínima entre os corpos de prova também será possível. Todavia, a distribuição da temperatura no interior do tanque tem três formas de ocorrência. Primeiro, há a região central com maior concentração de temperatura. Segundo, há as regiões que compreendem as laterais do tanque e o encontro das laterais, que formam uma região crítica, já que, neste ponto, a movimentação do líquido é mínima. Em terceiro, há a distribuição da água em forma de camadas, devida à diferença de densidade e ao que se chama de estratificação do líquido.

Outro ponto crítico e importante, que não se encaixa neste item, mas que precisa ser lembrado é a velocidade de movimentação do líquido no interior do reator, que não pode ser lenta ao ponto de ocorrer a estratificação da temperatura, nem pode ser rápida, o que causaria lixiviação da superfície dos corpos de prova, podendo danificá-los.

A solução encontrada para contornar a formação da estratificação da temperatura e da formação de zonas, foi o uso de colunas de bolhas por intermédio de bombas de ar comprimido. Para formação das bolhas, foi utilizado um dispersante através do uso de pedras porosas. Essa pedra libera o ar do compressor em forma de pequenas bolhas. Essas bolhas quando se movimentam provocam um arraste do líquido que está acima e em sua vizinhança, gerando assim uma movimentação aleatória do líquido sem causar um atrito significativo no corpo de prova.

O tipo ou a forma de alimentação dos tanques de armazenamento de água quente, pode provocar uma turbulência, por menor que seja, e causa a desestratificação do sistema (Figura 27) [15].

Pesquisadores estudaram causas que dificultam a estratificação da água no interior dos tanques e comprovaram, mais uma vez, que a turbulência é a principal causa. O uso desta técnica, aliada ao “air lift pumping”, atingiu uma eficiência notável e uma distribuição da temperatura no interior do tanque de forma mais uniforme possível. [17]

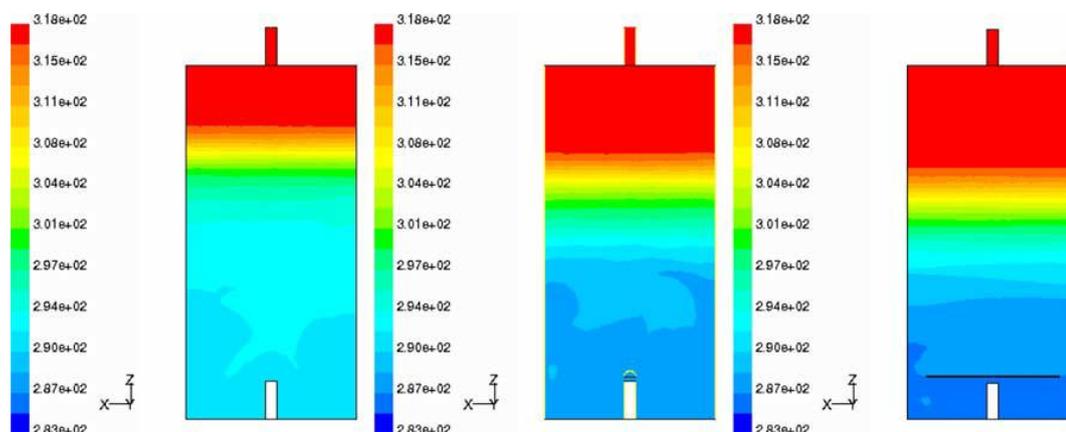


Figura 27: Distribuição da temperatura no tanque com alimentação central, passados 5 min com fluxo de entrada de 10 l/min e mais 30 s' de período de paralisação. Esquerda: Tubo de entrada. Centro: Tubo de entrada com defletor. Direita: Placa defletora de entrada.[15]

Para que fosse possível mapear as diferenças na distribuição da temperatura no interior do reator, foi necessário modificar a posição do sensor de temperatura no seu interior, no decorrer dos experimentos. O sensor foi colocado próximo à margem do líquido, no centro entre os corpos de prova, no fundo logo abaixo do corpo de prova e no encontro das laterais do reator, que era um ponto crítico de movimentação da água, e a temperatura nestes pontos era diferente quando comparada com a temperatura do

centro do reator. Desta forma foi possível perceber o funcionamento e a eficiência dos dispersores de bolhas que eliminaram a estratificação e a formação de zonas no interior do reator solar híbrido.

4.2. Funcionamento do reator híbrido solar para a cura acelerada em água morna

O funcionamento do reator solar híbrido baseia-se no projeto e montagem que foram descritos nos itens anteriores, com o intuito de mitigar os problemas que impedem ou dificultam a realização da cura acelerada em água morna, tais como, controle da temperatura, controle do fluxo, distribuição da temperatura, entre outros. As pesquisas de Cavalcanti Filho (2010) e Cafange (2011) aplicaram a técnica de aquecimento da água de cura, porém sem qualquer controle automático ou de investigação de estratificação, motivando vários questionamentos parcialmente analisados neste projeto.

O sistema projetado nesta pesquisa utiliza a técnica de instrumentação chamada malha fechada, ou seja, todas as variáveis do sistema são monitoradas durante o processo, analisadas antes da ocorrência do problema e corrigidas durante o processo, evitando que variações bruscas ocorram e provoquem grandes oscilações no processo. O tanque do reator é preenchido com água saturada de cal hidratada, até o limite superior que fica 50 mm acima do corpo de prova superior. O controle da temperatura é realizado de duas maneiras, quais sejam:

1. A água utilizada para a realização da cura é captada por uma saída que fica na parte inferior do tanque, que é a zona de menor temperatura dentro do reator e direcionada para o reservatório de aquecimento. Neste reservatório são encontrados dois componentes, uma barra resistiva de 1200W que serve para aquecer a água e uma termoresistência (PT100) que é usado para medir a temperatura da água no local (Figura 15). Em seguida a água saturada e aquecida é devolvida ao tanque por bombeamento, utilizando um método chamado “air lift pumping” para um ponto que se encontra na parte superior do tanque. Esse bombeamento é realizado por um compressor de ar duplo, que injeta ar em um ponto inferior, logo após a saída da caixa de aquecimento, com o uso de um difusor aerador. As bolhas ao serem lançadas dentro do tubo formam um grande novelo que impulsiona a água para cima

fazendo-a retornar para o tanque. Esta técnica é utilizada por indústrias de beneficiamento do petróleo e indústrias de mineração para remoção de matéria prima em locais de difícil acesso de bombas submersas.(Figura 28)

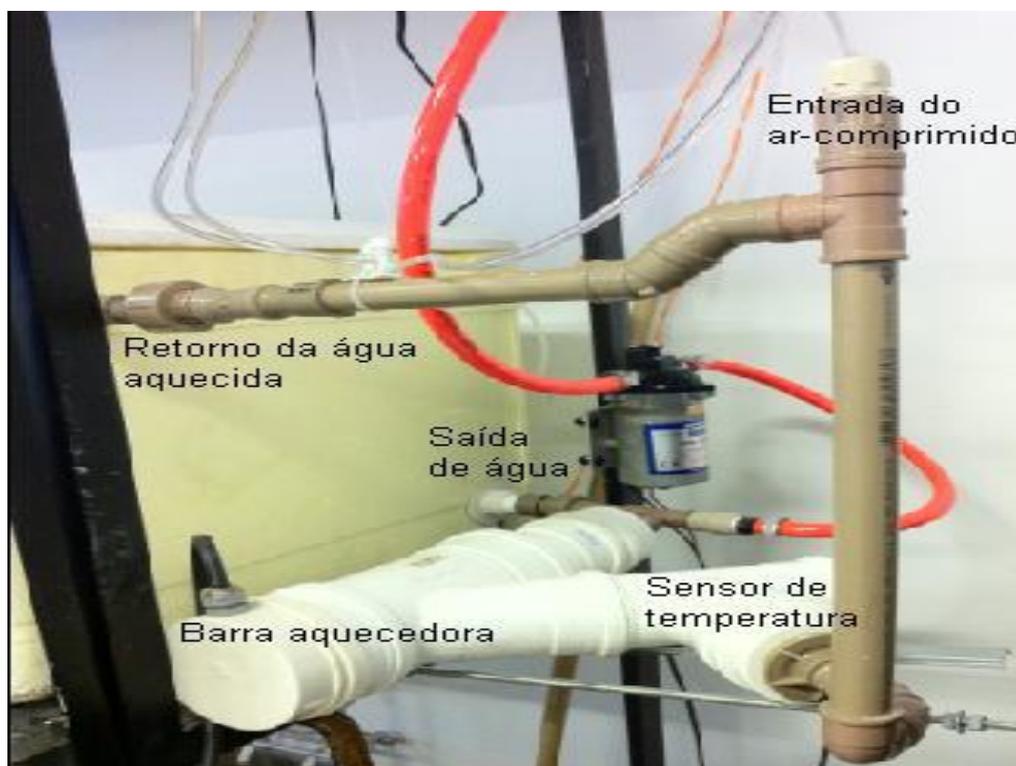


Figura 28: Reservatório de aquecimento que inclui barra aquecedora, sensor de temperatura e bombeamento por ar-comprimido.

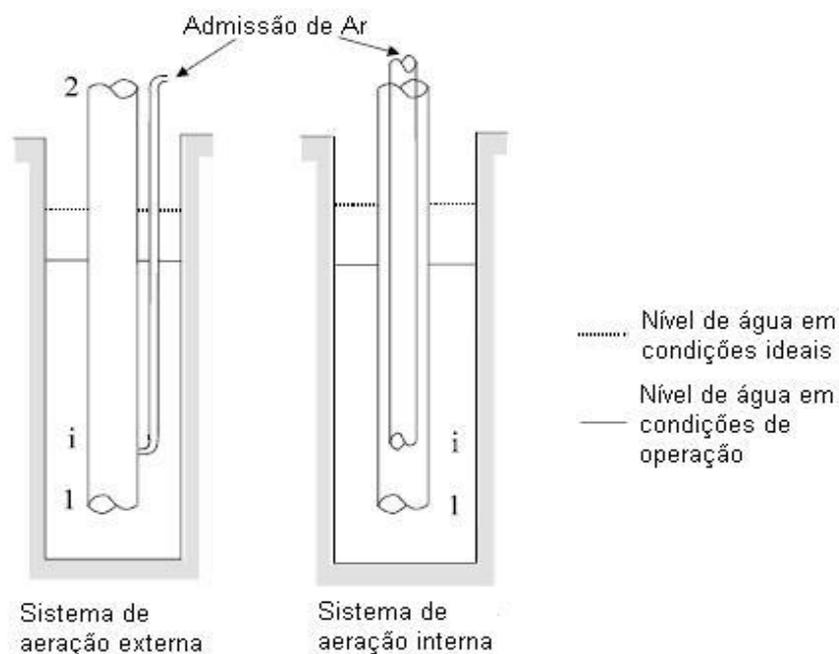


Figura 29: Bombeamento utilizando borbulhamento conhecido como “Air Lift Pumping”. [14]

A movimentação descrita acima promove a recuperação e controle da temperatura sem causar um fluxo excessivo. O aquecimento da água do reator não é realizado diretamente no interior do reator pela seguinte razão: a diferença de temperatura nas regiões próximas ao aquecedor seria bastante elevada, prejudicando a homogeneidade do banho [18], e a dificuldade em promover o resfriamento do tanque seria maior. Com a caixa de aquecimento externa e bombeamento contínuo, em momentos o banho estará sendo aquecido e bombeado de volta para o tanque e neste mesmo instante o banho estará sendo resfriado e retornando ao tanque, com essa forma de movimentação o controle da temperatura se apresenta mais eficiente e estável.

2. No segundo método a água saturada não é direcionada para o reservatório de aquecimento, a água saturada é captada no mesmo ponto que o primeiro método e então bombeada para outro tanque (Figura 30). O segundo tanque referido no parágrafo anterior funciona como reservatório de água saturada quente. Essa água saturada é aquecida através das placas solares que captam a energia do sol. A água bombeada do reator solar híbrido para o segundo

tanque de água aquecida provoca o transbordo dessa água aquecida que retorna para o reator solar híbrido. Assim, o volume retirado do reator solar híbrido que se encontrava com temperatura abaixo dos 35°C pré-definido provoca um transbordo de mesmo volume no segundo tanque que contém água aquecida com temperatura acima dos 35°C, essa água aquecida é que servirá de energia para a manutenção da temperatura no interior do reator solar híbrido. O bombeamento da água do reator solar híbrido para o segundo tanque com água aquecida acontece de forma pulsante e controlada.

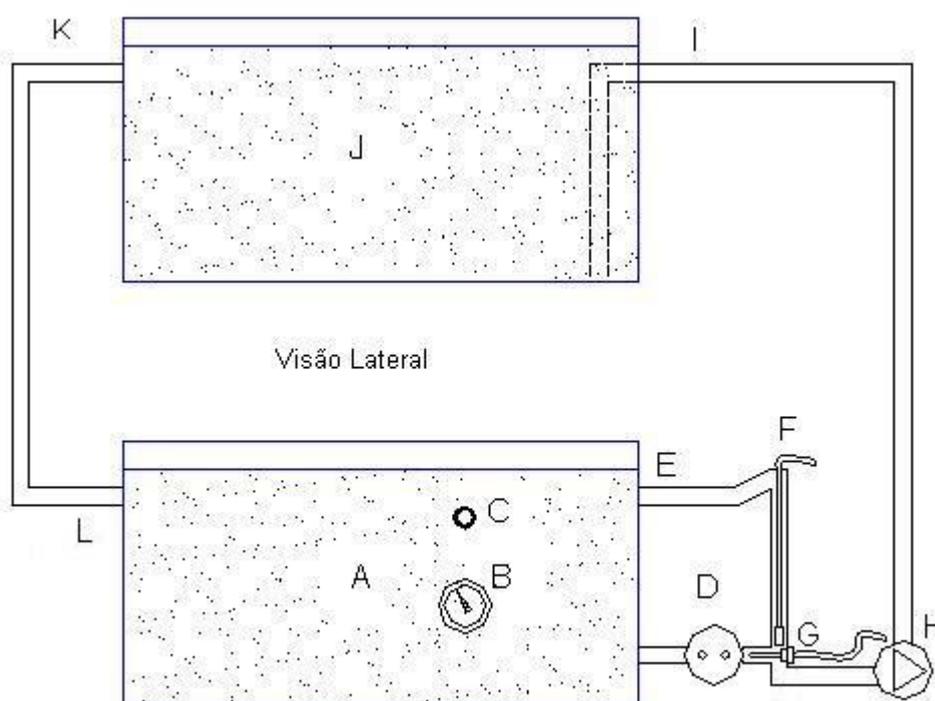


Figura 30: Visão lateral do reator híbrido solar e do segundo tanque que armazena água quente para ser usada na reposição da temperatura do reator híbrido solar.

As legendas da Figura 30 tem os seguintes significados:

- A. Tanque do reator híbrido solar;
- B. Termômetro;
- C. Ponte de encaixe de sensor de temperatura;
- D. Caixa de aquecimento;
- E. Retorno da água aquecida;
- F. Entrada de ar comprimido;
- G. Termoresistência PT100;

- H. Bomba de fluxo;
- I. Água com temperatura abaixo de 35°C vinda do reator híbrido solar;
- J. Segundo tanque de armazenamento de água aquecida por energia solar;
- K. Ponto de transbordo de água com temperatura acima de 35°C que servirá para repor a temperatura da água do reator híbrido solar;
- L. Entrada de água aquecida vinda do segundo tanque.

Ambas as formas de aquecimento são controladas pelo CLP, obedecendo a um programa de forma proporcional e integral. O CLP observa as temperaturas no reator, na caixa de aquecimento e no tanque solar utilizando os sensores PT100 e termopar. Com estas informações, o sistema toma decisões mediante uma lógica de programação pré-determinada, ou seja, se o segundo tanque, que é aquecido por placas solares, tiver água aquecida com energia suficiente para promover a manutenção da temperatura do reator solar híbrido, o CLP utiliza a bomba de fluxo para realizar a troca da água com temperatura abaixo da desejada por um mesmo volume de água com energia capaz de elevar a temperatura do reator solar híbrido. Essa movimentação é empregada de forma pulsante em intervalos pré-estabelecidos e sempre que for necessária a reposição da temperatura no interior do reator, caso contrário não haverá troca de volume de água entre o reator solar híbrido e o segundo tanque. Em contrapartida se a temperatura da água do segundo tanque não possuir energia suficiente para a correção da temperatura da água do reator solar híbrido, o CLP mudará automaticamente a sua forma de correção, passando a utilizar o aquecedor elétrico como energia de manutenção da temperatura.

O fluxo interno da água do reator solar híbrido foi projetado para funcionar de forma contínua sem a intervenção do CLP, desta forma foi possível transformar uma variável de processo em constante de processo, sendo assim, essa constante funciona, hora como refrigerador e hora como aquecedor e refrigerador, mantendo o sistema equilibrado.

No interior do reator foram instalados quatro difusores aeradores, um em cada extremidade do reator solar híbrido, que dispersam a água do fundo do reator para a parte superior, de forma turbulenta, eliminando a estratificação do banho e promovendo a homogeneidade dele, assim o corpo de prova receberá água aquecida na temperatura desejada de forma radial e homogênea.

4.3. Estudo de cura em corpos de prova de pastas de cimento

4.3.1. Resistência à compressão

Os resultados obtidos para as 200 moldagens de corpos-de-prova realizadas em pastas de cimento Portland constam nos anexos Anexo 5 e Anexo 6.

Na Figura 31, observa-se, em destaque, as amostras separadas por intervalo de cura. Os valores que aparecem na ordenada (Y) se referem ao desvio relativo máximo das amostras com relação a/c 0,35 (água/cimento), já que a relação a/c 0,25 não apresentou bons resultados, devido a técnica de mistura que foi empregada. Estes valores indicam a distância do resultado obtido com relação ao resultado esperado aos 28 dias de cura normal. Quanto menor for esse valor mais próximo os resultados obtidos estarão do valor esperado.

A 9ª massada se destaca das demais pelo fato de só apresentar uma amostra acima dos 10%, na coluna do desvio relativo máximo, isso indica uma moldagem com menor quantidade de defeitos e menor presença de ar devido a falhas na compactação, melhorando a distribuição da força no teste de compressão axial.

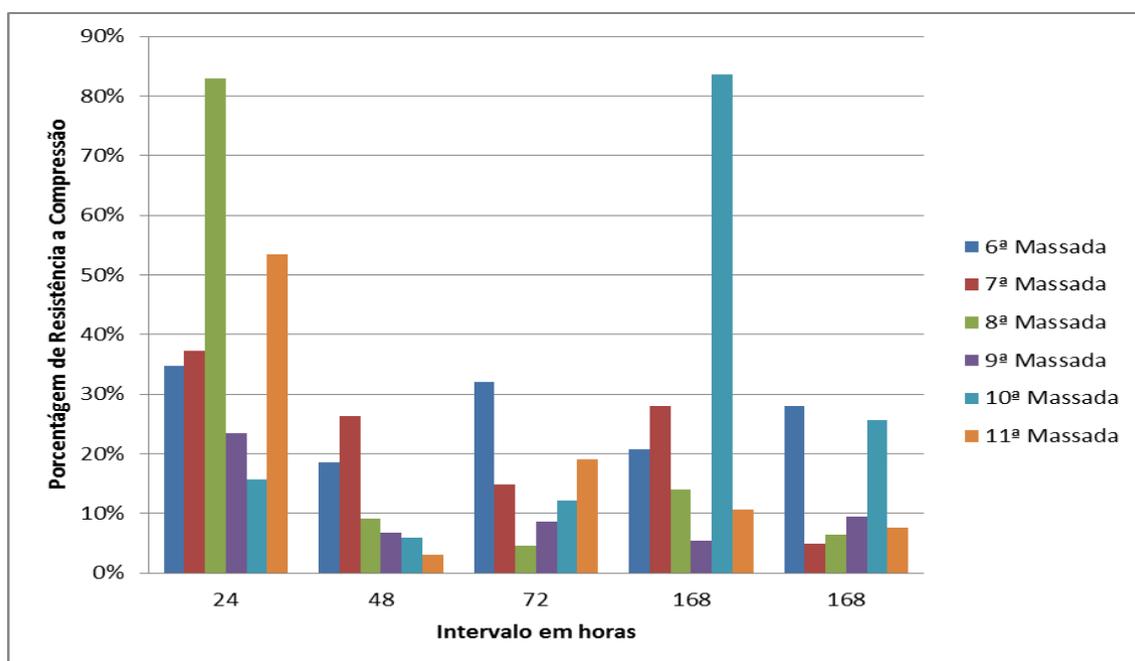


Figura 31: Desvio Relativo Máximo para a relação a/c 0,35 (DRM). A última idade de 168 horas neste gráfico se refere à ensaio de pastas com cura normal, e as demais são relativas à cura no reator solar híbrido.

Pode-se observar que a cura acelerada em temperatura amena, em prazo até 7 dias, não foi suficiente para se equiparar à cura normal a 28 dias e que os resultados em

alguns casos foram próximos aos da cura normal por 7 dias, como pode ser visto na Figura 32, porém sempre com os valores um pouco acima, o que indica uma aceleração da cura. Como o número de amostras foi baixo, por conta do tempo e de vários outros fatores, já mencionados no início deste capítulo, seria ideal repetir todas as análises, com amostras de cimento e aditivo isentas de suspeita por prazo de estocagem, com melhor uniformidade de mistura e condições mais adequadas de moldagem e de retificação do topo dos corpos de prova, minimizando-se a influência de defeitos por ar aprisionado ou por falta de estanqueidade das fôrmas, o que não foi possível neste trabalho.

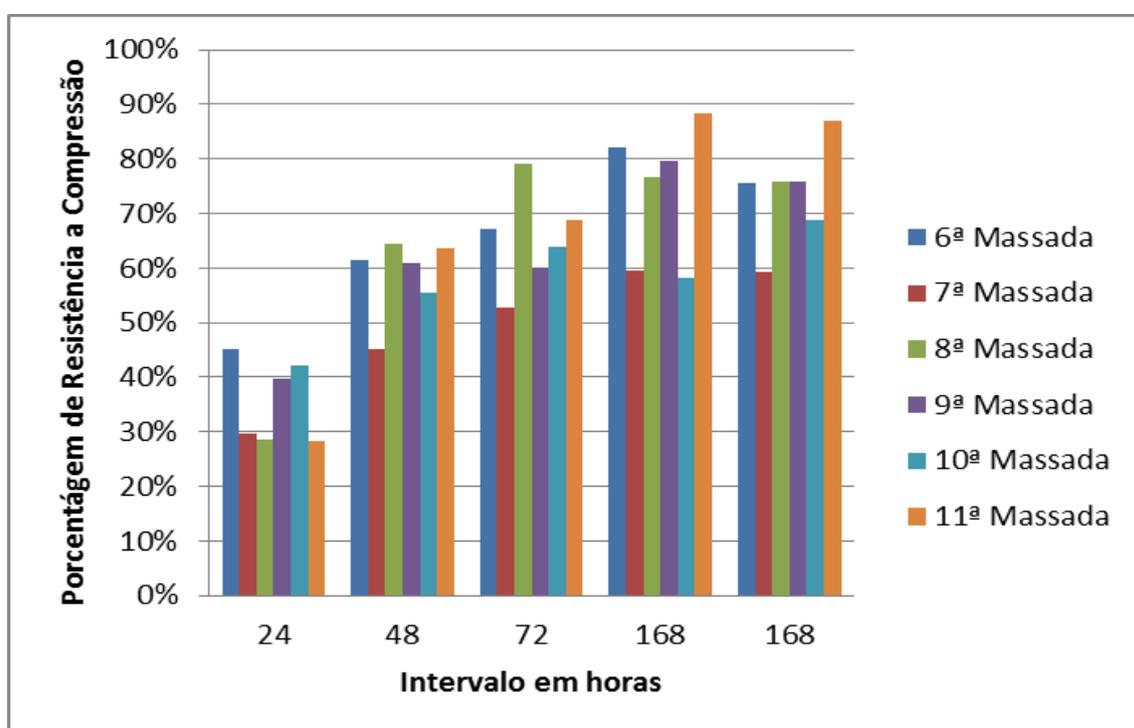


Figura 32: Porcentagem de resistência à compressão simples relativa à cura normal a 28 dias.

Como a pesquisa tem como principal objetivo a aceleração da cura com o uso da temperatura no intervalo de 7 dias, a Figura 33 destaca as duas curas com intervalo de 7 dias, trabalhadas no laboratório. Mais uma vez é possível perceber que as resistências alcançadas com a cura realizada no reator solar híbrido se mantiveram acima das das resistências de cura realizadas em tanque padrão de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (2003). Tomando como base o teste de compressão simples e a pequena diferença entre os resultados obtidos, foi necessária a realização de outros tipos de testes para melhorar a avaliação da eficiência do reator solar híbrido.

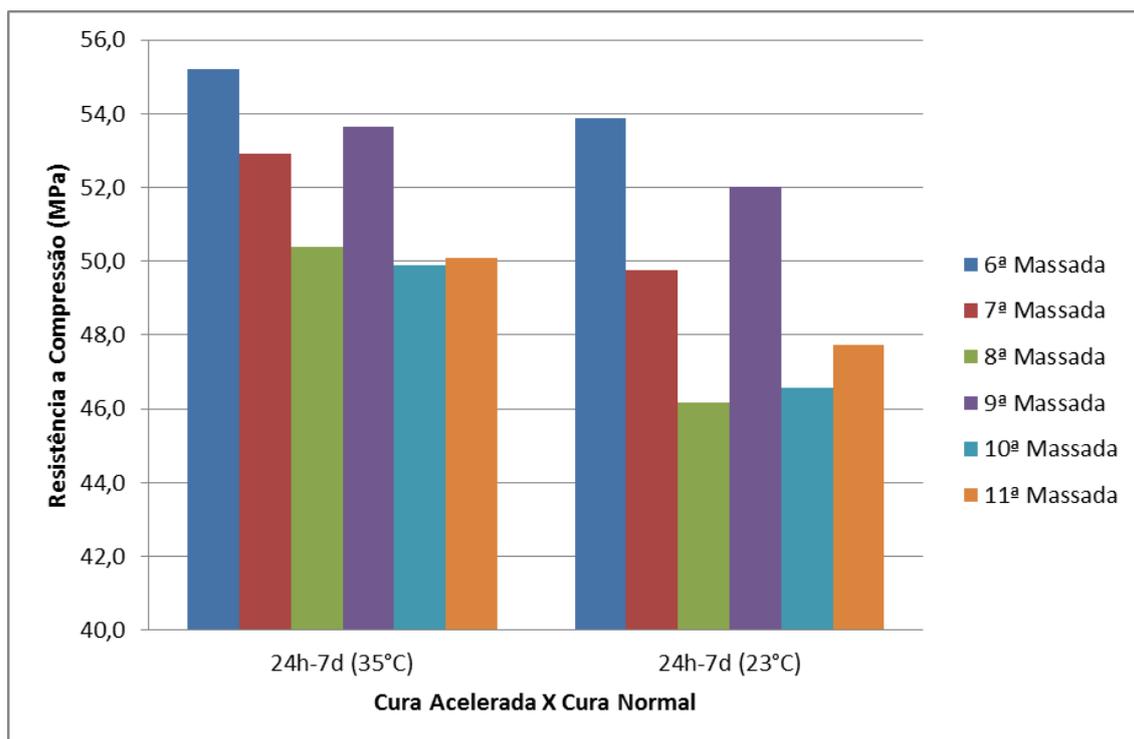


Figura 33: Resistência média à compressão simples das pastas para um intervalo de 7 dias.

A finura do cimento em questão pode ter influência na dispersão de alguns dos resultados, mas novos ensaios precisariam ser feitos, para confirmar a tendência de não haver diferença entre a cura acelerada entre 1 e 7 dias e a cura normal até 7 dias, até porque a diferença dos resultados variou entre as diferentes amassadas de pasta.

4.3.2. Análise térmica

Para um melhor entendimento da cura da pasta de cimento, com a possibilidade de detecção das fases presentes no decorrer da maturação, é bastante utilizada a análise de termogravimetria com a sua derivada no tempo. Com estes dados, pode-se perceber o surgimento das reações químicas do cimento em contato com a água.

Na análise de TG da Figura 34, para a pasta curada no reator solar híbrido, observou-se uma perda de 1,63% em massa, no intervalo de temperatura entre 50-120°C devido à evaporação da água absorvida na superfície e nos poros da pasta, bem como, a desidratação do C-S-H. Neste mesmo intervalo a pasta de cimento curada durante 28 dias em reator padrão, de acordo com a norma em vigor, a uma temperatura de 23°C ± 3°C a perda foi de 1,12%. A segunda perda de 0,49%, para a pasta curada no reator solar híbrido, no intervalo entre 400 e 500 °C refere-se à desidroxilação da portlandita, todavia, para a pasta curada em reator normatizado durante 28 dias a perda foi de

0,54%. Na terceira perda, o volume atingiu 0,61%, para pasta curada no reator solar híbrido, no intervalo entre 700 e 800°C, essa perda se refere à descarbonatação do CaCO_3 , já a pasta curada no reator normatizado a perda foi de 0,69% [34].

É possível observar na Figura 34, destacada com o número 1 e com o número 3, duas análises que se comportam de forma diferente uma da outra, porém proveem da mesma pasta de cimento. A diferença se dá devido a uma secagem realizada, na amostra de número 1, em estufa a uma temperatura de 120°C, em seguida, a amostra foi cominuída, em almofariz, até atingir um tamanho de grão, na ordem de 75 μm e posteriormente colocada na máquina de TG para a realização da análise. Devido à secagem inicial em estufa não foi possível observar uma perda inicial em torno de 1,63%, já que a temperatura de secagem da estufa era idêntica à temperatura utilizada inicialmente pela máquina de TG.

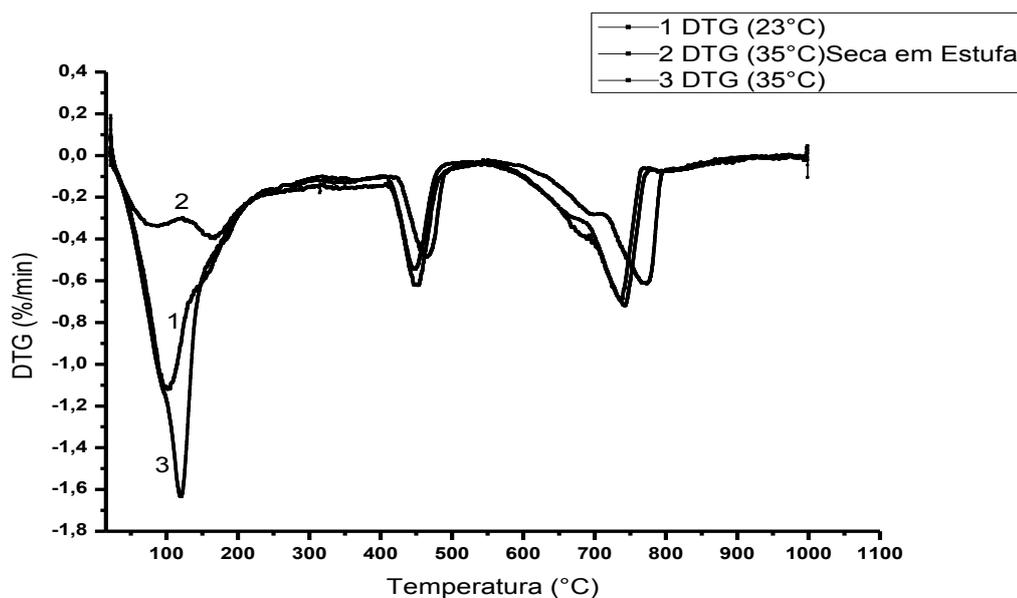


Figura 34: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,25 curadas em tanque a temperatura normatizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C com secagem em estufa e sem secagem em estufa.

Diferente do teste de compressão, a análise de TG mostra claramente uma tendência forte de diferenciação no teor de água combinada no gel resistente de C-S-H silicato de cálcio hidratado, quando comparado com a pasta curada de forma normatizada. A perda inicial de 1,63% para a pasta curada em reator solar híbrido está

muito acima da perda inicial de 1,11% atingida com a pasta de cimento curada em tanque normatizado com duração de cura de 28 dias.

Na Figura 35 a diferença é um pouco menor porém significativa. A perda da pasta curada no reator solar híbrido se mantém, já o resultado da análise realizada na pasta curada no tanque padrão atingiu 1,45%, bem maior quando comparada com o resultado obtido na Figura 34 que foi de 1,11%.

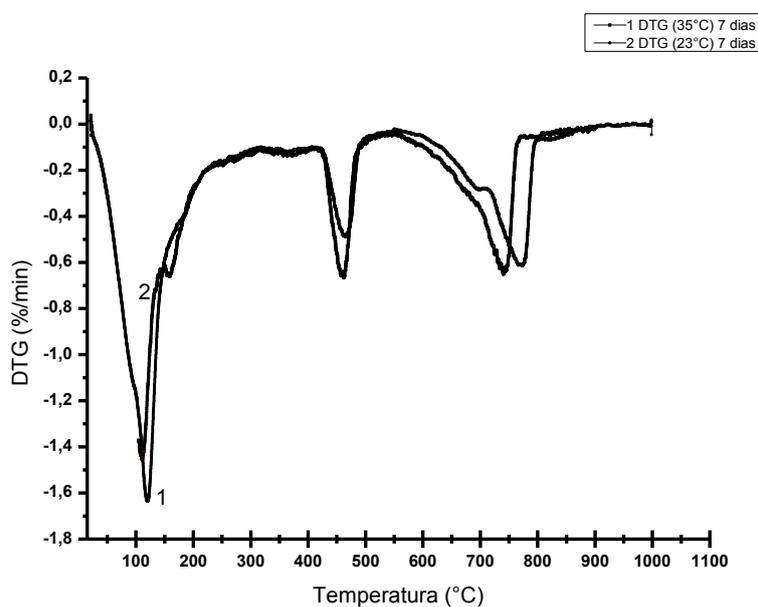


Figura 35: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,35 curadas em tanque a temperatura normatizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C.

É possível observar na Figura 36 a diferença bastante elevada na perda inicial referente à desidratação do C-S-H entre a amostra curada no reator e a amostra curada em tanque padrão no intervalo de 28 dias. Essa perda inicial indica uma maior reação da água de amassamento, devido à temperatura. É possível que a temperatura tenha ativado a formação de C-S-H. É importante uma grande formação de C-S-H, já que o mesmo é o produto mais resistente da pasta hidratada. O gel de C-S-H, também chamado gel de tobermorita, também é o principal responsável pelas propriedades hidráulicas dos cimentos. [11, 21]

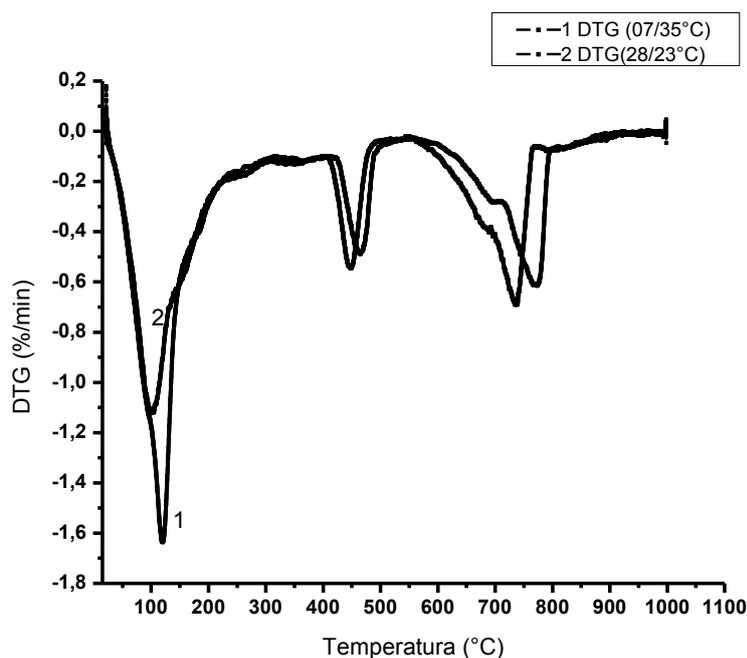


Figura 36: Curvas de DTG das pastas de cimento com fator a/c de 0,35 curadas em tanque a temperatura normatizada de 23°C durante 28 dias e em reator híbrido solar a 35°C durante 7 dias.

4.3.3. Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens da Figura 37 são de uma pasta de cimento curada em reator solar híbrido por 168 horas e cominuída em almofariz de ágata. Como pode-se ver nas imagens da Figura 37 (A, B ,C e D), os cristais formados se apresentam de forma aleatória e de difícil interpretação. O processo de fragmentação da pasta de cimento no almofariz tornou impossível a observação da formação de qualquer cristal, e as demais imagens foram obtidas por lascas das pastas de cimento ensaiadas à compressão e imersas em álcool para bloqueio de hidratação.

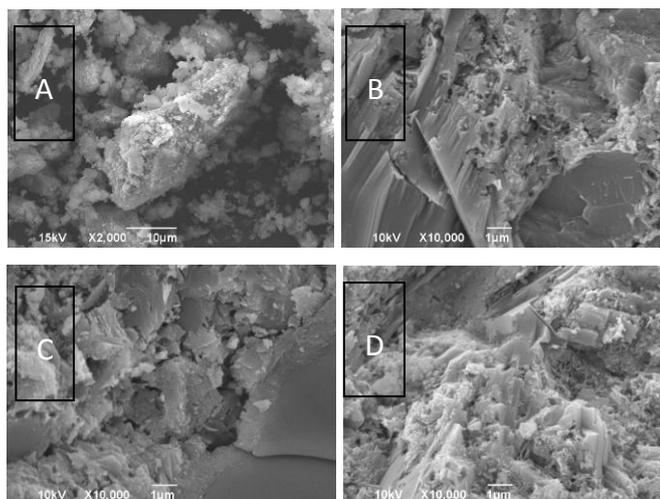


Figura 37: Imagem de MEV de pó de cimento ($75\mu\text{m}$) (cura em reator durante 168 horas) e relação a/c 0,25.

Nas imagens da Figura 38, o que pode ser visto é a formação de cristais dentro dos poros. Esses cristais tem formato hexagonal característico do hidróxido de cálcio acompanhado de uma formação de cristais em flocos, que também pode ser a formação de hidróxido de cálcio. As imagens de MEV são de difícil interpretação, e seria mais prudente a comparação com outras imagens de artigos analisados, para facilitar a compreensão, como também o uso de EDS que possibilita o mapeamento da composição do cristal, comprovando a presença da estrutura.

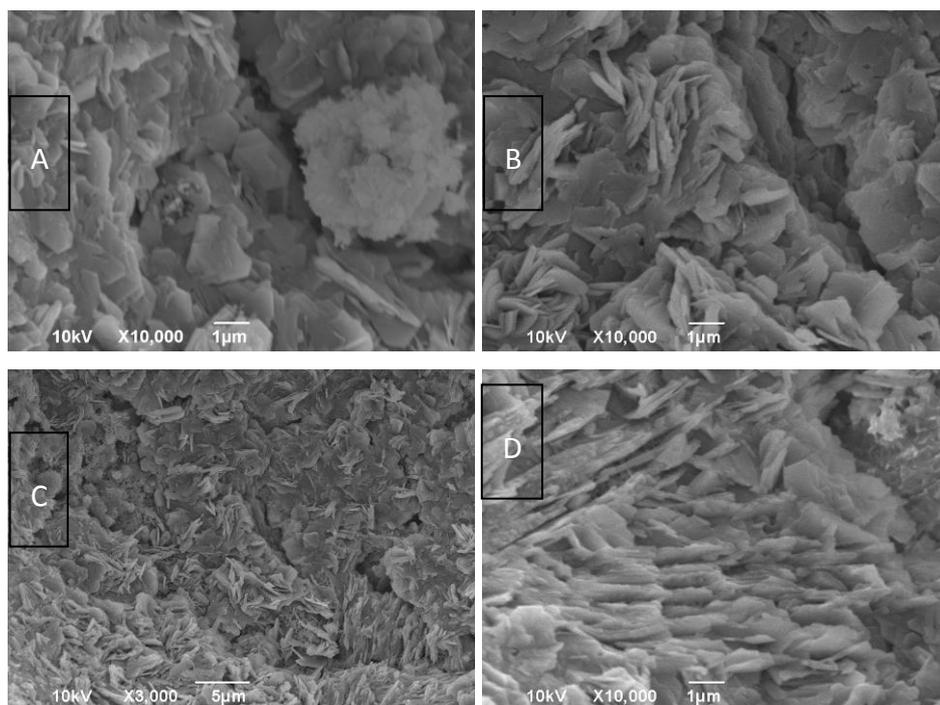


Figura 38: Imagem de MEV de lascas de cimento (cura em reator durante 168 horas) e relação a/c 0,25.

Na Figura 39 as amostras LP3 e LP66 se referem a pastas com adição de cal curadas por um período de 3 meses e 66 meses. Apesar das diferenças no potencial das ampliações, pode-se perceber semelhanças em algumas imagens, como, por exemplo, a Figura 39 (e, f) com a Figura 38 (A, B, C, D).

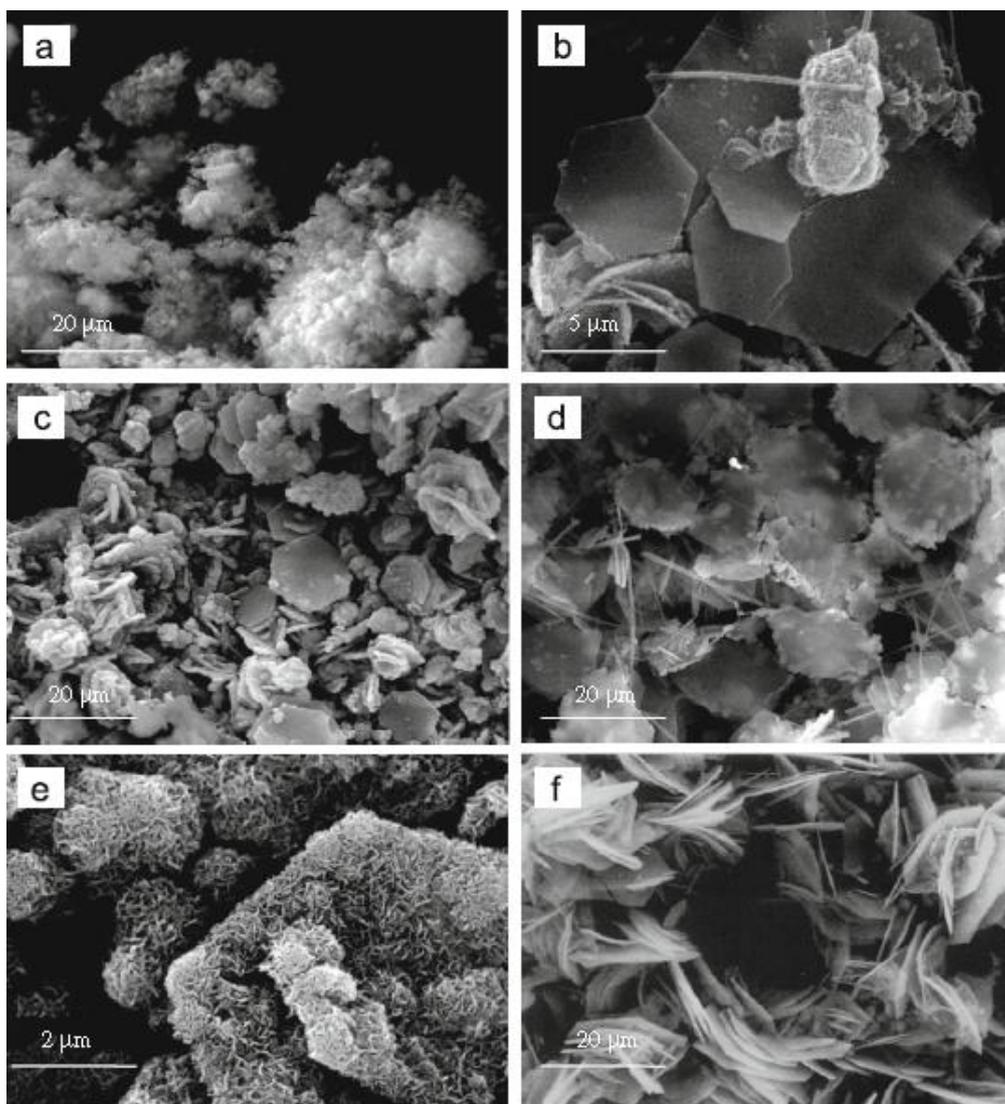


Figura 39: MEV de amostras, LP3 (a, b) e LP66 (c, d, e, f). Fonte: *Jornal of Cristal Growth* “Evolução da microestrutura de massa de cal sobre o envelhecimento”. [37]

Observando a Figura 40, podemos perceber o surgimento de cristais dispersos na pasta de cimento em formato característico de cristalização de C-S-H, quando comparado com a Figura 39(b, c). O volume não é tão significativo, comparado com as imagens das figuras Figura 41, Figura 42 e Figura 43 uma vez que a cura se por período de 24 h.

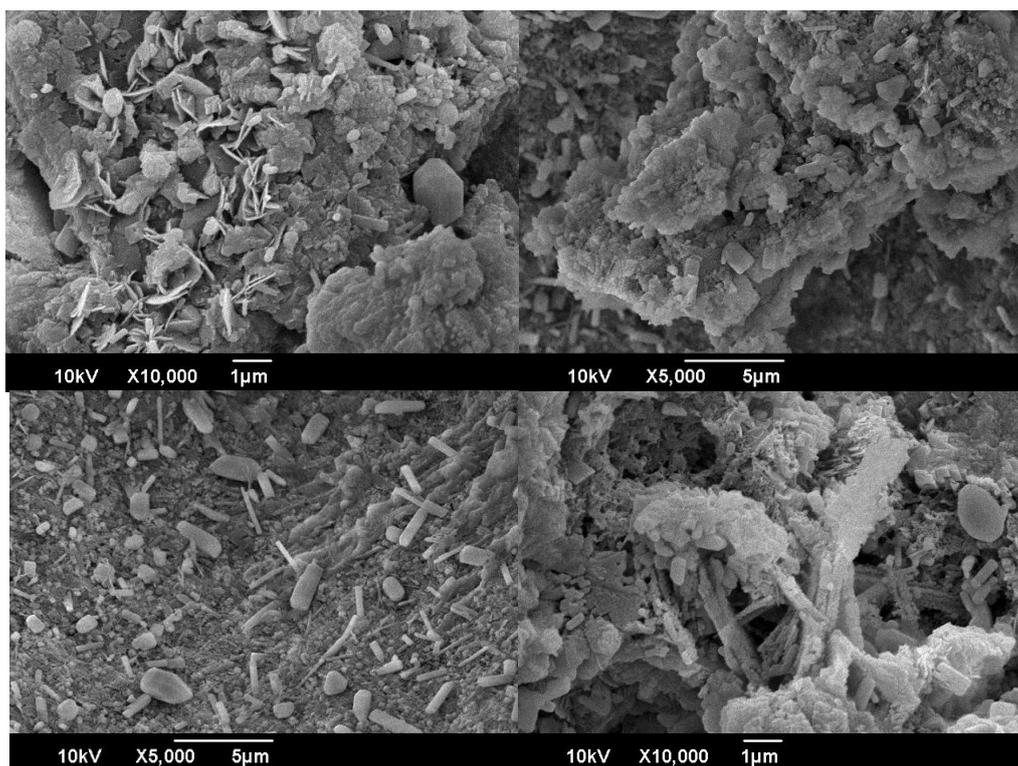


Figura 40: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no reator solar híbrido de acordo com a ASTM C 684 tipo A, com duração da cura de 24 horas e relação a/c 0,35.

As figuras Figura 41 e Figura 43 expõem um crescimento dos cristais das pastas de cimento curada no reator solar híbrido e em tanque normatizado respectivamente, indicando uma evolução do crescimento dos cristais em pasta curada no prazo de 7 dias, que foi o objetivo desta pesquisa, em temperatura de 35°C.

Se compararmos a Figura 41 com a Figura 42, vamos observar uma formação de cristal com menor intensidade, na Figura 42, o que pressupõe uma aceleração no crescimento dos cristais na pasta de cimento curada no reator solar híbrido, reforçando ainda mais o objetivo da pesquisa.

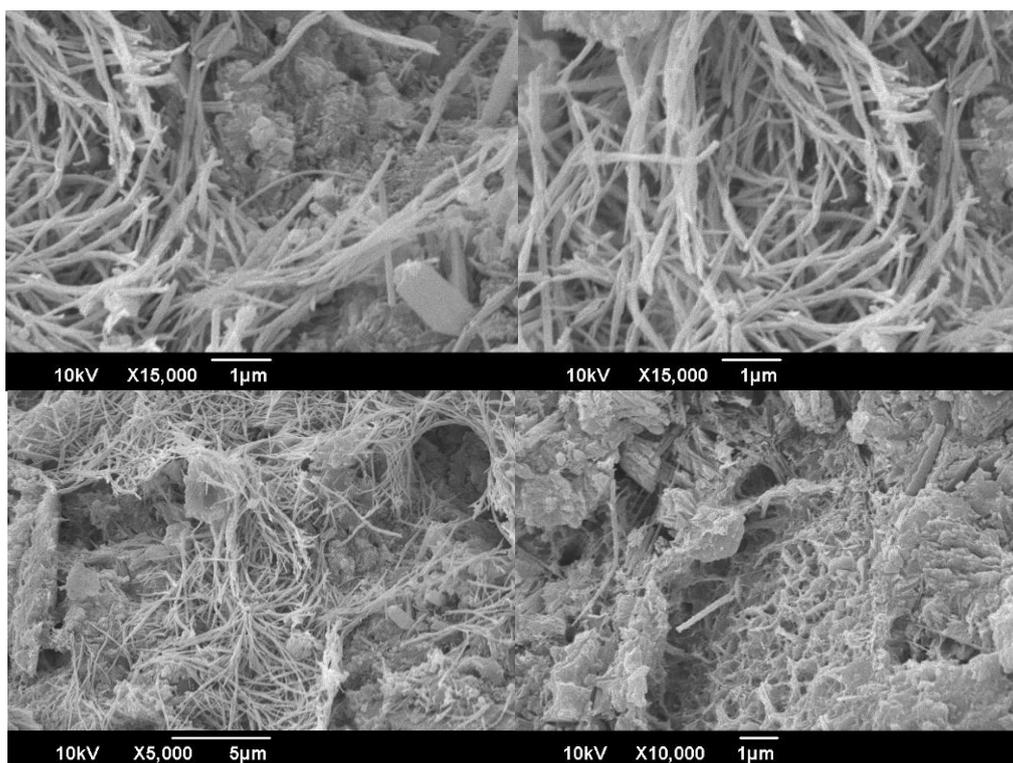


Figura 41: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no reator solar híbrido com duração da cura de 168 horas e relação a/c 0,35.

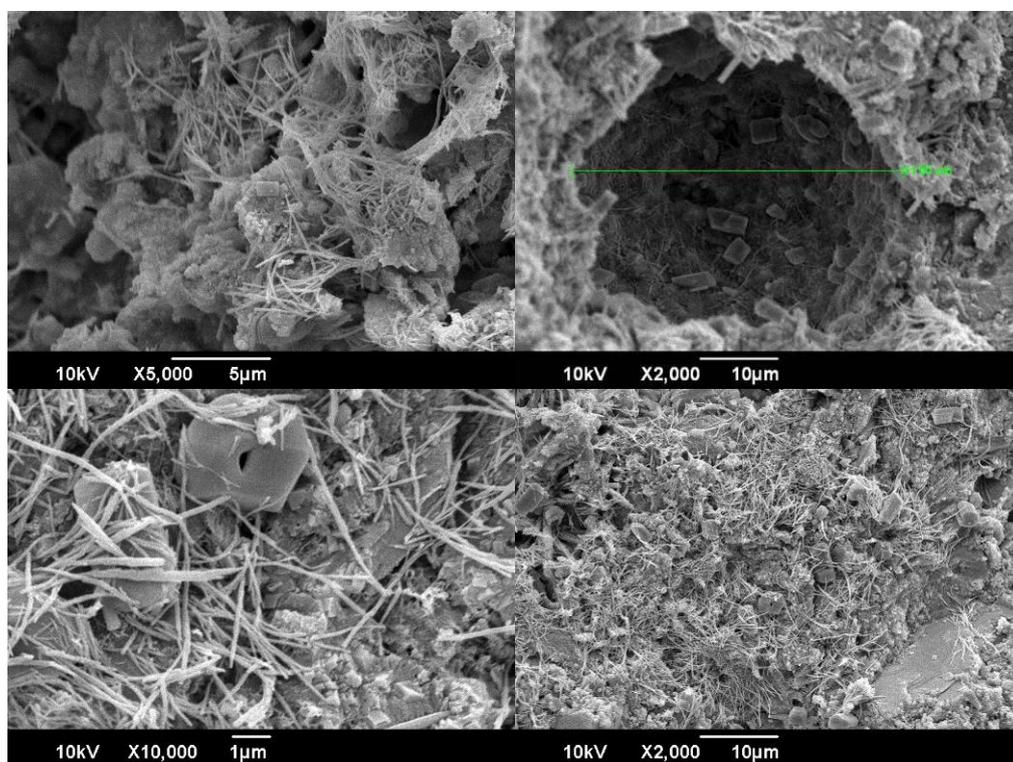


Figura 42: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no tanque normatizado há 25°C, com duração da cura de 168 horas e relação a/c 0,35.

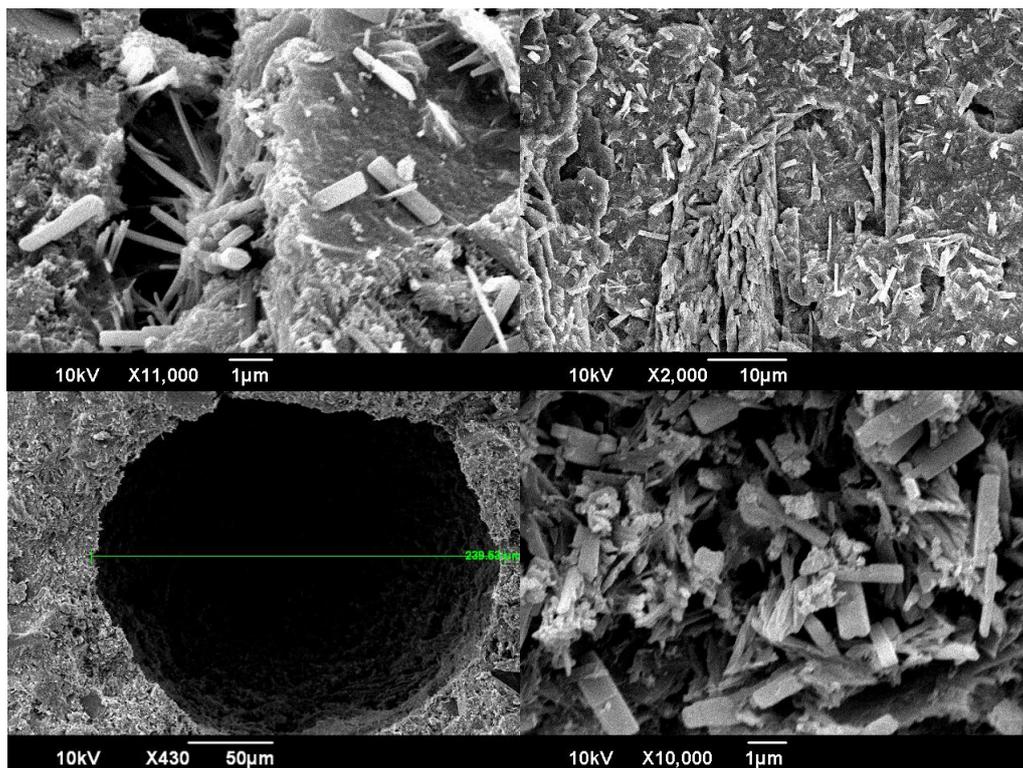


Figura 43: Imagens de MEV de lascas de pasta de cimento endurecida curada no tanque normatizado, com duração da cura de 28 dias e relação a/c 0,35.

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do título deste trabalho salientar o uso do reator para acelerar a cura do concreto em água morna, os testes foram realizados em pastas de cimento, obedecendo às normas brasileiras de construção civil. Devido a alguns problemas, como dificuldade de obter apoio das empresas do setor produtivo, por conta da demanda de serviços e de impossibilidade de confecção das amostras nos laboratórios que estiveram envolvidos neste trabalho. Como as reações químicas no concreto acontecem na pasta de cimento e não no agregado, o estudo dessas reações foi de enorme importância para entendermos melhor a relação entre a cura e a temperatura.

O reator solar híbrido funcionou de forma correta durante os meses em que os experimentos foram realizados, controlando a temperatura da água no seu interior em $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Ele foi projetado para trabalhar com energia solar e elétrica, podendo trabalhar em outros níveis de temperatura do que o especificado neste trabalho.

Os resultados obtidos com a pasta de cimento curada no reator solar híbrido, quando comparados com a mesma pasta curada em reator padrão, mostraram uma evolução na resistência inicial à compressão, indicando maturação da sua microestrutura, como pretendido inicialmente nesta pesquisa.

Próximas pesquisas poderão confirmar as diferenças de resistência na cura acelerada contínua de corpos-de-prova de concreto pelos mesmos prazos estudados para a pasta, e com especial ênfase para o prazo de 24 h a 168 h (7 dias), pois é o que tem maior potencial de normatização, para aplicação em estudos de dosagem em laboratórios, controle de obras e pesquisas.

Como proposta para a continuidade deste trabalho, sugere-se a melhoria no sistema do reator solar híbrido através da possibilidade de um “set point” variável tornando o controle da temperatura mais flexível, podendo variar a temperatura, desde valores negativos, até valores maiores do que os apresentados neste trabalho, com possibilidade de confecção de corpos de prova em diferentes locais, Estados ou Países, de forma a garantir resultados semelhantes se mantidas as mesmas condições de trabalho.

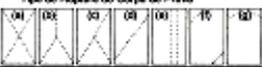
BIBLIOGRAFIA

- 1 - METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. .M., “*Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais*”, 1ª edição, novembro 1994.
- 2 - MONTEIRO, P. J. M., “*Controle da Microestrutura para o Desenvolvimento de Concretos de Alto Desempenho*”, São Paulo, EPUSP, 1993 – 22p. – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/86.
- 3 - STARK, JOCHEN, “*Recent Advances In The Field Of Cement Hydration And Microstructure Analysis*”, journal homepage: <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>
- 4 - TANGO, C. E. DE S., “*Contribuição ao Estudo da Previsão da Resistência à Compressão de Cimentos e Concretos*”, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1983.
- 5 - CAFANGE, M. P. J., “*Estudo de Métodos e Medidas Auxiliares para o Controle da Resistência a Carbonatação de Concreto Estruturais de Cimento Portland*”, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- 6 - CAVALCANTE FILHO, A. N., “*Contribuição ao Controle Tecnológico de Concretos Estruturais de Cimento Portland em Ambientes Marítimos*”, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- 7 - ZAMPIERI, V. A., “*Cimento Portland Aditivado com Pozolanas de Argilas Calcinadas: Fabricação, Hidratação e Desempenho Mecânico*”, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 1993.
- 8 - BAUER, L. A. F. “*A cura do concreto: Métodos e Materiais*”. Boletim nº 32, São Paulo, 1991, 33 p.
- 9 - DUARTE, M. A., ”*Estudo da Microestrutura do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Residual sem Beneficiamento*”, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal De Santa Maria, 2008.
- 10 - PETRUCCI, E. G. R., “*Concreto De Cimento Portland*”, 14ª edição, ver. Por Vladimir Antônio Paulon – São Paulo: Globo, 2005.
- 11 - NEVILLE, A. M., “*Propriedades Do Concreto*”, 1923, Salvador E. Giammusso. – 2ª ed. ver. atual, São Paulo; Pini, 1997.

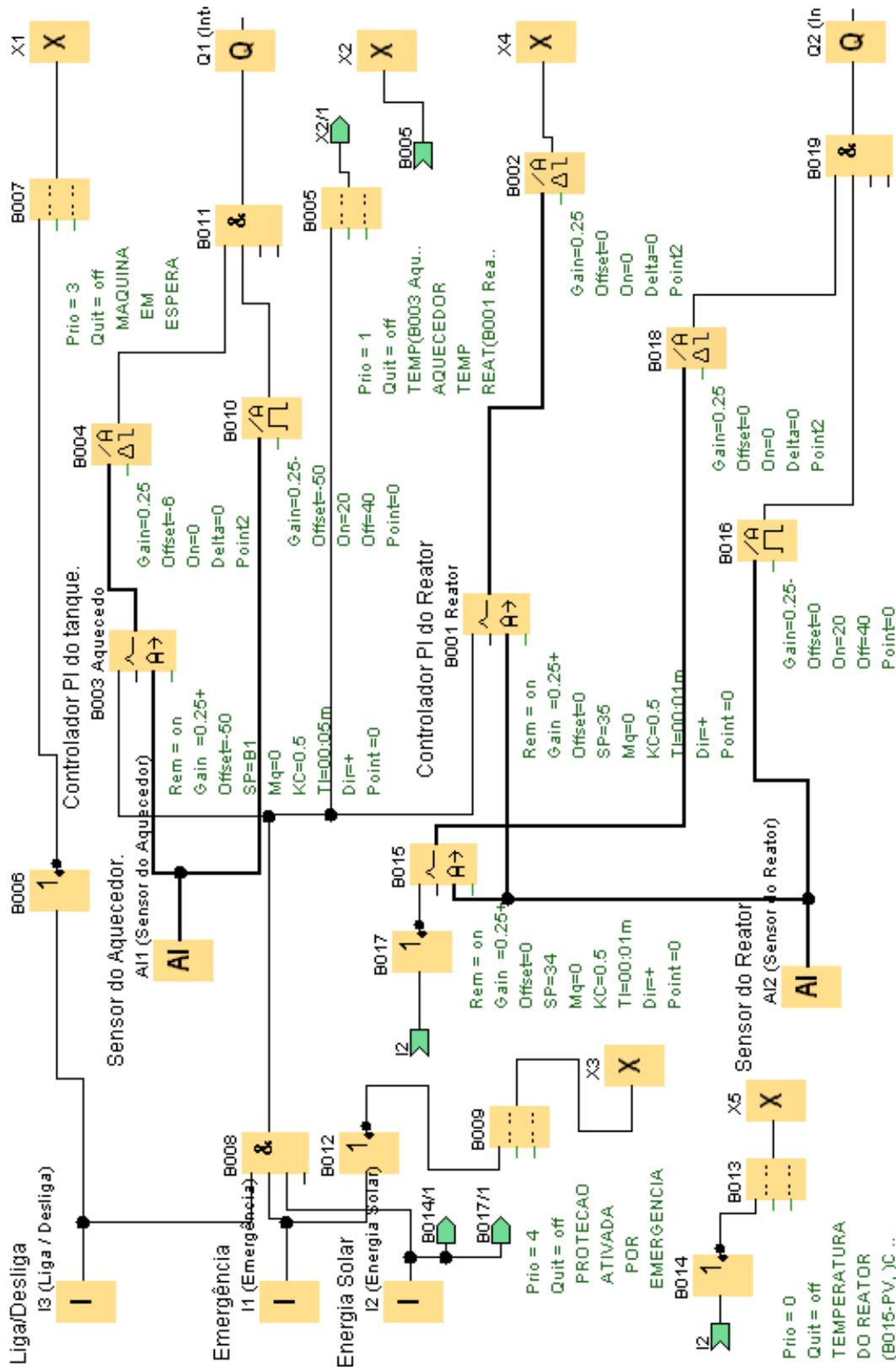
- 12 - CAMARINI, G., “*Desempenho de Misturas de Cimento Portland e Escória de Alto-Forno Submetidas a Cura Térmica*”, Tese (Doutorado). EPUSP. Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- 13 - HOPPE FILHO, J., “*Sistema Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismo de Hidratação, Microestrutura e Carbonatação de Concreto*”, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- 14 - A. NENE, D. ASSIMACOPOULO, N. MARKATO, G. KARYDAKIS, “*Simulation of Airlift Pumps for Moderate-Depth water wells*”, Published In Technika Chronika, 14, 1-20 (1996). Translated From The Original Greek Text.
- 15 - SHAH, L. J., FURBO, S., “*Entrance Effects In Solar Storage Tanks*”, Departamento de Engenharia civil, Universidade técnica da Dinamarca, Lyngby, Dinamarca - Science direct, 17 de abril de 2003.
- 16 - HARIHARAN, K., BADRINARAYANA, K., SRINIVASA MURTHY, S. AND KRISHNA MURTHY, M. V., “*Temperature Stratification In Hot-Water Storage Tanks*”, Laboratório de Refrigeração e Ar-Condicionado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia da Índia, Madras-600 036, Índia 22 Outubro 1990.
- 17 - HAN, Y.M., WANG, R. Z. DAI, Y. J., “*Thermal Stratification Within The Water Tank*”, Instituto de Refrigeração e Criogenia, Universidade Jiao Tong Xangai, Xangai, China, 2009.
- 18 - AI-NIMR, M. A., “*Temperature Distributions Inside Electrical Hot-Water Storage Tanks*”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de ciência e Tecnologia da Jordânia, Irbid, Jordânia, 1994.
- 19 - BEZERRA, S. A., “*Influência do Tipo e do Tempo de Duração de Cura Nas Propriedades Mecânicas de Concreto de Alto Desempenho (Cad) Produzidos em Período Quente ($T > 25^{\circ}\text{C}$) e de Baixa Umidade Relativa do Ar ($H < 50\%$)*”, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, 2005.
- 20 - BARBOSA, D. C., BARDELLA, P. S., CAMARINI, G., “*Avaliação da Carbonatação Natural em Concretos Produzidos Com e Sem Sílica Ativa Submetido a Diferentes Procedimentos de Cura*”, In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47°, 2005, Rio De Janeiro. Anais: Ibracon, 2005.

- 21 - KJELLEN, K. O., “*Revisiting the microstructure of hydrated tricalcium silicate a comparison to Portland cement*”, In: Science Direct, Cement & Concrete Composites 26 (2004) 947-956.
- 22 - YOGENDRAN, V.; LANGAN, B. W.; WARD, M. A. “*Hydration of cement and silica fume paste*”. Cement and Concrete Research, v. 21, p. 691-708, 1991.
- 23 - GONÇALVES, J. P., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R.” *Study of the hydration of Portland cement pastes containing ceramic waste by thermal analysis*”. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94 out./dez. 2006.
- 24 - PARROTT, L. J., GEIKER, M., GUTTERIDGE, W. A., KILLOH, D., “*Monitoring Portland cement hydration: comparison of methods*”. Cement and Concrete Research, v. 20, p. 919-926, 1990.
- 25 - DWECK, J.; SILVA, P. F.; BUCHLER, P. M.; CARTLEDGE, F. K. “*Study by Thermogravimetry of the evolution of ettringite phase during type II Portland cement hydration*”. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 69, p. 179-186, 2002.
- 26 - DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K. “*Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate*”. Thermochemica Acta, n. 346, p. 105-113, 2000.
- 27 - MARSH, B. K.; DAY, R. L. “*Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash and blended cement pastes*”. Cement and Concrete Research, v. 18, p. 301-310, 1988.
- 28 - VEDALAKSHMI, R.; SUNDARA RAJ, A.; SRINIVASAN, S.; GANESH BABU, K. “*Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique*”. Thermochemica Acta, n. 407, p. 49-60, 2003.
- 29 - GUENOT-DELAHAIE, I. “*Contribution à l’analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton*”. 1996. These de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, Franca, 1996.
- 30 - TAYLOR, H. F. W. “*Cement chemistry*”. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.
- 31 - LEA, F.M. “*The chemistry of cement and concrete*”. 4th ed. London: Edward Arnold, 1974.
- 32 - RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. “*Handbook of analytical techniques in concrete*”. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 2001.

- 33 - MASSAZZA, F. "*Lea's Chemistry of Cement and Concrete*". 4th ed. London: Arnold, 1998.
- 34 - TAVARES, A. M. G., "*Síntese e caracterização de pasta de cimento aditivadas com resinas epóxi – análises cinéticas, termodinâmicas e calorimétricas*". Dissertação (Mestrado), Núcleo de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Sergipe, 2010.
- 35 - CAVALCANTE FILHO, A.N.; CAVALCANTE, G.A.A.; SELMO, S.M.S., "*Estudo de propriedades mecânicas de concretos estruturais em cura acelerada com temperatura moderada*". In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51º, 2009, Curitiba. Anais: IBRACON. Curitiba, 2009.
- 36 - FAPITEC, PII004541-4, "*Aquecedor Solar de Agua*". Instituição(ões) financiadora(s): FAPITEC, data de depósito: 12/01/2011.
- 37 – MASCOLO, G., MASCOLO, C.M., VITALE, A., MARINO, O., "*Microstructure evolution of lime putty upon aging*". *Jornal of Crystal Growth*, 2010.
- 38 – AHMED, E. T., "*An accelerated test for predicting the 28-day compressive strength of concrete*". *The Arabian Journal for science and engineering*, volume 15, number 1. January 1990.
- 39 – www.soletrol.com.br

  		ENSAIOS DE CONCRETO NBR - 5738 E NBR - 5739	Identificação: FORM.GTSC.18 Versão : 06				
OBRA: Mansão Aloísio Campos LOCAL: Rua João Vitor de Matos CLIENTE: Constren - Construções e Engenharia Ltda.		CERTIFICADO Nº 21					
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS $f_{ck} = 30,00 \text{ MPa}$							
							
ENSAIO Nº	TRAÇO	Cesão pelo Abatimento do Tronco de Cone - "Slump Test" (mm)	DATA DE MOLDAGEM	IDADE DE RUPTURA (Dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)		
					CP I	CP II	MAIOR
18-RX	Redimix	110	quarta-feira, 27/04/2011	07	35,50	35,80	35,80
19-RX	Redimix	110	quarta-feira, 27/04/2011	07	32,70	33,60	33,60
Local de Aplicação do Concreto: 16 - RX (NF: 35137/ 4,0 m³) - Poço do elevador + conta p17-p18..... (Lab.: Isaac Santos-SONDA) 18 - RX (NF: 35604/ 8,0 m³) - Pilar Conta - Semi elevado - P11, P12, P15, P16, P21, P22, P25, P19, P9, P6, P3..... (Lab.: Anderson Costa-SONDA) 19 - RX (NF: 35605/ 8,0 m³) - P3, P127, P128, P9, P9, P133, P10, P13, P14, P17, P18, P20, P26, P23, P24..... (Lab.: Anderson Costa-SONDA)							
Informações Adicionais sobre o Concreto 19 - RX - Foram adicionados 20 L de água							
Observações: Recebimento (usinado) ou acompanhamento da produção (produção na obra) dos concretos, ensaio(s) de Abatimento pelo tronco de cone, moldagem e Identificação de Corpo(s) de Prova(s) efetuados pela SONDA. □ Tipos de Ruptura: (a) Cônica, (b) Cônica e Bipartida, (c) Cônica e Cisalhada, (d) Cisalhada, (e) Colunar, (f) e (g) Fraturas no Topo ou Base.							
DATA DE IMPRESSÃO: qui, 05/05/2011				VISTO:			

Anexo 2: Cura realizada pela empresa Sonda Engenharia.



Anexo 3: Programa do CLP para efetuar o controle da temperatura do sistema de forma automática.

Massada (manual ou mecânica?)	Relação água/cimento	Tipo de cura	Prazo de cura	Data de moldagem	Data prevista de ruptura	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	Valor máximo	Desvio relativo da média	Valor mínimo	Desvio relativo da média	Desvio relativo máximo	Prazo de cura	% da resistência de cura normal a 28 dias
1	0,25	Acelerada	0-24 h	20/mar	21/mar	52,5	23,6			38,0	52,5	38%	23,6	38%	38%	24,0	83%
Manual?			24-48 h		22/mar	35,5	13,1			24,3	35,5	46%	13,1	46%	46%	48,0	53%
			24-72 h		23/mar	29,2	52,5			40,8	52,5	28%	29,2	28%	28%	72,0	89%
			24h-7d		27/mar	44,9	42,5	56,9		48,1	56,9	18%	42,5	12%	18%	168,0	104%
		Normal	24h-28d		17/abr	42	50,1		46,1	50,1	9%	42,0	9%	9%	672,0	100%	
2	0,25	Acelerada	0-24 h	27/mar	28/mar	11,1	7,57			9,3	11,1	19%	7,6	19%	19%	24,0	#DIV/0!
Manual?			24-48 h		29/mar	30,9	12,5			21,7	30,9	42%	12,5	42%	42%	48,0	#DIV/0!
			24-72 h		30/mar	37,4	32,3			34,8	37,4	7%	32,3	7%	7%	72,0	#DIV/0!
			24h-7d		03/abr	56,4	49,7	43,9	51,2	50,3	56,4	12%	43,9	13%	13%	168,0	#DIV/0!
		Normal	24h-28d		24/abr	0	0		0,0	0,0		0,0		0%	672,0	#DIV/0!	
3	0,25	Acelerada	0-24 h	10/abr	11/abr	49	52,4			50,7	52,4	3%	49,0	3%	3%	24,0	55%
Mecânica?			24-48 h		12/abr	68,7	72,5			70,6	72,5	3%	68,7	3%	3%	48,0	77%
			24-72 h		13/abr	75,2	76,5			75,8	76,5	1%	75,2	1%	1%	72,0	83%
			24h-7d		17/abr	75,8	74,7	79,4	90	80,0	90,0	13%	74,7	7%	13%	168,0	87%
		Normal	24h-21d		08/mai	91,7	92,1		91,9	92,1	0%	91,7	0%	0%	672,0	100%	
4	0,25	Acelerada	0-24 h	23/abr	24/abr	28,1	18,2			23,1	28,1	22%	18,2	22%	22%	24,0	36%
Mecânica?			24-48 h		25/abr	34,1	45,9			40,0	45,9	15%	34,1	15%	15%	48,0	62%
			24-72 h		26/abr	43,9	35,6			39,7	43,9	11%	35,6	11%	11%	72,0	62%
			24h-7d		30/abr	51,5	48,5			50,0	51,5	3%	48,5	3%	3%	168,0	78%
		Normal	24h-28d		21/mai	62,4	66,6		64,5	66,6	3%	62,4	3%	3%	672,0	100%	
5	0,25		0-24 h	24/abr	25/abr	33,6	13,4			23,5	33,6	43%	13,4	43%	43%	24,0	35%
Mecânica?			24-48 h		26/abr	38,2	45,8			42,0	45,8	9%	38,2	9%	9%	48,0	63%
			24-72 h		27/abr	52,8	59,1			56,0	59,1	6%	52,8	6%	6%	72,0	84%
			24h-7d		01/mai	51,5	48,5	67,6		55,9	67,6	21%	48,5	13%	21%	168,0	83%
		Normal	24h-28d		22/mai	69,3	64,7		67,0	69,3	3%	64,7	3%	3%	672,0	100%	

Anexo 5: Ensaio de compressão dos corpos de prova moldados no laboratório de Engenharia Civil para uma relação a/c 0,25.

Massada (manual ou mecânica)	Relação água/cimento	Tipo de cura	Prazo de cura	Data de moldagem	Data prevista de ruptura	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	Valor máximo	Desvio relativo da média	Desvio relativo da média	Desvio relativo máximo	Prazo de cura	% da resistência de cura normal a 28 dias
6ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	07/mai	08/mai	16,38	27,9	26,45	29,65	25,1	29,7	18%	35%	35%	24,0	45%
Mecânica?			24-48 h		09/mai	36,55	35,36	37,34	27,9	34,3	37,3	9%	19%	19%	48,0	62%
			24-72 h		10/mai	25,39	43,4	41,16	39,43	37,3	43,4	16%	32%	32%	72,0	67%
			24h-7d (35°C)		14/mai	55,22	51,87	37,23	38,52	45,7	55,2	21%	19%	21%	168,0	82%
		24h-7d (23°C)	31,24			35,34	47,89	53,88	42,1	53,9	28%	26%	28%	168,0	76%	
		Normal	24h-28d		04/jun	63,6	49,9	50,5	58,8	55,7	63,6	14%	10%	14%	672,0	100%
7ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	08/mai	09/mai	26,15	29,35	24,37	14,88	23,7	29,4	24%	37%	37%	24,0	30%
Mecânica?			24-48 h		10/mai	26,72	40,56	37,53	40,13	36,2	40,6	12%	26%	26%	48,0	45%
			24-72 h		11/mai	45,72	47,24	40,34	36,06	42,3	47,2	12%	15%	15%	72,0	53%
			24h-7d (35°C)		15/mai	34,35	51,27	52,93	52,29	47,7	52,9	11%	28%	28%	168,0	60%
		24h-7d (23°C)	47,04			47,06	45,84	49,76	47,4	49,8	5%	3%	5%	168,0	59%	
		Normal	24h-28d		05/jun	69,63	80,1	97,93	72,87	80,1	97,9	22%	13%	22%	672,0	100%
8ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	14/mai	15/mai	2,81	6,91	27,39	28,77	16,5	28,8	75%	83%	83%	24,0	29%
Mecânica?			24-48 h		16/mai	35,82	34,46	40,45	37,53	37,1	40,5	9%	7%	9%	48,0	64%
			24-72 h		17/mai	45,91	44,44	44,16	47,63	45,5	47,6	5%	3%	5%	72,0	79%
			24h-7d (35°C)		21/mai	40,27	39,94	46,05	50,38	44,2	50,4	14%	10%	14%	168,0	77%
		24h-7d (23°C)	40,82			46,18	45,49	42,08	43,6	46,2	6%	6%	6%	168,0	76%	
		Normal	24h-28d		11/jun	54	56	62	58	57,5	62,0	8%	6%	8%	672,0	100%

9ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	15/mai	16/mai	27,21	28,08	28,96	19,95	26,1	29,0	11%	23%	23%	24,0	40%
Mecânica?			24-48 h		17/mai	41,55	37,18	40,2	40,57	39,9	41,6	4%	7%	7%	48,0	61%
			24-72 h		18/mai	39,83	35,86	38,7	42,45	39,2	42,5	8%	9%	9%	72,0	60%
			24h-7d (35°C)		22/mai	49,3	52,71	53,65	52,86	52,1	53,7	3%	5%	5%	168,0	80%
		24h-7d (23°C)	51,27			44,92	52,03	50,26	49,6	52,0	5%	9%	9%	168,0	76%	
		Normal	24h-28d		12/jun	70,56	57,42	68,78	64,84	65,4	70,6	8%	12%	12%	672,0	100%
10ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	21/mai	22/mai	21,17	29,02	26,1	24,02	25,1	29,0	16%	16%	16%	24,0	42%
Mecânica?			24-48 h		23/mai	30,93	31,95	33,97	34,72	32,9	34,7	6%	6%	6%	48,0	55%
			24-72 h		24/mai	33,31	38,03	41,76	38,63	37,9	41,8	10%	12%	12%	72,0	64%
			24h-7d (35°C)		28/mai	33,59	49,89	5,65	49,13	34,6	49,9	44%	84%	84%	168,0	58%
		24h-7d (23°C)	30,31			46,58	43,24	42,96	40,8	46,6	14%	26%	26%	168,0	69%	
		Normal	24-28h		18/jun	56,62	56,76	59,96	63,88	59,3	63,9	8%	5%	8%	672,0	100%
11ª Massada	0,35	Acelerada	0-24 h	22/mai	23/mai	8,34	9,53	18,04	22,35	14,6	22,4	53%	43%	53%	24,0	28%
Mecânica?			24-48 h		24/mai	33,61	31,74	33,31	31,81	32,6	33,6	3%	3%	3%	48,0	64%
			24-72 h		25/mai	40,96	31,19	28,5	40,2	35,2	41,0	16%	19%	19%	72,0	69%
			24h-7d (35°C)		29/mai	42,69	50,08	40,59	47,66	45,3	50,1	11%	10%	11%	168,0	88%
		24h-7d (23°C)	46			43,38	47,73	41,18	44,6	47,7	7%	8%	8%	168,0	87%	
		Normal	24-28h		19/jun	49,89	45,79	60,79	48,46	51,2	60,8	19%	11%	19%	672,0	100%

Anexo 6: Ensaio de compressão dos corpos de prova moldados no laboratório de Engenharia Civil para uma relação a/c 0,35.