

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

INVESTIGAÇÃO SOBRE OS MÉTODOS
DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA
DO CONCRETO

ENG. JOSÉ CARLOS ZANFELICE

São Carlos
Estado de São Paulo
Outubro de 1.981

INVESTIGAÇÃO SOBRE OS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

ENG. JOSÉ CARLOS ZANFELICE

Orientador Prof. Dr. Péricles B. Fusco

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

São Carlos
Estado de São Paulo
Outubro de 1981

INVESTIGAÇÃO SOBRE OS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RE-
SISTÊNCIA DO CONCRETO

ENG. JOSÉ CARLOS ZANFELICE

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Péricles B. Fusco

Prof. Dr. Walter A. Nimir

Prof. Dr. Lafael Petroni

São Carlos

Estado de São Paulo

Outubro de 1981

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Péricles Fusco pela orientação e estímulo que nos dedicou.

Agradecemos à Faculdade de Engenharia de Limeira da Universidade Estadual de Campinas pelo apoio recebido para a realização da parte experimental.

Agradecemos a Isabel Cristina da Costa Delle Vedove e Magali Gonçalves Ramos pelo trabalho de datilografia e a Sonia Maria Michel Garcia pelos desenhos.

Agradecemos a José Reinaldo Marçal e a Paulo Cesar Nogarotto pela ajuda nos trabalhos de laboratório.

DEDICATÓRIA

À minha família.

Ao Prof. Levy Pires de Queirós.

Ao Prof. Antonio Galvão Novaes.

RESUMO

Neste trabalho são analisados e comparados métodos de ensaio acelerado da resistência do concreto, propostos entre 1915 e 1979. A comparação entre os métodos é feita usando-se três medidas de eficiência, coeficiente de aceleração, afastamento padrão e coeficiente de afastamento.

O trabalho apresenta, também, resultados da investigação experimental sobre dois métodos de ensaio acelerado: o método modificado de ebulição e um método de água quente a 70°C.

ABSTRACT

This paper presents the analysis and comparison on methods of accelerated strength testing of concrete, developed between 1915 and 1979. The comparison among the methods is made by the use of three measures of efficiency coefficient of acceleration, standard error of estimation and coefficient of deviation.

The paper also presents the results of an experimental investigation on two methods of accelerated strength testing: the modified boiling method and a warm water method at 70°C.

ÍNDICE

Página

1a. PARTE: O ESTADO ATUAL DOS CONHECIMENTOS SOBRE OS EN
SAIOS ACELERADOS DE CONCRETO.

1	ENSAIOS ACELERADOS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO	1
1.1	Introdução	1
1.2	Método Proposto por Gerend	2
1.3	Método Proposto por Patch	3
1.4	Método Proposto por King	3
1.5	Método Proposto por Akroyd	4
1.6	Método Proposto por Thompson	6
1.7	Método Proposto pela Comissão de Ensaaios Acelerados da Institution of Civil Engineers	6
1.8	Método Proposto por Malhotra e Bauset	8
1.9	Método Proposto por Smith e Chojnacki	8
1.10	Método Proposto por Smith e Tiede	9
1.11	Métodos Propostos no Simpósio da RILEM	10
1.11.1	Método Proposto por Dutron	11
1.11.2	Método Proposto por Jarocki	11
1.11.3	Método Proposto por Cornwell	11
1.11.4	Método Proposto por Mihail	12
1.11.5	Método Proposto por Vuorinen	12
1.12	Métodos Propostos pela ASTM	12
1.13	Métodos Propostos pela Transportation Research Board	13
1.13.1	Método Proposto por Hudson e Steele	14
1.13.2	Método Proposto por Ramakrishan e Dietz	14
1.13.3	Método Proposto por Brockenbrough e Larason	15
1.13.4	Método Proposto por Kalyanasundaram e Kurien	15
1.14	Métodos Propostos por Collet	16
1.15	Método Proposto por Nasser	16

2	EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO	17
2.1	Medidas de Eficiência	17
2.2	Eficiência do Método Proposto por Akroyd	18
2.3	Eficiência do Método Proposto por Thompson	25
2.4	Eficiência do Método Proposto pela Comissão de Ensaio Acelerados da Institution of Civil Engineers	29
2.5	Eficiência dos Métodos Propostos por Smith	29
2.6	Eficiência do Método Proposto por Dutron	34
2.7	Eficiência do Método Proposto por Jarocki	34
2.8	Eficiência do Método Proposto por Cornwell	34
2.9	Eficiência do Método Proposto por Ramakrishnan e Dietz	35
2.10	Eficiência do Método Proposto por Brockenbrough e Larason	35
2.11	Eficiência do Método Proposto por Kalyanasundaran e Kurien	35
2.12	Eficiência dos Métodos Propostos por Collet	35
3	CRÍTICA DOS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO	45
3.1	Introdução	45
3.2	Método Modificado de Ebulição	47
3.3	Métodos de Água Quente	52
3.4	Método de Cura Autógena	57
2a.	PARTE: INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO	
4	INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE DOIS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO	59
4.1	Materiais	59
4.2	Métodos	62
4.3	Resultados	64
4.4	Comparação entre os métodos	77
5	CONCLUSÕES	80
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 ENSAIOS ACELERADOS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

1.1 Introdução

O objetivo da criação de ensaios acelerados de concreto foi obter, em curto intervalo de tempo, uma estimativa razoavelmente precisa e confiável da resistência aos 28 dias de idade. Os métodos de ensaio acelerado surgiram pela necessidade, que havia, de se controlar a fabricação de grandes quantidades de concreto (a maioria dos métodos foi criada durante a construção de barragens). Para conseguir este controle o concreto, após algumas horas ou um dia, era submetido a cura em um meio de temperatura elevada, acelerando-se assim a cinética química e obtendo-se corpos de prova com resistências próximas da resistência aos 28 dias.

Os primeiros métodos de ensaio acelerado foram criados por McDANIEL (45) em 1915 que, após estudar a evolução da resistência do concreto com a temperatura, traçou várias curvas relacionando a temperatura de cura com a resistência, sugerindo que tais curvas poderiam ser usadas para prever a resistência do concreto aos 28 dias de idade, e por GEREND (25) em 1927, e PATCH (57) em 1933, os quais por não apresentarem resultados satisfatórios foram abandonados.

O estudo de novos métodos foi retomado entre 1953 e 1956 com os trabalhos de KING (32) e AKROYD (3)

despertando-se assim novamente o interesse de pesquisadores e instituições. O interesse ressurgiu porque, os cimentos atuais ganham resistência, mais rapidamente que os cimentos antigos, e, também, porque o ritmo de concretagens aumentou tanto que 28 dias é muito tempo de espera para controlar o concreto fabricado. Em 1959, a "Institution of Civil Engineers" criou a Comissão de Ensaaios Acelerados (27), para estudar os métodos então existentes e adotar um deles como padrão para a Inglaterra. Em 1963, a Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions (RILEM) (64) promoveu um simpósio por correspondência para coligir informações sobre os métodos de ensaio acelerado visando uma possível padronização. A Comissão C9 de The American Society for Testing and Materials (ASTM) criou, em 1964, uma subcomissão para estudar métodos para serem adotados como padrão, WILLS Jr. (77). No encontro anual de 1975 da Transportation Research Board (54), foram apresentados treze relatórios sobre ensaios acelerados e em 1976, o American Concrete Institute promoveu um simpósio internacional sobre ensaios acelerados de concreto.

1.2 Método Proposto por Gerend

Na construção de uma fábrica de papel, de 1924 a 1927, que consumiu 34.000 m^3 de concreto, era necessário manter um controle rigoroso da resistência porque havia muita variação do cimento e dos agregados, resultando resistências entre 7,7 e 20,7 MPa.

GEREND (25) adotou um método de ensaio acelerado em que o resultado da resistência à compressão era obtido em 48 h. Submetiam-se os corpos de prova a cura padrão por 24 h e a uma cura acelerada em vapor sob pressão de 0,6 a 0,7 MPa entre 12 e 15 h.

Ensaios preliminares indicaram que submetendo-se os corpos de prova a períodos maiores de cura acelerada resultavam resistências excessivamente elevadas para

a máquina de ensaio disponível; por períodos menores, os corpos de prova tornavam-se quebradiços, porque, talvez, o cimento não passasse no ensaio de determinação da estabilidade de volume em autoclave.

1.3 Método Proposto por Patch

O método proposto por PATCH (57), trabalhando para o United States Bureau of Reclamation, foi desenvolvido, em 1930, para controlar o concreto usado na construção da barragem de Hoover.

Foram usados, como meio de cura acelerada vapor a baixa e alta pressão, e água quente. Adotou-se água quente porque dava melhores resultados e os equipamentos necessários eram mais simples.

O método tinha o seguinte ciclo: 30 min após a mistura do concreto, os corpos de prova eram imersos em água a 90°C e deixados por 7 h. Quando a temperatura atingia 79°C eram retirados, esfriados durante 1 h e a seguir ensaiados.

1.4 Método Proposto por King

KING (32) estudou vários métodos de ensaio acelerado, na London University, para The Port of London Authority, a partir de outubro de 1953. Foram testados como meio de cura acelerada o aquecimento por corrente elétrica comum e de alta frequência, por vapor e em estufa. A cura em estufa apresentou os melhores resultados; por isso foi estudado detalhadamente.

Os corpos de prova eram colocados em uma estufa fria 30 min após a mistura do concreto. A estufa era ligada e os corpos de prova eram aquecidos por 6 h, quando então eram retirados, esfriados por 30 min e a seguir ensaiados. A temperatura da estufa, durante a cura acelerada, era de aproximadamente 95°C entre os corpos de prova e 105°C na parte superior da estufa.

ORDMAN e BONDRE (56), além do método de King, estudaram outros métodos para o controle do concreto usado nas Docas de Tilbury. Os métodos estudados foram aquecer em estufa continuamente por 24 h ou submeter os corpos de prova inicialmente a cura normal e depois aquecê-los por um período conveniente. O primeiro foi abandonado por causa do longo tempo em que a estufa devia permanecer ligada. Os períodos de cura normal experimentados foram de 18 h, 21 h e 24 h após a mistura do concreto. Depois os corpos de prova eram aquecidos por 4 h.

O método adotado foi curar normalmente por 24 h e aquecer em estufa por 4 h a 85°C . Este método era o que resultava em menor dispersão (medida pelo desvio padrão dos resultados acelerados) na cura de correlação de resistência aos 7 e 28 dias e resultava em resistência acelerada igual à obtida pela cura por 6 h.

1.5 Método Proposto por Akroyd

AKROYD e SMITH-GANDER (2) estudaram os efeitos de cura normal antes da cura acelerada, duração da cura acelerada, temperatura da água e duração do esfriamento nos resultados de ensaio acelerado.

Antes de colocar os corpos de prova no meio de cura acelerada, estes eram submetidos à cura normal por períodos de 15 min a 4 h. Este procedimento não influiu nos resultados.

As durações de cura acelerada estudadas foram de 3 h e 45 min até 12 h. A taxa de crescimento da resistência era alta até 7 h, desaparecendo a seguir (a diferença de resistência depois de 7 h e 9 h de cura acelerada era menor que 2%).

Os períodos de 1 a 16 h de resfriamento, após 7 h de cura acelerada, não tiveram influência nos resultados.

A resistência aumentava quando a temperatura da água subia de 50 a 100°C , e como não havia necessidade de termostato para manter a temperatura da água em 100°C ,

esta temperatura foi adotada no método.

Adotaram o método de ebulição com o seguinte ciclo de ensaio: 30 min após a mistura do concreto os corpos de prova eram colocados em água a 60°C e em 1 h levada a ebulição e curados por mais 6 h. No fim deste período os corpos de prova eram retirados do tanque, esfriados por 1 h e ensaiados.

A cura acelerada por 7 h tornou difícil a aplicação do método em obras, pois ela exigia o trabalho no turno de laboratório.

Para eliminar este problema AKROYD (3) propôs o método modificado de ebulição: os corpos de prova, 30 min após a moldagem, eram submetidos a cura normal por 24 h; em seguida, ainda nos moldes, eram colocados em água em ebulição por 3 h 30 min. O ensaio à compressão realizava-se 1 h após a cura acelerada.

MALHOTRA (39) utilizou este método no Canadá, diminuindo o tempo de cura normal para 23 h. Com este ciclo, o método modificado de ebulição foi adotado como método normalizado, sob designação CSA A-23.2.26.

VILLARREAL (74) usou o método modificado de ebulição, com ligeiras modificações, para estimar a resistência do concreto à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão.

Os cilindros e prismas, para ensaio acelerado, eram curados por 18 h 30 min em câmara úmida e depois submetidos a cura acelerada por 3 h 30 min em água a 91°C e após 2 h eram ensaiados por compressão diametral.

Para estimar a resistência à tração, eram moldados cilindros que, após 28 dias de cura padrão, eram rompidos por compressão diametral. Para estimar a resistência à tração na flexão eram moldados prismas de 15,2 por 50,8 cm (6 por 12 polegadas) que após cura padrão por 28 dias eram ensaiados à flexão.

Com este ensaio acelerado podia-se prever em 24 h a resistência à tração e a resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias.

NAIK (49) após o uso contínuo do método modifi-

cado de ebulição, encontrou dificuldades em adaptar o ciclo de 28 h 30 min ao dia normal de trabalho. Propôs modificações nas fases do ciclo, resultando métodos com ciclos de 24 h, 28 h e 72 h. Corpos de prova, para o ensaio acelerado, moldados em véspera de feriados, eram submetidos ao ciclo de 48 h, corpos de prova moldados às sextas-feiras eram submetidos ao ciclo de 72 h e corpos de prova moldados após as 14 h eram submetidos ao ciclo de 24 h; evitando assim trabalho noturno ou aos domingos e feriados.

A cura acelerada para os ciclos de 24 h, 28 h, 48 h e 72 h começava na idade de 19 h, 23 h 30 min, 44 h e 68 h 30 min e durava 4 h, 3 h 30 min, 3 h e 2 h 30 min, respectivamente. Após a cura acelerada, os corpos de prova eram desmoldados e esfriados por 50 min, em 10 min eram capeados e ensaiados à compressão.

1.6 Método Proposto por Thompson

THOMPSON (74) procurou criar um método de ensaio acelerado que combinasse simplicidade de operação com precisão razoável de previsão da resistência aos 7 e 28 dias, e que proporcionasse resistência em 24 h igual à resistência obtida com o método de King. Para isso, mudou a temperatura e curava os corpos de prova em água. A temperatura da água era de 35°C e o ciclo de ensaio era cura normal por 30 min, cura acelerada por 24 h e, nos 30 min seguintes, resfriamento e ensaio.

1.7 Método Proposto pela Comissão de Ensaios Acelerados da Institution of Civil Engineers

Em 1959, a Institution of Civil Engineers criou a COMISSÃO DE ENSAIOS ACELERADOS (29), formada por pesquisadores de seis laboratórios ingleses: APCM Research Laboratory, Building Research Station, Constructional Services, Port of London Authority, Queen Mary College, Road Research Laboratory. O objetivo da comissão era examinar e comparar vários métodos de ensaio acelerado para adoção de um método simples e confiável e que proporcio-

nasse resultados em um dia ou menos.

Os métodos estudados foram:

- cura em água a 100°C por 3 h;
- cura em água a 100°C por 6 h;
- cura em água a 80°C por 3 h;
- cura em água a 80°C por 6 h;
- cura em água a 80°C por 18 h;
- cura em água a 80°C por 24 h;
- cura em água a 55°C por 18 h;
- cura em água a 55°C por 24 h;
- cura em água a 35°C por 18 h;
- cura em água a 35°C por 24 h;
- cura úmida a 19°C por 24 h, seguida de 3 h a 100°C em água;
- cura úmida a 19°C por 24 h, seguida de 6 h a 100°C em água;
- cura úmida a 19°C por 24 h, seguida de 3 h a 80°C em água;
- cura úmida a 19°C por 24 h, seguida de 6 h a 80°C em água;
- método proposto por King:
 - cura em água a 35°C por 30 h;
 - cura em água a 55°C por 30 h;
 - cura em água a 55°C por 3 h, seguida de cura a 80°C por 3 h sem os moldes;
 - cura por 18 h a 19°C, seguida de cura por 3 h a 80°C sem os moldes;
 - cura por 24 h a 19°C, seguida de cura por 3 h a 80°C;
 - cura em água a 55°C por 6 h; e
 - cura em água a 55°C por 48 h.

Em todos os métodos, a cura acelerada iniciava-se 30 min após a mistura do concreto, e o ensaio à compressão era realizado 30 min após o fim da cura acelerada.

A análise final mostrou que o melhor método era o de 24 h em água a 55°C porque previa a resistência aos 28 dias com um coeficiente de variação de 8,5%, usando um corpo de prova apenas e coeficiente de variação menor usando médias de três ou mais corpos de prova.

1.8 Método Proposto por Malhotra e Bauset

Durante a construção de um complexo hidrelétrico para a Comissão Hidrelétrica de Quebec, houve a necessidade de se criar métodos de ensaio acelerado que estimassem a resistência do concreto aos 91 dias. MALHOTRA e BAUSET (41) adotaram o método modificado de ebulição e estudaram outro método usando água quente.

O método de água quente consistia em curar os corpos de prova normalmente por 10 h, em água a 77°C por 38 h e imediatamente ensaiá-los.

Depois de dois anos de experiência, a Comissão Hidrelétrica de Quebec aprovou este método como rotina de ensaio.

1.9 Método Proposto por Smith e Chojnacki

SMITH e CHOJNACKI (67), (68) procuraram desenvolver um método de ensaio acelerado para controlar concreto empregado em pavimentação, baseando-se nos ensaios de King e Akroyd e Smith Gander e procurando obter um ciclo ótimo de cura e uma temperatura que proporcionassem as mais altas resistências aceleradas.

O primeiro método utilizado tinha como característica principal o tempo de espera de 6 h antes do início da cura acelerada. A cura acelerada era feita da seguinte maneira: após 6 h de mistura do concreto, os corpos de prova eram colocados em água a 88°C, devendo atingir o ponto de ebulição entre 5 h 30 min a 6 h 30 min; após 19 h no tanque, os cilindros eram retirados, desmoldados e esfriados por 30 min. Nos 30 min seguintes, eram capeados e ensaiados. Este método foi denominado método de cura acelerada com tempo de espera padronizado.

Estudos posteriores mostraram que os resultados do ensaio acelerado eram afetados pela fonte do cimento, dosagem e aditivos usados no concreto. Para eliminar o problema, dilataram o tempo de espera arbitrariamente,

contanto que o ciclo de ensaio fosse conveniente para dia de trabalho normal. Como não obtiveram resultados, criaram um outro método em que o tempo de pega determinava o início da cura acelerada.

O segundo método tinha o seguinte ciclo: após o cimento ter concluído a pega (de 6 a 8 h), os corpos de prova eram colocados em água fervendo e curados por 16 h; em 1 h eram esfriados, capeados e ensaiados. Este método foi denominado método de cura acelerada com pega concluída.

1.10 Método Proposto por Smith e Tiede

O uso continuado do método de cura acelerada com pega concluída, pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Ontário, mostrou que a inconveniência do método era a determinação do fim da pega, pois eram ensaiados cerca de 20.000 corpos de prova por ano. SMITH e TIEDE (69) procuraram desenvolver outro método de ensaio acelerado que fosse mais fácil de ser utilizado. A idéia inicial foi usar o calor de hidratação do cimento como acelerador da cura. Estudaram os seguintes métodos:

- cura autógena por 22 h;
- cura autógena por 22 h, seguida de cura em água a 38°C por 24 h, a 60°C por 24 h, a 100°C por 24 h, a 80°C por 3 h e a 100°C por 3 h; e
- cura autógena por 46 h.

Para reter o calor de hidratação, os corpos de prova eram envoltos em sacos plásticos e colocados em recipiente termicamente isolado. A cura acelerada iniciava-se 1 h após a mistura do concreto e o ensaio realizava-se 1 h depois da cura acelerada.

O método de cura autógena por apenas 22 h apresentava resultados com grande dispersão. O método de cura autógena, seguida de cura em água quente ou em ebulição, produzia resultados semelhantes à cura autógena

por 46 h. A cura autógena por 22 h seguida de cura em água por 3 h apresentava pequena elevação da resistência além da obtida por cura autógena apenas.

Os autores estudaram, mais profundamente, os seguintes métodos:

- cura autógena por 46 h;
- cura autógena por 22 h, seguida de cura em água a 38°C, 60°C e em ebulição, por 24 h.

Os métodos apresentaram resultados similares, e, como o método de cura autógena por 46 h era o mais simples, ele foi adotado como rotina de laboratório.

BISAILLION et alii (12) (13) usaram o mesmo método de cura autógena; fabricavam os corpos de prova em moldes de poliestireno expandido, providos de tampa, promovendo assim o isolamento térmico do concreto.

1.11 Métodos Propostos no Simpósio da RILEM

O objetivo do Simpósio, foi coligir informações sobre métodos de ensaios acelerados que tivessem tido aplicação importante e que por isso pudessem ser adotados como possível padrão, BERIO (10). O simpósio contou com a participação de nove autores e recebeu informações sobre métodos usados por dez laboratórios de ensaios de materiais.

No método de ensaio acelerado usado na Holanda os corpos de prova eram curados normalmente por 48 h, em água em ebulição por 2 h 30 min e em temperatura ambiente por 21 h. O ciclo de ensaio tinha a duração total de 72 h.

Na França usou-se um método em que a cura acelerada se processava em vapor a 80°C por 4 h, sendo imediatamente ensaiados.

O método utilizado na Noruega era o modificado de ebulição proposto por AKROYD (3).

Na Itália os corpos de prova depois de 16 h eram

desmoldados, curados por 8 h em água entre 80 e 85°C e imediatamente ensaiados, resultando um método com ciclo de 24 h.

1.11.1 Método Proposto por Dutron

DUTRON (20) descreveu estudos desenvolvidos na Bélgica, para comparar a curva de resistência de concreto submetido a cura acelerada com ciclo de 24 h e a curva de resistência de concretos curados normalmente.

O meio de cura acelerada era o vapor. O método tinha o seguinte ciclo: após a moldagem, os corpos de prova eram curados normalmente, por 2 h, a seguir colocados em uma câmara. Em 3 h 20 min a temperatura da câmara era elevada a 60°C, por meio de vapor, e curados nesta temperatura por 9 h 40 min; a seguir em 5 h a temperatura era baixada a 40°C e em 4 h de 40°C para 20°C.

1.11.2 Método Proposto por Jarocki

JAROCKI (30), da Polônia, propôs um método de ensaio acelerado para controlar concreto usado numa barragem.

O método foi criado para possibilitar a correção rápida do traço do concreto devido a qualidade variável dos materiais.

O método tinha ciclo de 24 h, com as seguintes etapas: os corpos de prova eram curados a 18°C por 12 h em câmara úmida; sendo depois colocados num tanque com água e a temperatura elevada de 18°C a 90°C em 1 h e curados por 5 h; em 4 h a temperatura era baixada de 90°C a 40°C e em 2 h de 40°C para 20°C sendo os corpos de prova imediatamente ensaiados.

1.11.3 Método Proposto por Cornwell

Cornwell, citado por MALHOTRA (37), desenvolveu em 1955, durante a construção de uma usina hidrelétrica

na Austrália, um método de ensaio acelerado com ciclo de 24 h.

O ciclo de ensaio acelerado constava das seguintes etapas: 30 min após a moldagem, os corpos de prova eram colocados em água a temperatura ambiente e em poucos minutos a temperatura era elevada a 74°C; a cura se processava por 21 h 30 min quando os cilindros eram retirados do tanque, desmoldados e esfriados. Eram capeados e ensaiados com a idade de 24 h.

1.11.4 Método Proposto por Mihail

O método proposto por MIHAIL (46), da Romênia, tinha ciclo de 4 h, usando corpos de prova cilíndricos de 11,3 cm de diâmetro e 10 cm de altura, fabricados em moldes metálicos com tampas parafusadas.

Os corpos de prova, 30 min após a mistura do concreto, eram curados em água ou vapor à temperatura entre 97 e 99°C durante 3 h. Eram desmoldados, esfriados por 30 min e ensaiados na idade de 4 h.

1.11.5 Método Proposto por Vuorinen

VUORINEN (76), descreveu um método usado na Finlândia, para controlar concreto empregado em construção de hidrelétricas.

A cura acelerada processava-se em água ou estufa a temperatura entre 80 e 85°C. A estufa era provida de ventoinha para tomar a temperatura igual em qualquer ponto.

Os corpos de prova, 1 h após a moldagem, eram colocados na estufa ou tanque de água em temperatura ambiente. Em 4 h a temperatura era elevada a 80 ou 85°C e os corpos de prova curados por 20 h, quando então eram retirados e esfriados por 3 h. Os cilindros eram capeados e ensaiados na idade de 24 h.

1.12 Métodos Propostos pela ASTM

A Comissão C-9 (Concreto e Agregados para Concreto) da American Society for Testing and Materials criou, em 1964, uma Subcomissão sobre Ensaaios Acelerados para estudar os métodos propostos por KING (32), AKROYD (3) e SMITH e CHOJNACKI (67), (68).

Os nove laboratórios que participaram do programa foram: Ideal Cement Co. Colorado; Setor de Minas do Departamento de Energia, Minas e Recursos Naturais de Ontario; Divisão de Engenharia do Departamento de Obras Públicas de Montreal; Departamento de Transportes do Estado de Nova York; Divisão de Materiais e Ensaios do Departamento de Estradas de Rodagem de Ontario; Conselho de Pesquisas Rodoviárias de Virginia; Pacific Cement and Aggregates, Califórnia; Portland Cement Association, Illinois; Corpo de Bombeiros da Waterways Research Station, Mississipi; WILLS (77).

Os métodos estudados foram:

- cura em água a 35°C por 24 h;
- método modificado de ebulição;
- cura autógena por 46 h; e
- após conclusão da pega, cura por 15 h em água a 55°C, 75°C, 90°C e água em ebulição.

Durante o programa, os métodos de ensaio com pega concluída foram abandonados por causa do trabalho adicional em se determinar o fim da pega; os três primeiros foram adotados como padrão pela ASTM (7), com a designação C684-74.

1.13 Métodos Propostos pela Transportation Research Board

Em 1975, no encontro anual do Transportation Research Board (54), foram apresentados 13 trabalhos sobre ensaio acelerado e maturidade do concreto, sendo que 5 trabalhos relatavam novos métodos de ensaio acelerado.

1.13.1 Método Proposto por Hudson e Steele

HUDSON e STEELE (27), (28) procuraram desenvolver um método de ensaio acelerado para controlar o concreto empregado em pavimentação.

Desejava-se estimar uma resistência média potencial mínima à compressão do concreto aos 28 dias. Estudaram o efeito de diversos fatores (variação na fonte e conteúdo do cimento) e diversos meios e temperaturas de cura acelerada (água a 93°C e em ebulição, estufa a 80°C, autoclave a temperatura de aproximadamente 110°C e pressão de 0,10 MPa).

Concluíram que não havia necessidade de cura acelerada, bastando que se ensaiasse o concreto a 1, 2, 3 e 4 dias de idade e se calculasse a maturidade. Deduzia-se a seguir uma equação, para cada condição e dosagem do concreto, que estimasse a resistência potencial mínima aos 28 dias a partir do resultado do ensaio, à compressão em idade jovem e a maturidade (como será visto no Cap. 4, a maturidade não serve como indicação da resistência do concreto).

Para não ter que resolver a equação a cada resultado de ensaio, criaram um nomograma, em que entrando-se com o resultado do ensaio em idade jovem e a maturidade, lia-se a resistência potencial mínima aos 28 dias.

1.13.2 Método Proposto por Ramakrishanan e Dietz

RAMAKRISHANAN e DIETZ (60) desenvolveram estudos sobre dois métodos de ensaio acelerado, um empregando água em ebulição e outro água quente.

No método de ebulição os corpos de prova eram curados normalmente por 26 horas após moldagem e a seguir colocados por 3 h 30 min em água em ebulição em 1 h, eram esfriados, capeados e ensaiados.

No método de água quente, 2 h após a moldagem, os corpos de prova eram colocados em água a 75°C por 24 h e ensaiados com 28 h de idade.

Comparando os resultados destes dois ensaios com os resultados do método modificado de ebulição e do método de água quente da ASTM, o método de água quente proposto pelos autores apresentou resultados de resistência mais elevados. O método de ebulição proposto pelos autores apresentou os mesmos resultados do método modificado de ebulição da ASTM.

1.13.3 Método Proposto por Brockenbrough e Larason

BROCKENBROUGH e LARASON (14) propuseram um método de ensaio acelerado usando água a 38°C como meio de cura acelerada, após estudar métodos usando água a 32°C , 38°C , 43°C , 54°C e 66°C . A temperatura de 38°C tinha as vantagens de segurança para os técnicos, o choque térmico ser pequeno e não introduzir mudanças no processo de endurecimento do concreto.

O método tinha o seguinte ciclo de ensaio: 15 min após o início da moldagem, iniciava-se a cura acelerada em água a 38°C por 23 h 30 min. Os corpos de prova eram removidos, desmoldados e ensaiados com idade de 24 h.

1.13.4 Método Proposto por Kalyanasundaram e Kurien

KALYANASUNDARAM e KURIEN (31) estudaram, na Índia, dois métodos de ensaio acelerado para controlar concreto com resistência variando de 15 a 60 MPa.

No primeiro método estudado, os corpos de prova, 30 min após mistura, eram curados em água a 60°C por 23h. Em 30 min eram esfriados e ensaiados.

O outro método estudado consistia em curar normalmente por 24 h, depois submeter a cura acelerada em água a 85°C por 3 h 30 min e em 1 h esfriar e testar os corpos de prova.

Adotaram o segundo método por ter apresentado resultados de previsão mais precisos e a cura acelerada se processar por mais curto período de tempo.

1.14 Métodos Propostos por Collet

COLLET (16) estudou vários métodos de ensaio acelerado: o método modificado de ebulição, o método de cura autógena, um método usado na França e outro na Inglaterra.

O método usado na França, pela Electricité de France (EDF), tinha o seguinte ciclo: imediatamente após a moldagem os corpos de prova (cilindros de diâmetro 11 cm e 22 cm de altura) eram colocados em água a 60°C e curados por 23 h, em 1 h eram esfriados e ensaiados.

No método usado na Inglaterra, os corpos de prova (cubos de 10 cm) eram colocados em água a 20°C, entre 1 h e 3 h após a moldagem, dependendo do tipo de cimento e composição do concreto. Em 2 h a temperatura da água era elevada de 82°C e assim mantida por 14 h, os corpos de prova eram esfriados por 1 h a 2 h e a seguir ensaiados.

1.15 Método Proposto por Nasser

NASSER (52) propôs o seguinte método de ensaio acelerado de concreto: os cilindros de 7,5 cm de diâmetro por 15 cm de altura eram moldados dentro de um aparelho especial e comprimidos com a pressão de 10,5 MPa por um pistão hidráulico. Ao redor dos moldes, resistências elétricas aqueciam os corpos de prova à temperatura de 149°C por 3 h; a seguir eram esfriados por 2 h, retirados do molde especial e ensaiados. A temperatura do corpo de prova, na hora do ensaio, era de 68°C. Os resultados eram usados para prever resistência de corpos de prova de diâmetro 15 cm e altura 30 cm aos 7 e 28 dias após cura normal.

2 EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

2.1 Medidas de Eficiência

Usaremos três medidas para analisar a eficiência dos métodos de ensaio acelerado da resistência do concreto: o coeficiente de aceleração, o afastamento padrão e o coeficiente de afastamento. Não usaremos o coeficiente de correlação como medida de eficiência porque, como notou ARNI (8), seu uso depende de várias suposições estatísticas sobre os dados que, se não forem satisfeitas, conduzirão a uso inútil e incorreto. O uso do coeficiente de correlação só tem valor quando há relações estatísticas entre 2 valores e coleta-se uma amostra aleatória de uma população normal bivariada e mede-se duas características em cada item da amostra.

O coeficiente de aceleração é a razão entre a resistência obtida no ensaio acelerado e a resistência com cura normal durante um prazo pré-estabelecido. Os resultados de ensaios acelerados são sempre menores que os resultados de ensaios com cura padrão, YOKOMISHI e HAYASHI (78); por isso o coeficiente de aceleração terá sempre valores menores que a unidade, podendo ser usado como indicação da capacidade que o método de ensaio acelerado tem de fornecer resultados próximos dos resultados obtidos em ensaios com cura normal.

O afastamento padrão é a raiz quadrada positiva da variância em relação à regressão, DRAPER e SMITH (19). A variância em relação à regressão é definida, COSTA NETO (18), pela fórmula:

$$s_v^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m} \quad (2.1)$$

$$s_v = + \sqrt{s_v^2} \quad (2.2)$$

onde:

y_i = valor observado.

\hat{y}_i = valor ajustado pela equação de regressão.

n = número de observações.

m = parâmetros da equação de regressão estimados a partir das observações.

s_v^2 = variância em relação à regressão.

s_v = afastamento padrão.

O coeficiente de afastamento é o quociente entre o afastamento padrão e a média das observações, \bar{y} :

$$\delta_v = \frac{s_v}{\bar{y}} \quad (2.3)$$

O afastamento padrão e o coeficiente de afastamento indicam a dispersão das observações em tórno da curva de regressão; portanto, quanto menores forem seus valores mais precisos serão os valores estimados pela curva de regressão.

Todas as medidas apresentadas foram calculadas a partir de dados coletados nas referências citadas ao longo do capítulo.

2.2 Eficiência do Método Proposto por Akroyd

Durante o desenvolvimento do método modificado de ebulição, os ensaios realizados por AKROYD (3) proporcionaram os seguintes resultados: para a previsão da resistência do concreto aos 7 dias de idade, coeficiente de aceleração 0,656, afastamento padrão 2,861 MPa e coeficiente de afastamento 0,115; para a previsão da resistência aos 28 dias, coeficiente de aceleração 0,462, afastamento padrão 2,914 MPa e coeficiente de afastamento 0,085. Os resultados foram obtidos usando-se seis cimentos portland comuns e seis dosagens diferentes.

CAMERON (15) usou esse método para o controle do concreto empregado na construção de um edifício em Londres. Obteve coeficiente de aceleração 0,681, afastamento padrão 2,026 MPa e coeficiente de afastamento 0,065, para previsão da resistência aos 7 dias de idade e coeficiente de aceleração 0,510, afastamento padrão 2,956 MPa e coeficiente de afastamento 0,072, para previsão da resistência aos 28 dias de idade.

O método modificado de ebulição foi empregado para o controle de concreto em diversas obras, no Canadá, por Malhotra e colaboradores.

MALHOTRA e ZOLDNERS (38) usaram o método modificado de ebulição para o controle do concreto fornecido por três usinas misturadoras. Os resultados dos ensaios acelerados eram usados para prever a resistência aos 28 dias. Foram ensaiados concretos com aditivos (incorporadores de ar, redutores de água, retardadores de pega e Ca Cl_2) e sem aditivos. Os resultados obtidos foram: coeficiente de aceleração 0,427, afastamento padrão 2,065 MPa e coeficiente de afastamento 0,066.

MALHOTRA e BAUSET (41) empregaram esse método para a Quebec Hydro-Electric Commission, Ottawa, Canadá, durante a construção de uma barragem em Outardes - 3. O método era usado para prever a resistência do concreto aos 91 dias de idade; obtiveram coeficiente de aceleração 0,199, afastamento padrão 2,520 MPa e coeficiente de afastamento 0,096.

MALHOTRA e BERWANGER (42) empregaram o método para verificar a rapidez com que a resistência do concreto aos 28 dias podia ser prevista. Empregaram concreto fornecido por uma usina misturadora da região de Ottawa, Canadá, obtendo os seguintes resultados: coeficiente de aceleração 0,456, afastamento padrão 2,724 MPa e coeficiente de afastamento 0,081. Para prever a resistência aos 7 dias, os resultados foram coeficiente de aceleração 0,563, afastamento padrão 2,182 MPa e coeficiente de afastamento 0,082.

MALHOTRA (43) empregou o método no controle de concreto leve (usando argila expandida como agregado graúdo) obtendo para a previsão da resistência aos 28 dias: coeficiente de aceleração 0,443, afastamento padrão, 2,065 MPa e coeficiente de afastamento 0,050.

LOPEZ e BARRERA (36) realizaram cinco séries de ensaios com o método modificado de ebulição para controlar a qualidade do concreto produzido por 7 usinas da cidade do México.

Os resultados dos ensaios acelerados eram usados para prever a resistência aos 28 dias, com coeficiente de aceleração 0,474, afastamento padrão 2,437 MPa e coeficiente de afastamento 0,113.

No programa de ensaios desenvolvidos pela American Society for Testing and Materials para escolher os métodos de ensaio acelerado de concreto e realizados pelos 9 laboratórios, citados por WILLS (77), foram usados cimento portland comum e de alta resistência inicial, aditivo incorporador de ar e retardador de pega. O consumo de cimento era de 265, 325 e 385 Kg/cm³.

Aplicou-se análise de regressão aos dados, considerando-se isoladamente cada laboratório e os resultados obtidos com cada um dos conjuntos de materiais.

TABELA 1

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaios Acelerados da ASTM, usando o método modificado de ebulição e cimento portland comum, para prever a resistência aos 28 dias.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
1	0,558	1,371	0,129
2	0,585	1,230	0,100
3	0,423	0,809	0,168
4	0,439	4,113	0,614
5	0,471	1,617	0,213
6	0,414	1,266	0,184
7	0,500	1,898	0,180

TABELA 2

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaios Acelerados da ASTM, usando método modificado de ebulição e cimento de alta resistência inicial, para prever a resistência aos 28 dias.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
1	0,621	0,668	0,044
2	0,691	1,301	0,074
3	0,554	1,090	0,109
4	0,522	2,074	0,170
5	0,614	1,266	0,088
6	0,559	0,914	0,069
7	0,595	3,551	0,252
8	0,586	2,215	0,142
9	0,699	3,129	0,239

Usando-se um cimento portland com calor de hidratação moderado, os laboratórios 8 e 9 obtiveram para o coeficiente de aceleração, os resultados 0,377 e 0,322; e para o afastamento padrão 1,582 e 2,531 e coeficiente de afastamento de 0,273 e 0,779.

FALCÃO BAUER e OLIVAN (21) usaram o método modificado de ebulição, no Brasil, obtendo os seguintes resultados: para prever a resistência aos 28 dias coeficiente de aceleração 0,430, afastamento padrão 3,419 MPa e coeficiente de afastamento 0,146.

GHOSH, et alii (26), na Índia, usaram o método para controlar o concreto empregado em pavimentos rígidos através de ensaios de compressão e flexão. Eram ensaiados, no método acelerado e com cura normal, cubos de 10 cm de aresta e prismas de 10 cm por 10 cm de seção transversal e 50 cm de comprimento. Os resultados dos ensaios acelerados eram usados para prever a resistência à compressão e à flexão aos 7 e 28 dias.

Para prever a resistência à compressão aos 7 dias obtiveram os seguintes resultados: coeficiente de aceleração 0,589, afastamento padrão 1,170 MPa, e coeficiente de afastamento 0,066; para prever resistência aos 28 dias: coeficiente de aceleração 0,385, afastamento padrão 1,720 MPa e coeficiente de afastamento 0,064.

Para prever a resistência à flexão aos 7 dias os resultados foram: coeficiente de aceleração 0,412, afastamento padrão 0,350 MPa e coeficiente de afastamento 0,148; para prever a mesma resistência aos 28 dias, os resultados foram: coeficiente de aceleração 0,281, afastamento padrão 0,370 MPa e coeficiente de afastamento 0,108.

VILLARREAL (74) usou o método modificado de ebulição para prever a resistência à tração do concreto por compressão diametral aos 28 dias e para prever, também, a resistência à tração na flexão. Para prever a resistência à tração eram ensaiados no método acelerado e aos 28 dias, cilindros de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura em compressão diametral; para prever a resistência à tra

ção na flexão eram ensaiados cilindros de 15 cm por 30 cm, no método acelerado e aos 28 dias, prismas de seção transversal 15 cm por 15 cm e 50 cm de comprimento. Fazia-se a correlação entre o ensaio acelerado da resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão da viga curada normalmente por 28 dias.

Os resultados obtidos foram: para prever resistência à tração por compressão diametral: coeficiente de aceleração 0,487, afastamento padrão 0,264 MPa e coeficiente de afastamento 0,089; para prever a resistência à tração na flexão: coeficiente de aceleração 0,270, afastamento padrão 0,496 MPa e coeficiente de afastamento 0,092.

MALHOTRA (44), realizou investigações com o mesmo método de Villarreal. Ensaiou cilindros de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura com o método acelerado e aos 28 dias e prismas com seção transversal de 9 cm por 10 cm de comprimento de 47 cm, aos 28 dias. Obteve os seguintes resultados: para prever a resistência à tração por compressão diametral: coeficiente de aceleração 0,555, afastamento padrão 0,248 MPa e coeficiente de afastamento 0,077; para prever a resistência à tração na flexão coeficiente de aceleração 0,305, afastamento padrão 0,403 MPa e coeficiente de afastamento 0,069.

NAIK (51), usando o método modificado de ebulição, com ciclo de 24 h, obteve os seguintes resultados: para prever a resistência à compressão axial aos 28 dias, coeficiente de aceleração 0,406, afastamento padrão 2,194 MPa e coeficiente de afastamento 0,058.

RODWAY e LENTZ (65), usaram o método modificado de ebulição para controlar o concreto empregado na construção de uma usina hidrelétrica no Canadá. Empregou-se cimento portland comum de três fontes diferentes. Os resultados do ensaio acelerado eram usados para prever a resistência aos 7 e 28 dias. Calcularam o afastamento padrão, obtendo os seguintes valores: para estimar resistência aos 7 dias: fonte 1 2,390 MPa, fonte 2 1,898 MPa e fonte 3 1,793 MPa; para estimar a resistência aos 28 dias: fonte 1 3,726 MPa, fonte 2 2,390 MPa e fonte 3 2,559 MPa.

2.3 Eficiência dos Método Proposto por Thompson

THOMPSON (71), nos ensaios que fez para desenvolver o método de ensaio acelerado em água quente, obteve os seguintes resultados: para prever a resistência aos 7 dias: coeficiente de aceleração 0,563, afastamento padrão 1,371 MPa e coeficiente de afastamento 0,044; para prever a resistência aos 28 dias, coeficiente de aceleração 0,441, afastamento padrão 3,041 MPa e coeficiente de afastamento 0,063.

No programa de ensaios da American Society for Testing and Materials, o método de água quente de Thompson foi estudado da mesma maneira que o método modificado de ebulição, WILLS (77).

Com o uso de cimento portland comum, os resultados estão apresentados na tabela 3, usando cimento de alta resistência inicial os resultados estão apresentados na tabela 4.

Quando se utilizou cimento portland de moderado calor de hidratação, nos laboratórios 8 e 9, os resultados foram: coeficientes de aceleração 0,291 e 0,238; afastamentos padrões de 2,004 MPa em ambos os coeficientes de afastamento de 0,599 e 1,128.

TABELA 3

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaios Acelerados da ASTM, usando método de Thompson e cimento portland comum, para prever a resistência aos 28 dias.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
1	0,510	2,145	0,243
2	0,419	1,898	0,279
3	0,301	0,879	0,146
4	0,370	2,953	0,495
5	0,375	3,762	0,779
6	0,340	1,652	0,361
7	0,432	2,883	0,368

TABELA 4

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaio Acelerados da ASTM, usando método de Thompson e cimento de alta resistência inicial, para prever a resistência aos 28 dias.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
1	0,578	0,879	0,060
2	0,587	1,090	0,078
3	0,417	1,969	0,332
4	0,506	2,355	0,197
5	0,590	1,617	0,124
6	0,490	1,301	0,135
7	0,568	3,691	0,299
8	0,512	2,812	0,231
9	0,679	2,109	0,164

Oito laboratórios do Corpo de Engenheiros do Exército norte-americano, empregaram o método de ensaio acelerado de Thompson, usando dois cimentos portland comuns e aditivos: incorporador de ar, redutor de água, acelerador e retardador de pega. Os resultados conseguidos foram, LAMOND (33): coeficiente de aceleração 0,492, afastamento padrão 2,654 MPa e coeficiente de afastamento 0,133, para previsão da resistência do concreto aos 7 dias; para previsão da resistência aos 28 dias, obtiveram coeficiente de aceleração 0,351, afastamento padrão 4,868 MPa e coeficiente de afastamento 0,175, e para prever a resistência aos 90 dias, obtiveram coeficiente de aceleração 0,206, afastamento padrão 4,401 MPa e coeficiente de afastamento 0,142.

O Laboratório Central de Engenharia Civil, de Ilha Solteira, da Companhia Energética de São Paulo (CESP) (17) na implantação do método de ensaio acelerado de Thompson, empregou concreto com pozolana e sem pozolana. Os resultados dos ensaios acelerados de concreto sem pozolana eram usados para prever a resistência aos 7 e 28 dias, após cura normal. Os resultados foram: para prever resistência aos 7 dias, coeficiente de aceleração de 0,363, afastamento padrão de 1,571 MPa e coeficiente de afastamento de 0,080; para prever a resistência aos 28 dias, coeficiente de aceleração de 0,274, afastamento padrão 1,995 MPa e coeficiente de afastamento 0,077.

Os resultados dos ensaios de concreto com pozolana eram usados para prever resistência aos 7, 28 e 90 dias. Para prever a resistência aos 7 dias os resultados foram: coeficiente de aceleração de 0,293, afastamento padrão de 1,433 MPa e coeficiente de afastamento 0,089; para prever a resistência aos 28 dias obtiveram coeficiente de aceleração de 0,178, afastamento padrão de 3,182 MPa e coeficiente de afastamento 0,123; para prever a resistência aos 90 dias, os resultados foram: coeficiente de afastamento 0,148, afastamento padrão 3,296 MPa e coeficiente de afastamento 0,106.

2.4 Eficiência do Método Proposto pela Comissão de Ensaaios Acelerados da Institution of Civil Engineers.

A Comissão de Ensaaios Acelerados da Institution of Civil Engineers (29), no desenvolvimento do método de ensaio acelerado fez ensaios utilizando cimento portland comum e de alta resistência inicial. Para se prever a resistência do concreto aos 28 dias, os resultados foram: coeficiente de aceleração 0,548, afastamento padrão 3,931 MPa e coeficiente de afastamento 0,088.

RAMASWAMY e NAMBIAR (63) usaram esse método de ensaio acelerado para controlar a qualidade de concreto com consumo de cimento de 240, 400, 360, 475 e 535 kg/m³.

Para prever a resistência aos 7 dias os resultados foram: coeficiente de aceleração 0,634, afastamento padrão 2,151 MPa e coeficiente de afastamento 0,096; para prever a resistência aos 28 dias, os resultados foram: coeficiente de aceleração 0,432, afastamento padrão 3,040 MPa e coeficiente de afastamento 0,095.

2.5 Eficiência dos Métodos Propostos por Smith.

SMITH e TIEDE (69), no desenvolvimento do método de ensaio acelerado de cura autógena usaram cinco tipos de cimento portland e aditivos retardadores de pega. Utilizaram o método para prever a resistência do concreto aos 28 dias, obtendo coeficiente de aceleração 0,557, afastamento padrão 4,970 MPa e coeficiente de afastamento 0,131.

Os resultados obtidos com o método de cura autógena, pelos 9 laboratórios do programa de ensaios acelerados da American Society for Testing and Materials, para padronização de métodos de ensaios acelerados foram, WILLS (77): para o cimento portland comum, os da tabela 5 e para o cimento portland de alta resistência inicial os da tabela 6.

Apenas o laboratório 8 usou a cura autógena para concretos com cimento de moderado calor de hidratação obtendo coeficiente de aceleração 0,607, afastamento padrão de 0,984 MPa e coeficiente de afastamento de 0,079.

TABELA 5

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaios Acelerados da ASTM usando método de cura aut^ogena e cimento portland comum.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
2	0,704	4,148	0,223
4	0,537	1,758	0,204
9	0,402	2,144	0,427

TABELA 6

Resultados dos ensaios acelerados do Programa de Ensaios Acelerados da ASTM usando método de cura aut^ogena e cimento de alta resistência inicial.

laboratório	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
2	0,775	1,512	0,066
4	0,662	1,969	0,107
9	0,763	1,477	0,093
8	0,723	0,422	0,022

BISAILLION et alii (12), (13) empregaram o método de cura autógena para controle do concreto empregado em construção de uma rodovia no Canadá. Os resultados do ensaio acelerado eram usados para prever a resistência do concreto à compressão com 28 dias de idade.

Os resultados de eficiência foram: coeficiente de aceleração 0,656, afastamento padrão 2,779 MPa e coeficiente de afastamento 0,077.

BICKLEY (11) usou o método da cura autógena para controlar o concreto empregado na construção de uma torre de 457 m no Canadá.

O método era usado para prever a resistência aos 7, 28 e 90 dias. Foram utilizados cimento portland comum, cimento de baixo calor de hidratação. O cimento de baixo calor de hidratação foi sendo gradativamente substituído por cimento portland comum; a uma taxa de 10% à medida em que a temperatura ambiente diminuía.

Para cimento portland comum, os resultados foram:

idade da previsão	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
7	0,718	1,765	0,051
28	0,606	2,398	0,053
90	0,546	2,517	0,051

Para o cimento de baixo calor de hidratação os resultados foram:

idade da previsão	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
7	0,713	2,362	0,068
28	0,522	2,503	0,052
90	0,453	3,438	0,063

Para o cimento resultante da mistura de metade de cimento portland comum e metade de cimento de baixo calor de hidratação, obtiveram os resultados:

idade da previsão	coeficiente de aceleração	afastamento padrão (MPa)	coeficiente de afastamento
7	0,742	2,039	0,056
28	0,560	2,116	0,044
90	0,493	3,403	0,062

2.6 Eficiência do Método Proposto por Dutron

DUTRON (20) ensaiou, com seu método, concreto feito com cimento portland comum, de alta resistência inicial e cimento de alto forno.

Os resultados eram usados para prever a resistência do concreto aos 28 dias, obtendo-se as seguintes medidas de eficiência: coeficiente de aceleração 0,595, afastamento padrão 4,921 MPa e coeficiente de afastamento 0,110.

2.7 Eficiência do Método Proposto por Jarocki

O concreto usado por JAROCKI (30) era feito com cimento de escoria de alto forno com consumo de 243 kg/m³ de cimento.

Os resultados obtidos para prever a resistência aos 28 dias foram: coeficiente de aceleração 0,542, afastamento padrão 1,660 MPa e coeficiente de afastamento 0,080.

2.8 Eficiência do Método Proposto por Cornwell

MALHOTRA (37) empregou o método de Cornwell para o controle de concreto usando os resultados de ensaio acelerado para prever a resistência aos 28 dias.

As medidas de eficiência obtidas foram: coeficiente de aceleração 0,394, afastamento padrão 2,456 MPa e coeficiente de afastamento 0,084.

2.9 Eficiência do Método Proposto por Ramakrishnan e Dietz.

RAMAKRISHNAN e DIETZ (60), (61) empregaram concreto fabricado com cimento portland comum e cimento portland expansivo. Obtiveram os seguintes resultados: coeficiente de aceleração 0,410, afastamento padrão 3,368 MPa e coeficiente de afastamento 0,103.

2.10 Eficiência do Método Proposto por Brockenbrough e Larason

BROCKENBROUGH e LARASON (14) ensaiaram concreto de cimento portland comum com os aditivos incorporador de ar e retardador de pega.

Os resultados obtidos foram: coeficiente de aceleração 0,463, afastamento padrão 2,522 MPa e coeficiente de afastamento 0,086.

2.11 Eficiência do Método Proposto por Kalyanasundaram e Kurien

Com esse método de ensaio acelerado, KALYANASUNDARAM e KURIEN (31) procuraram controlar concreto fabricado com 11 amostras diferentes de cimento em uma usina misturadora, em Bombaim na Índia.

A partir dos resultados do ensaio acelerado, previam a resistência do concreto aos 7 e 28 dias, com os seguintes resultados: coeficiente de aceleração 0,627, afastamento padrão 1,423 MPa e coeficiente de afastamento 0,049, para estimar a resistência aos 7 dias e coeficiente de aceleração 0,464, afastamento padrão 1,927 MPa e coeficiente de afastamento 0,050, para estimar resistência aos 28 dias.

2.12 Eficiência dos Métodos Propostos por Collet

COLLET (16), ao empregar os quatro métodos de

ensaio acelerado, calculou o coeficiente de aceleração de cada método para estimar a resistência aos 28 dias de idade. Os corpos de prova, ensaiados em todos os métodos, eram cubos de 15,8 cm de aresta. Os resultados foram: com o método modificado de ebulição 0,60 (cimento tipo P40), 0,52 (cimento tipo HK40) e 0,63 (cimento tipo P50); com método de água quente a 60°C 0,56, 0,59, 0,62, respectivamente; com o método de água quente a 82°C 0,67, 0,76, 0,85, respectivamente.

Os corpos de prova, submetidos à cura autógena, foram ensaiados tendo as faces retificadas e não retificadas. Com as faces retificadas, os coeficientes de aceleração foram: 0,71, 0,52 e 0,77 para cada tipo de cimento e com as faces não retificadas, os resultados foram: 0,59, 0,45 e 0,66 respectivamente.

TABELA 7

Resumo das medidas de eficiência obtidas com a utilização do método modificado de ebulição.

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	observações
0,656	2,861	0,115	7 d	3	
0,462	2,914	0,085	28 d	3	
0,681	2,026	0,065	7 d	15	
0,510	2,956	0,072	28 d	15	
0,427	2,065	0,066	28 d	38	
0,199	2,520	0,096	91 d	41	
0,456	2,724	0,081	28 d	42	
0,443	2,065	0,050	28 d	43	
0,474	2,437	0,113	28 d	36	
0,558	1,371	0,129	28 d	77 ¹	lab. 1
0,585	1,230	0,100	28 d	77 ¹	lab. 2
0,423	0,809	0,168	28 d	77 ¹	lab. 3
0,439	4,113	0,614	28 d	77 ¹	lab. 4
0,471	1,617	0,213	28 d	77 ¹	lab. 5
0,414	1,266	0,184	28 d	77 ¹	lab. 6
0,500	1,898	0,180	28 d	77 ¹	lab. 7
0,621	0,668	0,044	28 d	77 ²	lab. 1
0,691	1,301	0,074	28 d	77 ²	lab. 2
0,554	1,090	0,109	28 d	77 ²	lab. 3
0,522	2,074	0,170	28 d	77 ²	lab. 4
0,614	1,266	0,088	28 d	77 ²	lab. 5
0,559	0,914	0,069	28 d	77 ²	lab. 6
0,595	3,551	0,252	28 d	77 ²	lab. 7
0,586	2,215	0,142	28 d	77 ²	lab. 8
0,699	3,129	0,239	28 d	77 ²	lab. 9
0,377	1,582	0,273	28 d	77 ³	lab. 8
0,322	2,531	0,779	28 d	77 ³	lab. 9
0,430	3,419	0,146	28 d	21	
0,589	1,170	0,066	7 d	26 ⁴	

(continuação da tabela 7)

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	observações
0,385	1,720	0,064	28 d	26 ⁴	
0,412	0,350	0,148	7 d	26 ⁵	
0,281	0,370	0,108	28 d	26 ⁵	
0,487	0,264	0,089	28 d	74 ⁶	
0,270	0,496	0,092	28 d	74 ⁵	
0,555	0,248	0,077	28 d	44 ⁶	
0,305	0,403	0,069	28 d	44 ⁵	
0,406	2,194	0,058	28 d	51	
-	2,390	-	7 d	65 ⁷	
-	3,726	-	28 d	65 ⁷	
-	1,898	-	7 d	65 ⁸	
-	2,390	-	28 d	65 ⁸	
-	1,793	-	7 d	65 ⁹	
-	2,559	-	28 d	65 ⁹	
0,60	-	-	28 d	16 ¹⁰	
0,52	-	-	28 d	16 ¹¹	
0,63	-	-	28 d	16 ¹²	

- (1) - concreto feito com cimento portland comum
(2) - concreto feito com cimento de alta resistência
(3) - concreto feito com cimento de calor de hidratação moderado
(4) - ensaio à compressão
(5) - ensaio à flexão
(6) - ensaio à compressão diametral
(7) - concreto feito com cimento da fonte M
(8) - concreto feito com cimento da fonte O
(9) - concreto feito com cimento da fonte A
(10) - concreto feito com cimento tipo P40 das normas belgas
(11) - concreto feito com cimento tipo HK40 das normas belgas

(continuação da tabela 7)

(12) - concreto feito com cimento tipo P50 das normas
belgas

TABELA 8

Resumo das medidas de eficiência obtidas com a utilização dos métodos acelerados com cura em água quente a diversas temperaturas.

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	tempe_ratura	obs.
0,563	1,371	0,044	7 d	71	35°C	
0,441	3,041	0,063	28 d	71	35°C	
0,510	2,145	0,243	28 d	77 ¹	35°C	1ab.1
0,419	1,898	0,279	28 d	77 ¹	35°C	1ab.2
0,301	0,879	0,146	28 d	77 ¹	35°C	1ab.3
0,370	2,953	0,495	28 d	77 ¹	35°C	1ab.4
0,375	3,762	0,779	28 d	77 ¹	35°C	1ab.5
0,340	1,652	0,361	28 d	77 ¹	35°C	1ab.6
0,432	2,893	0,368	28 d	77 ¹	35°C	1ab.7
0,578	0,879	0,060	28 d	77 ²	35°C	1ab.1
0,587	1,090	0,078	28 d	77 ²	35°C	1ab.2
0,417	1,969	0,332	28 d	77 ²	35°C	1ab.3
0,506	2,355	0,197	28 d	77 ²	35°C	1ab.4
0,590	1,617	0,124	28 d	77 ²	35°C	1ab.5
0,490	1,301	0,135	28 d	77 ²	35°C	1ab.6
0,568	3,691	0,299	28 d	77 ²	35°C	1ab.7
0,512	2,812	0,231	28 d	77 ²	35°C	1ab.8
0,679	2,109	0,164	28 d	77 ²	35°C	1ab.9
0,291	2,004	0,599	28 d	77 ³	35°C	1ab.8
0,238	2,004	1,128	28 d	77 ³	35°C	1ab.9
0,492	2,654	0,133	7 d	33	35°C	
0,351	4,868	0,175	28 d	33	35°C	
0,363	1,571	0,080	7 d	17 ⁴	35°C	
0,274	1,995	0,077	28 d	17 ⁴	35°C	
0,293	1,433	0,089	7 d	17 ⁵	35°C	
0,178	3,182	0,123	28 d	17 ⁵	35°C	
0,148	3,296	0,106	90 d	17 ⁵	35°C	
0,548	3,931	0,088	28 d	29	55°C	

(continuação da tabela 8)

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	tempe_ ratura	obs.
0,634	2,151	0,096	7 d	63	55°C	
0,432	3,040	0,095	28 d	63	55°C	
0,595	4,921	0,110	28 d	20	60°C	
0,542	1,660	0,080	28 d	30	variável	
0,394	2,456	0,084	28 d	37	74°C	
0,410	3,368	0,103	28 d	60	75°C	
0,463	2,522	0,086	28 d	14	38°C	
0,627	1,423	0,049	7 d	31	85°C	
0,464	1,927	0,050	28 d	31	85°C	
0,56	-	-	28 d	16	60°C	
0,59	-	-	28 d	16	60°C	
0,62	-	-	28 d	16	60°C	
0,67	-	-	28 d	16	82°C	
0,76	-	-	28 d	16	82°C	
0,85	-	-	28 d	16	82°C	

- (1) - concreto feito com cimento portland comum
(2) - concreto feito com cimento de alta resistência inicial
(3) - concreto feito com cimento de calor de hidratação moderado
(4) - concreto sem pozolana
(5) - concreto com pozolana

TABELA 9

Resumo das medidas de eficiência obtidas com a utilização do método acelerado com cura autôgena.

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	observações
0,557	4,970	0,131	28 d	69	
0,656	2,779	0,077	28 d	12	
0,704	4,148	0,223	28 d	77 ¹	lab. 2
0,537	1,758	0,204	28 d	77 ¹	lab. 4
0,402	2,144	0,427	28 d	77 ¹	lab. 9
0,775	1,512	0,066	28 d	77 ²	lab. 2
0,662	1,969	0,107	28 d	77 ²	lab. 4
0,763	1,477	0,093	28 d	77 ²	lab. 9
0,723	0,422	0,022	28 d	77 ²	lab. 8
0,607	0,984	0,079	28 d	77 ³	lab. 8
0,718	1,765	0,051	7 d	11 ⁴	
0,606	2,398	0,053	28 d	11 ⁴	
0,546	2,517	0,051	90 d	11 ⁴	
0,713	2,362	0,068	7 d	11 ⁵	
0,522	2,503	0,052	28 d	11 ⁵	
0,453	3,438	0,063	90 d	11 ⁵	
0,742	2,093	0,056	7 d	11 ⁶	
0,560	2,116	0,044	28 d	11 ⁶	
0,493	3,403	0,062	90 d	11 ⁶	
0,71	-	-	28 d	16 ⁷	c.p. retif.
0,52	-	-	28 d	16 ⁸	c.p. retif.
0,77	-	-	28 d	16 ⁹	c.p. retif.
0,59	-	-	28 d	16 ⁷	c.p.não ret.
0,45	-	-	28 d	16 ⁸	c.p.não ret.
0,66	-	-	28 d	16 ⁹	c.p.não ret.

(1) - concreto feito com cimento portland comum

(2) - concreto feito com cimento de alta resistência inicial

(continuação da tabela 9)

- (3) - concreto feito com cimento de calor de hidratação moderado
- (4) - concreto feito com cimento portland comum
- (5) - concreto feito com cimento de baixo calor de hidratação
- (6) - concreto feito com cimento obtido da mistura, em partes iguais, dos dois anteriores.
- (7) - concreto feito com cimento tipo P40 das normas belgas
- (8) - concreto feito com cimento tipo HK40 das normas belgas
- (9) - concreto feito com cimento tipo P50 das normas belgas

TABELA 10

Resumo das medidas de eficiência obtidas com a utilização de outros métodos.

coef. acel.	afast. pad.	coef. afast.	idade prev.	nº ref. bibl.	observações
0,490	4,169	0,116	28 d	46	met.Mihail
0,640	3,641	0,192	7 d	52	met.Nasser
0,451	4,127	0,157	28 d	52	met.Nasser

3 CRÍTICA DOS MÉTODOS DE ENSAIO ACELERADO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

3.1 Introdução

Com o uso continuado dos vários métodos de ensaio acelerado do concreto, foram aparecendo os fatores que afetavam os resultados dos ensaios acelerados e afetavam, também, a relação ou estimativa da resistência do concreto em idade mais avançada, a partir dos resultados acelerados.

A influência de cada fator dependia tanto do método em si, como do conjunto de materiais empregados, isto é, para alguns materiais o método proporcionava bons resultados e para outros materiais apresentava resultados maus.

Os primeiros métodos propostos (Gerend, Patch e King) foram logo abandonados sem terem tido larga aplicação.

O método de Gerend foi abandonado, após alguns anos de uso, porque necessitava de aparelhagem muito complicada (autoclave, registro de pressão e de tempo de exposição a esta pressão) e porque apresentava, para corpos de prova coletados na obra, resultados de ensaios acelerados, diferindo de até 50%. Isto ocorria porque os corpos de prova eram muito afetados, durante a cura acelerada, por variações na qualidade e pressão do vapor e

pelo tempo de exposição ao vapor. Para contornar este problema, moldava-se em laboratório, em condições e com materiais rigorosamente controlados, corpos de prova pilotos para acompanhar os corpos de prova da obra; com isso o método complicou-se ainda mais, tornando-se de difícil aceitação pelos outros laboratórios.

O método de Patch apresentava relações entre resultados de ensaios aos 28 dias após cura normal e resultados de ensaios após cura acelerada que variavam entre 2,9 a 5,6. A grande variação era devida a mudanças na marca e tipo de cimento usado para fabricar o concreto. Isto ocorria, KING (32), porque os corpos de prova eram submetidos, muito cedo, a um regime de cura muito severo (temperatura de 90°C), logo após sua confecção.

KING (32), nos estudos de desenvolvimento do seu método concluiu que deveria haver um período de espera entre a mistura do concreto e início da cura acelerada para que a relação entre resultados de ensaios acelerados e resultados de ensaio com cura padrão aos 7 e aos 28 dias apresentassem menor dispersão em torno da curva de regressão. Concluiu, também, que concretos feitos com cimento portland de endurecimento rápido produziam maior dispersão dos resultados do que os concretos produzidos com cimento portland comum.

ORDMAN e BONDRE (56) efetuaram também diversos estudos, tanto sobre o método de King como sobre o próprio método para verificar a precisão da relação entre resultados de ensaios acelerados e resultados de ensaios com cura padrão aos 7 e 28 dias. O método, por eles desenvolvido, apresentava dispersão dos resultados em torno da curva de regressão por causa da variação da granulometria dos agregados e mudança no tipo de cimento.

Além desses fatores, concluíram que se não houvesse um controle rigoroso sobre a temperatura da câmara úmida, em que os corpos de prova permaneciam por 7 ou 28 dias, essa dispersão era ainda maior, e também concluí-

ram que concretos de alta resistência apresentavam resultados de ensaio acelerado mais dispersos que concretos com resistências mais baixas.

Os dois métodos de estufa foram abandonados, definitivamente, pois estudos de AKROYD (3) mostraram que dentro de uma estufa pode haver diferenças de temperaturas de até 40°C , dependendo do lugar em que se efetua a medida, ocasionando com isso, condições não uniformes de cura para os corpos de prova.

3.2 Método Modificado de Ebulição

AKROYD e SMITH-GANDER (2), (3) efetuaram diversos ensaios antes de optar pelo método modificado de ebulição, método que teve a mais ampla aceitação. Adotaram água como meio de cura por ser um meio de temperatura mais homogêneo que a estufa.

O período de espera entre fim da moldagem e início de cura acelerada podia ser de 1 h a 4 h sem afetar os resultados do ensaio acelerado se a temperatura da água fosse, no máximo, de 60°C . Se a temperatura da água fosse superior havia a necessidade de cura padrão inicial de 24 h.

A temperatura da água, na cura acelerada, tinha o seguinte efeito: quando a temperatura crescia até 80°C havia aumento efetivo na resistência acelerada, mas aumentando-se a temperatura de 80°C até a temperatura de ebulição da água, a elevação da resistência era desprezível. Por isso, no método modificado de ebulição adotou-se a cura em água em ebulição por ser esta temperatura mais fácil de ser mantida.

Estudaram períodos de cura acelerada desde 3 h 30 min até 12 h, chegando às seguintes conclusões: com períodos de cura de até 7 h havia grande aumento na resistência acelerada; a partir de 7 h até 9 h, a taxa de crescimento de resistência era tão pequena (2%) que podia ser desprezada; de 9 h em diante não havia mais crescimento na resistência acelerada. Escolheram 3 h 30 min

de cura acelerada por ser mais conveniente ao horário de trabalho do laboratório.

Compararam este método com o método de ebulição e o de estufa de King e concluíram que o primeiro apresentava maior dispersão dos resultados em torno da curva de regressão.

Concluíram ainda que os resultados da previsão de resistência em idades mais avançadas (7 ou 28 dias, neste caso) eram mais afetados pela variação na procedência dos agregados do que nas marcas de cimento. Então, sempre que houvesse mudança de agregados, haveria necessidade de determinação de nova curva de regressão.

Do mesmo modo que o método de King, aumentando-se a resistência do concreto, aumentava-se a dispersão dos resultados em torno da curva de regressão, AKROYD (3).

MALHOTRA e ZOLDNERS (38) usaram o método modificado de ebulição entre julho de 1963 e janeiro de 1964 para controlar concreto fornecido por 3 usinas misturadoras, ensaiando concreto fabricado em 106 betonadas. Para estimar a resistência aos 28 dias usaram a média de resultados de 3 ensaios acelerados. Concluíram que ao se usar 2 resultados ou apenas 1 resultado, a precisão da previsão diminuía. Combinando resultados de ensaios acelerados de todo o Canadá, conseguiram obter uma curva de regressão que previa a resistência do concreto aos 28 dias, com precisão de $\pm 15\%$; afirmando não ter havido influência dos diversos tipos de cimentos nos resultados acelerados; porém, quando a tolerância diminuía, esta influência não podia mais ser desprezada. Recomendaram, ainda, que a equação de regressão seja verificada sempre com relação à precisão da previsão de resistência em idades avançadas.

Quando se ensaiava concreto com resistência à compressão entre 14,1 e 28,1 MPa aos 28 dias, podia-se desprezar a influência de diferentes tipos de agregados nos resultados do ensaio acelerado. Mas quando a resistência ultrapassava este valor, tinha-se que estabelecer uma curva de regressão para cada tipo de agregado. O concreto ensaiado continha aditivos, o que pareceu não afe-

tar os resultados.

MALHOTRA (43) empregou ainda este método para controle de concreto feito com agregado leve, com cimento de alta resistência inicial e cimento de baixo calor de hidratação, concluiu que estes fatores não influenciaram o grau de correlação.

MALHOTRA e BAUSET (41) usaram o método modificado de ebulição durante a construção da barragem de Ouatardes-3, para prever a resistência do concreto aos 91 dias e verificaram que mudando-se o tipo de cimento havia necessidade de se mudar a curva de regressão. Verificaram ainda que para a estimativa da resistência aos 91 dias os resultados dos ensaios acelerados não reproduziam com a mesma precisão os resultados aos 91 dias após cura normal, porém a precisão dos ensaios acelerados era superior à precisão dos ensaios aos 3 e 7 dias com cura normal.

Além de mudar a curva de regressão, quando se mudava o cimento, mudava-se também o coeficiente de aceleração. Outro fator que afetava esta relação era o fator água-cimento, pois quanto maior o fator água-cimento maior o coeficiente de aceleração.

Concluíram que a precisão da previsão da resistência aos 91 dias, a partir dos resultados do ensaio acelerado, aumentava se fossem estabelecidas curvas de regressão para cada concreto.

Quando LOPES e BARRERA (36) empregaram o método, no México, observaram que a previsão da resistência aos 28 dias tinha maior precisão com concreto cuja resistência estava situada entre 7 e 16 MPa. Concretos com resistência inferior a 7 MPa ou superior a 16 MPa apresentavam maior dispersão nos resultados de ensaio acelerado. Verificaram que a cura acelerada podia ser iniciada entre 22 h e 25 h, após a moldagem dos corpos de prova, sem afetar os resultados do ensaio acelerado.

Nos estudos desenvolvidos pela subcomissão de ensaios acelerados da American Society for Testing and Materials, WILLS (77), foram estudados diversos fatores

que afetavam os resultados do ensaio acelerado: o método modificado de ebulição produziu coeficientes de aceleração maiores que o método de água quente; quando se aumentava o conteúdo de cimento no concreto o coeficiente de aceleração também aumentava; doses normais de aditivo retardador de pega não afetavam os resultados acelerados; cada laboratório obteve resultados diferentes dos outros laboratórios por empregar os materiais disponíveis na região.

Ao se usar o resultado de ensaio acelerado para prever a resistência aos 28 ou 364 dias, cada laboratório teve que obter sua própria curva de regressão, porque juntando-se todos os resultados de ensaios acelerados dos nove laboratórios, havia grande dispersão em torno de uma única curva de regressão.

RAMAKRISHNAN e DIETZ (60) notaram, em seus estudos, que os resultados do ensaio acelerado com o método modificado de ebulição sofriam pouca influência quando se mudava o tipo de cimento; mas eram mais sensíveis à mudança de moldes. Quando usaram moldes metálicos os resultados eram de 10 a 15% superiores aos resultados obtidos com o uso de moldes de papelão e de 3 a 6% quando se usava moldes plásticos.

Dilataram a cura normal, antes do início da cura acelerada, para 27 h e encontraram os mesmos resultados apresentados por cura normal durante 24 h.

FALCÃO - BAUER e OLIVAN (22) empregaram o método modificado de ebulição para controle de concreto utilizado na construção de uma usina siderúrgica e concluíram que a marca do cimento exercia influência sobre os resultados de ensaio acelerado.

GHOSH et alii (26), ao usar o método modificado de ebulição, notaram que a cura normal por 24 h antes da cura acelerada permitiu minimizar a incidência de fissuras por choque térmico, devido a expansão diferencial entre a fase líquida e os constituintes sólidos do concreto.

Obtiveram o mesmo coeficiente de aceleração quan

do se mantinha o mesmo agregado e alterava-se o conteúdo de cimento.

O efeito do agregado graúdo no coeficiente de aceleração do ensaio acelerado parecia ser devido à superfície do agregado. Compararam os resultados do coeficiente de aceleração do método com concretos feitos com seixo rolado e com pedra britada; provavelmente a expansão térmica diferencial, provocada por uma elevação rápida da temperatura, quebrava a fraca ligação entre a argamassa e agregado que tinha uma superfície mais lisa. Por isso, os resultados do coeficiente de aceleração eram menores com concretos feitos com seixo rolado do que com pedra britada.

Outro fator estudado foi a influência do grau de moagem do cimento; concluíram que quanto mais alto o grau de moagem, maior é o coeficiente de aceleração.

O coeficiente de aceleração no ensaio de compressão foi sempre maior do que o coeficiente de aceleração no ensaio a flexão, devido, talvez ao gradiente de temperatura (8 a 12°C) entre o núcleo e a superfície da viga (ensaiada à flexão) ser maior que no cubo (ensaiado à compressão).

NAIK (49), (50), (51), observou que a temperatura inicial do concreto não exercia influência nos resultados do ensaio acelerado; porém, durante a cura normal, antes da acelerada, a temperatura tinha que ser muito bem controlada para aumentar a precisão da previsão da resistência em idades mais avançadas, porque sem este controle rigoroso a dispersão dos resultados acelerados aumentava.

O tipo de molde (cilindros de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura ou prismas de 35,6 cm de altura com carga aplicada numa face de 10 cm por 10 cm) empregado e o cimento afetavam os resultados. Então, quando se obtinha uma curva de regressão para prever resistências em idades posteriores, baseando-se em resultados acelerados, a precisão da previsão aumentava se o laboratório adotasse uma curva para cada tipo de material empregado.

VILLARREAL (74) e MALHOTRA (44) empregaram o método modificado de ebulição para prever a resistência à

tração aos 28 dias através do ensaio de compressão diametral e prever o módulo de ruptura na flexão aos 28 dias. Apesar dos poucos ensaios efetuados os autores conseguiram a previsão dentro de limites de $\pm 15\%$.

Durante a construção de um tunel de 50 km, no México, TREJO e CASTRO (72), empregaram o método para controlrar 1 milhão de metros cúbicos de concreto, usado na parede do túnel; com o objetivo de estimar a resistência aos 28 dias a partir dos ensaios acelerados. Como o cimento e areia eram sempre da mesma procedência, os fatores que afetavam a previsão da resistência aos 28 dias foram: aditivo incorporador de ar e o agregado graudo. Uma desvantagem encontrada pelos autores, no método, foi a sua não adaptação ao dia normal de trabalho tendo que se fazer horas extras nos laboratórios de ensaio.

LAPINAS (34) usou este método, no Canadá, para o controle do concreto produzido por uma usina. A partir dos resultados de ensaios acelerados, previa-se a resistência aos 28 dias para controlar a qualidade do concreto produzido; conseguia-se prever tal resistência dentro de limites de $\pm 12\%$.

O autor concluiu que quanto mais uniforme fosse a qualidade do cimento mais precisas eram as estimativas de resistência aos 28 dias; criou, por isso, para cada cimento uma curva de regressão; contudo o método não foi usado amplamente pois comparações entre a resistência prevista e a resistência real, aos 28 dias, mostravam divergências.

COLLET (16) comparou o método modificado de ebullição com os dois métodos de água quente (60 e 82°C), concluiu que a resistência acelerada obtida era igual ao método com água a 60°C . A única vantagem que o método modificado de ebullição tinha sobre os outros dois era necessitar de aparelhagem mais simples para controle de temperatura.

3.3 Métodos de Água Quente

Foram propostos três métodos que, pela sua temperatura de cura, se aproximam do método modificado de ebulição. São eles: o método de Jarocki em que a cura se processava a 90°C , método de Vuorinen em que a cura era efetuada entre 80 e 85°C e o de Kalyanasundaram e Kurien que curava os corpos de prova a 85°C .

O método de JAROCKI (30) foi utilizado para proporcionar correções na dosagem do concreto devido a variabilidade dos materiais. Foi verificado que sempre que se mudava os agregados havia necessidade de se determinar nova curva de regressão para se prever a resistência aos 28 dias. Foram estudados os efeitos do módulo de alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$), módulo de sílica ($\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$) e superfície específica do cimento sobre a eficiência do método e concluiu-se que, mantidos os mesmos agregados, os efeitos eram tão pequenos que podiam ser desprezados.

Na Finlândia, com o método empregado por VUORINEN (63) foram realizados poucos ensaios para se concluir algo sobre os diversos fatores que influenciavam os resultados. Contudo, experiências iniciais indicaram ser preferível adotar métodos com choque térmico sobre os corpos de prova, por que isso permite um trabalho contínuo do laboratório de ensaio.

KALYANASUNDARAN e KURIEN (31), durante o uso de seu método, concluíram que não havia influência da fonte e do conteúdo do cimento e do fator água-cimento.

O primeiro método de água quente que surgiu foi o de THOMPSON (71). Baseou-se no método de estufa de King e procurou criar um outro método que eliminasse as desvantagens daquele. Com a cura acelerada processando-se em água a 35°C , as vantagens eram que o choque térmico era menor e a temperatura era mais homogênea dentro do tanque de água.

No programa de ensaios da subcomissão de ensaios acelerados da American Society for Testing and Materials o método de Thompson também foi estudado.

Foi possível chegar-se às seguintes conclusões, WILLS (77), quanto aos fatores que afetavam os resultados de ensaio acelerado: quando se aumentava o conteúdo de cimento no concreto a resistência acelerada aumentava a uma taxa maior que o aumento da resistência aos 28 dias; o uso de aditivo retardador de pega dependia do tipo de cimento com que era utilizado (com um tipo de cimento afetava o resultado de ensaio acelerado e com outro tipo não afetava); cada laboratório obteve resultados significativamente diferentes, por isso os resultados de ensaios acelerados só podiam ser usados com confiança desde que fossem feitos sempre no mesmo laboratório, por causa das diferenças dos materiais empregados em cada laboratório.

LAMOND (33) empregou o método e concluiu que apresentou a mesma variabilidade que ensaios com idades posteriores e com cura normal e que a precisão da estimativa da resistência aos 28 dias aumentava quando se considerava um conjunto particular de materiais. A grande desvantagem era a rigidez do ciclo de ensaio.

RAMAKRISHNAN e DIETZ (60), (61) afirmaram que neste método de ensaio acelerado os resultados eram mais afetados por mudanças no cimento que em outros métodos e os parâmetros envolvidos em se moldar e curar os corpos de prova deviam ser cuidadosamente analisados para apresentarem resultados válidos de estimativa de resistência em idades posteriores.

Eles compararam o coeficiente de aceleração do método modificado de ebulição, de um método com cura em água a 75°C e do método de Thompson; o menor coeficiente de aceleração foi apresentado pelo método de Thompson.

O Laboratório Central de Engenharia Civil da COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (17), usando o método de Thompson, concluiu que o método sofria influência dos materiais e que portanto a correlação com resistência em idades posteriores devia ser baseada em experiências anteriores, mudando-se a curva de regressão quando os materiais eram mudados.

RAMASWAMY e NAMBIAR (63) estudaram o método proposto pela Comissão de Ensaio Acelerados da Institution of Civil Engineers, em laboratório, para posterior emprego em controle de qualidade do concreto em obras.

Com base nos resultados de ensaios acelerados, estimavam a resistência do concreto em idades mais avançadas. Concluíram que os aditivos comuns usados no concreto pareciam não influenciar a estimativa da resistência, enquanto que aumentando-se o conteúdo do cimento havia maior dispersão dos resultados em torno da curva de regressão; os resultados do ensaio acelerado dependiam da temperatura a que os corpos de prova eram submetidos nas primeiras 2 h.

AL-RAWI (5) estudou o efeito do cimento no coeficiente de aceleração do método acima, porque em todos os métodos a composição química e o grau de moagem do cimento foram ignorados.

O efeito do grau de moagem era exercido da seguinte maneira: aumentando-se o grau de moagem, a relação entre o resultado do ensaio acelerado e o resultado do ensaio aos 28 dias tende a se ajustar melhor a uma reta, enquanto que cimentos com baixo grau de moagem os resultados tendem a se ajustar a uma hipérbole (que é o caso dos resultados da Comissão da Institution of Civil Engineers).

O conteúdo de gesso, no cimento, aumentava a resistência acelerada mas diminuía a resistência aos 28 dias.

Comparando seu resultado com os da comissão da Institution of Civil Engineers verificou que diminuindo-se a relação $C_3S : C_2S$ a correlação entre a resistência acelerada e a resistência aos 28 dias não se aplicou por proporcionar resultados menores que os reais.

O conteúdo de álcalis no cimento pareceu não afetar a estimativa da resistência aos 28 dias, a partir do ensaio acelerado.

SMITH e CHOJNACKI (67), (68) realizaram estudos sobre métodos de ensaio acelerado, procurando obter in-

formações sobre os fatores que mais afetavam os resultados do ensaio acelerado.

Quando realizaram ensaios acelerados com um tempo de espera definido (6 h), antes de se iniciar a cura acelerada, os fatores que afetavam os resultados eram as diferentes marcas do cimento, a betonada da qual era recolhido o concreto para se moldar os corpos de prova e o tempo de pega do cimento.

Para eliminar a influência destes fatores, estudaram um outro método em que a cura acelerada só era iniciada depois que o cimento tivesse atingido o fim de pega. Além disso, estudaram também o efeito do tempo de espera da duração de cura acelerada.

A diferença dos resultados de ensaio acelerado após cura acelerada entre 15 h e 21 h era tão pequena que podia ser desprezada.

Concluíram finalmente que concretos com resistências superiores a 21 MPa apresentavam resultados acelerados com maior dispersão que concretos com resistências menores.

O método anterior exigia a determinação do fim da pega do cimento, por isso não foi mais utilizado.

O método de Cornwell, empregado por MALHOTRA (37) para prever a resistência aos 28 dias, apresentava as seguintes deficiências: mudando-se o cimento, havia necessidade de se mudar a curva de regressão e para resistências acima de 21 MPa a dispersão dos resultados acelerados aumentava. Para resistências menores que 21 MPa, a dispersão dos resultados acelerados era da mesma ordem que a dispersão dos resultados do ensaio aos 28 dias.

BROCKENBROUGH e LARASON (14), afirmaram que ao se empregar o método com temperatura de cura baixa (38°C no método proposto) evitava-se choque térmico ao concreto, havia menor expansão do ar incorporado e evitava-se mudanças artificiais no processo de endurecimento do concreto. Concluíram que, com esse método, os resultados a-

celerados apresentavam a mesma dispersão que os resultados de ensaios aos 28 dias com cura normal.

COLLET (16) comparou os dois métodos de ensaio acelerado com cura em água quente (a 60°C e a 82°C). Quando usou o método de água a 60°C concluiu que variações de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ na temperatura, durante o ciclo de cura, tinham pouco efeitos nos resultados.

O método de ensaio acelerado com cura em água a 82°C foi o que apresentou resistências aceleradas mais elevadas (superiores, inclusive, ao método modificado de ebulição). Ensaando-se os corpos de prova com 24 h de idade, não com 19 h, como no método original, havia ligeiro aumento na resistência acelerada e o método adaptava-se melhor ao dia de trabalho do laboratório.

NASSER (52) e NASSER e BEATON (53) afirmaram que os resultados eram poucos para se concluir quais os fatores que afetavam os resultados de ensaio acelerado. Estudaram, contudo, o tempo de cura acelerada e o tempo de resfriamento. A cura acelerada por períodos superiores a 3 h apresentava pequena elevação na resistência. Depois de um período de resfriamento dos corpos de prova de 2 h os resultados acelerados eram mais altos que se o ensaio fosse executado imediatamente após a cura acelerada. Outra vantagem do método, segundo os autores, era que os cilindros podiam ser ensaiados sem serem capeados porque apresentavam faces bem lisas.

3.4 Método de Cura Autógena

SMITH e TIEDE (69) criaram o método de cura autógena e com ele verificaram que os resultados eram afetados pelo conteúdo de cimento no concreto, mas pouco afetados pelo fator água - cimento. Quando se ensaiava concretos, cujas resistências eram superiores a 45 MPa, os resultados do ensaio acelerado eram mais dispersos.

BISAILLION et alii (12), (13) usaram o método de cura autógena para controlar concreto usado na construção de uma rodovia no Canadá. Por causa da variação dos resultados tiveram que determinar, para cada fornecedor, uma curva de regressão para estimar a resistência aos 28 dias. Concluíram ainda que o resultado do ensaio acelerado era grandemente afetado pela temperatura inicial do concreto. A temperatura inicial variava entre 10 e 32°C e a diferença entre resultados do ensaio acelerado era de até 4,2 MPa.

BICKLEY (11) usou este método para controlar o concreto empregado na construção de uma torre de 457 m de altura, no Canadá. Como o método de construção empregado era o de formas deslizantes e a maior parte da concretagem foi efetuada durante o inverno, o controle do concreto deveria ser bem executado. Escolheram o método de cura autógena para não ter que montar aparelhagem adicional no local da obra.

FERRER (23) verificou que os fatores que afetavam a estimativa da resistência aos 28 dias, a partir dos resultados de ensaio acelerado com método de cura autógena eram: granulometria do agregado graúdo (quanto maior o agregado maior a dispersão) e a resistência do concreto (quanto mais alta a resistência mais alta a dispersão).

COLLET (16), usando o método de cura autógena com corpos de prova cúbicos, fabricados em moldes de poliestireno expandido, notou que alguns corpos de prova precisavam ter suas faces retificadas, por não apresentarem as faces planas, o que tornava mais caro o uso do método.

4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE OS ENSAIOS ACELERADOS DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

4.1 Materiais

Na realização dos ensaios acelerados da resistência do concreto, foram utilizados os materiais mais facilmente encontráveis na região de Limeira.

Os agregados foram guardados dentro do laboratório, para evitar que sofressem os efeitos das intempéries, durante o período em que os ensaios foram realizados.

Foi utilizado, na fabricação do concreto, um cimento portland comum, de classe 320. O cimento era comprado em sacos e as partidas eram armazenadas em um silo especial de aço inoxidável que permitia a homogeneização da amostra e a retirada fácil por uma abertura no fundo do silo.

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada que apresentou a composição granulométrica mostrada na tabela 11, como agregado miúdo utilizou-se areia, cuja composição granulométrica está mostrada na tabela 12.

TABELA 11

Composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneiras abertura (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida	Porcentagem acumulada
38	—		
25	384	3	3
19	4074	27	30
9,5	7261	48	78
4,8	2881	19	97
2,4	243	2	99
1,2	157	1	100
0,6	—	—	100
0,3	—	—	100
0,15	—	—	100
fundo	—	—	100

O diâmetro máximo: 25 mm

módulo de finura : 7,07

TABELA 12

Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras abertura (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida	Porcentagem acumulada
4,8	—	—	—
2,4	125	3	3
1,2	370	7	10
0,6	962	19	29
0,3	1750	35	64
0,15	1624	33	97
fundo	168	3	100

O diâmetro máximo: 2,4 mm

módulo de finura : 2,03

Foram feitas duas dosagens de concreto: a dosagem I com o traço nas proporções 1:2,42:3,70 (em peso) e o fator água-cimento de 0,57 para apresentar a resistência à compressão simples aos 28 dias em torno de 25 MPa; a dosagem II com o traço nas proporções 1:3,56:4,94 (em peso) e o fator água-cimento de 0,76 para apresentar resistência à compressão simples aos 28 dias em torno de 15 MPa.

Eram moldados, com o concreto de uma mesma betonada, 14 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Cinco corpos de prova eram curados por 28 dias em câmara úmida; cinco eram submetidos a cura acelerada de água quente e 4 eram submetidos à cura do método modificado de ebulição.

4.2 Métodos

Foram usados dois métodos de ensaio acelerado: o método modificado de ebulição (descrito na página 5, AKROYD (3)) e um método de água quente a 70°C.

A escolha dos dois métodos foi sugerida pelo estudo da literatura em que diversos autores compararam o método modificado de ebulição com um método de água quente a temperatura elevada. A comparação foi feita para se perceber as dificuldades no emprêgo dos métodos e para se estudar o comportamento dos materiais quando submetidos a curas aceleradas por períodos e temperaturas diferentes.

O método de água quente tinha o seguinte ciclo: imediatamente após a moldagem, os corpos de prova eram colocados em um tanque com água a 70°C e curados por 24 h; na hora seguinte eram esfriados, desmoldados, capeados e ensaiados à compressão simples.

O tanque, para cura acelerada dos corpos de prova, era feita de cimento amianto e tinha capacidade de 500 litros, com superfície livre de 8500 cm², onde podiam ser curados, simultaneamente, 12 corpos de prova.

Para aquecimento de água, foram colocadas nas paredes laterais da caixa quatro resistências tubulares blindadas de 1500 watts cada uma, opostas duas a duas e a 10 cm do fundo; com essa disposição, dispensou-se o uso de agitador pois a temperatura da água era igual em qualquer ponto do tanque.

O termostato empregado para manter a temperatura na medida desejada, permitia regulagens entre 20°C e 120°C , também de fácil aquisição no mercado. Este termostato permitiu a precisão de controle da temperatura em $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Quando os cinco corpos de prova eram colocados na água a temperatura baixava de 1°C .

O nível d'água só era restabelecido às sextas-feiras, quando não eram curados corpos de prova e, por isso, o tanque era desligado, (a evaporação não era excessiva). O tanque era ligado segunda-feira entre 17 e 18 h e o processo de cura acelerada era feito até às 10 h da sexta-feira, havendo evaporação de 40 litros d'água nestes quatro dias e meio. Durante a cura acelerada o tanque permanecia fechado.

Para o método modificado de ebulição, inicialmente, usou-se um tanque metálico com as dimensões de 60 cm de largura, 60 cm de altura e 120 cm de comprimento. Para obter-se a ebulição da água, usaram-se quatro queimadores de gás, ligados a um botijão comum para se evitar a necessidade de se fazer ligações especiais.

Com essa aparelhagem, em duas tentativas em dias separados e durante quatro horas cada uma, o máximo que se conseguiu foi fazer a água atingir a temperatura de 92°C , verificou-se que havia a necessidade de queimadores maiores, ou então, mais queimadores e como nas duas tentativas consumiu-se o botijão de gás, optou-se por aparelhagem com aquecimento elétrico.

Em uma caixa de cimento amianto, com capacidade de 150 l, foram instaladas duas resistências elétricas tubulares e blindadas de 2000 watts cada uma, nas paredes laterais e a 8 cm do fundo da caixa. A água, ainda

assim, demorava muito para atingir a ebulição, o que tornaria difícil a sua aplicação no laboratório.

Adotou-se o seguinte sistema: na véspera do ensaio acelerado, as resistências tubulares eram ligadas e a temperatura da água era controlada por um termostato para ser mantida em torno de 80°C. Na manhã seguinte, além das resistências tubulares, eram ligadas quatro resistências comuns de ebulidores. Assim, em 2 h, a temperatura da água elevava-se dos 80°C até 97°C, que é o ponto de ebulição da água em Limeira.

As dimensões da caixa permitiam a cura simultânea de apenas quatro corpos de prova.

Quando os corpos de prova eram imersos na água em ebulição, a temperatura baixava 7°C e em 20 min voltava ao ponto de ebulição; neste momento as resistências tubulares eram desligadas.

Durante esse procedimento, com a caixa fechada e para uma superfície livre de 3200 cm², havia a evaporação de 16 litros d'água.

Os corpos de prova, para o ensaio de 28 dias, eram curados e ensaiados de acordo com as especificações e métodos brasileiros.

A fabricação do concreto e moldagem de todos os corpos de prova, também, foram feitas seguindo as especificações e métodos brasileiros.

4.3 Resultados

Os resultados dos ensaios à compressão simples, com corpos de prova submetidos à cura acelerada em água quente, água em ebulição e cura normal, estão mostrados nas tabelas 13 a 18.

A fórmula usada para calcular o desvio padrão foi, FUSCO (24):

$$s = \sqrt{\frac{s_{n_1}^2 (n_1 - 1) + s_{n_2}^2 (n_2 - 1) + \dots}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1) + \dots}} \quad 4.1$$

TABELA 13

Resultados dos ensaios acelerados com o método modificado de ebulição e dosagem I.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)			
17-09-1980	11,2	12,2	11,8	12,5
18-09-1980	11,2	12,0	12,4	12,7
23-09-1980	13,2	12,2	12,7	13,0
24-09-1980	13,2	13,2	13,8	13,4
25-09-1980	10,7	11,6	12,1	12,7
30-09-1980	13,5	13,2	13,5	12,8
1º-10-1980	12,9	12,2	13,4	12,6
02-10-1980	14,2	14,0	14,3	14,5
08-10-1980	17,6	16,8	17,1	18,6
09-10-1980	12,9	12,0	12,6	11,1
13-10-1980	11,3	9,8	12,7	8,2
14-10-1980	12,7	12,6	13,6	13,5
15-10-1980	13,6	12,8	14,7	13,4
16-10-1980	15,7	15,7	15,1	15,8
20-10-1980	13,8	13,5	13,5	13,9

Resistência média: 13,2 MPa

Desvio padrão : 0,71MPa

Coefficiente de variação: 0,05

TABELA 14

Resultados dos ensaios acelerados com o método modificado de ebulição e dosagem II.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)			
29-10-1980	6,6	5,6	6,6	6,3
30-10-1980	7,1	7,2	7,0	7,3
03-11-1980	6,0	6,1	6,1	6,3
04-11-1980	6,4	6,3	6,5	6,3
05-11-1980	5,7	6,3	5,7	6,3
10-11-1980	4,5	4,5	4,7	4,7
11-11-1980	4,4	4,5	4,4	4,3
12-11-1980	4,9	4,6	5,3	5,1
13-11-1980	5,5	5,1	5,3	5,2
17-11-1980	6,4	6,2	6,3	5,8
18-11-1980	6,0	5,8	6,2	5,9
19-11-1980	6,0	6,3	5,8	6,0
20-11-1980	5,7	5,7	5,3	5,9
24-11-1980	4,5	4,6	4,5	4,3
25-11-1980	5,9	6,3	5,9	6,6

Resistência média: 5,7 MPa

Desvio padrão : 0,24 MPa

Coeficiente de variação: 0,04

TABELA 15

Resultados dos ensaios acelerados com método de água quente (70°C) e dosagem I.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)				
02-09-1980	18,4	18,3	19,7	19,0	18,5
04-09-1980	17,4	16,5	19,4	18,2	19,3
09-09-1980	19,2	17,8	19,9	20,5	19,9
10-09-1980	18,1	18,7	19,0	19,0	18,6
17-09-1980	19,3	18,3	19,0	19,1	19,4
18-09-1980	18,1	18,9	18,7	18,8	18,1
23-09-1980	16,8	17,7	17,7	18,2	17,2
24-09-1980	17,6	19,1	15,8	18,8	17,5
25-09-1980	16,7	17,5	17,3	17,8	16,6
30-09-1980	17,9	18,0	17,8	17,0	18,1
19-10-1980	17,9	18,4	18,2	17,7	18,2
02-10-1980	18,4	18,0	19,4	18,8	18,6

Resistência média: 18,3 MPa
 Desvio padrão : 0,72 MPa
 Coeficiente de variação: 0,04

TABELA 16

Resultados dos ensaios acelerados com método
de água quente (70°C) e dosagem II.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)				
29-10-1980	7,9	7,7	8,1	8,6	8,6
30-10-1980	9,2	8,6	9,2	8,3	9,4
03-11-1980	8,0	8,6	8,7	8,2	8,6
04-11-1980	8,5	8,7	8,6	8,7	8,9
05-11-1980	9,0	9,4	9,1	9,1	8,3
10-11-1980	6,9	7,2	7,7	7,7	7,6
11-11-1980	6,8	7,6	7,0	7,3	7,1
12-11-1980	6,4	6,7	7,1	7,2	6,8
13-11-1980	8,4	8,2	8,0	8,1	8,0
17-11-1980	9,3	9,5	9,1	9,8	9,8
18-11-1980	8,9	9,1	8,9	9,3	9,4
19-11-1980	8,4	7,5	7,4	7,9	7,8

Resistência média: 8,2 MPa

Desvio padrão : 0,33 MPa

Coefficiente de variação: 0,04

TABELA 17

Resultados dos ensaios aos 28 dias, após cura normal com a dosagem I.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)				
02-09-1980	28,7	28,3	29,6	30,0	30,9
04-09-1980	30,1	26,3	29,1	28,5	30,3
09-09-1980	25,2	24,2	28,7	26,6	28,7
10-09-1980	25,3	27,2	26,5	27,1	23,8
17-09-1980	23,7	22,5	22,0	22,9	21,0
18-09-1980	22,7	21,2	22,0	21,0	21,7
23-09-1980	24,5	26,6	25,0	22,5	24,1
24-09-1980	25,5	30,3	27,1	27,9	27,1
25-09-1980	21,8	24,5	27,1	24,1	25,2
30-09-1980	26,3	25,0	24,8	26,7	23,8
19-10-1980	25,6	26,1	19,0	25,5	20,9
02-10-1980	30,3	30,2	30,1	30,4	34,0
08-10-1980	28,0	27,5	28,9	29,9	29,8
09-10-1980	24,4	29,3	30,3	28,0	30,4
13-10-1980	27,6	26,5	31,5	27,3	30,7
14-10-1980	30,0	30,5	31,1	27,1	30,2
15-10-1980	26,3	30,0	31,1	31,5	31,0
16-10-1980	32,7	34,1	37,7	35,1	37,3
20-10-1980	31,1	29,8	31,6	28,3	32,6

Resistência média: 27,6 MPa
 Desvio padrão : 1,80 MPa
 Coeficiente de variação: 0,07

TABELA 18

Resultados dos ensaios aos 28 dias, após cura normal com a dosagem II.

Data de moldagem	Resistência à compressão (MPa)				
29-10-1980	20,7	14,4	15,8	16,0	15,3
30-10-1980	23,3	20,0	21,6	23,2	23,2
03-11-1980	14,4	17,6	15,4	15,2	15,3
04-11-1980	17,0	16,0	17,6	17,1	16,6
05-11-1980	16,6	16,1	14,8	17,2	15,3
10-11-1980	16,9	14,6	16,1	16,0	16,5
11-11-1980	16,1	16,6	17,5	16,9	16,7
12-11-1980	15,8	16,6	17,1	16,3	16,3
13-11-1980	17,2	16,8	15,6	16,4	16,9
17-11-1980	17,1	17,2	16,3	16,4	16,5
18-11-1980	15,4	16,1	15,3	17,0	17,8
19-11-1980	16,3	16,1	17,1	15,3	17,3
20-11-1980	15,2	15,9	17,1	17,5	16,8
24-11-1980	15,4	16,4	16,0	16,2	16,9
25-11-1980	16,5	16,1	17,4	16,3	17,1

Resistência média: 16,8 MPa
 Desvio padrão : 1,03 MPa
 Coeficiente de variação: 0,06

O método modificado de ebulição apresentou um coeficiente de aceleração de 0,486 para a dosagem I e coeficiente de aceleração de 0,336 para a dosagem II. Considerando-se duas dosagens como uma amostra única, o coeficiente de aceleração foi de 0,411.

Para o método de cura em água quente a 70°C , para a dosagem I o coeficiente de aceleração foi de 0,713 e para a dosagem II foi de 0,493. Considerando as duas dosagens como amostra única, o coeficiente de aceleração foi de 0,603.

Usando-se o método dos mínimos quadrados, concluiu-se que as curvas que melhor se adaptaram aos resultados foram as retas mostradas nas figuras 4.1 e 4.2.

Devido às dificuldades surgidas com o método modificado de ebulição (descritas na pag. 63), a aplicação do método dos mínimos quadrados para obtenção das retas da fig. 4.1, foram considerados os resultados de ensaio após cura normal por 28 dias, a partir da data de 17/09/1980 da tabela 17.

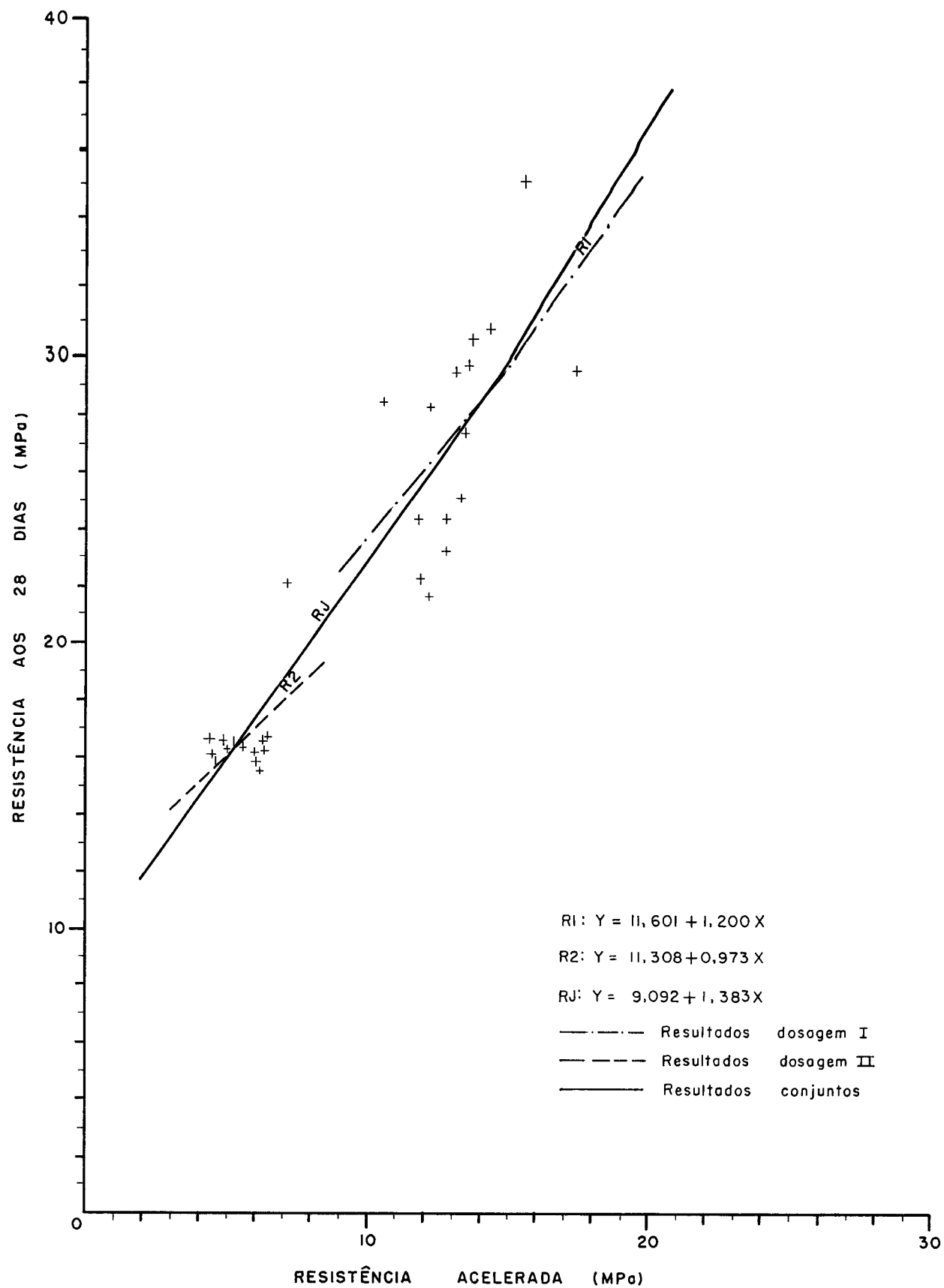


Fig 4.1 Relações entre resistência acelerada e resistência aos 28 dias, com o método modificado de ebulição.

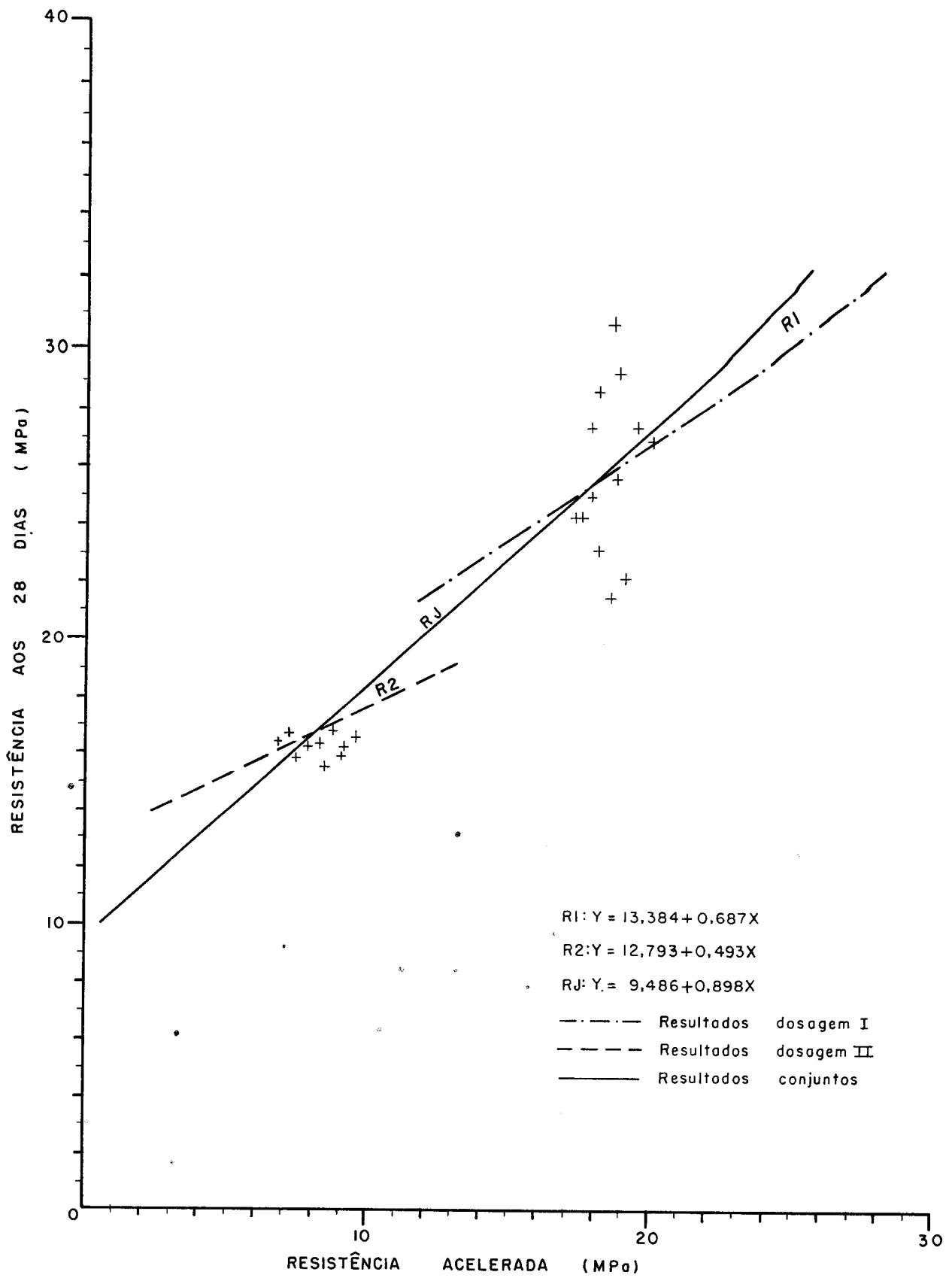


Fig. 4.2 Relações entre resistência acelerada e resistência aos 28 dias, com o método de água quente.

As medidas de eficiência obtidas com aplicação de análise de regressão aos resultados dos ensaios acelerados da resistência estão mostrados na tabela 19 para o método modificado de ebulição e na tabela 20 para o método de água quente.

TABELA 19

Aplicação da análise de regressão aos resultados do método modificado de ebulição.

	coeficiente aceleração	afastamento padrão MPa	coeficiente afastamento
dosagem I	0,486	3,332	0,121
dosagem II	0,336	1,397	0,083
conjunto	0,411	2,485	0,112

TABELA 20

Aplicação de análise de regressão aos resultados do método de água quente (70°C).

	coeficiente aceleração	afastamento padrão MPa	coeficiente afastamento
dosagem I	0,713	2,993	0,115
dosagem II	0,493	1,785	0,106
conjunto	0,603	2,364	0,110

4.4 Comparação entre os Métodos

O método de água quente proporcionou coeficientes de aceleração mais altos que os do método modificado de ebulição. O coeficiente de afastamento, na dosagem I, foi maior para o método de água quente; mas na dosagem II o coeficiente de afastamento foi menor para o método modificado de ebulição.

Ao se considerar as duas dosagens como um universo único ou como universos distintos, pode-se notar que as medidas de eficiência situam-se entre os dois resultados.

Tomando-se como base o coeficiente de aceleração pode-se notar a influência que o conteúdo de cimento do concreto exerce sobre os resultados em qualquer dos métodos.

As medidas de eficiência obtidas, neste trabalho, comparam-se com as medidas obtidas pelos outros autores e confirmam a hipótese de que ensaios acelerados usando água quente como meio de cura acelerada sempre apresentam resistências aceleradas superiores às resistências obtidas como o método modificado de ebulição.

O método modificado de ebulição foi o método mais utilizado entre todos os outros métodos, pois os pesquisadores alegavam que ele é mais simples de ser utilizado que o de água quente.

Muitos autores disseram ter empregado o método modificado de ebulição, mas mantendo a temperatura da água ligeiramente abaixo do ponto de ebulição, para evitar a evaporação excessiva que ocorre. Neste caso há a necessidade de um termostato para controlar tal temperatura, deixando, então, o método de ter a simplicidade alegada.

McGHEE, citado por RAMAKRISHNAN e DIETZ (60), e COLLET (16) e AKROYD e SMITH-GANDER (2) concluíram que a temperatura da água que proporciona resistências mais altas, após 24 h de cura acelerada, situa-se entre 74 e 82°C.

Outro problema que pode ser notado com o uso do método modificado de ebulição é que, mesmo após 1 h de resfriamento, os corpos de prova deviam ser manuseados com luvas por causa da temperatura em que ainda estavam.

A cura normal por 24 h, no método modificado de ebulição, tem a vantagem de eliminar a influência de alguns fatores, podendo ser empregado quando há variação muito grande em parâmetros e condições de ensaio numa obra.

Na utilização do método de água quente, para se manter a temperatura da água em $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ foi usado um termostato comum, facilmente encontrável no mercado. Durante, os três meses em que foram realizados os ensaios acelerados, o sistema montado para a cura em água quente não apresentou qualquer problema.

Inicialmente o sistema foi ligado apenas para regular o termostato de modo a manter-se a temperatura da água em 70°C , tendo sido usado até o fim dos ensaios acelerados sem precisar de nenhuma outra regulagem. Portanto a alegação de que o método de água quente é complicado por necessitar de termostato e pessoal técnico especializado não procede.

Outra vantagem do método de água quente é a que corpos de prova são mais facilmente manipuláveis, após 1 h de resfriamento por apresentarem temperaturas mais baixas.

A desvantagem deste método é submeter o corpo de prova, ainda muito jovem, a um choque térmico.

O uso de temperatura mais baixa em método de água quente, por exemplo o método de Thompson a 35°C , apresenta resultados muito dispersos, cf. WILLS (77), talvez porque essa baixa temperatura perturbe apenas as reações de hidratação sem apresentar resultados constantes, como os métodos que usam temperatura mais elevada.

O emprêgo de métodos de ensaio acelerado com choque térmico adapta-se melhor a uma rotina de laboratório em que haja número grande de ensaios, pois isso exi-

ge menos moldes e menos equipamentos, já que ao se retirar um corpo de prova do tanque de cura acelerada pode-se, imediatamente, colocar outro.

Alguns autores, LEW e RICHARD (35), RAMAKRISHNAN e DIETZ (60), BICKLEY (11), correlacionaram a resistência do ensaio acelerado com a resistência em idades avançadas, através da lei de maturidade desenvolvida por PLOWMAN (59), com a fórmula:

$$f_{av} = a + b \log M$$

onde

$$f_{av} = \text{resistência em idade avançada}$$

$$a \text{ e } b = \text{constantes}$$

$$M = \text{maturidade}$$

A maturidade é definida por:

$$M = \sum a_t (t + 10)$$

onde

$$a_t = \text{duração, em horas, da cura à temperatura } t$$

$$t = \text{temperatura}$$

Porém, trabalhos de SAUL (66) e VOLZ et alii (75) concluíram que o concreto curado em altas temperaturas, em idade jovem, (de 6 a 24 h), apresentaram resistências que não obedeciam a lei da maturidade.

5 CONCLUSÕES

Há necessidade de um método de ensaio acelerado para o controle da qualidade do concreto, por causa da rapidez com que são executadas as obras atualmente; em uma semana pode-se concretar uma laje de edifício ou construir uma aduela de ponte em balanços sucessivos.

Este problema não é de fácil solução porque os resultados do ensaio acelerado são afetados pela variabilidade dos materiais, como: tipo de cimento, granulometria e forma dos agregados, pelo tempo e temperatura de cura. Por isso, ao se empregar um método de ensaio acelerado, sempre que houver mudanças no conjunto de materiais ou situação do ensaio, haverá a necessidade de se mudar a curva de regressão usada para a previsão da resistência em idades mais avançadas.

As razões que impedem o estabelecimento de um método de ensaio acelerado plenamente satisfatório que substitua o ensaio com cura normal, ainda não estão bem definidas. VERBECK (73) sugere que a cura inicial em alta temperatura acelera as reações de hidratação do C_3S e C_2S , criando uma zona densa, como uma capa impermeável ao redor das partículas, dificultando a hidratação destas partículas em idade mais avançada. MIRONOV (47) e REGOURD, citada por COLLET (16), acham que a cura inicial em alta temperatura (até $100^{\circ}C$) ou temperatura normal produzem os mesmos produtos de hidratação do cimento;

a resistência em idade mais avançada seria afetada por mudanças físicas na estrutura do concreto, haveria expansão térmica diferencial dos componentes.

A pesquisa experimental serviu para comprovar que as dificuldades apontadas na literatura, são as mesmas que se encontram ao se usar os materiais nacionais. Os coeficientes de aceleração obtidos são comparáveis aos coeficientes de aceleração obtidos por COLLET (16) na Bélgica, ou pelos laboratórios do programa de ensaios acelerados das ASTM, WILLS (77); quer com o uso do método de água quente ou com o método modificado de ebulição.

Não existe nenhum método que elimine todas as dificuldades de aceitação, encontradas pelos métodos já propostos. As pesquisas parecem indicar como um método adequado aquele que utilizasse água quente como meio de cura acelerada.

Para a determinação de valores experimentais que permitam a aplicação de critérios de aceitação do concreto, em face de valores característicos especificados, alguns pesquisadores, MALHOTRA (39), COMISSÃO DE ENSAIOS ACELERADOS da Institution of Civil Engineers (29) e PHILLEO (58), sugeriram a substituição do ensaio aos 28 dias por ensaios acelerados.

Ao se propor o uso dos resultados de ensaios acelerados como suficientes para ser feito o julgamento final do concreto, sem a necessidade de controlar a resistência aos 28 dias com corpos de prova sob cura normal, pode-se estar tomando decisões com base em resultados de ensaio de um material que no futuro não será igual ao concreto da estrutura.

Por isso, supõe-se que essa idéia só poderá ser aceita quando a controversia em relação aos produtos de hidratação dos concretos submetidos à cura acelerada seja resolvida. Sugere-se que as pesquisas futuras sejam orientadas neste sentido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABDUN-NUR, E.A. Accelerated, early and immediate evaluation of concrete quality. In: ACI International symposium on accelerated strength testing, Mexico, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978. p. 1-3.
- 2 AKROYD, T.N.W. & SMITH-GANDER, R.G. Accelerated curing of concrete test cubes: a practical site procedure. Engineering, London, 81, 153-5, Feb. 1956.
- 3 ———. The accelerated curing of concrete test cubes. Proc. Institution of Civil Engineers, London, 19: 1-22, May 1961.
- 4 ———. Discussion on "The accelerated curing of Concrete test cubes". Proc. Institution of Civil Engineers, London, 21:678-96, Mar. 1962.
- 5 AL-RAWI, R.S. The effects of composition and fineness of cement in accelerated testing of concrete. Journal of Testing and Evaluation, Philadelphia, 2(2):102-6, Mar. 1974.
- 6 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. International symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, 1978, 319 p.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Making accelerated curing, and testing of concrete compression test specimens (C684-74). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, p. 409-17, 1978.

- 8 ARNI, H.T. The significance of the correlation coefficient for analyzing engineering data. Materials Research and Standards, Philadelphia, 11 (5): 16-9, May 1971.
- 9 ——. Appendix to "Early assessment of concrete quality by accelerating compressive strength development with heat (results of Astm's cooperative test program). Journal of Testing and Evaluation, Philadelphia, 3 (4): 251-62, July 1975.
- 10 BERIO, A. General report "RILEM symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests". RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31):158-66, June 1966.
- 11 BICKLEY, T.A. Accelerated concrete strength testing at the CN Tower. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 29-38.
- 12 BISAILLION A., et alii. Field evaluation of expanded polystyrene molds for self-cured, accelerated strength testing of concrete. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558. Washington, D.C., 1975, p. 50-60.
- 13 ——. Accelerated strength test results from expanded polystyrene molds with emphasis on initial concrete temperature. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 201-28.
- 14 BROCKENBROUGH, T.W. & LARASON, R. Early Strength test for quality control of concrete. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concret. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, p. 61-8.

- 15 CAMERON, R. Discussion on "The accelerated curing of concrete test cubes". Proc. Institution of Civil Engineers, London, 21: 682-3, Mar. 1962.
- 16 COLLET, Y. Estimation a très jeune age de la résistance du béton. Centre National de Recherches Scientifiques et Techniques pour l'Industrie Cimentière. RR CRIC 49-f-1979: 20 p.
- 17 COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP). Ensaio de cura acelerada do concreto - Introdução do método e correlação com resistências obtidas pelo processo convencional. Relatório C-30/80 - 1980: 13 p.
- 18 COSTA NETO, P.L.O. Estatística. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 264 p.
- 19 DRAPER, N.R. & SMITH, H. Applied regression analysis. New York, John Wiley, 1966. 407 p.
- 20 DUTRON, R. Quelques résultats d'essais en contribution à ce colloque. In: RILEM symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 167-8, June 1966.
- 21 FALCÃO BAUER, L.A. Ensaio acelerado para previsão da resistência do concreto. In: Instituto Brasileiro do Concreto. Colóquio sobre pré-moldados. São Paulo, Fev. 1976, p. 1-24.
- 22 ——— & OLIVAN, L.I. Use of accelerated tests for concrete made with slag cement. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 177-28.
- 23 FERRER, M.M. Quality control of concrete by means of short termed tests at La Angostura Hidroelectric Project, State of Chiapas, Mexico. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 51-74.
- 24 FUSCO, P.B. Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil e Editora da Universidade de São Paulo, 1976, 274 p.

- 25 GEREND, M.S. Steamed-cured cylinders give 28-day concrete strength in 48 hours. Engineering News Record, New York, 98 (7): 282-3, Feb. 1927.
- 26 GHOSH, R.K. et alii. Accelerated strength tests for quality control of paving concrete. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 169-82.
- 27 HUDSON, S.B. & STEELE, G.W. Prediction of potential strength of concrete from the results of early tests. Highway Research Record - Concrete, Washington, D.C., (370): 25-37, 1971.
- 28 ——— & ———. Developments in the prediction of potential strength of concrete from results of early tests. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, p. 1-12.
- 29 INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. Accelerated Testing Committee. An accelerated test for concrete; research and development report. London, 1968, 9 p.
- 30 JAROCKI, W. The rapid control of concrete strength on the basis of specimens cured in hot water. In: RILEM Symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 169-75, June 1966.
- 31 KALYANASUNDARAN, P. & KURIEN, V.J. Accelerated testing for prediction of 28-day strength. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, p. 77-86.
- 32 KING, J.W.H. An accelerated test for the seven and twenty-eight-day compressive strength of concrete. Journal of Applied Chemistry, London, (10):256-62,

June 1960.

- 33 LAMOND, J.F. Accelerated strength testing by the warm water method. Proc. of Journal of American Concrete Journal, Detroit, 76(4):499-512, Apr. 1979.
- 34 LAPINAS, R.A. Accelerated concrete strength testing by modified boiling method: concrete producer's view. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 75-93.
- 35 LEW, H.S. & REICHARD, T.W. Prediction of strength of concrete from maturity. In: ACI International symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 229-48.
- 36 LOPEZ, A.G. & BARRERA, S.Z. Evaluacion de los ensayos acelerados en el control de calidad del concreto. Revista IMCYC, Mexico, 7(40): 41-56, Sept-Oct.1969.
- 37 MALHOTRA, V.M. Analyses of accelerated 24-hour concrete strengths from field tests. In: Rilem Symposium by Correspondence. Accelerated Hardening of Concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 177-84, June 1966.
- 38 — & ZOLDNERS, N.G. Accelerated strength testing of Concrete using a boiling method. In: Rilem Symposium by Correspondence. Accelerated Hardening of Concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 185-92, June 1966.
- 39 —. The past, present and future of accelerated testing of Concrete. Indian Concrete Journal, Bombay, 43 (9): 342-9, Sept. 1969.
- 40 — & ZOLDNERS, N.G. Some field experience in the use of an accelerated method of estimating 28-day strength of Concrete. Proc. of Journal of American Concrete Institute, Detroit, 66(11): 894-7, Nov. 1969. Discussion. Proc. Journal of American Concrete Institute, Detroit, 67(5): 424-34, May 1970.

- 41 — & BAUSET, R. Rapid estimation of concrete strength potential for Hydro-Quebec dams with special reference to modified boiling Method. In: Commission International des Grands Barrages. Dixième Congrès des Grands Barrages (annals), Montreal, Q. 39, R. 20, 1970, p. 415-38.
- 42 — & BERWANGER, C. Boiling method for estimating 28-day strength of Concrete at a ready - mixed concrete plant. Proc. Journal of American Concrete Institute, Detroit, 68(12): 963-7, Dec. 1971.
- 43 —. Canadian experience in the use of the modified boiling method. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C. 1975, p. 13-8.
- 44 —. An accelerated method of estimating the 28-day splitting - tensile and flexural strengths of concrete. In: ACI International symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 147-67.
- 45 McDANIEL, A.B. Influence of temperature on the strength of Concrete. Illinois Engineering Station Bulletin. 81: 3-24, July 26, 1915.
- 46 MIHAIL, N. Méthode pour l'essai rapide de la qualité des bétons. In: Rilem Symposium by Correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 193-7, June 1966.
- 47 MIRONOV, S.A. Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening. In: Highway Research Board Symposium on structure of portland cement paste and concrete. SP-90:465-74, Washington, D.C., 1966.
- 48 MOORE, J.K. & TAYLOR, M.A. Statistical properties of techniques for predicting concrete strength and examples of their use. In: ACI International

- symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 259-83.
- 49 NAIK, T.R. Adaptation of accelerated strength testing methods for concrete quality control and quality assurance. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing. Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 30-50.
- 50 ———. Utilization of accelerated strength testing methods. Cement and Concrete Research, New York, 9 (1): 7-17, Jan. 1979.
- 51 ———. Effect of cement types in accelerated compressive strength testing of concrete. Cement and Concrete Research, New York, 9 (3): 377-86, May 1979.
- 52 NASSER, K.W. A new method and apparatus for accelerated strength testing of concrete. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978. p. 249-58.
- 53 ——— & BEATON. The K.5 accelerated strength tester. Proc. Journal of the American Concrete Institute, Detroit, 77 (3): 179-88, May-June 1980.
- 54 NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board Recent developments in accelerated testing and maturity of Concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, 121 p.
- 55 NURSE, R.W. Steam curing of concrete. Magazine of Concrete Research, London, 1(2):79-88, June 1949.
- 56 ORDMAN, N.N.B. & BONDRE, N.G. Accelerated curing tests on concrete. Engineering, London, 185:243-5, Feb. 1958.
- 57 PATCH, O.G. An 8-hour accelerated strength test for field concrete control. Proc. Journal of the American Concrete Institute, Detroit, 29:318-24, Mar-Apr. 1933.
- 58 PHILLEO, R.E. Lunatics, liars, and liability, In: ACI International symposium on accelerated strength

- testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 315-5.
- 59 PLOWMAN, J.M. Maturity and strength of Concrete. Magazine of Concret Research, London, 8 (22): 13-23, Mar. 1956.
- 60 RAMAKRISHANAN, V. & DIETZ, J. Accelerated methods of estimating the strength of Concrete. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, p. 29-44.
- 61 — & —. ASTM accelerated strength tests for quality control of concrete. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 95-116.
- 62 —. Accelerated strength testing - annotated bibliography. In: ACI International symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 285-312.
- 63 RAMASWAMY, N.M. & NAMBIAR, O.N.N. Accelerated curing and quality control of concrete. Indian concrete Journal, Bombay, 51(7): 216-20, July 1977.
- 64 RILEM symposium by correspondence: "Accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests". RILEM Bulletin, New Series, (31): 154-213.
- 65 RODWAY, L.E. & LENZ, K.L. Use of modified boiling method in Manitoba and Alberta, Canada. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 129-46.
- 66 SAUL, A.G.A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research, London, 2(6):127-40, Mar. 1951.

- 67 SMITH, P. & CHOJNACKI, B. Accelerated strength testing of concrete cylinders. Proc. ASTM, Philadelphia, 63: 1079-101, 1973.
- 68 — & —. Accelerated strength testing of concrete cylinders in Ontario. In: RILEM symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 199-204, June 1966.
- 69 — & TIEDE, H. Earlier determination of Concrete strength potencial. In: Highway Research Record A Symposium on concrete strength, Washington, D.C., 210; 29-66, 1967.
- 70 —. Quick quality testing of concrete. Civil Engineering (ASCE), New York, 40 (8): 52-6, Aug. 1970.
- 71 THOMPSON, M.S. Discussion on "The accelerated curing of concrete test cubes". Proc. Institution of Civil Engineers, London, 21: 678-82, Mar. 1962.
- 72 TREJO, R.S. & CASTRO, L.F. Experience in the use of accelerated testing procedure for the control of concrete during the construction of tunnel "Emissor Central" in Mexico City. In: ACI International Symposium on accelerated strength testing, Mexico City, 1976. American Concrete Institute Publication SP-56, Detroit, 1978, p. 15-28.
- 73 VERBECK, G. Cement Hydration reactions at early ages. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Skokie, 7(3): 57-63, Sep. 1965.
- 74 VILLARREAL, R.R. Accelerated splitting-tension test for determining potencial 28-day splitting tensile strength and modulus of rupture of concrete. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board: Recent developments in accelerated testing and maturity of concrete. Transportation Research Record 558, Washington, D.C., 1975, p. 114-20.
- 75 VOLZ, K.C. et alii. Maturity Effects on concrete strength. Cement and Concrete Research, New York,

11 (1):41-50, Jan. 1981.

- 76 VUORINEN, J. Some notes on the use of a accelerated curing of test specimens for concrete quality control. In: RILEM symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31):205-8, June 1966.
- 77 WILLS, Jr., M.H. Early Assessment of Concrete Quality by Accelerating Compressive Strength Development with Heat (Results of ASTM's Cooperative Test Program). Journal of Testing and Evaluation, Philadelphia, 3(4):251-62, July 1975.
- 78 YOKOMISHI, H. & HAYASHI, M. Influence of high temperature curing in early on strength of Concrete. In: RILEM symposium by correspondence: accelerated hardening of concrete with a view to rapid control tests. RILEM Bulletin, New Series, Paris, (31): 209-13, June 1966.