

Carlos Eduardo de Siqueira Tango

UM ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO
DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO
DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND
ATÉ 50 ANOS DE IDADE

Tese Apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para a Obtenção
do Título de Doutor em
Engenharia.

CONSULTA

FT-571

SÃO PAULO
1990

FT 571

Carlos Eduardo de Siqueira Tango
Engenheiro Civil, Escola Politécnica da U.S.P., 1973;
Mestre em Engenharia, Escola Politécnica da U.S.P., 1983.

UM ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO
DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND
ATÉ 50 ANOS DE IDADE

Tese Apresentada à Escola
Politécnica da U.S.P. para
a Obtenção do Título de
Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Vahan Agopyan
Professor Doutor do Departamento de Engenharia
de Construção Civil da EPU SP.

São Paulo, 1990.

*A Ary Torres, seus companheiros
e sucessores, que nos legaram
os dados usados neste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao realizar este trabalho, o autor sentiu-se como mais um dos agentes na consecução de uma tarefa que vem envolvendo algumas gerações de IPTeanos. A todos os envolvidos nesse mister, velhos colegas, vivos ou mortos, de todos os postos, vão pois os primeiros e emocionados votos de gratidão, esperando que continuem a dar inspiração a esse trabalho que ainda tem muito a percorrer. Os colegas contemporâneos, que deram ao autor esta missão, assumindo inclusive alguns encargos que lhe seriam destinados, para ser possível vir a público um acervo inédito julgado de valor, mostraram que o espírito das velhas gerações continua presente. Sejam estes incluídos na ampla categoria dos primeiros, integrando o atual Laboratório de Concreto, o atual Agrupamento de Materiais de Construção Civil e a atual Divisão de Construção Civil do IPT, em todos os graus hierárquicos e funções.

Não menos importante foram o apoio, o incentivo e a abnegação dos familiares, que durante certo tempo conviveram com um personagem ausente e meio aéreo, tendendo ao desligamento de um convívio normal. Obrigado, querida esposa Neide, e queridos filhos Rodrigo, Rafael e Júlio! Agora espero ficar mais presente.

A materialização desta tese não pode deixar de ser creditada às pessoas que participaram diretamente nos trabalhos, em ordem (mais ou menos) cronológica: Estagiário Milton Seiti Kutliski; Técnico Roberto Silva; Técnico Pedro Carlos Bilesky; Técnica Cristianne Kinuko Higai; Secretária Meire Antonia Aparecida Pegoraro; Técnico Alvaro Ferraz; Técnico Angelo Derolier; Técnico Waldemar Mastromauro; Técnico José Roberto Batelocchi; Engenheiro Luiz Tsuguo Hamassaki e Engenheiro Wanderley Moacyr John.

Ao Professor Dr. Vahan Agopyan, por sua atuação polivalente e altamente positiva como orientador, também agradeço.

São Paulo, Junho de 1990.

RESUMO

TAN GO (PT 571)

Os princípios básicos da hidratação do cimento, sua evolução com o tempo e seu relacionamento com o desenvolvimento da resistência do concreto são revistos à luz da literatura técnica, concluindo-se que a resistência à compressão pode ser expressa como função da relação água/cimento dividida pelo grau de hidratação, mantidos constantes os materiais constituintes e as condições externas.

Passam-se então em revista trabalhos técnicos sobre o relacionamento dentro da cadeia tempo-hidratação-porosidade-resistência à compressão.

Propõem-se dois modelos matemáticos linearizáveis: o primeiro, mais simples, relaciona a resistência à compressão ao tempo e à relação água/cimento, desprezando uma eventual influência da própria relação água/cimento na velocidade de hidratação; o segundo leva em conta esse fator, admitindo uma lei matemática hipotética na dedução.

O ajuste de ambos os modelos foi feito a resultados de um programa de longa duração em andamento no IPT, iniciado em 1933 e a findar em 2015, com 75 cimentos portland ensaiados à compressão na forma de concretos de agregados padrão e cinco diferentes relações água/cimento, a idades variando de 2 dias a 50 anos. Ambos os ajustes foram satisfatórios mas o segundo modelo mostrou-se mais apurado.

A linearização, possível em ambos os modelos, propiciou a proposição de um método para previsão de resistências baseado na extrapolação a partir de dois resultados a duas idades mais baixas que a em questão.

O desenvolvimento das resistências à compressão com o tempo apresentou perturbações que ensejam pesquisas sobre eventual ocorrência de quedas de resistência ocasionadas por expansão do próprio gel de C-S-H ou outros compostos, seguidas de também hipotéticas recuperações autógenas.

ABSTRACT

The basic principles of cement hydration are presented with emphasis on its evolution with time and its relationship with the compressive strength. It was inferred that the compressive strength may be expressed as a function of the quotient of water-cement ratio and the degree of hydration of the cement as long as the materials and the external conditions are kept constant.

The technical literature concerning the relationship of time-hydration-porosity-compressive strength is reviewed.

Two linearizable mathematical models are proposed: the first one, more simple, relates compressive strength to time and water/cement ratio, not taken into account the possible effect of the latter in the hydration speed; the second one, takes this factor into account, and an hypothetical mathematical law, relating the degree of hydration and water/cement ratio, is admitted in its development.

Both models were adjusted to the results of a long-term compressive strength program carried on at IPT, since 1933 and finishing in 2015; concrete samples made with 75 ordinary portland cements and five different water/cement ratios for each cement have been tested at ages varying from 2 days up to 50 years. A good adjustment was obtained for the two models, but the second one has the best correlation.

By the linearization of the two models it was possible to propose a method to predict the compressive strength of the concrete at a certain age by the results of specimens tested in two earlier ages.

The strength development with the time presented some variations that required further research on the falling the strength by an eventual expansion of C-S-H gel or other compounds, followed by an also hypothetical autogenous healing.

TANGÓ, C.E.S. *Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade.* Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.

página, localização	onde se lê	lera-se
v, título	ABSTRACT	ABSTRACT (A Study of Portland Cement Concrete Compressive Strength Development up to 50 Years Age).
vii, alínea 1	MODELO MATEMÁTICO	MODELOS MATEMÁTICOS
2, alínea 30	... previsão e regressão de previsão de ...
9, alínea 21	... Brunauer e Kantro ⁽²⁾ Brunauer e Kantro, citados em ⁽²⁾ ,
10, alínea 14	frequentemente	frequentemente
13, figura 3, (X)	cristalização	cristalização
20, figura 5	(espaço preenchido por pontos)	(acrescentar a indicação) BEL
20, figura 5, texto	... $1/m_{cc}$ = volume inicial de cimento.	... $1/m_{cc}$ = volume inicial de cimento; w_n = volume virtual de água não evaporável. (Considerou-se a massa específica da água igual a 1).
21, alíneas 12 e 16	área	água
54, alínea 23	... níveis C_3A níveis de C_3A ...
59, alínea 19	Carino, Lew e Volz, ...	Carino, Lew e Volz ⁽¹¹⁷⁾ ...
59, alínea 20	... Considerando Consideraram ...
59, alínea 21	... hiperbólico hiperbólico ...
65, título do item 4	MODELO MATEMÁTICO	MODELOS MATEMÁTICOS
72, alínea 6	$1/g_h = 1 + [g_{ho}'(T-T_0)]$	$1/g_h = 1 + [g_{ho}'(T-T_0)]$
74, figura 16, indicação de ângulo na origem	g_{ho}'	$\text{arc tg } g_{ho}'$
80, alínea 6	20 de Abril de 1935	20 de Abril de 1933
86, alínea 1	... tempo:	... tempo, em dias:
89, alínea 8	... além do cimento 23, único além dos cimentos 10, 11, 12, 23, 26, 32, 43 e 64, únicos ...
120, após ref. (116)	-	⁽¹¹⁷⁾ CARINO, N.J.; LEW, H.S. & VOLZ, C.K. <i>Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method.</i> Journal of the American Concrete Institute, N. 2, Proceedings V.80, Mar. Apr. 1983, pp. 93-101.

ÍNDICE

	pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. O FENÔMENO DO ENDURECIMENTO DA PASTA DE CIMEN- TO PORTLAND	3
2.1. A composição química e a morfologia do cimento portland	3
2.2. A hidratação do cimento portland	8
2.3. Relação entre a hidratação e a resistên- cia mecânica	16
3. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE ESTUDOS DO RELA- CIONAMENTO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, O GRAU DE HIDRATAÇÃO E O TEMPO	26
3.1. Modelos do grau de hidratação em função do tempo	27
3.2. Relacionamento entre o grau de hidratação, a porosidade, a resistência e o tempo	38
3.3. Influências sobre o grau de hidratação como função do tempo	44
3.4. A resistência mecânica como função de diversas variáveis	47
3.5. Estudos de longa duração	63

4. FORMULAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO	65
4.1. Relação entre a resistência mecânica e o grau de hidratação	65
4.2. Relação entre o grau de hidratação e o tempo	66
4.3. Relação entre a resistência à compressão e o tempo	75
5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS	80
5.1. Levantamento de dados	80
5.1.1. Notas históricas	80
5.1.2. Coleta e preparo das amostras de cimento	81
5.1.3. Ensaio de cimento para caracterização	81
5.1.4. Ensaio em concretos	83
5.2. Ajustes dos modelos	85
5.3. Análise crítica dos modelos	87
5.4. Simulação de extrapolações	90
6. CONCLUSÃO	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ANEXO I (Tabela 3)	121
ANEXO II (Tabela 4)	124
ANEXO III (Tabela 5)	129
ANEXO IV (Tabela 6)	131
ANEXO V (Tabela 7)	134
ANEXO VI (Tabela 8)	144

ÍNDICE DAS TABELAS

	pág.
Tabela 1 - Componentes Químicos do Clínquer	4
Tabela 2 - Composição Mineralógica do Clínquer ..	5
Tabela 3 (Anexo I) - Amostras de Cimento, Anos de Amostragem, Números de Certificados IPT e Códigos dos Fabricantes	121
Tabela 4 (Anexo II) - Ensaaios Físicos, Mecânicos e Químicos das Amostras de Cimento	124
Tabela 5 (Anexo III) - Caracteriação Granulométrica dos Agregados Empregados, Individualmente e Após Composições	129
Tabela 6 (Anexo IV) - Temperaturas Médias Mensais de Câmara Úmida	131
Tabela 7 (Anexo V) - Traços, Relações Água/Cimento e Resistências Obtidas para os Concretos Ensaaiados à Compressão	134
Tabela 8 (Anexo VI) - Coeficientes das Equações 73, 74, 81 e 82 Calculados por Regressão Linear Múltipla	144
Tabela 9 - Condições para Simulações de Previsão de Resistência	94

ÍNDICE DAS FIGURAS

	pág.
Figura 1 - Representação Esquemática da Hidratação do Cimento	11
Figura 2 - Desenvolvimento da Micro Estrutura Durante a Hidratação	12
Figura 3 - Modelo de Feldman e Sereda para a Estrutura do Gel	13
Figura 4 - Balanço de Volumes em uma Pasta de Cimento	15
Figura 5 - Evolução dos Volumes na Pasta em Hidratação	20
Figura 6 - Dependência entre dg_h/dt e g_h e Curva g_h em Função do Tempo	35
Figura 7 - Resistência à Compressão em Função do Grau de Hidratação	39
Figura 8 - Hidratação de Alita e Belita com Diferentes Relações a/c	45
Figura 9 - Relação entre a Resistência à Compressão e a "Relação Água/Cimento Efetiva".	48
Figura 10 - Efeitos da Relação Água/Cimento na Relação entre a Resistência e a Quantidade de Material Hidratado	50
Figura 11 - Relacionamento entre Resistências à Compressão e à Tração com o Grau de Hidratação	52

Figura 12 - Esquema Simplificado de Hidratação num Instante Genérico	67
Figura 13 - Situação Hipotética de Três Leis Cinéticas de Hidratação Ocorrendo Simultaneamente	68
Figura 14 - Diagrama Esquemático do Grau de Hidratação em Função do Tempo	70
Figura 15 - Simplificação da Evolução do Grau de Hidratação Segundo uma Função Homográfica	72
Figura 16 - "Velocidade" Inicial de Hidratação em Função da Relação Água/Cimento \times	74
Figura 17 - Curvas de Abrams de Concreto onde a Relação Água/Cimento não Interfere na Velocidade de Hidratação	78
Figura 18 - Curvas de Abrams de Concretos onde a Relação Água/Cimento Interfere na Velocidade de Hidratação	78
Figura 19 - Linearização de f_c em Função do Tempo	92
Figura 20 - Previsão de Resistências a 28 dias a partir dos Resultados a 2 e 3 dias de Idade	95
Figura 21 - Previsão de Resistências a 28 dias a partir dos Resultados a 3 e 7 dias de Idade	96
Figura 22 - Previsão de Resistências a 90 dias a partir dos Resultados a 3 e 7 dias de Idade	97
Figura 23 - Previsão de Resistências a 90 dias a partir dos Resultados a 7 e 28 dias de Idade	98

Figura 24 - Previsão de Resistências a 1 ano a partir dos Resultados a 7 e 28 dias de Idade	99
Figura 25 - Previsão de Resistências a 1 ano a partir dos Resultados a 7 e 180 dias de Idade	100
Figura 26 - Previsão de Resistências a 1 ano a partir dos Resultados a 90 e 180 dias de Idade	101
Figura 27 - Previsão de Resistências a 10 anos a partir dos Resultados a 1 e 5 anos de Idade	102
Figura 28 - Previsão de Resistências a 25 anos a partir dos Resultados a 1 e 10 anos de Idade	103
Figura 29 - Previsão de Resistências a 25 anos a partir dos Resultados a 5 e 10 anos de Idade	104
Figura 30 - Previsão de Resistências a 50 anos a partir dos Resultados a 6 meses e 5 anos de Idade	105
Figura 31 - Previsão de Resistências a 50 anos a partir dos Resultados a 6 meses e 10 anos de Idade	106
Figura 32 - Previsão de Resistências a 50 anos a partir dos Resultados a 6 meses e 25 anos de Idade	107

1. INTRODUÇÃO

A evidente dificuldade de se atravessarem gerações aguardando resultados de ensaios faz com que se encontrem poucas referências a experimentos para verificação da resistência mecânica de concretos a idades como 25 ou 50 anos ⁽¹⁾. Teria sido preciso que se tivessem controladas as características dos concretos, as condições de cura, um sistema de agendamento que garantisse a realização de ensaios num futuro muito distante, um sistema de arquivo de resultados resistente ao tempo; os idealizadores do programa de ensaios poderiam não estar vivos no momento das conclusões; a essência do planejamento dos ensaios poderia se tornar obsoleta durante tanto tempo; os materiais e as técnicas empregadas poderiam sofrer evoluções que não permitissem o aproveitamento dos resultados por ocasião de sua interpretação; o local de armazenamento e a identificação dos corpos de prova teriam que resistir ao tempo, às imprevisíveis mudanças de local que o laboratório pudesse vir a sofrer; o laboratório ou o financiador do estudo poderiam vir a deixar de existir ... Não será possível enumerar as possibilidades. Somente planejadores ousados, desprendidos e de visão ainda mais longa que o prazo de seus experimentos seriam capazes de preparar meticulosamente um plano de ensaios, confeccionar com esmero séries e séries de corpos de prova, caracterizar de forma a mais abrangente possível os materiais empregados, estabelecer uma rotina de trabalho e deixar tal tesouro plantado para vir a frutificar nas mãos sabe-se lá de quem. Não menos admiração merecem fabricantes de cimento capazes de financiar empreitadas do gênero.

Este trabalho é a continuação de um estudo iniciado por ocasião da elaboração da dissertação de mestrado do autor ⁽²⁾, onde se tratou da previsão de resistências do cimento e do concreto até 28 dias. Como naquele trabalho, pretendeu-se fazer uma apreciação de resultados de ensaios do riquíssimo acervo dos Certificados do

I.P.T. - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Desta feita, o alvo foram os dados de um programa de ensaios de longa duração, cujos primeiros resultados datam de 1933 e cuja agenda prevê ainda ensaios que se sucedem até o ano de 2015, sendo que praticamente todos os resultados de 25 anos de idade já estavam disponíveis, além de uma parcela já significativa de resultados a 50 anos de idade.

Para confronto com esses resultados, planejou-se deduzir modelos matemáticos para a evolução da resistência mecânica com o tempo e a relação água/cimento, a partir de certas relações empíricas consagradas entre a resistência à compressão e propriedades da pasta (Equações de Feret ^(3,4), Abrams ⁽⁵⁾, Powers e Brownyard ⁽⁶⁾, Powers ^(7,8)), além de suposições do autor. O confronto desses modelos com os resultados experimentais serviria para a escolha e ajuste de um modelo aceitável.

Um objetivo final seria estabelecer um método prático para previsão de resistências, aplicável a concretos, e por extensão, a argamassas e pastas de cimento portland.

A tese que se procura demonstrar é a de que um modelo aceitável para a evolução da resistência do concreto com o tempo poderá ser empregado para fins práticos em obras.

Para isso, procura-se, na parte 2, apresentar o embasamento teórico-experimental sobre o endurecimento do cimento, como causa da evolução da resistência do concreto com o tempo; na parte 3 apresentam-se sucintamente os resultados de uma pesquisa bibliográfica sobre o estado-da-arte da modelagem matemática do fenômeno, passando, na parte 4, às deduções de modelos matemáticos; na parte 5 estes modelos são confrontados aos resultados experimentais, e escolhido um modelo, este é submetido a simulações de previsão e regressão de resistências, demonstrando possibilidades de emprego prático. Conclui-se que o modelo proposto é utilizável com certas limitações explicitadas, sugerindo-se temas para a continuação de estudos correlatos.

2. O FENÔMENO DO ENDURECIMENTO DA PASTA DE CIMENTO PORTLAND

Procurar-se-á abordar o tema restringindo-o ao cimento portland comum sem adições ⁽¹⁾ e às condições ambientais normais de temperatura e pressão, nas quais se desenvolveram os experimentos utilizados neste estudo; por outro lado, tendo sido o assunto já tratado em trabalho do qual este é continuação ⁽²⁾, e para não tornar excessivamente volumosa esta tese, tentar-se-á o máximo de concisão, reportando o leitor às referências bibliográficas para maior aprofundamento.

2.1. A composição química e a morfologia do cimento portland

O cimento portland é obtido de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (fundamentalmente CaCO_3) e argila (fundamentalmente hidrossilicatos de alumina), reduzida a pó e submetida à ação de temperaturas da ordem de 1400 a 1500°C; nessas condições as matérias primas reagem entre si, originando novos compostos, que, devido a fenômenos químicos e físicos, se aglomeram em pelotas de dimensões variáveis, que compõem o chamado clínquer ^(10,11). O clínquer já possui os compostos fundamentais do cimento portland, faltando-lhe porém a finura adequada e uma adição controladora do tempo de pega ⁽¹²⁾; numa etapa seguinte, pois, o clínquer é moído e recebe adições: o gipso, destinado ao controle da pega, e outras, com outros fins específicos, e opcionais: as escórias granuladas básicas de alto-forno, as pozolanas e, mais recentemente, o próprio calcário ^(9,13,14); a partir daí temos os cimentos portland, comum, de alto forno ou pozolânico.

A parte experimental deste trabalho versa sobre o cimento portland comum sem adições, ou seja: o cimento portland que não contém nem escória, nem pozolana e nem calcário, apenas clínquer e gipso. Esse tipo de cimento, que podemos considerar fundamental, está presente em todos os tipos de cimento produzidos no Brasil; e também na maior parte dos cimentos produzidos em todo o mundo. A atual designação normalizada no Brasil para esse tipo de cimento

("cimento portland comum sem adições") é um tanto extensa, inclusive devido à necessidade de diferenciação para fins comerciais, e por isso, passaremos doravante a chamá-lo simplesmente de "cimento portland", como é costume na literatura internacional desde o século passado.

Sabe-se que o cimento portland anidro não é um composto químico simples. Segundo Duda ⁽¹⁰⁾, os componentes químicos do clínquer são (Tabela 1):

Tabela 1 - Componentes Químicos do Clínquer ⁽¹⁰⁾

SiO ₂	16 - 26 %
Al ₂ O ₃	4 - 8 %
Fe ₂ O ₃	2 - 5 %
Mn ₂ O ₃	0 - 3 %
TiO ₂	0 - 0,5 %
CaO	58 - 67 %
MgO	1 - 5 %
K ₂ O + Na ₂ O ...	0 - 1 %
SO ₃	0,1 - 2,5 %
P ₂ O ₅	0 - 1,5 %

Os componentes químicos da Tabela 1 são encontrados, no clínquer, nas formas mineralógicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição Mineralógica do Clínquer (10,15)

Classificação	Designação	Campo de Validade	Fórmula clássica	Abreviatura
Fases Principais	Silicato tricálcico (alita)	-	$3CaO.SiO_2$	C_3S
	Silicato dicálcico-beta '(belita)'(*)	-	$2CaO.SiO_2$	Beta - C_2S *
	Aluminato tricálcico	$Al_2O_3 \geq Fe_2O_3$	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
	Ferro-aluminato tetracálcico		$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF
	Ferro aluminato cálcico (fase de cristais mistos)	$Al_2O_3 < Fe_2O_3$	$2CaO.(Al_2O_3, Fe_2O_3)$	$C_2(A,F)$
Fases Menores **	Caí livre	-	CaO	-
	Magnésia livre (periclásio)	-	MgO	-
	Aluminato, rico em álcalis	$K_2O + Na_2O < SO_3$	$(K,Na)_2 O.8CaO.3Al_2O_3$	$(K,N) C_8A_3$
	Sulfato alcalino	-	$(K,Na)_2 SO_4$	-
	Sulfato de cálcio	$K_2O + Na_2O > SO_3$	$CaSO_4$	-

* O silicato dicálcico pode ocorrer em quatro modificações polimórficas, denominadas ALFA, ALFA', BETA e GAMA; usualmente a forma encontrada no clínquer portland é a BETA (15);

** Apresentam-se as mais comuns, ocorrendo ainda Fosfatos, Fluoretos, óxidos de Metais Pesados (15).

Os componentes químicos citados na Tabela 1, durante a fabricação do cimento, se combinam entre si formando fases de cristais mistos que contém os componentes de outras fases, em pequenas quantidades, num enlace cristalino, assim como também as demais substâncias químicas incapazes de formar fases autônomas. Glasser ¹⁶ procurou resumir a formação do clínquer da seguinte forma simplificada:

(i) A temperaturas da ordem de 600 a 700°C ocorre a descarbonatação e desidroxilação. São formados produtos sólidos de reação química de decomposição, porosos e de graduação fina. A fase gasosa contém componentes reativos, como o CO₂, e componentes catalíticos, que ajudam as reações;

(ii) A estas baixas temperaturas, fases intermediárias, como carbonato-silicatos, se formam. Enquanto estas fases são subsequentemente decompostas na zona de alta temperatura do forno, elas podem agir como importantes precursores da formação de C₂S, aluminatos e ferritas, etc. Seu papel na cinética global de formação ainda está para ser avaliado;

(iii) As altas concentrações locais de "voláteis" - ex.: cloretos, óxidos de enxofre - atingidas nos modernos fornos de combustível eficiente, podem também desempenhar um importante papel na reação. Em particular, altas concentrações locais desses componentes podem exceder o ponto de condensação, resultando na formação de um líquido rico em sais com um ponto de fusão transitório;

(iv) Reações entre os componentes principais - CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂ - acontecem a velocidades desiguais. Formação de aluminatos de cálcio e ferrita parecem ocorrer a temperaturas mais baixas e a velocidades mais altas que a formação dos silicatos de cálcio, durante os primeiros estágios de reação da partida;

(v) Os primeiros estágios da clínquerização são também marcados pela formação de aluminatos de cálcio, ferritas, silicatos, etc.,

que são termodinamicamente meta-estáveis em termos de composição global. Exemplos incluem aluminatos, como silicatos de $C_{12}A_7$, como C_2AS (gehlenita), e ferritas como CF. Sua formação é condicionada parcialmente por cinética mais favorável, mas também pela distribuição estatística dos componentes químicos, que dão acesso a áreas locais relativamente enriquecidas em componentes das fases exóticas, em relação ao conjunto. O silicato dicálcico se forma a temperaturas muito mais baixas que o silicato tricálcico. A fase de C_2S pode se desenvolver no estado sólido, enquanto que a de C_3S , para todos os fins práticos, se forma somente na presença de uma fase líquida;

(vi) Por volta de $1300^{\circ}C$ desenvolvem-se o líquido e cristais de C_3S . Em clínqueres bem misturados e bem queimados, um equilíbrio, mineralógico e de textura, é obtido. Os mecanismos de transporte via fase líquida foram extensivamente estudados nas décadas recentes e é possível quantificar as forças que conduzem à formação de C_3S , e determinar, em geral, o papel dos componentes menores e mineralizadores na cinética do processo*.

Após a moagem conjunta com gipso, o cimento portland se torna um material pulverulento, cujos grãos, em sua maioria, são partículas do clínquer que contém portanto os minerais do mesmo. As dimensões dessas partículas, variáveis de acordo com as necessidades de fabricação, devem estar compreendidas entre 3 e 30 micrômetros nas proporções de cerca de 40 a 50% para cimentos correntes, 55 a 65% para cimentos de alta resistência e acima de 70% para cimentos de mais alta resistência (a 28 dias de idade)⁽¹⁰⁾, proporções essas variáveis segundo a composição mineralógica. A grosso modo, pode-se dizer que as partículas do cimento estão distribuídas entre 1 micrômetro e 100 micrômetros em seu diâmetro⁽¹²⁾, com área específica média da ordem de 2000 a 4000 cm^2/g .

O cálculo da composição mineralógica do clínquer ou do cimento a partir de sua composição química pode ser feito por meio de métodos como o de Bogue ⁽¹⁷⁾, que apesar de antigo, tem sido o mais empregado, levando sempre em conta suas limitações: devem-se descontar as contribuições das eventuais adições, como pozolana, escória ou calcário ⁽¹⁸⁾, deve ser aceitável a hipótese de ocorrência de esfriamento lento do clínquer para cristalização completa dos compostos e só se admite a formação de C₃A quando a relação Al₂O₃/Fe₂O₃ for maior que 0,64. A hipótese da cristalização completa é um estado ideal raramente atingido, e por isso o método fornece a denominada composição mineralógica *potencial* de Bogue.

O emprego da *espectrometria de raios-X* permite a obtenção rápida e econômica da composição mineralógica ⁽¹⁹⁾, no caso do clínquer, a *microscopia de reflexão* pode ser utilizada para esse propósito ⁽²⁰⁾.

Uma representação das dimensões médias das partículas do cimento pode ser inferida da Área Específica "Blaine" ⁽²¹⁾, o *resíduo na peneira de 0,075 mm* ⁽²¹⁾ fornece apenas um ponto da distribuição granulométrica na cauda superior; métodos para se obter a distribuição granulométrica baseados nos princípios do *turbidímetro de Wagner* ⁽²²⁾, inclusive usando raios Laser, podem ser empregados.

2.2. A hidratação do cimento portland

A resistência mecânica do concreto, das argamassas ou das pastas de cimento portland é devida a um fenômeno físico-químico, de combinação do cimento com a água, que chamamos *hidratação*.

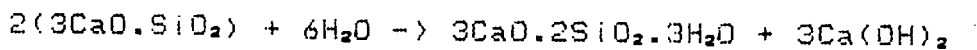
Os grãos de cimento combinam-se com a água, e em sua superfície formam-se cristais, preponderantemente aciculares, do material hidratado. Esses cristais, em seu entrelaçamento cada vez maior, à

⁽¹⁷⁾ Quando o método é empregado para cimentos; geralmente, porém, se forem desconhecidas a composição e a proporção das adições, o método não pode ser empregado; praticamente todo o cimento produzido atualmente no Brasil contém alguma dessas adições.

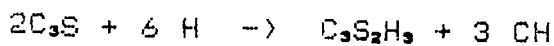
medida que progride a hidratação, são os responsáveis pela aglutinação do conjunto ⁽²³⁾.

Os silicatos hidratados, de forma simplificada, teriam a composição química dada pelas equações ⁽¹²⁾:

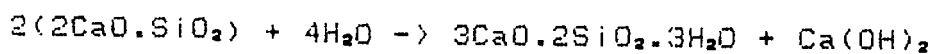
a) da hidratação do silicato tricálcico:



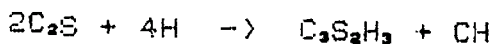
ou, em notação abreviada,



b) da hidratação do silicato dicálcico:



ou, em notação abreviada:



O principal responsável pela resistência da pasta endurecida seria o material resultante da hidratação dos silicatos, e chamado por alguns autores de "tobermorita" (que nas equações acima assume a fórmula abreviada $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$). O "sub-produto" das reações seria a "portlandita" que tem a fórmula da cal hidratada ou CH (hidróxido de cálcio). As proporções de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e "portlandita" no material hidratado dependeriam da composição mineralógica do cimento. As equações acima são apenas simplificações de um fenômeno bastante mais complexo. Brunauer e Kantro ⁽²⁾ mostraram diferenças entre as "tobermoritas" oriundas do C_3S e do C_2S , dando-lhes a fórmula genérica $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$, onde x e y seriam as relações molares CaO/SiO_2 e $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ respectivamente; o valor de x tenderia a 1,39 para o C_3S

hidratado, e a 1,72 para o C_2S hidratado. Desde 1948, pelo menos, há uma tendência para o abandono da denominação "tobermorita" para o produto de hidratação dos silicatos, usando-se a designação ampla "C-S-H" ⁽²⁶⁾. Collepardi ⁽²⁹⁾ assinala que durante bom tempo se considerou que o C-S-H tivesse uma estrutura similar à do mineral tobermorita, de pacotes laminares contendo duas ou três camadas elementares com cerca de 1 nanômetro de espessura, entre as quais pudessem se alojar moléculas de H_2O ; esta última opinião perdurou; todavia, o uso do termo "tobermorita" para designar o C-S-H tem sido desaconselhado.

O C_3A reage muito rapidamente com a água para dar, desde os primeiros minutos, cristais cujo número e tamanho crescem muito depressa. Eles são constituídos de uma mistura de hidratos C_4AH_n (dá-se a n, frequentemente, os valores de 13 a 19) e C_2AH_6 . Esses hidratos a longo prazo devem se transformar em C_3AH_6 ⁽²⁴⁾.

O C_4AF reage também muito rapidamente em presença de água, dando hidratos análogos aos do C_3A , porém se pode lhes deduzir a natureza por simples substituição do Al por Fe. Esses hidratos também se apresentariam sob a forma de solução sólida $C_3AH_6 - C_3FAH_6$ ⁽²⁴⁾.

Genericamente, pode-se notar o produto da hidratação dos aluminatos por $C_4(A,F)H_{13}$ nas primeiras idades ⁽²⁶⁾.

A Figura 1 sumariza o mecanismo da hidratação como um todo, nas idades iniciais.

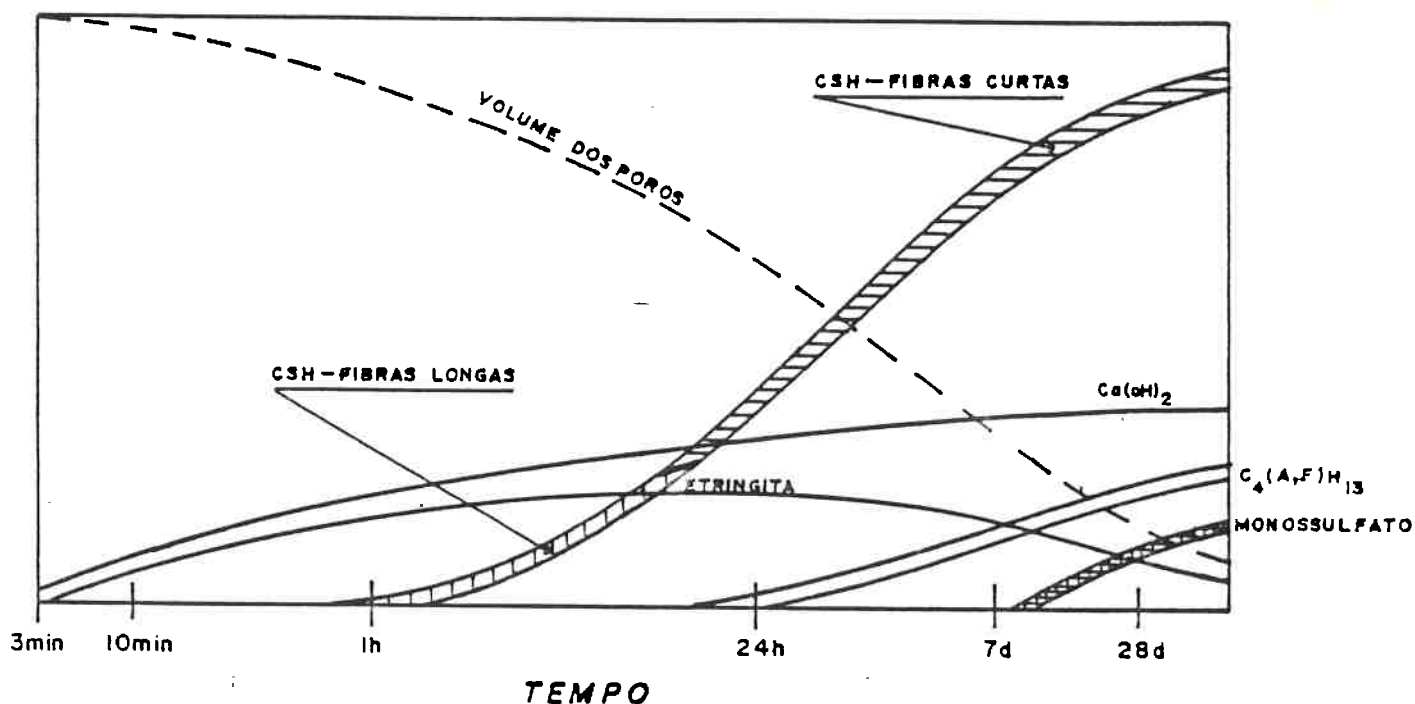


Figura 1 - Representação esquemática da hidratação do cimento (25,26).

Na Figura 1 aparecem também a "etringita" ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e o monossulfo aluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), a primeira, da reação do gesso com o C_3A e o segundo, da transformação da etringita (25). Mais recentemente tem-se preferido chamar mais genericamente estas fases de AFt e AFm , respectivamente, em vista das diferenças que os compostos reais apresentam em relação àqueles, correspondentes a uma situação ideal (27,28,29).

Scrivener, citado por Taylor (27), apresentou um interessante esquema sobre a estrutura formada em torno dos grãos de cimento

durante a hidratação, em sua tese de doutoramento na Universidade de Londres.

A Figura 2 mostra o esquema de Scrivener.

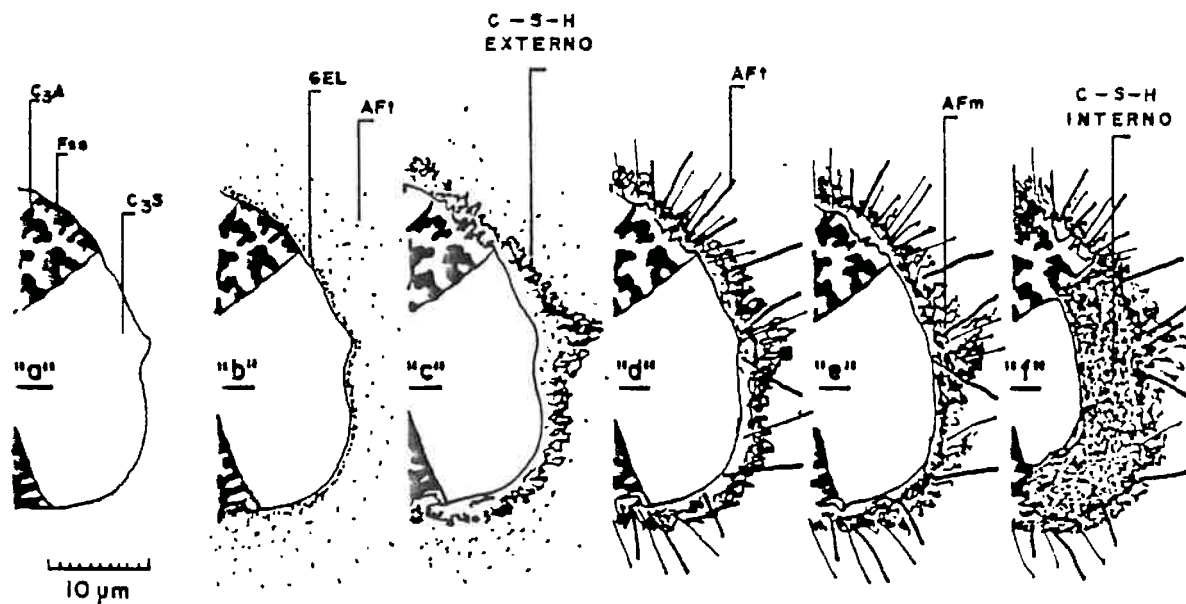


Figura 2 - Desenvolvimento da micro estrutura durante a hidratação de um cimento portland, segundo Scrivener (27).

- a) Seção não hidratada de um grão polimineral (fase intersticial exagerada);
- b) -10 min.: Algum C_3A (e/ou Fss) reage com sulfato de cálcio em solução. Amorfo, gel rico em aluminato forma-se na superfície e agulhas curtas de $AF1$ nucleiam-se na superfície do gel e na solução;
- c) -10 horas: Reação do C_3S produzindo $C-S-H$ "externo" sobre a estrutura deixada de agulhas de $AF1$ -1 micrômetro entre a superfície do grão e a casca hidratada;
- d) -18 horas: Hidratação secundária do C_3A (e/ou Fss) produzindo agulhas longas de $AF1$. Produto de $C-S-H$ "interno" começa a se formar no interior da casca a partir da continuação da hidratação do C_3S ;
- e) 1-3 dias: O C_3A reage com algum $AF1$ no interior da casca formando placas hexagonais de AFm . A contínua formação de produto "interno" reduz a separação do grão anidro com a casca hidratada;
- f) -14 dias: $C-S-H$ "interno", suficiente para preencher o espaço entre o grão e a casca, foi formado. O $C-S-H$ "externo" começou a ser mais fibroso.

Existem indicações experimentais de semelhanças substanciais entre os mecanismos de hidratação do C_3S e do Beta- C_2S (**). Há, porém, diferenças nas velocidades de hidratação, conseqüência das diferenças nas estruturas cristalinas entre os dois silicatos e também à falta de super-saturação com respeito ao CH, no caso do C_2S . Nos aspectos principais a composição e morfologia dos C-S-H oriundos do C_2S ou C_3S parecem similares, com diferenças definidas em detalhes micro estruturais (30,31).

O modelo proposto por Feldman e Sereda (32) para ilustrar a estrutura do cimento hidratado, é apresentado na Figura 3.

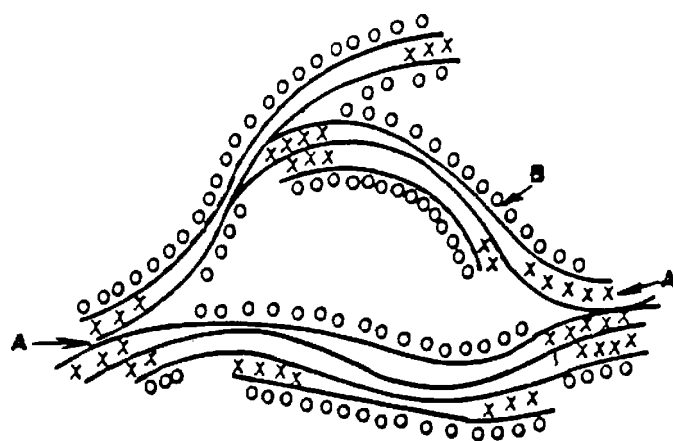


Figura 3 - Modelo de Feldman e Sereda (32) para a estrutura do gel de cimento.

- (A) ligação sólido-sólido;
 (B) camadas de C-S-H;
 (X) água de cristalização entre as camadas moleculares;
 (O) água fisicamente adsorvida.

(**) O Beta- C_2S é a forma alotrópica do C_2S mais comumente encontrada no cimento.

Por outro lado, Powers (4,7,8) e Brownhard (4) estudaram as variações de volume que ocorrem na pasta de cimento em virtude da hidratação, relacionando-as a propriedades da pasta endurecida, dentro de um enfoque físico. Nesses trabalhos, o fenômeno da hidratação é relacionado ao desenvolvimento da *água não evaporável, da área específica do gel, e da relação gel/espaco*, esta última sendo o volume ocupado pelo produto da hidratação, que é maior que o volume original de sólidos presente na pasta e que cresce com o tempo, em relação ao espaço disponível para esse crescimento.

A Figura 4 (23) mostra os volumes dos componentes da pasta de cimento desde o momento da mistura, quando o grau de hidratação (g_h) é nulo, até à hidratação total ($g_h = 1$, condição ideal), adotando valores comuns para as relações volumétricas gel/cimento e gel/poros vazios.

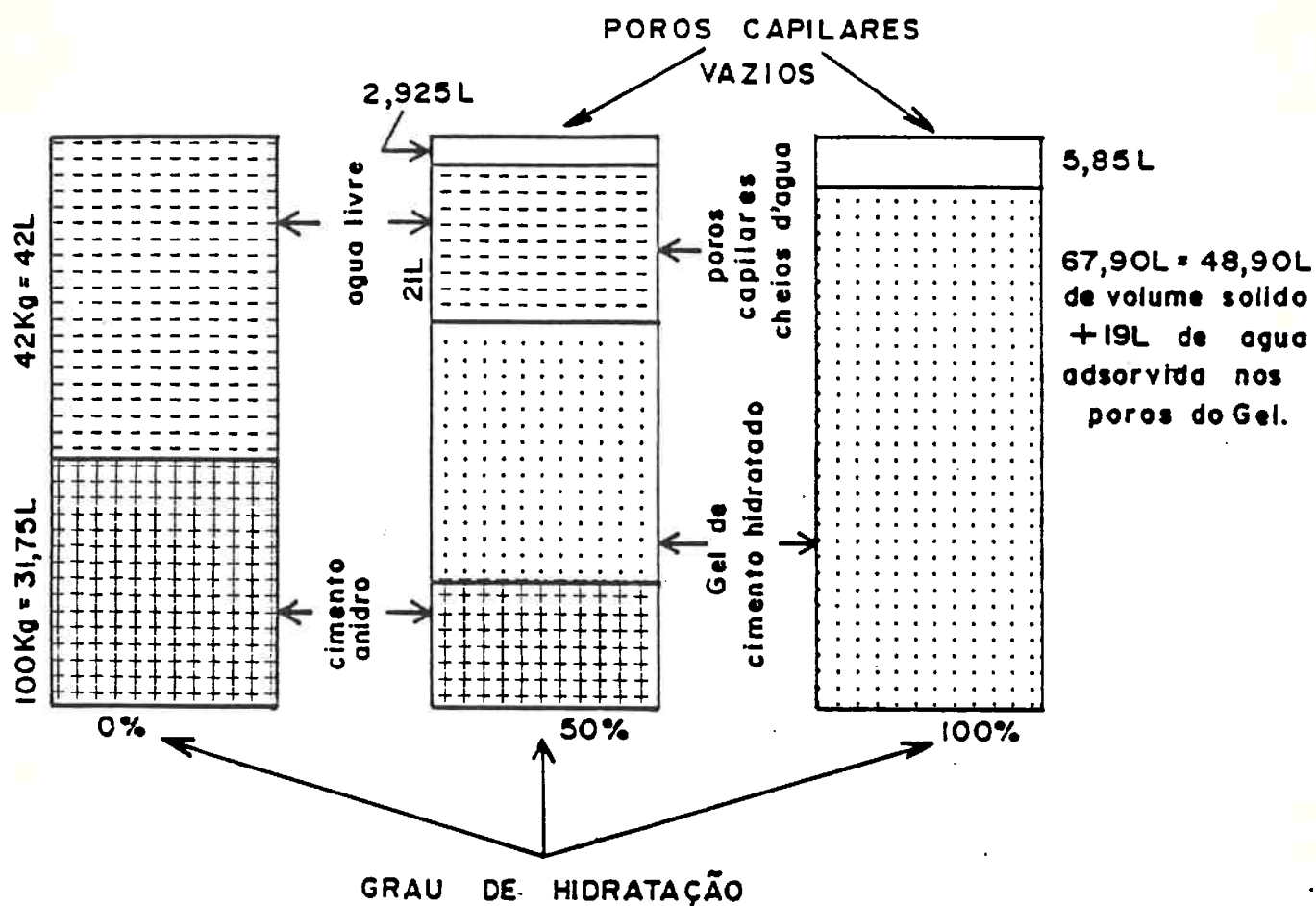


Figura 4 - Balanço de volumes em uma pasta de cimento para os graus de hidratação g_h iguais a zero, 0,5 e 1 (23). Supõe-se haver inicialmente a exata água necessária para a hidratação completa do cimento.

2.3. Relação entre a hidratação e a resistência mecânica

Não somente a resistência mecânica, mas também outras propriedades do concreto endurecido, tais como a durabilidade, a retração e a deformação lenta, dependem da estrutura da pasta de cimento endurecido. Conforme foi visto no item anterior, esta pode ser simplificada representada por partículas de cimento ainda não hidratado, recobertas pelo produto de hidratação de estrutura fibrosa, entre os quais são disseminadas cavidades de dimensões variáveis grosso modo entre 1 e 0,01 micrômetros, chamadas poros capilares. Na Figura 4, pode-se observar um volume de poros capilares vazios e um volume de poros capilares cheios d'água; os vazios se originam da contração de volume sofrida pelo sistema cimento + água ao se transformar em cimento + gel + água. Todavia, ocorre um aumento substancial no volume de sólidos, isto é, gel + cimento anidro, ou uma diminuição no volume de poros capilares.

Além desses poros capilares, o gel tem também uma estrutura porosa. Segundo Powers ⁽²⁾ esses poros têm dimensões entre alguns décimos e um milésimo de nanômetro, e seu volume representa cerca de 28% do volume do gel. A área específica do gel atinge cerca de 200 m²/g, segundo Winslow e Diamond e também Litvan ⁽²³⁾.

Os fatores mais importantes para determinar a resistência mecânica do gel seriam: a ligação que uniria as partículas de gel de cimento, a área específica, a porosidade capilar, a forma das partículas do gel e a umidade presente na pasta cimentícia.

A natureza da ligação é ponto controvertido: uns defendem uma natureza exclusivamente de contato entre partículas ou forças de

Van der Waals, como Soroka e Sereda ⁽³⁴⁾ ou Feldman e Sereda ⁽³⁵⁾, outros uma natureza mista, entre forças de Van der Waals e ligações de valência, como Brunauer e também Chatterji e Jeffery, além de Wittman e Setzer.

Sejam as ligações de qualquer natureza, a área específica desempenha papel importante. *O entrelaçamento das fibras dos produtos de hidratação* favorece notavelmente o desenvolvimento da resistência mecânica, entrando aí a influência do fator forma.

A umidade relativa, ao aumentar, provoca a diminuição das forças de ligação entre partículas, e assim também diminui a resistência mecânica do cimento ⁽³⁶⁾.

Resume-se o desenvolvimento da resistência mecânica com as três fases ⁽⁴¹⁾:

- a) O fenômeno químico da hidratação;
- b) O fenômeno físico da cristalização;
- c) O fenômeno físico-químico da criação de ligações entre os diferentes cristais, que conferem coesão ao sólido.

"Quando cristais da mesma natureza se encontram, em virtude do seu crescimento, soldam-se mais ou menos completamente. (...) (quando a orientação cristalina coincidir) poderão reunir-se de modo a formarem um só cristal; neste caso a aderência é igual à coesão interna. (...) Mas a aderência entre dois cristais orientados de qualquer maneira é inferior à coesão". Estas palavras de Le Chatelier ⁽⁴²⁾ escritas em 1887, bastante de acordo com teorias mais recentes, ainda explicam com clareza o fenômeno do desenvolvimento da resistência.

Ao que parece, as melhores formas de correlacionar a resistência com a estrutura de um sistema complexo como o cimento são as relações com a *porosidade capilar*, com a *água não evaporável* e com a *área específica do gel*, segundo trabalhos já citados no item anterior (6.7.8).

Powers e Brownard propuseram, em 1947, as fórmulas (6):

$$f_c = 120.000 V_n/w_o - 3600$$

$$f_c = 34.200 w_n/w_o - 3600$$

onde:

f_c = resistência à compressão em cubos de 2 polegadas de aresta, neste caso, em libras por polegada quadrada;

V_n = quantidade de material adsorvido, para formar uma camada completa condensada sobre o sólido, com uma molécula de espessura (6);

w_o = quantidade de água originalmente presente na mistura;

w_n = quantidade de água não evaporável.

Tanto w_n como V_n relacionam-se entre si e com a chamada *relação gel/espaco* ("gel/space ratio"), a que Powers passou a dar destaque como determinante da resistência à compressão (7.8).

$$f_c = F_1 [X] \quad \text{(equação 1)}$$

$$f_c = F_2 [X^{-1}] \quad \text{(equação 2)}$$

onde:

F_1 = função relacionando f_c a X ;

F_2 = função relacionando f_c a X^{-1} ;

X = relação gel/espaco (em volume);

X^{-1} = relação espaco/gel (em volume).

$$X = V_{hc} / (V_{hc} + p_c)$$

onde:

V_{hc} = volume do gel;

p_c = volume dos poros capilares

Powers ⁽⁷⁾ notou a relação entre X e a compacidade de Feret ^(3,4) fazendo também uma analogia entre a função F_2 e a expressão de Abrams ⁽⁵⁾, porém a forma empírica que parece ter sido mais aceita ^(8,22,35) para a função F_1 é:

$$f_c = A_p X^n \quad (\text{equação 3})$$

onde A_p parece representar a resistência do gel ⁽⁸⁾, com valores da ordem de 250 MPa e n , com valores usualmente entre 2,6 e 3, depende das características do cimento.

A Figura 5 ilustra a evolução dos volumes durante a hidratação do cimento, admitindo a linearidade do desenvolvimento dos volumes com o grau de hidratação.

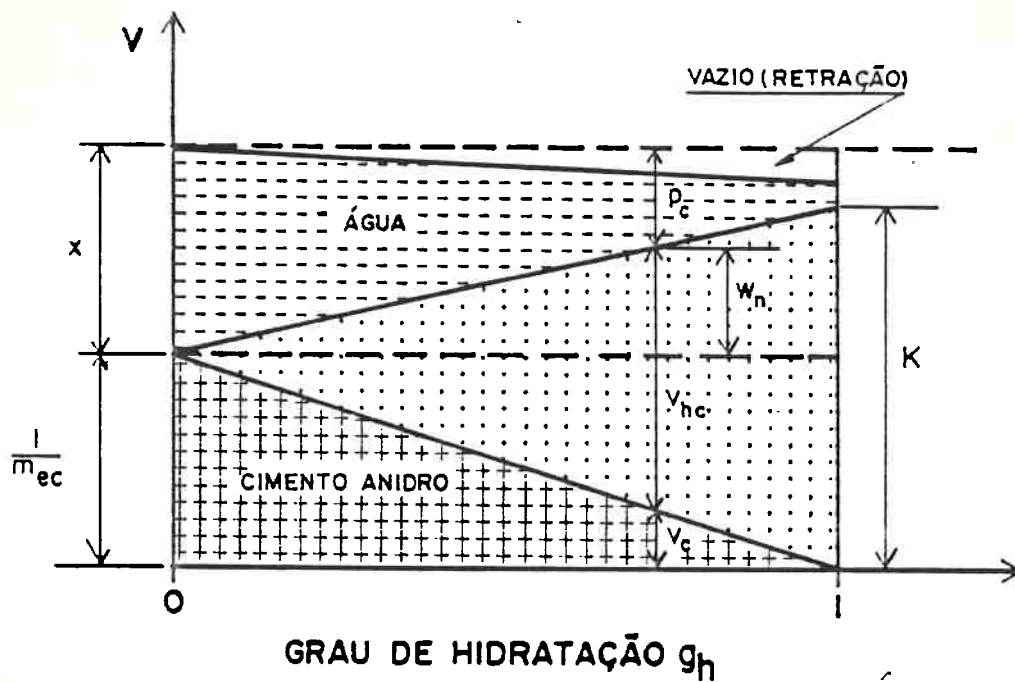


Figura 5 - Evolução dos volumes na pasta em hidratação. V = volume; g_h = grau de hidratação; x = relação água/cimento (massa); m_{ec} = massa específica do cimento; p_c = volume instantâneo de poros capilares; V_{hc} = volume instantâneo do gel; V_c = volume instantâneo de cimento; K = volume de gel após hidratação total de uma unidade de massa de cimento; $1/m_{ec}$ = volume inicial de cimento.

Se considerarmos que V_{hc} é proporcional ao grau de hidratação g_h , temos:

$$V_{hc} = K \cdot g_h$$

Sabemos que p_c , o volume de poros capilares, é igual ao volume total [dado pelo volume original de água (x) mais o volume original

de cimento $(1/m_{ec})]$ menos a soma do volume do gel V_{hc} e o volume de cimento ainda não hidratado V_c .

$$p_c = (x + 1/m_{ec}) - (V_{hc} + V_c)$$

como $V_{hc} = Kg_h$ e $V_c = (1/m_{ec})(1 - g_h)$

temos: $p_c = x + 1/m_{ec} - Kg_h - 1/m_{ec} + g_h/m_{ec}$

ou: $p_c = x - Kg_h + g_h/m_{ec}$

a relação gel/espaco X fica então:

$$X = V_{hc}/(V_{hc} + p_c) = Kg_h / (Kg_h + x - Kg_h + g_h/m_{ec})$$

$$X = Kg_h / (g_h/m_{ec} + x) \quad (\text{equação 4})$$

sendo:

K = volume do gel por unidade de massa de cimento hidratado (expresso em unidades nas quais o volume específico da área é -1, ex.: cm^3/g);

x = relação água/cimento, em massa;

m_{ec} = massa específica do cimento (expressa em unidades nas quais a massa específica da área é -1, ex.: g/cm^3).

Assim, das equações 3 e 4, vem:

$$f_c = A_p [Kg_h / (g_h/m_{ec} + x)]^n \quad (\text{equação 5})$$

que é a generalização da expressão proposta por Collepardi (23), relacionando a resistência mecânica ao grau de hidratação.

Generalizando ainda mais, podemos tomar a equação 4 multiplicando por $1/g_h$ o numerador e o denominador do termo à direita.

$$X = K / (1/m_{ec} + x/g_h)$$

ou:

$$X^{-1} = (1/m_{ec} + x/g_h) / K$$

A equação (1), portanto fica:

$$f_c = F_1 [K / (1/m_{ec} + x/g_h)] \quad (\text{equação 7})$$

e a equação (2):

$$f_c = F_2 [(1/m_{ec} + x/g_h) / K] \quad (\text{equação 8})$$

lembrando que K e m_{ec} são constantes que dependem do cimento e das condições de hidratação, mantidas essas condições inalteradas, podemos dizer:

$$f_c = F_2' [x/g_h] \quad (\text{equação 9})$$

ou seja: a resistência à compressão é uma função da divisão da relação água/cimento x pelo grau de hidratação g_h .

Examinando as equações de Feret ^(3,4) e Abrams ⁽⁵⁾, podemos concluir que ambas são modelos matemáticos adotados para uma situação particular da equação 9, onde a *idade* e as condições ambientais são constantes ⁽⁶⁾.

De fato, veja-se o modelo de Feret mais empregado ⁽⁴⁾

$$f_c = A_f [c / [1 / (1-s)]]^2 \quad (\text{equação 10})$$

⁽⁶⁾ Isto não significa dizer que nos modelos de Feret e Abrams teríamos necessariamente g_h constante; o assunto será tratado adiante.

$$f_c = A_f \left[(e + v) / [c / (e + v) + 1] \right]^2 \quad (\text{equação 11})$$

onde:

A_f = constante de Feret, dependente dos materiais e condições do estudo;

c = volume absoluto de cimento na unidade de volume de argamassa;

s = volume absoluto de areia na unidade de volume de argamassa;

e = volume absoluto de água na unidade de volume de argamassa;

v = volume absoluto de vazios na unidade de volume de argamassa.

Torres ^(36,37) demonstrou que a equação de Feret pode ser expressa, para concretos (e argamassas) plásticos, na forma:

$$f_c = A_T \left[(1/m_{cc} + x) \right]^2 \quad (\text{equação 12})$$

onde, A_T = constante de Torres, dependente dos materiais e condições de estudo.

É notável a semelhança da equação 12 com a equação 7, ainda mais lembrando que k é uma constante, podendo ser a equação 7 apresentada na forma:

$$f_c = F_1' \left[1 / (1/m_{cc} + x/g_b) \right] \quad (\text{equação 13})$$

onde F_1' é uma nova função incorporando a constante K .

Por outro lado, veja-se o modelo de Abrams ⁽⁵⁾:

$$f_c = A_A / B_A^x \quad (\text{equação 14})$$

onde:

A_A e B_A = constantes de Abrams, dependentes dos materiais e condições de estudo.

Powers ⁽⁷⁾ expressou uma função semelhante à de Abrams, na forma:

$$f_c = A_{AP} / B_{AP}^{x/w_n} \quad (\text{equação 15})^{(8)}$$

onde:

A_{AP} e B_{AP} são constantes ("de Abrams - Powers") dependentes dos materiais e condições de estudo;

w_n = massa de água não evaporável.

Podemos considerar w_n como função do grau de hidratação g_h . Na Figura 5, observamos que w_n é numericamente igual à diferença entre o volume do cimento anidro ($1/m_{cc}$) mais o volume do gel e o volume

⁽⁸⁾ Powers obteve gráficos semelhantes aos de Abrams; locando em ordenadas $\log f_c$ e em abscissas x/w_n , para resultados experimentais, obteve boas aproximações a retas.

original de cimento anidro; para tornar a equação independente das unidades, passamos a notar w_n como w_n/m_{ea} sendo m_{ea} a massa específica da água.

$$w_n/m_{ea} = U_{hc} + U_c - i/m_{ec}$$

Como: $U_{hc} = Kg_h$ (ver Figura 5)

e também: $U_c = (i/m_{ec})(1 - g_h) = i/m_{ec} - g_h/m_{ec}$

temos: $w_n/m_{ea} = Kg_h + i/m_{ec} - g_h/m_{ec} - i/m_{ec}$

$$w_n = m_{ea}g_h (K - i/m_{ec})$$

A equação 15, portanto, fica:

$$f_c = A_{AP}/B_{AP} \left[(w_n/m_{ea})/g_h (K - i/m_{ec}) \right] = \\ A_{AP}/\{B_{AP} [(i/m_{ea})/(K - i/m_{ec})] \} \times g_h$$

se chamarmos o termo entre chaves de B_{AP1} , temos:

$$f_c = A_{AP}/B_{AP1} \times g_h \quad (\text{equação 16})$$

que seria a expressão da função F_2' da equação 9.

Assim, pode-se vislumbrar como a modelagem da evolução da resistência à compressão com o tempo inclui necessariamente a modelagem desta evolução para o grau de hidratação g_h .

No item seguinte, tratar-se-ão esses assuntos.

3. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE ESTUDOS DO RELACIONAMENTO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, O GRAU DE HIDRATAÇÃO E O TEMPO

Procurar-se-á, a seguir, apresentar, sinteticamente, trabalhos encontrados na literatura técnica, os quais apresentam alguma relação com a cadeia tempo-hidratação-porosidade-resistência.

Chegou-se à conclusão, no item anterior, que a resistência à compressão pode ser considerada como função de dois parâmetros fundamentais, mantidas constantes as condições de ensaio e os materiais empregados: a *relação água/cimento* e o *grau de hidratação*.

Sendo a relação água/cimento inicial, um parâmetro que, pela própria definição, não varia com o tempo, se quisermos modelar uma função como:

$$f_c = F_{x,t}[x,t] \quad (\text{equação 17})$$

sabendo que:

$$f_c = F_2' [x/g_h] = F_2' [x, g_h] \quad (\text{equação 9})$$

é necessário conhecer a função

$$g_h = g_{h,t}(t) \quad (\text{equação 18})$$

ou eventualmente

$$g_h = g_{h,x,t}(x,t) \quad (\text{equação 19})$$

Dessa forma, poder-se-á obter (substituindo a equação 19 na equação 9):

$$f_c = F_2' [x, g_{h,c}(x,t)] \quad (\text{equação 20})$$

que seria equivalente à função da equação 17.

Ou, mais simplificada, se for constatado que o grau de hidratação seja independente da relação água/cimento, substituindo a equação 18 na equação 9:

$$f_c = F_2' [x, g_{h,c}(t)] \quad (\text{equação 21})$$

que, nesse caso, equivaleria à função da equação 17.

Daí a importância da modelagem de g_h , que ora será vista.

3.1. Modelos do grau de hidratação em função do tempo

Em 1984, Brown, Pommersheim e Frohnsdorff ⁽³⁰⁾ publicaram uma revisão sobre a modelagem da hidratação do cimento, sugerindo que os modelos tendem a se enquadrar em duas categorias:

a) Modelos *empíricos* desenvolvidos para ajustar a hidratação (usualmente medida em termos de ganho de resistência) os quais tipicamente não consideram os processos físicos e químicos específicos que ocorrem;

b) Modelos "*mecanísticos*" ou *conceituais* desenvolvidos com base sobre processos físicos que ocorrem durante a hidratação, tais como nucleação, crescimento, precipitação e difusão.

Havendo mérito em ambos os enfoques, ambos teriam suas limitações: os métodos empíricos pouco acrescentariam ao avanço do entendimento sobre o processo de hidratação; os modelos conceituais tenderiam a

ser limitados, ou como resultado de suposições simplificadoras, ou contendo constantes ajustáveis, inviáveis de se medir diretamente; cada lei de velocidade, variação de propriedade ou equação empregada em um modelo, introduz pelo menos uma constante.

Os três autores acima ocuparam-se dos modelos conceituais, observando que, no processo de hidratação, as fases líquida e sólida reagem formando uma ou mais fases sólidas. A formação de uma fase resultante pode ocorrer homogeneamente ou heterogeneamente em locais preferenciais presentes no sistema; a nucleação homogênea raramente acontece, requerendo condições especiais; a cinética global de uma reação de hidratação, que envolve processos em série, tais como dissolução, nucleação e crescimento, é *determinada pela velocidade ou taxa do passo mais lento*. Esse passo determinante da velocidade pode se relacionar com a taxa de dissolução do reagente, com a taxa de nucleação da fase produzida, com a sua taxa de crescimento, ou com a taxa de um processo de transporte. Para processos envolvendo nucleação e crescimento, a relação entre essas taxas influencia a microestrutura da fase produzida; enquanto uma relação nucleação/crescimento grande resulta num produto de textura fina, uma textura grossa é obtida se a taxa for pequena. Para uma dada taxa de nucleação, a taxa de crescimento será limitada por um dentre vários fatores: a taxa à qual o reagente sólido entra na fase líquida; a taxa de difusão através dos contornos da fase líquido-sólido ou através de camadas de produto, ou a taxa à qual espécies se apresentam na interface solução-produto vindo a ser incorporadas como produto. É possível equacionar evoluções de nucleação, de crescimento e difusionais em termos de vários modelos cinéticos, nos quais a hidratação seja controlada por somente um processo (38).

Segundo Jander ⁽³⁹⁾, poder-se-ia imaginar uma partícula esférica de raio r_0 circundada por solução, onde entre a partícula e a solução se interpusesse uma camada contínua de produto, de espessura $j = (r_0 - r_t)$, que se desenvolveva. Partindo de:

$$dj/dt = K \cdot D/j$$

sendo:

K = uma constante;

D = coeficiente de difusão;

j = espessura da camada;

t = tempo,

Jander chegou a:

$$2 \cdot D \cdot t / r_0^2 = [1 - (1 - g_k)^{1/3}]^2 \quad (\text{equação 22})$$

sendo g_k o grau de reação.

Ginstling e Brounshtein ⁽⁴⁰⁾ melhoraram o modelo de Jander, levando em conta a diminuição da área da superfície de reação com o aumento do grau de hidratação, e partindo de:

$$dj/dt = K \cdot r/j \cdot (r - j)$$

chegaram a:

$$2 \cdot D \cdot T / r_0 = 1 - (2/3) \cdot g_k - (1 - g_k)^{2/3} \quad (\text{equação 23})$$

Os modelos acima podem ser classificados como *modelos de difusão*, uma vez que levam em conta a velocidade com que a reação progride para dentro da partícula. Bernard ⁽²⁴⁾ também propôs um modelo semelhante no qual levou em conta a distribuição granulométrica.

Quando o crescimento e a dissolução são controlados por difusão através de uma camada limite de transferência de massa, essas taxas são diretamente proporcionais à área interfacial disponível ⁽²⁸⁾.

$$\pm dV/dt = K \cdot A \cdot g_c/d_i$$

onde:

V = volume da partícula

K = constante que inclui o coeficiente de difusão;

A = área superficial da partícula;

g_c = gradiente de concentração entre a solução e a partícula;

d_i = a espessura da camada limite.

O sinal de dV/dt é negativo para dissolução e positivo para crescimento. Quando o gradiente e a espessura da camada limite são constantes, somente a área interfacial determina a velocidade de reação ⁽²⁸⁾:

$$\pm dV/dt = K' \cdot A$$

sendo $dV = dr/A$, na dissolução, temos:

$$- dr/dt = K'$$

ou, em termos de volume:

$$K' \cdot t/r_0 = i - (i - g_k)^{1/2} \quad (\text{equação 24})$$

que é um modelo de taxa de transporte através da superfície limite entre as fases.

Nos modelos de difusão e transporte, acima mencionados, o crescimento do produto de hidratação é considerado uniforme, nem se questionando a maneira pela qual ele atinge sua identidade, nem se

pensando sobre o desenvolvimento dos aspectos micro-estruturais, isto é, os processos de *nucleação e crescimento*.

Nucleação é o processo pelo qual íons, átomos ou moléculas dos quais o produto é composto, atingem uma disposição termodinamicamente mais estável do que a dos componentes individuais. A taxa de crescimento subsequente, de um núcleo estável, numa dada direção, pode ser definida pela taxa de extensão numa direção normal ao plano de uma dada superfície de crescimento. Desse modo a taxa de hidratação poderia ser expressa em termos do produto da taxa de aparecimento de centros de crescimento (taxa de nucleação) e a taxa de crescimento desses centros (taxa de crescimento), como segue ⁽³⁰⁾:

$$dg_n/dt = G_j(t) \cdot dN(t)/dt \quad (\text{equação 25})$$

onde g_n pode ser o grau de hidratação, $dN(t)/dt$ é a taxa de nucleação e $G_j(t)$ é a taxa de crescimento na direção j .

$N(t)$, o valor da *fração de núcleos presente*, em função do tempo, pode ser dado pela equação ⁽³⁰⁾:

$$N(t) = N_{inf} (1 - e^{-kt}) \quad (\text{equação 26})$$

onde:

N_{inf} = fração de núcleos limite, para a qual tende $N(t)$ quando o tempo tende a infinito;

e = base dos logaritmos neperianos;

k = constante;

t = tempo.

Note-se que $N(t)$ é uma função com valor zero para $t = 0$, tendendo a N_{inf} quando t tende a infinito.

Quando t é muito pequeno, a derivada $dN(t)/dt$, que é a taxa de nucleação, pode ser considerada igual a kN ; quando t é muito grande, a taxa de nucleação $dN(t)/dt$ tende a zero; são chamados *limites de Erofeyev* os tempos: (a) abaixo do qual se pode considerar a taxa de nucleação diferente de zero e constante; e (b) acima do qual se pode considerar a taxa de nucleação nula ^(30,41).

$G_j(t)$, a taxa de crescimento da fase-produto, pode ser controlada por um processo difusional, por um processo de limite de fase, ou por processos ocorrendo diretamente sobre uma superfície de crescimento. Uma variedade de modelos baseados em processos de superfície (ou de limite de fase) foi revista por Dhara e Reid ^(30,42). O mais simples é expresso por:

$$G(t) = A \cdot h \cdot dN(t)/dt \quad (\text{equação 27})$$

onde:

$G(t)$ = taxa de crescimento numa direção normal ao plano da superfície de crescimento;

A = área da superfície de crescimento;

h = espaçamento interplanar;

$dN(t)/dt$ = taxa de nucleação.

Modelos mais complexos para a taxa de crescimento associados à limitação de taxa dada pelo crescimento da superfície foram propostos, mas esses processos tendem a ocorrer mais rapidamente que os processos de transporte, não podendo portanto serem controladores da velocidade ⁽³⁰⁾. Assim sendo, a equação:

$$dj/dt = Kj$$

mostra que a taxa de crescimento é constante em qualquer dimensão j , independentemente do tempo de formação do núcleo. O crescimento em cada direção (h , i e j) será proporcional ao tempo, e para um crescimento P - dimensional ⁽³⁸⁾.

$$G(t) = s K t^P \quad (\text{equação 28})$$

onde:

s = fator geométrico de forma;

K = constante;

P = dimensionalidade do crescimento: se se formam poliedros, $P=3$; se folhas, placas planas ou membranas, $P=2$; se fibras, agulhas, formas lineares são formadas, $P=1$. Se o crescimento for controlado pela difusão, o crescimento é dado em termos da equação:

$$dj/dt = K \cdot D/j$$

e temos ⁽³⁹⁾:

$$G(t) = s \cdot K_0 \cdot t^{P/2} \quad (\text{equação 29})$$

sendo:

K_0 = taxa composta constante para difusão;

P = dimensionalidade do crescimento.

Brown *et al.* ⁽³⁹⁾, integrando a expressão genérica dada pela equação 25, chegaram a:

$$g_n = K \cdot t^P \quad (\text{equação 30})$$

onde K e M são constantes incorporando parâmetros do sistema. Levando em conta trabalhos de Avrami ^(43,44,38) e Mampel ⁽⁴⁵⁾, pode-se chegar à chamada *equação de Avrami - Erofeyev*: ^(38, 27)

$$-\ln (1 - g_h) = K t^M \quad (\text{equação 31})$$

Taylor ⁽²⁷⁾ questionou o uso desta equação, uma vez que derivação do lado esquerdo assume que a nucleação do produto ocorre ao acaso, dentro do volume ocupado pelo material inicial ao qual g_h se relaciona, e que o produto também se forma dentro desse volume, não correspondendo à realidade; já a derivação do lado direito seria menos questionável; ainda pondera que não se leva em conta a distribuição do tamanho das partículas e que é muito fácil obter uma relação linear com os gráficos logarítmicos duplos que se usam na aplicação da equação ⁽²⁷⁾.

Besjak ⁽⁴⁶⁾ considerou que a lei cinética que governa a hidratação para cada partícula mudaria com o andamento da hidratação, mas assumindo que os tempos, nos quais estas mudanças aconteceriam, dependeriam do tamanho da partícula; como resultado, leis cinéticas diferentes aconteceriam simultaneamente, para partículas de tamanhos diferentes; apresentou os diagramas mostrados na Figura 6, representando um caso particular simplificado, com partículas monodimensionais de raio 5 micrômetros.

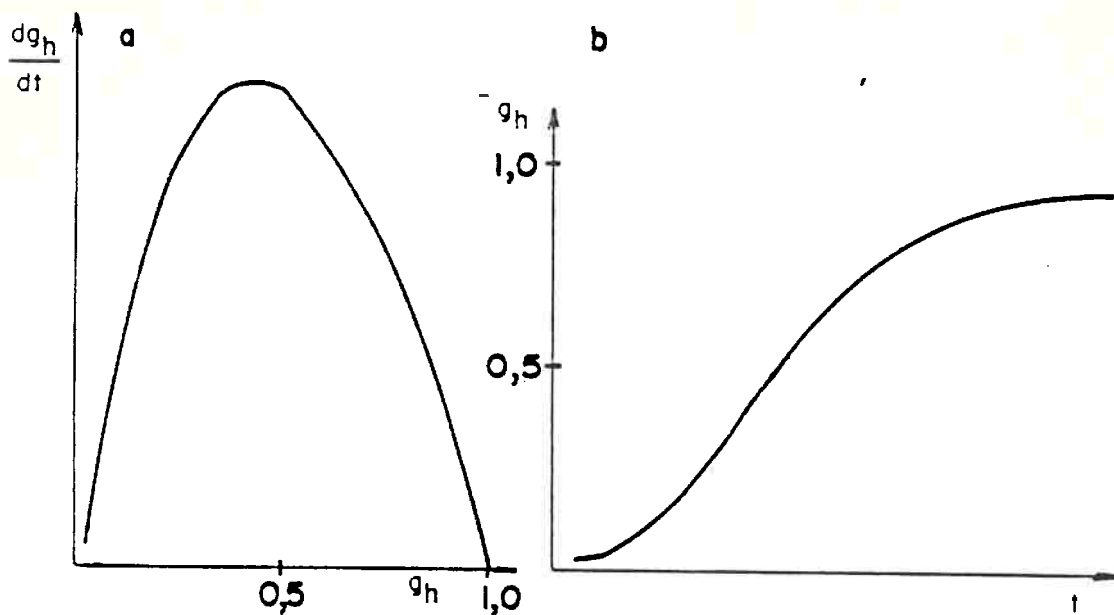


Figura 6 - Dependência entre dg_h/dt e g_h (a) e curva de g_h em função do tempo (b) apresentada por Bazjak ⁽⁴⁶⁾, para um caso hipotético de hidratação.

Knudsen ⁽⁴⁷⁾ apresentou o que chamou "modelo de dispersão" baseando-se em experimentos empregando a medida da retração química como índice de hidratação:

$$t_0 + t_1 A + t_2 A^2 = t \quad (\text{equação 32})$$

onde:

t = tempo;

t_0 , t_1 e t_2 = constantes - tempo dependendo da temperatura, tipo de cimento, aditivos, etc.;

$A = g_h / (1 - g_h)$ = relação entre o material hidratado e o não hidratado.

Todavia, Knudsen assinalou que, sendo a equação 32 composta de uma parte "linear" e uma "parabólica", embora o elemento "parabólico" $t_2 A^2$ seja suficientemente expressivo, numerosas experiências puderam ser consideradas totalmente lineares. Uma mudança da cinética "linear" para a "parabólica" viria tão tarde, que não haveria implicação prática em se adotar a "linear", nesses casos. As partes "linear" e "parabólica" seriam as expressas pelas equações:

$$t_0 + t_1 A = t \quad (\text{equação 33})$$

para cinética "linear"; e

$$t_0 + t_2 A^2 = t \quad (\text{equação 33})$$

para cinética "parabólica", sendo:

t = tempo;

t_0 = "período de dormência", no qual se considera uma demora para o início da hidratação;

t_1 e t_2 = constantes dependentes dos materiais e condições de ensaio, respectivamente para as cinéticas "linear" e "parabólica";

$A = g_h / (1 - g_h) = P / (P_{inf} - P)$ = relação entre o material hidratado e o não hidratado;

g_h = grau de hidratação;

P_{inf} = retração química máxima atingida pelo material;

P = retração química no instante t .

Knudsen ⁽⁴⁷⁾ chamou a atenção para o fato de se obterem boas aproximações de retas ao locar os pontos experimentais em um gráfico de ordenadas $1/P$ e abscissas $1/(t - t_0)^{1/2}$ ou $1/t - t_0$; o intercepto desses gráficos forneceria $1/P_{inf}$, escolhendo-se a cinética linear ou parabólica em função do valor estimado de P_{inf} mais plausível com as expectativas. O parâmetro t_0 seria ajustado por tentativas e erros até se obter a melhor reta.

Nesses modelos, a influência da finura do cimento apareceria no parâmetro $t_1 = r_0/k_1$ e $t_2 = r_0^2/k_2$, sendo r_0 proporcional à finura e k_1 e k_2 constantes, respectivamente, para os modelos "linear" e "parabólico".

Na continuação do trabalho de Knudsen ⁽⁴⁸⁾, o grau de hidratação foi expresso por:

$$g_h(t) = (t - t_0)/(t - t_0 + t_{50})$$

onde:

$g_h(t)$ = grau de hidratação em função do tempo;

t = tempo;

t_0 = período normal, da ordem de 6 ± 2 horas;

t_{50} = tempo necessário para se atingir 50% da hidratação total;
 $t_{50} = r_0/k$, onde r_0 é uma constante de finura na distribuição granulométrica do cimento; k é uma constante de velocidade correspondendo a um mecanismo de reação de cinética linear.

Em 1985, novamente abordando o tema, Brown, Pommersheim e Frohnsdorff ⁽⁴⁹⁾ apresentaram o seguinte modelo cinético para a hidratação do C_3S , admitindo que a formação do silicato de cálcio hidratado ocorra segundo processos que envolvem nucleação e crescimento:

$$-\ln [1 - (g_h - g_{h_0})] = K (t - t_0)^M \quad (\text{equação 34})$$

onde:

g_{h_0} é o grau de hidratação no tempo t_0 , quando um dado processo cinético começa a ser controlador da taxa de hidratação; K é uma constante incluindo nucleação, crescimento multidimensional, coeficientes de difusão, fatores geométricos, constantes numéricas, e outros fatores; M é um expoente que combina as dependências de tempo dos processos de crescimento e nucleação.

Sendo obedecida a equação 34, um gráfico de $\ln \ln \{1/[1-(g_h-g_{h_0})]\}$ versus $\ln (t-t_0)$ será linear, com inclinação M e intercepto $\ln K$.

Observe-se a semelhança da equação 34 com o modelo de Avrami-Erofeev (equação 31); Brown et al., porém, consideram o tempo t_0 , antes do qual a equação 34 não seria válida.

3.2. Relacionamento entre o grau de hidratação, a porosidade, a resistência e o tempo

Parry-Jones, Al Tayyib e Al Mana ⁽⁵⁰⁾ apresentaram um trabalho sobre a avaliação do grau de hidratação usando a técnica "MAS-NMR" de espectroscopia de ressonância magnética nuclear de silício-29, em amostras de cimento curadas em ambiente úmido durante 28 dias, sendo deixadas à umidade ambiente em um laboratório com temperatura controlada durante três anos. As relações água/cimento foram 0,40; 0,55 e 0,70 em massa; embora não tendo apresentado nenhum modelo matemático, os resultados denotam haver influência da relação água/cimento no grau de hidratação: a porcentagem de cimento anidro seria inversamente proporcional à quantidade de água adicionada.

Os mesmos autores e mais um colega, empregando a mesma técnica, porém em amostras com relação água/cimento constante igual a 0,45 em massa, hidratam cubos de pasta a temperaturas variáveis entre 21

e 55°C durante tempos variando de 3 a 28 dias, que foram ensaiados à compressão (31). Curvas do grau de hidratação e da resistência à compressão com o tempo foram ajustadas admitindo-se polinômios de segundo grau como modelos matemáticos; o gráfico da resistência à compressão com o grau de hidratação assumiu a configuração de uma reta, com inclinação 1,17 MPa/unidade de % e intercepto -6,58 MPa, com coeficiente de correlação considerado bom. O gráfico, apresentado na Figura 7, confirma o que foi deduzido no item anterior com a obtenção da equação 9, indicando, além disso, uma tendência linear crescente para f_c como função de g_h para um dado x , no campo pesquisado.

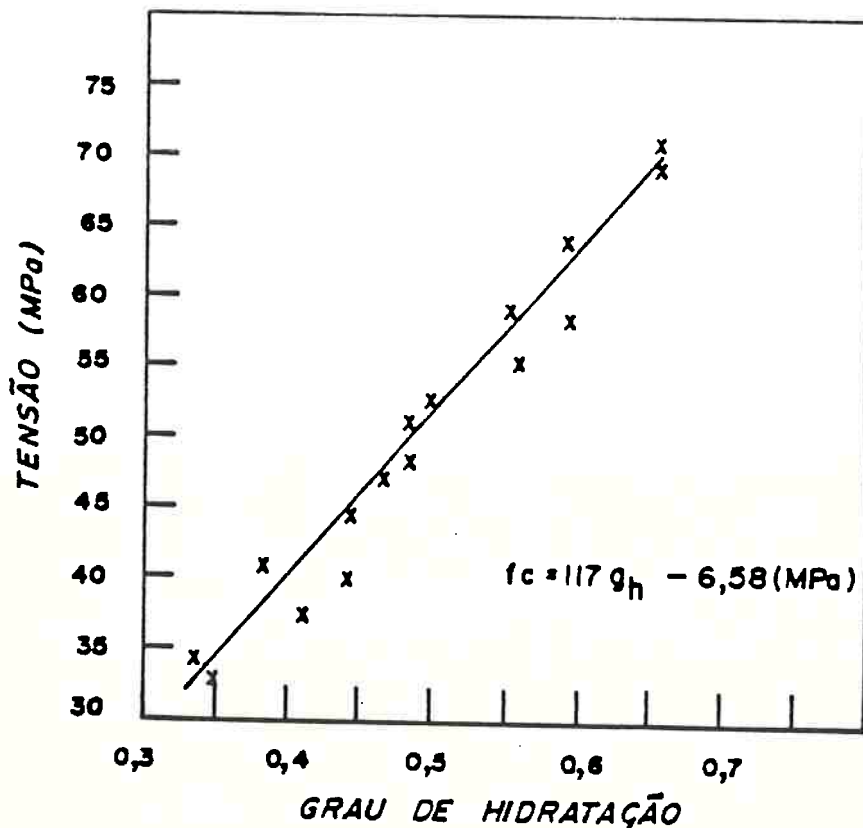


Figura 7 - Resistência à compressão em função do grau de hidratação segundo Parry-Jones, Al-Tayyib, Al-Dulaijan e Al-Mana (31). (Cubos de 25,4 mm de aresta, pastas com relação a/c = 0,45, hidratadas durante 3, 7, 14 ou 28 dias às temperaturas de 21, 35, 45 e 55°C).

Granju e Grandet ⁽⁵²⁾ assinalaram que uma pasta de cimento portland endurecida, na qual a avaliação do grau de hidratação seja feita pela quantidade de água não evaporável, pode haver frequentemente um erro devido à desidratação parcial dos aluminatos, que ocorre quando se efetua a extração da água: o estado de hidratação seria caracterizado pelo menos por dois graus de hidratação, um dos quais atingiria o valor 1 dentro de alguns dias e o outro poderia ser calculado a partir da água não evaporável.

Com efeito, o grau de hidratação global pode ser avaliado pela relação entre a água não evaporável no instante em questão e a água não evaporável medida após hidratação considerada total, esta última, obtida em condições especiais, deixando passar um tempo muito longo ou mantendo por exemplo a pasta em constante movimento e com excesso de água, num moinho de bolas ⁽⁵³⁾. A estimativa da água combinada pode ser feita por meio da secagem em estufa a 100 - 110°C ou à temperatura ambiente sobre um dessecante. Extremo cuidado deve ser tomado para proteger as amostras de CO₂ do ar durante os processos de secagem ⁽⁵³⁾. Há também o método denominado "D-drying", que tenta aperfeiçoar o último, chamado de "P-drying". No método "D-drying" utiliza-se gelo seco e temperatura de -79°C, além do vácuo ⁽⁵³⁾.

Santos, em sua dissertação de mestrado ⁽⁵⁴⁾, classificou como insolúvel o problema de se diferenciar experimentalmente a água quimicamente combinada nos produtos de hidratação, a água de hidratos pouco estáveis em condições de baixa umidade relativa, a água adsorvida nas superfícies dos sólidos e a parte realmente livre: consegue-se separar, aproximadamente, a água quimicamente ligada das outras, o que todavia não pode ser exato uma vez que o gel de silicato de cálcio hidratado é hidrofílico e adsorve água

prontamente, falseando um resultado baseado na volatilidade da água; este autor considerou que quando o material é seco, perde-se uma parte da água adsorvida e uma parte da água de hidratação, em quantidades dependentes do grau de secagem; esta separação seria todavia praticável. Dessa forma, propôs um método simples para avaliação da água não evaporável, baseado na interrupção da hidratação por meio de acetona e éter, seguida de secagem em estufa e calcinação. Com base nesse método, Santos encontrou, para um cimento CPE-32 brasileiro, contendo escória e pó calcário, uma relação linear entre a massa de água quimicamente ligada e o logaritmo do tempo, entre as idades de 2 e 28 dias (54).

Granju e Maso, em uma série de três trabalhos publicados em 1984 (55,56,57), relataram resultados experimentais em acordo com as equações:

$$R_c = R_o \cdot e^{-An} \quad (\text{equação 35})$$

$$\text{ou } R_c = (R_o/e^A) \cdot e^{An} \quad (\text{equação 36})$$

onde:

R_c = resistência à compressão da pasta;

R_o = resistência à compressão dos grãos hidratados;

n = porosidade capilar, sendo $n = 1 - kG$, sendo k o inchamento dos grãos hidratados, ligado à hidratação, e G um coeficiente caracterizando a relação água/cimento na pasta, quando em endurecimento, igual à massa de cimento dividida pela massa de água, aí deduzidas eventuais parcelas de exsudação e evaporação;

A = coeficiente caracterizando a natureza e qualidade dos contatos entre os grãos.

Nesses trabalhos, a medida da resistência à compressão se fez em cilindros de pasta, extraídos, de diâmetro 20 mm e altura 60 mm; o grau de hidratação foi avaliado pela medida da água não evaporável, considerando-o igual ao quociente da divisão da quantidade de água não evaporável pela correspondente a uma hidratação em pastas com 10 anos de idade.

Granju e Maso dividiram as pastas em duas categorias: num primeiro grupo, estariam as pastas onde a porosidade inicial seria suficiente para acomodar o aumento de volume dos grãos devido à hidratação; nesse grupo, a evolução do grau de hidratação com o tempo se daria até atingir 100%; num segundo grupo, a porosidade inicial não seria suficiente para prover todo o espaço necessário ao produto de hidratação; nesse caso, em certo tempo a hidratação cessaria e o grau de hidratação seria função não somente do tempo, mas também do valor da porosidade inicial (55,56).

O trabalho acima, faz questionar o modelo linear explícito na Figura 5. As pastas do segundo grupo, na Figura 5, seriam aquelas nas quais o valor de $x + 1/m_{ec}$ fosse menor que o valor de K . Admitindo para K o valor de $0,679 \text{ cm}^3/\text{g}$ (23) (*) e para m_{ec} o valor de $3,15 \text{ g/cm}^3$, teríamos a ocorrência de pastas do segundo grupo para relações água/cimento iniciais menores que:

$$x_{min} = K - 1/m_{ec} = 0,362 \text{ cm}^3/\text{g} \quad (\text{equação 37})$$

Se levássemos em conta a eventual presença de algum ar incorporado, o valor de x_{min} teria que ser ainda menor; na parte experimental desta tese, como veremos adiante, as relações água/cimento situaram-se sempre um tanto acima deste valor.

 (*) Segundo Collepardi, pode-se estimar um volume de gel de $67,9 \text{ dm}^3$ após a hidratação completa de 100 kg de cimento; daí $K = 67,9/100 = 0,679 \text{ dm}^3/\text{g}$; Collepardi baseou-se nos trabalhos de Powers e Brownyard, obra citada à página 1 como referência 6; veja-se também a figura 4.

Ainda ligando a resistência à compressão à porosidade da pasta, Rössler e Odler ⁽⁵⁸⁾ relataram experiências onde encontraram uma dependência linear; a porosidade nesse caso foi definida como a fração da pasta de cimento preenchida com água livre, isto é, evaporável pelo processo "D-drying", sendo também medida por porosímetro de mercúrio; concluíram que: (a) o progresso da hidratação e a composição dos produtos de hidratação pareceram ser dependentes da relação água/cimento empregada, sendo para baixas relações a taxa de hidratação diminuída e fases de mais alta relação C/S formadas; (b) preparando as amostras por moldagem ou prensagem, a estrutura e a composição resultaram diferentes; (c) a porosidade pareceu ser o principal fator determinando a resistência, sem falar na relação água/cimento e/ou grau de hidratação, sendo essa relação linear; e (d) as relações resistência-porosidade para pastas prensadas foram sistematicamente menores que as obtidas para pastas moldadas.

Verbeck e Helmut, no Congresso Mundial de Química do Cimento em 1968 no Japão ⁽⁵⁹⁾, reconheciam como válida mas criticavam a adoção da relação gel/espaco de Powers ou da Porosidade Capilar como fatores determinantes da resistência à compressão. Assinalaram que as relações aparecem sempre com a configuração linear, mas têm que ser curvas "pois obviamente não há resistência à porosidade capilar 100%"; que a porosidade é fator determinante da resistência inclusive para outros materiais; porém há variações que envolvem fatores como o tamanho e a distribuição dos constituintes minerais, a orientação de camadas, a elasticidade do material. Para cimento hidratado, fatores como o conteúdo ótimo de gesso e a temperatura de hidratação afetam a taxa inicial de hidratação; essa taxa também seria alterada significativamente pelo crescimento da relação gel/espaco (quanto maior a relação gel/espaco menor a taxa de hidratação com o tempo), devido ao crescimento de uma camada hidratada em torno dos grãos anidros, impedindo cada vez mais a

hidratação. Por outro lado, a distribuição do produto de hidratação (uniforme ou não uniforme) nas imediações dos grãos e nos espaços intergranulares também afetaria significativamente a resistência para iguais relações gel/espaco, assim como diferentes finuras do C_2S produziriam diferentes resistências para um mesmo grau de hidratação.

3.3. Influências sobre o grau de hidratação como função do tempo

Oóler, Yudenfreund e Skalny ⁽⁴⁰⁾ pesquisaram o grau de hidratação, a expansão durante a hidratação e a porosidade total de pastas de cimento de baixa porosidade (água/cimento = 0,2 e 0,3) durante tempos de hidratação de uma hora a 180 dias com dois tipos de cimento e quatro tipos de aditivos de moagem.

O grau de hidratação foi fortemente influenciado em sua relação com o tempo, pelo tipo de aditivo de moagem, que influenciou inclusive o "período de dormência". Também a temperatura, obviamente, alterou o andamento das curvas de hidratação com o tempo; outra influência que chamou a atenção foi a da relação água/cimento: em todas as idades, o grau de hidratação para relação $a/c=0,3$ foi maior que para relação $a/c=0,2$, a mesma tendência se configurando para os graus de hidratação máximos (patamares das curvas). A influência da finura: um cimento de baixa finura apresentou um período de dormência mais longo e graus de hidratação mais baixos nas idades iniciais, porém a diferença de graus de hidratação foi diminuindo cada vez mais com a idade. Em alguns cimentos a porosidade inicialmente cresceu com o tempo devido à expansão das pastas, vindo a decrescer em seguida, como é normal. O andamento da porosidade com o tempo também foi influenciado pela presença de aditivos de moagem. Houve tendência de se apresentarem patamares mínimos de porosidade para cada condição em estudo ⁽⁴⁰⁾.

A influência da relação água/cimento na hidratação é demonstrada claramente no diagrama da Figura 8, resultante de um trabalho de Stein, Stevels e Jong citados por Copeland e Kantro (41).

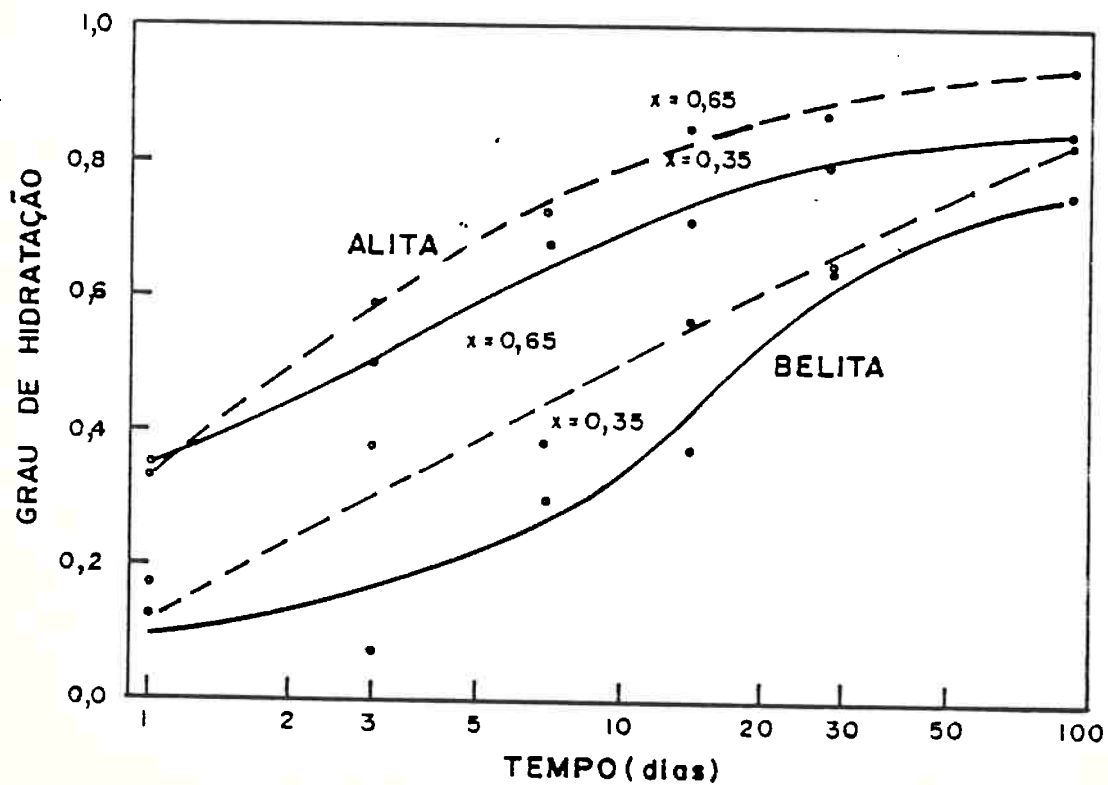


Figura 8 - Hidratação de Alita e Belita com diferentes relações a/c num cimento portland comum (41) (Alita inicial: 57,8 %; Belita inicial: 19,6 %).

Observa-se na Figura 8 que para a Alita ^(*) as porcentagens hidratadas são praticamente iguais a um dia para ambas as relações água/cimento, divergindo em seguida, sendo hidratada mais Alita para a maior relação água/cimento num dado tempo; com maior dispersão, a mesma tendência se observa para a Belita ^(**). Nota-se também que a Belita apresenta menor velocidade de hidratação.

As reações do C_3S e da Alita são influenciadas também pela composição da mistura em hidratação: a presença de pequenas quantidades de outros constituintes no C_3S , fazendo-o uma alita, a presença dos outros componentes do cimento e a presença de outras substâncias, tais como gesso ou cloreto de cálcio ⁽⁴¹⁾; Yamaguchi, Shirasuka e Ota ⁽⁴²⁾ obtiveram hidratações mais rápidas para Alita na forma Monoclínica em relação à forma Triclínica, coerentemente com os resultados de Nurse, Midgley, Gutt e Fletcher ⁽⁴³⁾. A presença de C_3A parece acelerar a hidratação da Alita, o que foi relatado por Kantro e Weise ⁽⁴⁴⁾. O gesso também acelerou a hidratação da Alita, conforme foi relatado por Raccanelli citada em ⁽⁵⁷⁾; Kantro, Copeland e Weise obtiveram indicações de que há um "teor ótimo" de gesso para a maior taxa de hidratação da Alita, que aparece notadamente nas idades de 1 e 3 dias, sendo que esse valor ótimo aparentemente decresceu com a idade ⁽⁴⁶⁾. Cellani, Colleparidi e Rio, concluíram que o gesso acelera a hidratação do C_3S mas somente no primeiro dia ⁽⁴⁵⁾.

A hidratação do Beta- C_2S , que para ser analisado isoladamente necessita de um material estabilizador, mostrou-se dependente do

^(*) Alita é o nome genérico dado ao C_3S (+ impurezas) nas várias formas em que é detectado na composição dos cimentos.

^(**) Belita é o nome genérico dado ao C_2S (+ impurezas) nas várias formas em que é detectado na composição dos cimentos.

estabilizador empregado a partir de cerca de uma semana ⁽⁴¹⁾. Os resultados para hidratação da Belita em cimentos são análogos aos obtidos para a Alita, inclusive quanto ao conteúdo ótimo de gesso ⁽⁴¹⁾.

Kantro, Weise e Brunauer relacionaram o grau de hidratação de silicatos de cálcio (C₂S, C₃S e Alita) com valores calorimétricos ⁽⁴⁴⁾.

3.4. A resistência mecânica como função de diversas variáveis

Seki, Kasahara, Kuriyama e Kawasumi ⁽⁴⁷⁾ procuraram relacionar a resistência à compressão em concretos com a grandeza que batizaram de "relação cimento/água efetiva" dada pelo quociente entre a quantidade de cimento hidratado e a quantidade de água presente na mistura (Essa grandeza é igual à divisão do grau de hidratação pela relação água/cimento em massa). Ver equação 39.

$$C_H/W = C \cdot g_h/W = g_h/x \quad (\text{equação 39})$$

onde:

C_H/W = relação cimento/água efetiva;

C = consumo de cimento por m³ de concreto;

g_h = grau de hidratação;

W = consumo de água por m³ de concreto;

$x = W/C$ = relação água/cimento.

Encontraram uma relação única entre a relação cimento/água efetiva e a resistência à compressão independentemente da idade, conforme ilustra a Figura 9.

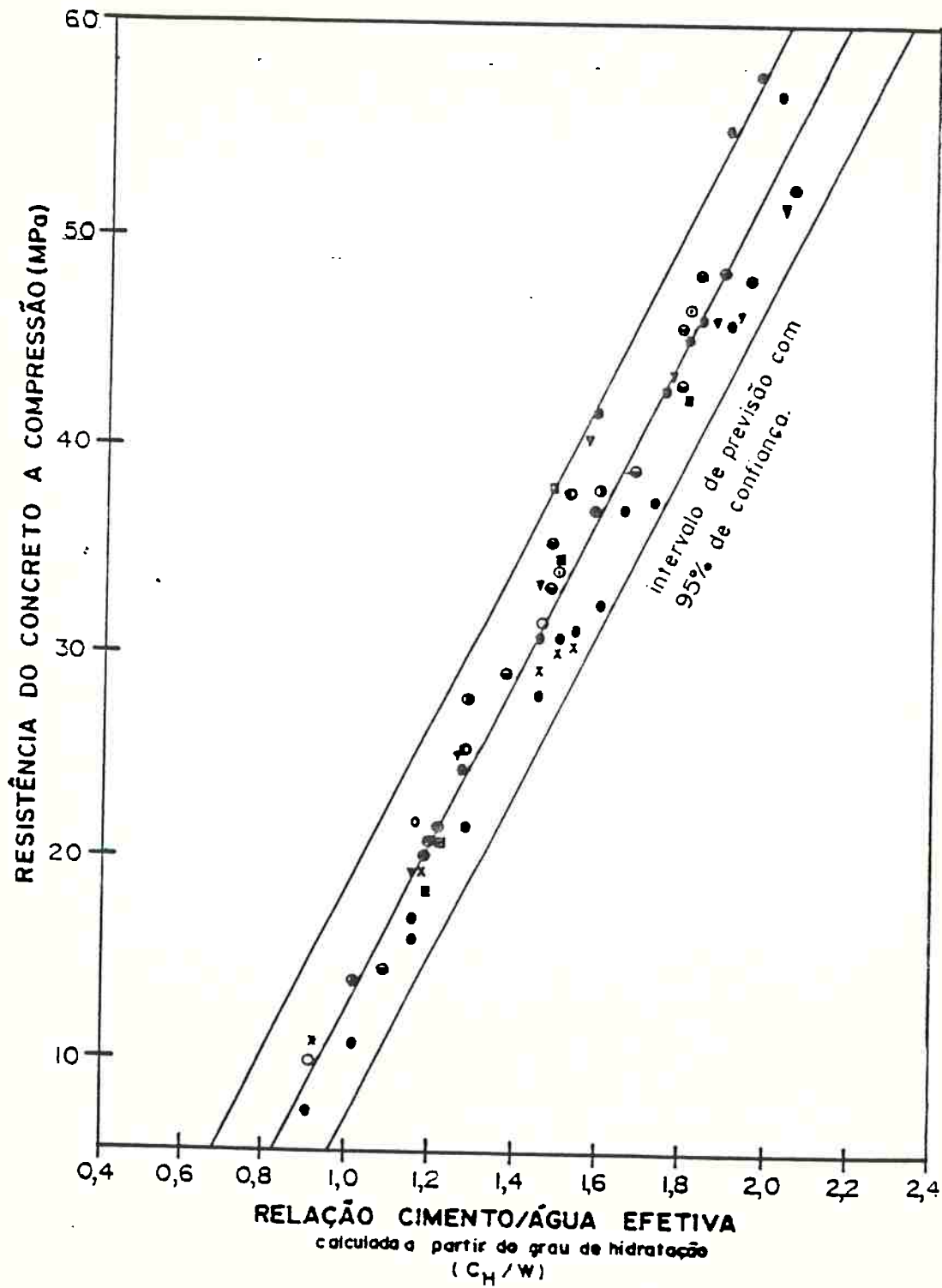


Figura 9 - Relação entre a resistência à compressão de concretos e a "relação cimento/água efetiva" (igual ao grau de hidratação dividido pela relação água/cimento inicial) segundo SEKI et al. (67).

Seki et al. calcularam o grau de hidratação dos concretos através da porcentagem de água ligada dividida pela porcentagem de água teórica para um cimento perfeitamente hidratado, que supuseram ser 97% em vista de estudos anteriores. Os concretos, de barragem, foram devidamente peneirados na abertura de malha de 40 mm e o tipo de cimento foi o portland de moderado calor de hidratação (baixo teor de C₃A); certos valores de água ligada foram interpolados graficamente a partir dos resultados experimentais; a idade dos concretos variou de 7 dias a 1 ano e as relações água/cimento de 0,25 a 0,65. O método de medida da água ligada foi a secagem a vácuo com dessecante de sílica-gel de uma amostra peneirada na malha de 0,15 mm, seguida da calcinação a 900 - 950°C.

Popovics ^(68,69) também obteve conclusões comparáveis, relacionando linearmente o logaritmo da resistência à compressão com o logaritmo da relação entre a quantidade de produtos de hidratação pela quantidade inicial de cimento, obtendo uma reta para cada relação água/cimento, independentemente da idade. Este autor empregou dados experimentais de Taplin ⁽⁷⁰⁾; chamou a atenção para o aparente "paradoxo" de que o grau de hidratação em pastas de cimento em uma dada idade aumente com o incremento da relação água/cimento original, enquanto a resistência decresce. O gráfico de Popovics é apresentado na Figura 10.

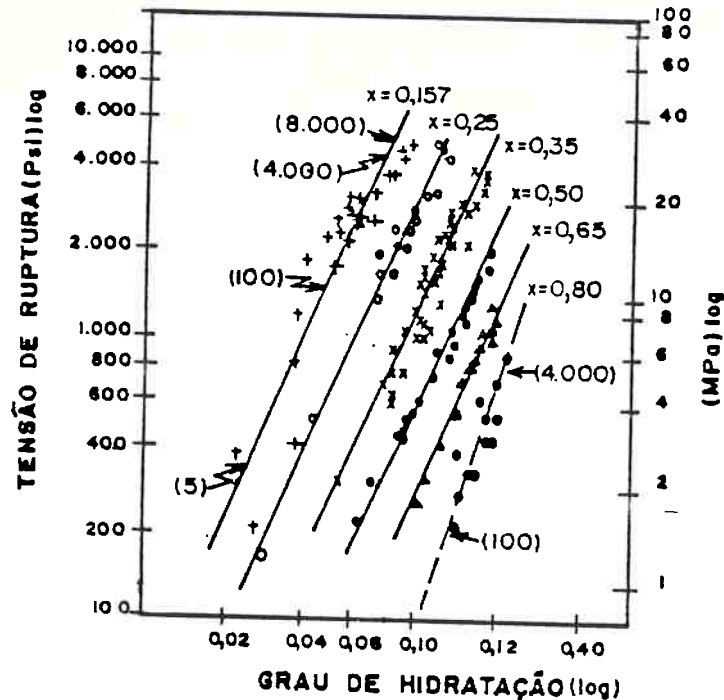


Figura 10 - Efeitos da relação água/cimento na relação entre a resistência e a quantidade de material hidratado (68). Os números entre parênteses indicam a idade aproximada no ensaio, em dias.

No trabalho acima e em vários outros (71,72,73,74) Popovics tem relacionado a resistência relativa (f_{rel}), isto é, a resistência à idade em questão dividida pela resistência aos 28 dias, com a idade (t) em dias e o conteúdo de C_3S do cimento (p) em centésimo de porcentagem:

$$f_{rel} = [1 - pe^{-a_1 t} - (1-p) e^{-a_2 t}] / [1 - pe^{-28a_1} - (1-p) e^{-28a_2}] \quad (\text{equação 40})$$

onde a_1 e a_2 são constantes dependentes da finura do cimento e da sua composição, principalmente do teor de C_3A , dos métodos de cura e ensaio, relação água/cimento, aditivos, etc.

Note-se que Popovics dá uma grande importância ao papel do C_3S no desenvolvimento da resistência: em sua fórmula (equação 40) o cimento é encarado como sendo uma parte C_3S e a outra parte não- C_3S , respectivamente nas proporções p e $(1-p)$. Particularmente na referência (79), procura generalizar a fórmula de Abrams (equação 14) propondo a equação 41:

$$f_c = (A/B^x) \cdot (S_c/S_o)^{1/2} \cdot f_{c,190} \quad (\text{equação 41})$$

onde:

A e B são as constantes de Abrams (possivelmente as constantes de um cimento típico a 90 dias de idade), no caso iguais respectivamente a 107 MPa e 6,4;

x = relação água/cimento em massa;

S_c e S_o = respectivamente as áreas específicas do cimento em questão e de um cimento típico, em cm^2/g ;

$f_{c,190}$ = valor dado pela equação 40, substituindo no denominador o número 28 por 90 (neste trabalho o autor preferiu utilizar como idade - base a de 90 dias em lugar da de 28 dias).

Lawrence, Young e Berger (49,75) estabeleceram para pastas de silicatos cálcicos a seguinte relação:

$$f_t = K X^3 \quad (\text{equação 42})$$

onde:

f_t = resistência à tração;

K = constante dependente das condições de ensaio;

X = relação entre o volume de gel de C-S-H e o volume dos espaços inicialmente vazios.

Afirmaram esses autores que se o grau de hidratação é igual, a natureza dos silicatos não interfere nessa relação. Os gráficos da Figura 11 mostram a dependência entre resistências à compressão e o grau de hidratação que obtiveram a várias temperaturas para argamassas de C_3S , bem como a superposição das resistências à tração tanto para pastas de C_3S como de β - C_2S para mesmos graus de hidratação.

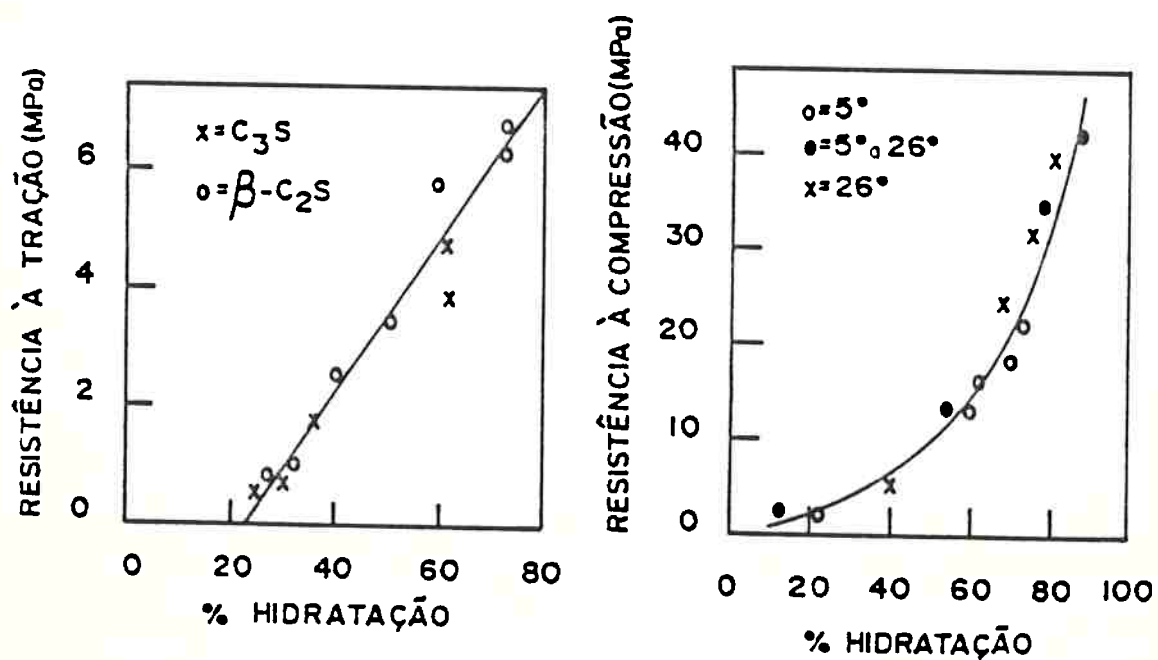


Figura 11 - Relacionamento entre resistências à compressão e à tração com o grau de hidratação segundo Lawrence et al (75).

Jambor ⁽⁷⁶⁾ propôs a equação 43 relacionando a resistência à compressão ao volume dos produtos de hidratação expresso em porcentagem do volume da pasta:

$$f_c = av^3 + bv^2 + cv \quad (\text{equação 43})$$

onde:

f_c = resistência à compressão;

v = volume dos materiais hidratados em % relativa ao volume da pasta;

a , b e c = constantes dependentes dos tipos de produtos de hidratação, e/ou sua capacidade ligante específica.

Ao conjecturarmos sobre o fato de que o produto de hidratação do cimento ocupa um espaço maior do que o original no material anidro, daí resultando a resistência mecânica, por outro lado podemos imaginar se após um certo tempo e dependendo da porosidade disponível, não começariam a surgir esforços internos, devidos a não haver espaço ou mobilidade suficiente para acomodação do produto de hidratação. Budnikov e Strelkov ⁽⁷⁷⁾ abordaram o assunto, lançando a hipótese de que o endurecimento dos ligantes é um fenômeno "internamente contraditório": excluindo os esforços resultantes de mudanças de temperatura, poder-se-ia assumir que as fontes mais importantes de esforços negativos seriam: (a) a "dispersão de hidratação", que definiram como a conversão dos produtos primários de hidratação macroscópicos, para novas partículas sólidas muito menores, produzindo tensões negativas; após a dispersão de hidratação se daria uma aglomeração de partículas na região anteriormente ocupada pela partícula sólida de cimento, tendo essa aglomeração um volume muito maior que o da partícula de cimento. Havendo um aumento no volume da fase sólida em torno dos grãos de cimento, haveria também o desenvolvimento da

pressão de dispersão da hidratação; ela faria as novas formações se tornarem mais próximas, e seu efeito dependeria da velocidade: se lenta, fortaleceria o conjunto, se rápida, enfraqueceria. Dessa forma Budnikoy e Strelkov afixaram que a resistência passaria a cair ao invés de subir para finuras demasiadamente aumentadas, relatando um exemplo onde se aumentou a área específica de 4000 para 9500 cm^2/g com considerável queda de resistência ⁽⁶⁶⁾; e (b) a *pressão cristalina*, que ocorreria nas interfaces dos cristais em crescimento, podendo atingir "dúzias de kgf/cm^2 ", sendo ela uma das possíveis causas da redução de eficiência de tratamentos hidrotérmicos ⁽⁶⁷⁾.

Alexander, Taplin e Wardlaw ⁽⁷⁰⁾ fizeram uma investigação das correlações entre a resistência e o grau de hidratação de cimentos australianos com a composição dos mesmos. Após várias análises de regressão múltipla sobre 15 marcas diferentes de cimento portland comuns em duas diferentes amostragens para cada marca, com relações água/cimento de 0,35 a 0,80 e idades de 1 a 6 meses; concluíram que o fator dominante a influenciar a resistência foi o C_3A , havendo uma pequena, mas significativa influência do tamanho médio das partículas; a influência do C_3S foi de importância secundária. Os autores comparam suas conclusões com as de outros trabalhos, nas quais a importância do C_3S foi fundamental, lembrando que nesses casos teria havido níveis C_3A com pouca variação; quanto aos óxidos menores, área específica e outras características, tiveram pouca influência ou poderiam estar correlacionados com o C_3A e o tamanho médio das partículas; possivelmente exceções seriam o Mn_2O_3 às baixas idades (correlação positiva) e a Cal Livre a altas relações água/cimento a altas idades (correlações negativas).

Ainda sobre a influência da composição química sobre a resistência mecânica, podemos citar o trabalho pioneiro de Gonnerman ⁽⁷¹⁾, que inspirou uma pesquisa no IPT, com cimentos brasileiros, por

⁽⁶⁶⁾ N. do A. este fato também poderia eventualmente ser explicado simplesmente pela conhecida teoria de formação imperfeita de cristais a velocidades de hidratação iniciais muito grandes, o que também ocorre a finuras elevadas, resultando numa resistência comparativamente menor após uma certa idade.

Rapye⁽⁸⁰⁾; nesses trabalhos a resistência à compressão foi relacionada aos teores de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , obtendo-se relações lineares pelo método dos mínimos quadrados; Gonnerman concluiu que o C_3S e o C_2S seriam os principais responsáveis pela resistência, concordando com as afirmações de Bogue e Lerch⁽⁸¹⁾, num trabalho clássico onde se ensaiaram pastas dos componentes puros do cimento portland; porém observou que o C_3A apresentava influência pelo menos até os 28 dias, aumentando a resistência⁽⁷⁷⁾.

Levando em conta uma correlação significativa que existia entre os teores de C_3S e do C_2S , Alexander⁽⁸²⁾ propôs um modo de estimar a resistência à compressão a partir da composição mineralógica a partir somente dos teores de C_3S e C_3A :

$$f_c = a + b(1+C_3A)C_3S + cS_w \quad (\text{equação 44})$$

onde:

f_c = resistência à compressão;

a , b e c = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

S_w = área específica do cimento;

C_3A = porcentagem de C_3A ;

C_3S = porcentagem de C_3S .

Aldridge⁽⁸³⁾ pesquisando correlações entre a resistência à compressão e cimentos neozelandeses, propôs uma equação do tipo:

$$f_c = b_0 + b_1 \cdot C_3S(C_3S + C_2S) + b_2 \cdot C_3A + b_4 \cdot S_w \quad (\text{equação 45})$$

onde:

b_0 , b_1 , b_2 e b_4 = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

C_2S = porcentagem de C_2S ;

demais grandezas, como na equação 44.

Von Euw e Gourdin ⁽⁸⁴⁾ obtiveram uma equação linear correlacionando os teores de Alita, C_3A , C_4AF , SO_3 e K_2O determinados por difração de raios X, o teor de perda ao fogo e as porcentagens de grãos dentro de seis faixas granulométricas, ensaiando 56 amostras de cimento portland franceses, incluindo-se cinco cimentos brancos.

Num estudo realizado no IPT ^(2.85.84) em 1983, procurou-se correlacionar a composição mineralógica e a finura de três marcas de cimentos portland comuns brasileiros fabricados no período de 1972 a 1981 com: (a) as resistências à compressão em argamassa normal, e (b) os coeficientes de Abrams (A e B da equação 14), obtidos ensaiando concreto padrão de consistência fixa e relação água/cimento variável. Foram obtidas equações lineares relacionando as variáveis dependentes a combinações de produtos entre as variáveis independentes, sendo estatisticamente escolhidas as mais significantes. Para a resistência à compressão do cimento aos 28 dias, as variáveis: com maior influência foram, na ordem: ($CaSO_4$, Blaine), ($C_3A.C_4AF$), (C_3S .Blaine), (C_3A .Blaine), ($C_4AF.CaSO_4$), ($C_3S.C_4AF$), ($C_3A.CaSO_4$) e (C_4AF .Blaine), todas com coeficiente negativo; seguidas por (Blaine), (C_3S), (C_3A) e (C_4AF) ⁽⁸⁵⁾, com coeficiente positivo; para o coeficiente A de Abrams as correlações foram muito baixas para a idade de 28 dias, sendo talvez preferível considerar a sua média, de 92,5 MPa; houve maiores influências, embora ainda pequenas, da composição química e da finura no

⁽⁸⁵⁾ Entre parênteses, entendam-se as porcentagens dos compostos indicados, os produtos entre as porcentagens dos compostos indicados ou a área específica "Blaine", conforme indicado.

coeficiente B de Abrams aos 28 dias, e as variáveis escolhidas, na ordem de importância, foram: (Blaine), ($C_3A.C_4AF$), ($C_3S.C_4AF$), com coeficiente negativo, seguidas de ($C_3A.C_3S$) e ($C_4AF.Blaine$) com coeficiente positivo. Nessas inferências não se usou a variável (C_2S) por haver uma correlação forte entre ela e a variável (C_3S).

Sadran e Dellyes ⁽⁸⁷⁾ representaram a evolução da resistência à compressão em função do tempo por meio de uma *função homográfica* na forma apresentada pela equação 46:

$$f_c = (K_1t + K_2)/(K_3t + K_4) \quad (\text{equação 46})$$

onde:

f_c = resistência à compressão;

K_1 a K_4 = constantes dependentes dos materiais, relação água/cimento e outras condições de estudo;

t = tempo.

Note-se que, quando $t=0$, $f_c = K_2/K_4$ e quando t tende para infinito, f_c tende para K_1/K_3 na equação 46.

No caso particular em que a curva passa pela origem, temos $K_2=0$ e chamando K_1/K_3 de A e K_1/K_4 de P , podemos escrever a equação 47 a partir da 46.

$$1/f_c = 1/A + (1/P).(1/t) \quad (\text{equação 47})$$

que é linear para as variáveis $1/f_c$ e $1/t$; A é o valor da assíntota de f_c para t tendendo a infinito e P é a inclinação da curva $f_c = f(t)$ no instante $t=0$.

Quando a curva não passa pela origem, por transformação de coordenadas pode-se chegar a uma forma análoga à da equação 47, dada pela equação 48:

$$1/f_c = 1/A' + (1/P') \cdot [1/(t-t_0)] \quad (\text{equação 48})$$

Sadran e Dellyes, dessa forma, consideraram linearizável a função $f_c = f(t)$, assinalando também que a inclusão do parâmetro t_0 , que seria o tempo necessário para começar a haver resistência à compressão, poderia ser desprezada em grande parte dos casos, pouco interferindo nos resultados práticos. Concluíram que a extrapolação de resistências a partir da equação homográfica fornecia resultados normalmente a favor da segurança, sendo que para idades não muito distantes entre si (de 16 horas a 7 dias; de 1 dia a 28 dias) obtiveram previsões de resistências de cimentos portland franceses com apreciável exatidão; no caso da equação 47 ser aplicável ela se define através de dois pares experimentais (f_c, t) ; no caso da equação 48, são três parâmetros a definir, havendo necessidade de três pares experimentais (f_c, t) . No caso da equação 48, com três pares experimentais (resistência, tempo) = (f_1, t_1) , (f_2, t_2) e (f_3, t_3) , temos um sistema de três equações (do tipo da 48) a três incógnitas, que seriam as constantes A' , P' e t_0 , cuja solução seria:

$$A' = -D/E \quad ; \quad P' = D^2/(DG+EF) \quad ; \quad t_0 = F/D$$

sendo:

$$D = (t_3-t_2) f_2 \cdot f_3 - (t_3-t_1) f_1 \cdot f_3 + (t_2-t_1) f_1 \cdot f_2$$

$$E = -(t_3-t_2) f_1 + (t_3-t_1) f_2 - (t_2-t_1) f_3$$

$$F = t_1(t_3-t_2) f_2 \cdot f_3 - t_2(t_3-t_1) f_1 \cdot f_3 + t_3(t_2-t_1) f_1 \cdot f_2$$

$$G = t_1(t_3-t_2) f_1 - t_2(t_3-t_1) f_2 + t_3(t_2-t_1) f_3$$

Mais tarde, Kee ⁽⁸⁸⁾, preocupado na modelação da resistência em função da maturidade em vista dos procedimentos de cura térmica, acabou adotando uma equação análoga à 47, porém com o tempo podendo ser substituído pela maturidade ⁽⁸⁹⁾:

$$t/f_c = K_1 \cdot t + K_2 \quad (\text{equação 49})$$

onde, K_1 e K_2 são constantes e as demais grandezas já definidas.

Dividindo ambos os termos por t recaímos numa equação análoga à 47, ficando $K_1 = 1/A$ e $K_2 = 1/P$. Nesse trabalho, Kee contesta o modelo de maturidade de Plowman ⁽⁸⁹⁾, a saber:

$$f_c = K_3 + K_4 \log M \quad (\text{equação 50})$$

onde K_3 e K_4 são constantes, M = maturidade, alegando que para um tempo infinito (ou maturidade infinita) seria impossível se obter resistência infinita como a equação 50 sugere.

O trabalho de Plowman, porém, se restringe ao campo de utilização prática com idades relativamente baixas nas quais ambos os modelos podem se considerar adequados. Lew e Reichard ⁽⁹⁰⁾ mostram a adequabilidade da equação 50 para idades de zero a 42 dias e temperaturas de 2°C até 23°C.

Carino, Lew e Volz, considerando a restrição acima explicitada para a equação 50, considerando válida a equação de Kee, ou seja, o modelo hiperbólico também proposto por Sadran e Dellyes ⁽⁸⁷⁾, obtiveram boas aderências dos pontos experimentais a hipérbolas passando pela origem, com valores assintóticos para maturidade infinita.

⁽⁸⁹⁾ Maturidade, conceito muito usado em cura térmica do concreto e estudos do desenvolvimento de resistências à baixas temperaturas, é o produto da idade por uma função da temperatura (normalmente temperatura mais uma constante).

Jerath e Kabbani, propondo um método computacional para auxílio na dosagem de concretos ⁽⁹¹⁾, utilizaram a fórmula:

$$f_c = 0,192 (f_c')^{1,05} \cdot t^{0,43} \quad (\text{equação 51})$$

onde:

f_c = resistência à compressão em p.s.i. à idade t em dias;

f_c' = resistência à compressão aos 28 dias em p.s.i.

Pode-se avaliar como a linearização da função $f_c = f(t)$ pode facilitar a previsão da resistência do cimento e do concreto através das hipóteses explícitas em 1983 ^(2.05.92): supondo uma função F que aplicada ao tempo linearize o gráfico de $f_c = f(t)$, teríamos um relacionamento entre três resistências à compressão na forma:

$$f_{ca} = (1+K) f_{cm} - K (f_{cb}) \quad (\text{equação 52})$$

onde:

f_{ca} = resistência à compressão numa idade "alta";

f_{cm} = idem, numa idade "média";

f_{cb} = idem, numa idade "baixa";

$K = [F(t_a) - F(t_m)] / [F(t_m) - F(t_b)]$;

F = função linearizadora aplicada ao tempo;

t_a = idade "alta";

t_m = idade "média";

t_b = idade "baixa".

Foram obtidas boas previsões de resistência independentemente da marca de cimento empregado, através de uma equação semelhante à 52, obtida por regressão linear, a saber:

$$f_{c28} = 1,098 f_{c7} - 0,358 f_{c3} + 13,3 \quad (\text{equação 53})$$

onde, f_{c28} , f_{c7} e f_{c3} são as resistências às idades de 28, 7 e 3 dias, respectivamente, em MPa. Esta equação foi obtida de 826 amostras de cimentos nacionais de três diferentes marcas, produzidos entre 1957 e 1981, com erro de previsão de $\pm 4,03$ MPa ou $\pm 12,8\%$ da média com 90% da confiança (**).

Mais recentemente, Helene (***) obteve boas linearizações da função $f_c = f(t)$ usando a fórmula:

$$f_c / f_{c28} = K_1 / K_2^{1/T} \quad (\text{equação 54})$$

onde K_1 e K_2 são constantes dependentes dos materiais e condições de estudo, $T = t^{1/2}$, e as demais grandezas são as anteriormente definidas. Derivando em relação à relação água/cimento o coeficiente angular da equação 54 linearizada, Helene demonstrou, com a ajuda da equação 5, que o crescimento relativo da resistência com a idade apresenta-se sempre maior para concretos com relação água/cimento mais alta, que são os concretos de resistência mais baixa. A equação 54 linearizada resulta na forma:

$$\log (f_c / f_{c28}) = K_3 + K_4 (1/t^{1/2}) \quad (\text{equação 55})$$

onde, $K_3 = \log K_1$ e $K_4 = -\log K_2$.

(**) No IPT, chamou-se de "efeito vara-de-pesca" ao fato de que conforme explicitam as equações 52 e 53, para uma dada resistência à idade média, (exemplo: aos 7 dias), o valor da resistência à idade alta (exemplo: 28 dias), decresce com o aumento da resistência à baixa idade (exemplo: de 3 dias); e vice-versa (**).

Podem ainda ser citadas as fórmulas de Ros ⁽⁹⁴⁾ e de Arenas e Gris ⁽⁹⁵⁾, ambas diferindo apenas nos coeficientes e no expoente do tempo, respectivamente apresentadas pelas equações 56 e 57:

$$f_c = f_{c28} (a \cdot t^{2/3}) / (b + t^{2/3}) \quad (\text{equação 56})$$

$$f_c = f_{c28} (a_1 t^2) / (b_1 + t^2) \quad (\text{equação 57})$$

onde:

f_c = resistência à compressão à idade t ;

f_{c28} = idem, para o mesmo concreto ou argamassa aos 28 dias;

a , b , a_1 e b_1 , coeficientes dependentes dos materiais e condições de estudo.

Dreux ⁽¹¹⁾ também propôs uma fórmula baseada na resistência a uma idade padrão, a saber:

$$f_c = f_{c0} [a + b (\log t)^n] \quad (\text{equação 58})$$

onde:

f_c = resistência à compressão à idade t ;

f_{c0} = resistência a uma certa idade;

a , b e n = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo.

Chambaud ⁽¹¹⁾, levando em conta a relação de Feret, apresentou a expressão:

$$f_c = K(1+a)^2 [En \cdot c / (e+v)] / [1+n \cdot c / (e+v)]^2 \quad (\text{equação 59})$$

onde, $n = t^{1/2} / (t_0^{1/2} + t^{1/2})$

K e a = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

c = volume de cimento;

e = volume de água;

v = volume de vazios;

$c/(e + v)$ = "relação de Feret";

t = tempo;

t_0 = tempo necessário para hidratação de metade do ligante.

Note-se que a equação de Chambaud tem a forma da equação de Feret dada na equação 11, porém com a relação $c/(e+v)$ multiplicada por n, que neste caso pode ser interpretado como associado ao grau de hidratação, concordando com o que foi dito no final do item 2.

3.5. Estudos da longa duração

Enquanto foram encontrados numerosos trabalhos sobre as relações entre a resistência à compressão, o grau de hidratação, a porosidade, a água não evaporável e o tempo, particularmente é reduzido o número dos que se ocuparam de verificações experimentais de longa duração, aqui entendidas como aquelas nas quais a idade atingisse algo como 25 ou 50 anos.

Coutinho ⁽⁴⁴⁾ e também Washa, Saemann e Cramer ⁽⁴⁵⁾ apresentam como possivelmente único na categoria de ensaios de resistência a 50 anos de idade, um programa da universidade de Wisconsin, subdividido em três séries, a "A", iniciada em 1910, a "B", iniciada em 1923 e a "C", iniciada em 1937.

M.O. Withey foi o pesquisador responsável pelo planejamento, inauguração e condução de boa parte desse programa (1,96,97,98,99).

Na época do início dos ensaios, ponderou-se que a resistência do concreto seria afetada pelos fatores: idade, qualidade dos ingredientes, proporções de cimento, agregado e água de mistura, eficácia da mistura e condições de cura. Note-se que em 1910 nem mesmo Abrams ainda havia publicado sua célebre equação, muito menos divulgado o uso do cone de Abrams, e a consistência não foi medida (mais tarde estimou-se um abatimento de mais de 200 mm, bastante fluido). As proporções em volume (cimento:areia:pedra) foram 1:2:4 e 1:3:6, a primeira com relação água/material seco 9,1% e a segunda com 10%, calculando-se relações água/cimento, respectivamente iguais a 0,94 e 1,36. Moldaram-se cilindros de relação altura/diâmetro igual a 3; a areia, de Jannesville, continha 60% de quartzo, 30% de dolomito e 10% de material na maior parte ígneo. O agregado graúdo foi dolomito magnesiano britado. As condições de cura foram: imersão em água, intempéries e ambiente abrigado. Ao relatar resultados de 20 e 30 anos (97,98), observou-se que a resistência parecia crescer linearmente com o logaritmo da idade; mais tarde (99), observou-se que uma extrapolação adotando as equações anteriormente obtidas era conservativa. As curvas de evolução da resistência com a idade apresentam períodos em que ocorrem quedas na resistência, que poderiam ou não ser atribuídos à variabilidade dentro do ensaio.

Relatando resultados da série "C" de 1937, *Washa et al* (96) assinalaram que após 10 anos a resistência decresceu ou permaneceu essencialmente a mesma; com relação às mudanças de volume e de peso, observaram que em 50 anos às intempéries a massa dos corpos de prova decresceu em média 0,9%. Após 10 anos teria ocorrido uma expansão reduzindo a contração inicial líquida para 0,0075% em média. São aguardados resultados de 100 anos (da série "A") para 2010 (96).

4. FORMULAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO

4.1. Relação entre a resistência mecânica e o grau de hidratação

A resistência à compressão se desenvolve devido ao preenchimento dos poros capilares da pasta com o produto de hidratação de cimento, cujo volume é maior do que o do material anidro. Com a hidratação, ocorre a diminuição gradual do volume dos poros capilares e o aumento gradual do material sólido na pasta.

Admitir-se-á a relação dada pela equação 16:

$$f_c = A/Bx^{*g_h} \quad (\text{equação } 60)$$

onde:

A e B = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

x = relação água/cimento, em massa;

g_h = grau de hidratação, relação em massa.

Outras equações alternativas poderiam ser:

a) com base na equação 5,

$$f_c = A' [K / (1/m_{ec} + x/g_h)]^n \quad (\text{equação } 61)$$

onde:

A' e n = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

K = volume de material hidratado resultante, por unidade de massa de cimento anidro, após hidratação completa;

m_{ec} = massa específica do cimento.

b) com base na Figura 9 e na equação 39 (que por sua vez tem relação com a fórmula linear originalmente proposta por Powers e Brownyard ⁽⁶⁾),

$$f_c = A^* \cdot (g_h/x) - B^* \quad (\text{equação } 62)$$

onde:

A^* e B^* = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo.

Um dos motivos da escolha da equação 60 é a sua semelhança ao modelo de Abrams, consagrado no Brasil; pode-se linearizá-la, transformando-a em:

$$\log f_c = \log A - (\log B) \cdot x/g_h \quad (\text{equação } 63)$$

O tratamento matemático deste modelo apresenta relativa facilidade, como se verá adiante.

4.2. Relação entre o grau de hidratação e o tempo

O grau de hidratação se desenvolve ao longo do tempo como o resultado da hidratação simultânea, em regimes diversos, de grãos de cimento com várias dimensões e composições mineralógicas.

A hidratação de um grão de dadas dimensões e composição mineralógica tem sua velocidade controlada pelo processo que, no instante considerado, seja mais lento, atuando como um freio em outros processos que aconteçam numa cadeia. Por exemplo, suponha-se que hidratação se dê por um esquema simplificado apresentado na Figura 12.

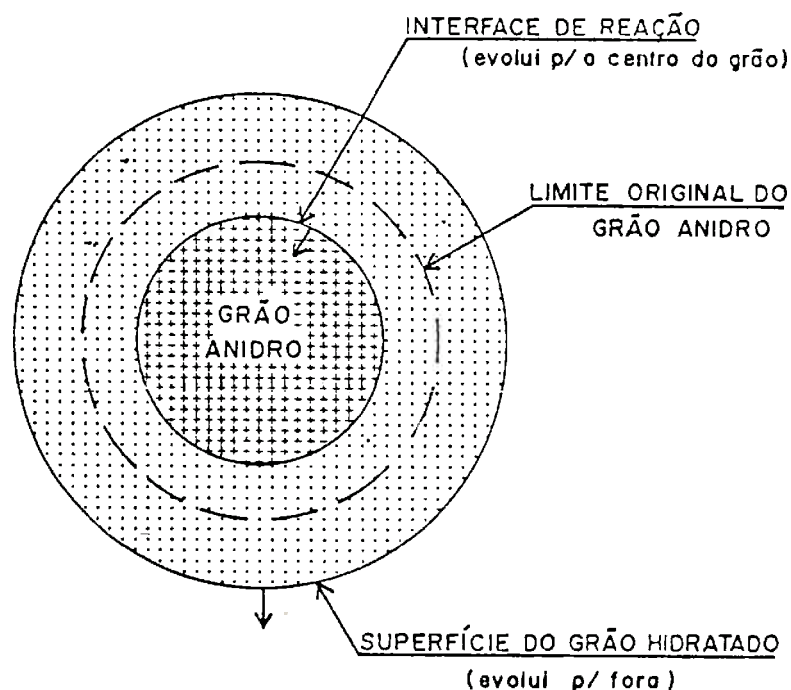


Figura 12 - Esquema simplificado de hidratação num instante genérico.

É necessário que a água atravessasse o gel hidratado, para atingir o grão anidro; que ocorra o ataque do grão anidro pela água, resultando um produto de hidratação na forma de íons em solução; parte desses íons têm que ser transportados até à superfície do grão hidratado e é preciso se formarem os cristais de C-S-H. Simplificadamente temos: transporte de íons em dois sentidos através do gel, reação propriamente dita e formação de cristais interiores e exteriores de C-S-H. Cada um desses processos teria, se ocorresse independentemente dos demais, uma lei cinética própria. Como a ocorrência é simultânea, prevaleceria na realidade a cinética mais lenta. Cada lei cinética de processo independente

poderia ser expressa pela velocidade de hidratação em função do grau de hidratação, através de uma função genérica:

$$dg_h/dt = f(g_h) \quad (\text{equação 64})$$

onde, dg_h/dt é a velocidade de hidratação, g_h é o grau de hidratação e t é o tempo. A Figura 13 procura ilustrar três diferentes cinéticas (hipotéticas) de hidratação ocorrendo independentemente e a cinética resultante devida à ocorrência simultânea.

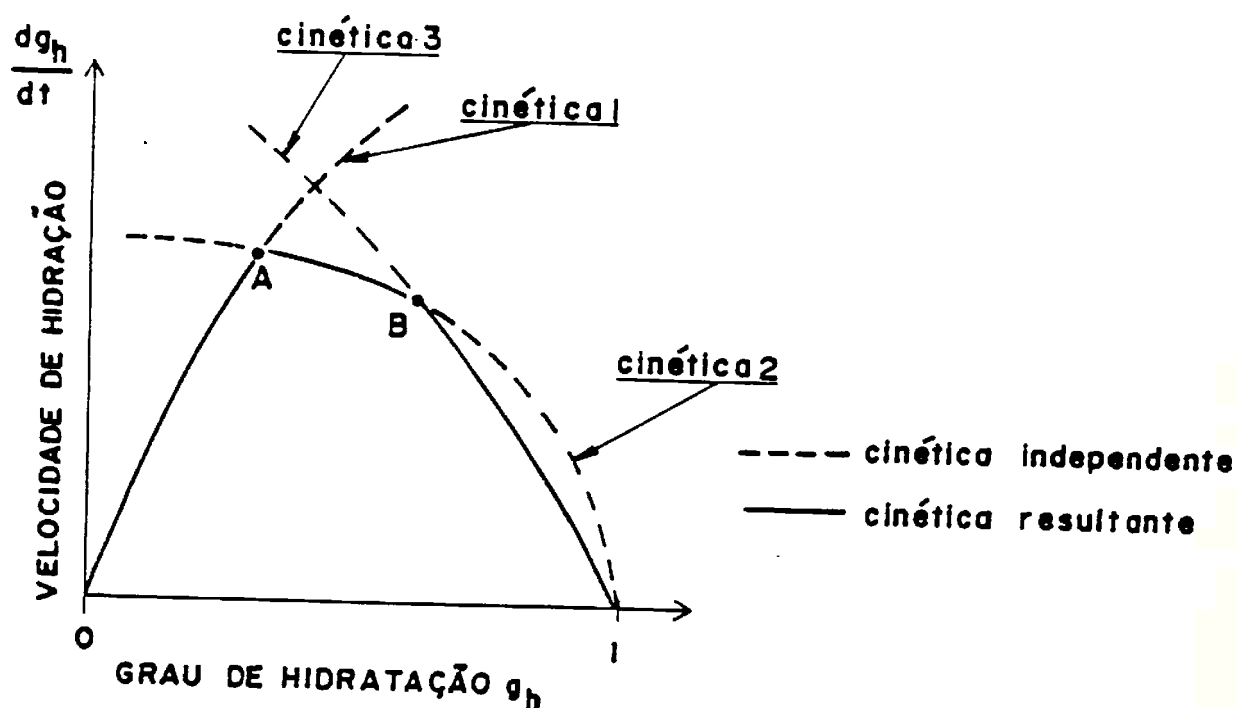


Figura 13 - Situação hipotética de três leis cinéticas de hidratação ocorrendo simultaneamente.

No exemplo da Figura 13, poder-se-ia ter a cinética 1 como a da formação de cristais (inicialmente a velocidade seria nula e com o surgimento dos primeiros germes de cristalização iria crescendo progressivamente); a cinética 2 como controlada pela velocidade de ataque do cimento pela água na superfície do grão anidro (a velocidade de hidratação iria diminuindo progressivamente em função da diminuição da superfície de ataque, com a diminuição do tamanho do grão anidro); a cinética 3 poderia ser controlada pela resistência exercida pela camada de gel à passagem de ions no processo. Até o ponto A do diagrama, a cinética resultante seguiria a curva 1, que atuaria como freio dos demais processos; entre os pontos A e B a cinética mais lenta seria a da curva 2, sendo então esta a prevalecer; após o ponto B, a cinética passaria a seguir a curva 3.

Não cabe aqui discutir exatamente qual o processo determinante em cada fase, nem quais as fases que ocorreriam. Simplesmente pode-se admitir que a configuração do diagrama da velocidade de hidratação com o grau de hidratação mostra um aumento progressivo no início, passa por um máximo e diminui até zero. O arredondamento dessa curva num cimento real seria consequência inclusive da multiplicidade de tamanhos de grãos e composições dos mesmos.

Ocorre, em linhas gerais, numa curva real de hidratação em função do tempo, um período de dormência (I), um período de aceleração (II), uma velocidade máxima de hidratação, uma diminuição progressiva da velocidade (III) até se atingir velocidade praticamente nula (IV) ao final da hidratação; a configuração se apresenta na Figura 14.

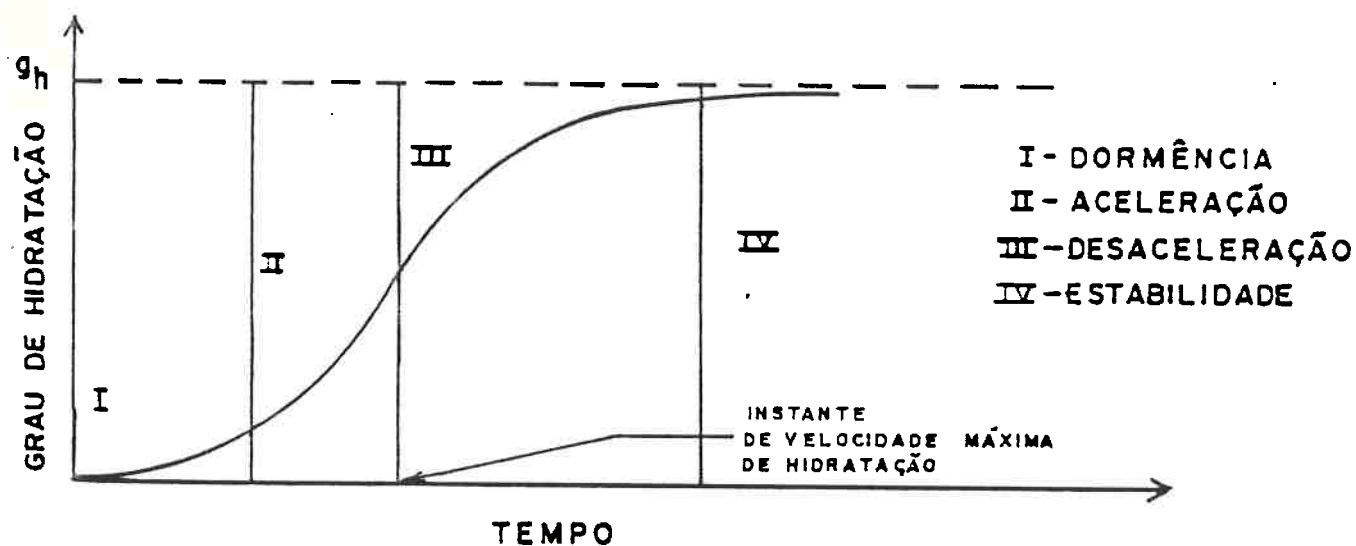


Figura 14 - Diagrama esquemático do grau de hidratação em função do tempo.

A equação de Avrami-Erofeyev (equação 31):

$$-\ln(1 - g_h) = K t^M$$

pode ser escrita na forma:

$$g_h = 1 - e^{-KT} \quad (\text{equação 66})$$

onde:

$$T = t^M \quad (t = \text{tempo})$$

K e M = constantes dependentes dos materiais e condições de estudo;

g_h = grau de hidratação;

Derivando ⁽¹⁰⁰⁾, temos $dg_h/dt = 0$, quando $t=0$ e também que $g_h = f(t)$ pode passar por uma inflexão ⁽¹⁰¹⁾. Note-se que quando t tende a infinito, g_h tende a 1.

Da equação 66, tiramos:

$$t = [-\ln (1-g_h) / K]^{1/M}$$

$$e^{-Kt^M} = (1 - g_h)$$

$$dg_h/dt = M \cdot K \cdot (1-g_h) \cdot [-\ln (1-g_h)/K]^{M-1/M} \quad (\text{equação 67})$$

O gráfico da equação 66 tem a configuração da Figura 14 e o gráfico da equação 67 mostra que dg_h/dt em função de g_h , saindo de zero na origem, passa por um máximo, tendendo a zero quando g_h tende à unidade.

No intuito de se obterem fórmulas mais simples, buscaram-se outras funções matemáticas para a representação do grau de hidratação em função do tempo.

Para tal, pode-se usar uma simplificação maior do que a da equação de Avrami-Erofeyev. Trata-se de admitir:

- Durante o período de dormência, a hidratação é considerada zero;
- A hidratação se inicia num instante t_0 , seguindo uma função homográfica ⁽¹⁰²⁾. O gráfico da Figura 15 ilustra a simplificação.

⁽¹⁰¹⁾ A curva $g_h = f(t)$ muda de inflexão no instante: $t = [(M-1) / M K]^{1/M}$

⁽¹⁰²⁾ $g_h = (K_1 T' + K_2) / (K_3 T' + K_4)$, com K_1, K_2, K_3 e K_4 constantes, é uma função homográfica com assíntota igual a K_1/K_3 quando T' tende a infinito; se a curva passa pela origem, $K_2=0$ e temos: $g_h = K_1 T' / (K_3 T' + K_4) = 1 / [(K_3/K_1) + (K_4/K_1 T')]$, logo $1/g_h = K_3/K_1 + K_4/K_1 \cdot (1/T')$ sabendo-se que a assíntota de g_h é 1 (máximo grau de hidratação possível) e que para a curva passar pela origem é necessário que $T' = T - T_0$ (ver Figura 17), e chamando K_1/K_4 de g_{h0}' , tem-se $1/g_h = 1 + 1/g_{h0}' \cdot 1/(T - T_0)$ que é uma expressão mais cômoda, como veremos adiante.

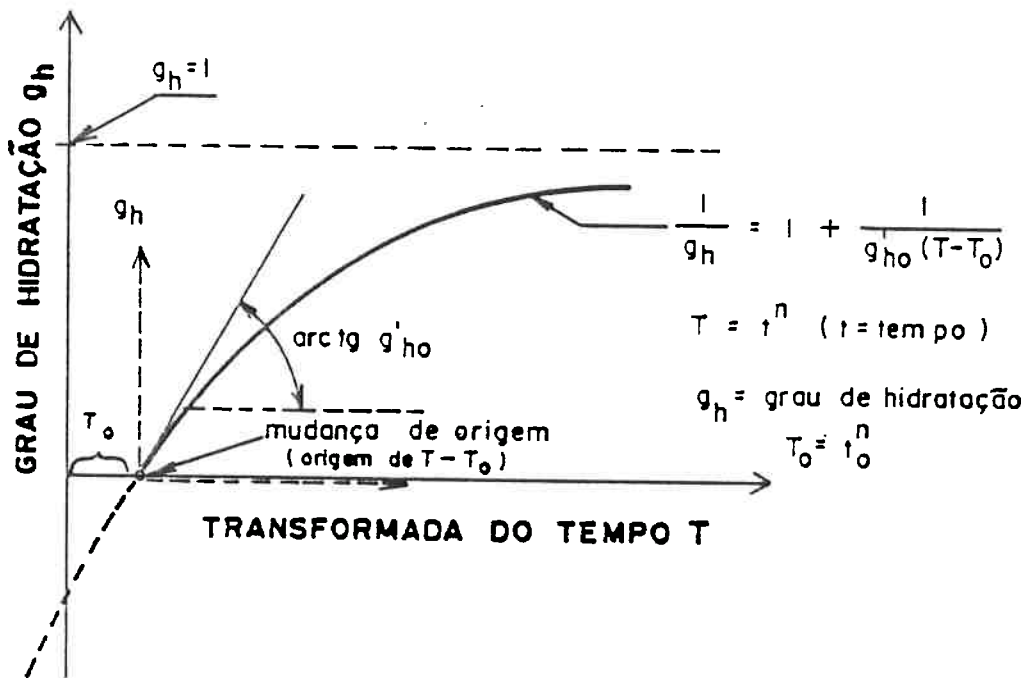


Figura 15 - Simplificação da evolução do grau de hidratação segundo uma função homográfica. Ver equação 68.

Utiliza-se a variável $T = t^n$ em lugar da variável t (tempo) para permitir um melhor ajuste das curvas aos casos reais. Tem-se dessa forma a equação:

$$\frac{1}{g_h} = 1 + \frac{1}{g_{ho}'(T - T_0)} \quad (\text{equação } 68)$$

onde:

g_h = grau de hidratação;

g_{h_0}' = derivada do grau de hidratação em relação a T no instante em que $T = T_0$ (dependente dos materiais e condições de estudo);

T = transformada do tempo = t^n ;

t = tempo;

n = constante dependente dos materiais e condições de estudo;

$T_0 = t_0^n$ = transformada do tempo no instante de início da hidratação (quando $g_h = 0$);

t_0 = tempo no início da hidratação.

O gráfico da equação 68, mostrado na Figura 15, mesmo sendo uma simplificação, pode ter seus parâmetros interpretados fisicamente: a transformada do tempo T_0 pode ser interpretada como relacionada ao tempo de dormência; deve portanto ter relação com a composição do cimento e com a relação água/cimento, mantidas constantes as demais condições; a constante g_{h_0}' é uma espécie de "velocidade" inicial de hidratação em relação à transformada do tempo T (se $n=1$ seria a própria velocidade inicial de hidratação); também deve se relacionar com as mesmas variáveis. Sabe-se que a velocidade de hidratação é influenciada pela relação água/cimento.

Ao tratar de idades avançadas, o valor de T_0 pode vir a ser considerado desprezível no tratamento dos dados. Desta forma, passaremos a considerar, apenas, a influência da relação água/cimento na constante g_{h_0}' , considerando $T_0 = 0$. Arbitrar-se-á, para o relacionamento de g_{h_0}' com a relação água/cimento x , a expressão:

$$1/g_{ho}' = 1/g_{h' máx} + 1/g_{ho}'' \cdot 1/x \quad (\text{equação } 69)$$

onde:

g_{ho}' = derivada do grau de hidratação na equação 68;

$g_{h' máx}$ = assíntota de g_{ho}' para x tendendo a infinito, dependente dos materiais e condições de estudo;

g_{ho}'' = derivada de g_{ho}' em relação a x quando $x = 0$, dependente dos materiais e condições de estudo;

x = relação água/cimento.

A Figura 16 ilustra o gráfico da equação 69.

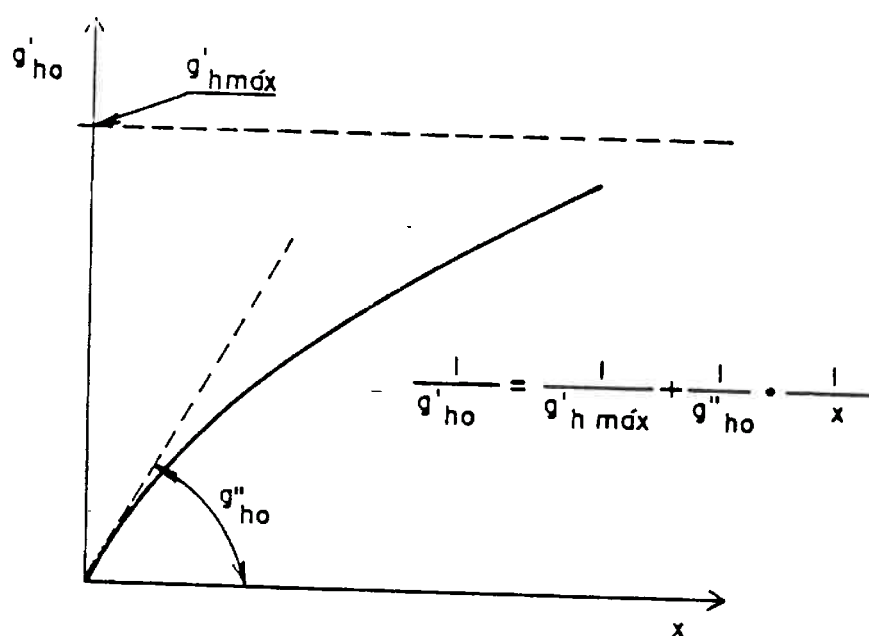


Figura 16 - "Velocidade" inicial de hidratação em função da relação água/cimento x .

Nesse gráfico, observa-se que acima de um certo valor da relação água/cimento, a "velocidade" inicial de hidratação passaria a ser praticamente constante; abaixo desse valor, haveria uma relação crescente entre a "velocidade" inicial de hidratação e a relação água/cimento; para relação água/cimento nula, a "velocidade" inicial de hidratação seria zero (**).

Não deixando de considerar $T_0 = 0$, a equação 68 fica, substituindo o valor de $1/g_{ho}'$:

$$1/g_h = 1 + [(1/g_h'_{\text{máx}}) + (1/g_{ho}'') \cdot (1/x)] \cdot 1/T \quad (\text{equação 70})$$

ou:

$$1/g_h = 1 + (1/g_h'_{\text{máx}}) \cdot (1/T) + (1/g_{ho}'') \cdot (1/x) \cdot (1/T) \quad (\text{equação 71})$$

4.3. Relação entre a resistência à compressão e o tempo

Da equação 63,

$$\log f_c = \log A - (\log B) \cdot x/g_h \quad (\text{equação 63})$$

substituindo o valor de $1/g_h$ dada pela equação 68, temos:

$$\log f_c = \log A - (\log B) \cdot x - [(\log B)/(g_{ho}')] \cdot x/(T - T_0) \quad (\text{equação 72})$$

Se T_0 for desprezível, temos:

$$\log f_c = \log A - (\log B) \cdot x - [(\log B)/g_{ho}'] \cdot (x/T) \quad (\text{equação 73})$$

Substituindo o valor de $1/g_{ho}'$ dado pela equação 69:

$$\log f_c = \log A - (\log B) \cdot x - (\log B/g_h'_{\text{máx}}) \cdot (x/T) - (\log B/g_{ho}'') \cdot (1/T) \quad (\text{equação 74})$$

(**) Usa-se "velocidade" entre aspas já que essa grandeza exprime uma derivada em relação a uma transformada do tempo $T = t^n$.

Pode-se adotar a equação 65, usando o valor de g_{ho}' como constante quando o valor de x for suficientemente alto (segundo o gráfico da Figura 16), nesse caso, ter-se-ia:

$$\log f_c = (\text{constante 1}) - (\text{constante 2}) \cdot x - (\text{constante 3}) \cdot (x/T) \quad (\text{equação 75})$$

No caso de x influir em g_{ho}' , ter-se-ia a equação 66:

$$\log f_c = (\text{constante 1}) - (\text{constante 2}) \cdot x - (\text{constante 4}) \cdot (x/T) + (\text{constante 5}) \cdot (1/T) \quad (\text{equação 76})$$

Outra forma de se notar a equação 73 seria, chamando $(\log B)/g_{ho}'$ de $\log C$:

$$f_c = A / (B^x \cdot C^{x/T}) \quad (\text{equação 77})$$

que seria válida quando $g_{ho}' = \text{constante}$.

Também a equação 74 poderia ser notada, chamando $(\log B)/g_{ho}'$ de $\log D$ e $(\log B)/g_{ho}''$ de $\log E$:

$$f_c = A / (B^x \cdot D^{x/T} \cdot E^{1/T}) \quad (\text{equação 78})$$

que seria uma expressão mais geral.

Note-se que se fizermos $T = \text{constante}$, na equação 77, teremos:

$$f_c = A / [B^x \cdot (C^{1/T})^x] = A / (B \cdot C^{1/T})^x$$

chamando $B \cdot C^{1/T}$ de β_1 , teremos

$$f_c = A / \beta_1^x \quad (\text{equação 79})$$

recaindo na forma da expressão de Abrams.

Na equação 78, fazendo $T = \text{constante}$,

$$f_c = A / [E^{1/T} \cdot (B \cdot D^{1/T})^n]$$

fazendo, $A/E^{1/T} = A_1$ e $B \cdot D^{1/T} = B_2$

temos: $f_c = A_1/B_2^n$ (equação 80)

recaindo também na forma da expressão de Abrams.

Uma diferença fundamental entre a equação 79 e a 80 são os valores das constantes no numerador; enquanto a constante A da equação 79 é independente do tempo, o valor da constante $A_1 = A/E^{1/T}$ é dependente do tempo.

Pode-se daí inferir que, sendo válida a equação 77, isto é, não havendo influência da relação água/cimento na velocidade inicial de hidratação, as curvas de Abrams terão seu intercepto com o eixo das ordenadas sempre no mesmo ponto, independente da idade, mantidas constantes as demais condições; se for válida, porém, a equação 78, os interceptos serão variáveis segundo a idade; isto aconteceria havendo uma influência significativa da relação água/cimento na velocidade de hidratação.

A Figura 17 e a Figura 18 mostram os dois casos.

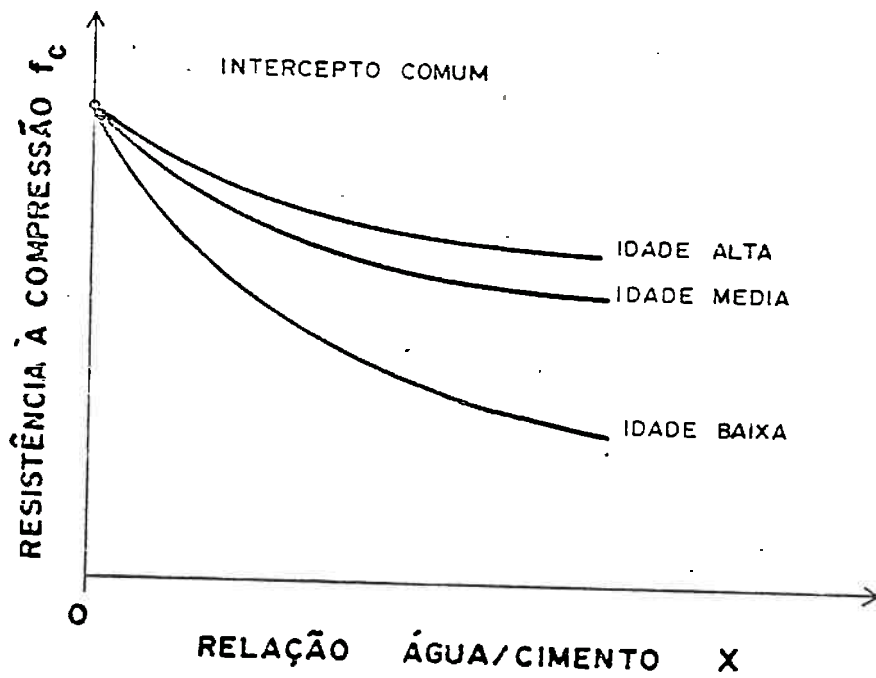


Figura 17 - Curvas de Abrams de concretos onde a relação água/cimento não interfere na velocidade de hidratação.

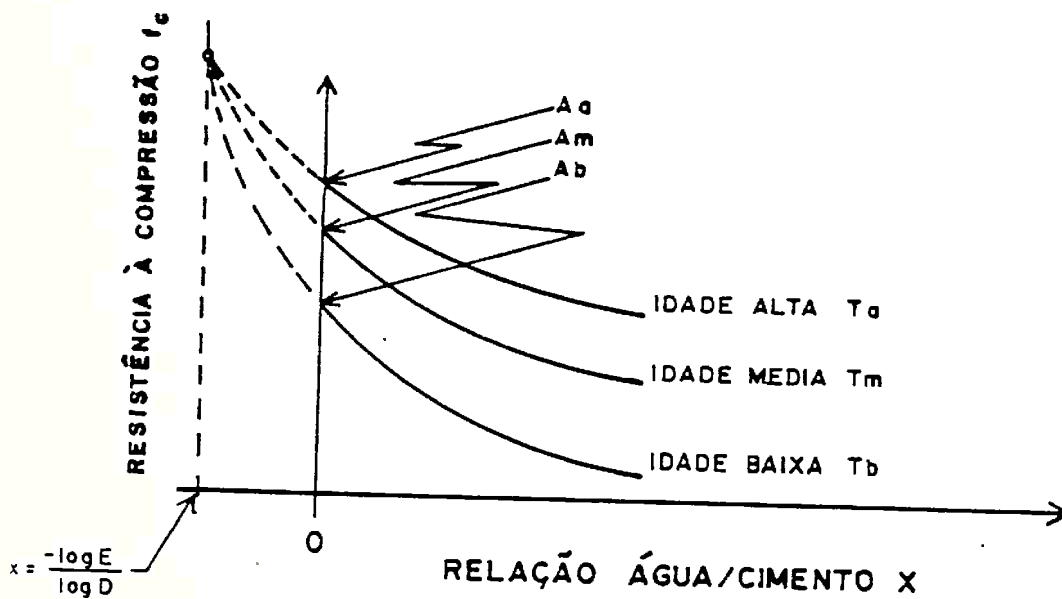


Figura 18 - Curvas de Abrams de concretos onde a relação água/cimento interfere na velocidade de hidratação.

Vemos na Figura 18 que as curvas também se cruzam sempre no mesmo ponto no segundo caso, porém isso se dá numa relação água/cimento (fictícia) igual a $-\log E/\log D$. Obtem-se esse valor calculando x a partir da igualdade:

$$A / (B^x \cdot D^{x/T_1} \cdot E^{1/T_1}) = A / (B^x \cdot D^{x/T_2} \cdot E^{1/T_2})$$

de onde resulta $x = -\log E/\log D$ (**)

Note-se que o resultado é independente do tempo e portanto as curvas de todas as idades se cruzam no mesmo ponto.

Viu-se, também, que o modelo de Abrams adaptado na forma da equação 60 resulta numa forma matemática semelhante, quer exista quer não exista influência da relação água/cimento na hidratação, tornando-o por isso ainda mais cômodo.

A parte experimental deste trabalho ocupar-se-á da verificação da validade e do estudo dos modelos pelas equações 77 e 78, cujos parâmetros permitem calcular os das equações 73 e 74.

$$(**) \log A - x \cdot \log B - (x/T_1) \log D - (1/T_1) \log E = \log A - x \log B - (x/T_2) \log D - (1/T_1) \log E$$

$$\text{logo, } -(x/T_1) \log D - (1/T_1) \log E = -(x/T_2) \log D - (1/T_1) \log E$$

$$(x/T_2) \log D - (x/T_1) \log D = (1/T_1) \log E - (1/T_2) \log E$$

$$x[(\log D)/T_2] - [(\log D)/T_1] = [(\log E)/T_1] - [(\log E)/T_2]$$

$$x \cdot (\log D) (1/T_2 - 1/T_1) = (\log E) (1/T_1 - 1/T_2)$$

$$x = (\log E/\log D) \cdot [(1/T_1 - 1/T_2)/(1/T_2 - 1/T_1)] = -\log E/\log D$$

5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS

5.1. Levantamento de dados

5.1.1. Notas históricas

O documento mais antigo, mencionando o programa de ensaios de longa duração, encontrado nos arquivos de Laboratório de Concreto do IPT é uma cópia de carta, de 20 de Abril de 1935, da *Companhia Brasileira de Cimento Portland S.A.* (já extinta), assinada pelo diretor-gerente H.A. Henry, aprovando o plano de ensaios proposto pelo Engenheiro Ary Torres, do L.E.M. (**), em uma reunião com o químico chefe M. Teixeira de Castro, da cimenteira.

No documento, além de se depreender que a autoria do plano inicial é de Ary Torres, resumem-se os ensaios a realizar e critérios de amostragem ⁽¹⁰¹⁾.

O primeiro documento técnico, a respeito do programa, emitido pelo L.E.M., é o "*Ensaio Oficial n. 3731*", ^(***), datado de 19 de Agosto de 1933, relatando o primeiro programa executado, séries de corpos de prova com características dos concretos, materiais empregados, métodos de ensaio e locais de coleta de amostras.

 (***) L.E.M. = Laboratório de Ensaio de Materiaes da Escola Polytechnica de São Paulo - entidade que no ano seguinte viria a ser o I.P.T.

(***) Foi também emitido outro documento de igual título e teor ⁽¹⁰²⁾ já com a denominação "*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - Anexo à Escola Polytechnica*"; possivelmente a duplicação se deva à emissão dos suplementos a idades do concreto mais altas, sendo que o primeiro suplemento data de 1935, quando o L.E.M., já passara à denominação que até hoje perdura.

Verifica-se que os programas de ensaios, nas linhas principais, seguiram os mesmos padrões para os outros fabricantes de cimento. Ao que parece, a unicidade encontrada na metodologia foi responsabilidade dos executores do programa, não tendo sido encontrada referência a nenhum acordo entre os fabricantes envolvidos, no que diz respeito a esses ensaios.

5.1.2. Coleta e preparo das amostras de cimento

As amostras de cimento, distribuídas no período de 1933 a 1965, em número de 75, e discriminadas na Tabela 3, foram coletadas por representantes do Laboratório em depósitos de fornecedores intermediários ou dos próprios fabricantes e homogeneizadas. A Tabela 3, Anexo I, apresenta o número dos certificados IPT para que eventualmente os fabricantes possam identificar seus próprios resultados.

Tabela 3 - Amostras de cimento, anos de amostragem, números de certificados IPT e códigos dos fabricantes. (ANEXO I)

5.1.3. - Ensaios de cimento para caracterização

Realizaram-se os ensaios físicos e mecânicos de cimento segundo as metodologias que, calcadas em Boletins do IPT e do Instituto de Engenharia de São Paulo, datados do período de 1931 a 1935 (103 a 108), resultaram no método M-1 do IPT (109), que se transformou no método MB-1 da ABNT em 1937 (110, 111). Os resultados encontram-se na Tabela 4.

A principal diferença entre a metodologia empregada e a que está atualmente em vigor ⁽¹¹²⁾ diz respeito ao índice de consistência da argamassa normal para o ensaio à compressão, e a relação água/cimento da mesma: o método de 1937 (que foi utilizado pelo IPT até 1977, a despeito de que esteve em vigor, simultaneamente, um outro método de mesmo escopo ⁽¹¹³⁾), previa a realização do ensaio com índice de consistência constante 165 ± 5 mm e relação água/cimento necessária para tal; atualmente fixa-se a relação água/cimento em 0,48, podendo-se medir a consistência resultante. Estima-se que a diferença entre o resultado pelo ensaio antigo e o resultado pelo ensaio atual, se aplicados num mesmo cimento, seja aproximadamente proporcional à diferença entre o índice de consistência 165 mm e o índice que for obtido com relação água/cimento 0,48; se o cimento apresentar índice de consistência menor que 165 mm, pelo ensaio atual, sua resistência será menor se medida pelo método antigo, e vice-versa. Como nos cimentos deste estudo a consistência foi imposta, com média de 165 mm e a relação água/cimento da argamassa normal resultou em torno de 0,48, podemos afirmar que se eles fossem ensaiados pelo método atual, os resultados não apresentariam grande discrepância dos da Tabela 4, Anexo II.

Os ensaios químicos também estão apresentados na Tabela 4, Anexo II, tendo-se empregado método tradicional de análise laboratorial, não pormenorizado nos certificados dos ensaios.

Tabela 4 - Ensaios físicos, mecânicos e químicos das amostras de cimento. (ANEXO II)

5.1.4. Ensaio em concretos

a) Caracterização dos Agregados

Empregaram-se, em todos os estudos, areia lavada do rio Tietê e pedregulho de mesma origem, com granulometria imposta. As proporções relativas entre os agregados, em cada traço de concreto, foram calculadas de modo a se obter um módulo de finura adequado à trabalhabilidade do concreto. A Tabela 5, Anexo III, apresenta os módulos de finura, da areia e do pedregulho, e mais os módulos de finura resultantes em cada traço de concreto, para cada cimento estudado.

Em todos os casos, o diâmetro máximo do agregado graúdo foi de 38 mm; a massa específica de ambos os agregados foi de 2,6 kg/dm³.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica dos agregados empregados, individualmente e após composições. (ANEXO III)

b) Método de confecção e traços

Os concretos foram todos confeccionados em ambiente abrigado, empregando-se caçambas metálicas e pás para mistura ^(*); cada quatro corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura eram confeccionados em uma mistura separada. O método de moldagem, inicialmente o descrito na segunda edição do Boletim n. 1 do L.E.M., ainda está em vigor ^(**), NBR-5738, assim como o abatimento do tronco de cone de Abrams, NBR-7223 ^(***), que se situou na faixa de 100 ± 20 mm; as relações água/cimento eram as obtidas por

^(*) O início do uso de betoneira no Laboratório de Concreto do IPT, deu-se por volta de 1965, segundo os técnicos Angelo Derolle e Álvaro Ferraz.

tentativas para atendimento do abatimento; os corpos de prova eram removidos do local de moldagem para a câmara úmida após cerca de 40 horas da moldagem.

Respeitando-se as proporções entre os agregados miúdo e graúdo de modo a obter os módulos de finura totais expressos na Tabela 5, eram confeccionados 6 traços de concreto, de relações cimento:agregado, em massa, iguais a 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 e 1:9 (**). Em geral, somente os traços 1:5, 1:6 e 1:7 tiveram corpos de prova para todas as idades, de 2 dias a 50 anos.

O número de corpos de prova por condição de ensaio foi 3. As idades programadas foram 2, 3, 7 e 28 dias; 3, 6 e 12 meses; 2, 3, 5, 10, 25 e 50 anos, em geral.

Os traços e as relações água/cimento encontram-se na Tabela 7, Anexo V.

c) Cura dos corpos de prova

A umidade relativa do ar manteve-se acima de 90 %.

Um levantamento das temperaturas nas câmaras úmidas empregadas, que foram duas, já que ocorreu uma mudança do laboratório no decorrer do período de cura das primeiras amostras, apresenta-se na Tabela 6, Anexo IV. Essas temperaturas foram obtidas a partir dos registros de ensaios de pega, feitos dentro das mesmas câmaras úmidas, e cada valor apresentado é a média de todos os registros encontrados para o mês em questão.

(**) Neste estudo deixamos de empregar os resultados dos traços 1:9 devido a limitações de capacidade do computador inicialmente empregado e também devido às relações água/cimento altas que esses concretos apresentaram, tendo sido julgado que sua omissão não alteraria significativamente as conclusões.

Tabela 6 - Temperaturas médias mensais de câmara úmida. (ANEXO IV)

d) Ensaio à compressão

O procedimento também foi o mesmo ainda descrito pelo atual método NBR-5739 ⁽¹¹⁵⁾. Os resultados são discriminados na Tabela 7, Anexo V.

Tabela 7 - Traços, relações água/cimento e resistências obtidas para os concretos ensaiados à compressão. (ANEXO V)

5.2. Ajustes dos modelos

Empregando-se o programa de computador "BMDP - Statistical Software" ⁽¹¹⁶⁾ efetuaram-se regressões múltiplas entre as variáveis: resistência à compressão (f_c), relação água/cimento (x) e tempo (t).

Os modelos teóricos dados pelas equações 77 e 78 foram objeto deste ajuste. Empregaram-se as formas linearizadas dessas equações, respectivamente:

$$\log f_c = \log A - (\log B)x - (\log C)(x/t^n) \quad (\text{equação 81})$$

$$\log f_c = \log A - (\log B)x - (\log D)(x/t^n) - (\log E)(1/t^n) \quad (\text{equação 82})$$

onde:

f_c = resistência à compressão;

x = relação água/cimento, em massa;

t = tempo;
 n = expoente de ajuste, de modo que $t^n = T$;
 T = transformada do tempo nas equações 77 e 78.

As variáveis de entrada no programa de computador foram: $\log f_c$ como variável dependente; x , x/t^n , $1/t^n$ como variáveis independentes. Efetuaram-se quatro regressões por amostra de cimento e por equação acima; cada uma dessas quatro regressões destinou-se à pesquisa da influência do expoente n no grau de ajuste das equações, arbitrando-se os valores: $n=1$, $n=1/2$, $n=1/3$ e $n=1/4$. O total de regressões realizadas foi dessa forma 600.

Observou-se pouca variação nos coeficientes de correlação múltipla e desvios padrão de previsão entre os 4 valores de n para cada cimento, para ambas as equações. Resolveu-se adotar o valor $n=1/2$, em vista do trabalho de Helene ⁽⁵⁴⁾, e também de verificações gráficas do alinhamento dos pontos experimentais $\log f_c$ versus t^n , mantidas constantes as relações água/cimento.

A Tabela 8, Anexo VI, apresenta, para ambos os modelos (equações 81 e 82) os coeficientes inferidos para as constantes $\log A$, $\log B$, $\log C$ e $\log D$, conforme o caso, com o valor de n igual a $1/2$.

Considerando que, por definição:

$$\log C = \log B / g_{ho}'$$

$$\log D = \log B / g_{h'_{edix}}$$

$$\log E = \log B / g_{ho}''$$

(conforme definido ao estabelecer as equações 77 e 78), pode-se calcular os valores de g_{ho}' , $g_{h'_{edix}}$ e g_{ho}'' a partir dos parâmetros da Tabela 8, Anexo VI, para cada um dos cimentos objeto do estudo, ou seja:

$$g_{ho}' = \log B / \log C \quad (\text{equação 83})$$

$$g_{h'_{adm}} = \log B / \log D \quad (\text{equação 84})$$

$$g_{ho}'' = \log B / \log E \quad (\text{equação 85})$$

Lembrando que:

g_{ho}' = derivada do grau de hidratação em relação à transformada do tempo $T = t^n$ no instante inicial; é um valor constante se válida a equação 81 (ou 77);

$g_{h'_{adm}}$ = assíntota do valor de g_{ho}' para relação água/cimento tendendo a infinito (ver Figura 18);

g_{ho}'' = derivada de g_{ho}' em relação à relação água/cimento quando esta é igual a zero (ver Figura 18).

Assim, a Tabela 8, Anexo VI, também apresenta os valores de g_{ho}' , $g_{h'_{adm}}$ e g_{ho}'' calculados a partir das equações 83 a 85.

Tabela 8 - Coeficientes das equações 73, 74, 81 e 82 calculados por regressão linear múltipla. (ANEXO VI)

5.3. Análise crítica dos modelos

O modelo representado pelas equações 81 ou 73, no qual se despreza a influência da relação água/cimento na velocidade de hidratação (primeiro modelo), apresenta resultados já satisfatórios, podendo

ser empregado principalmente para famílias de concretos com relações água/cimento relativamente altas, para uma dada reatividade do cimento. O valor de x a partir do qual se poderia adotar o primeiro modelo poderia ser verificado experimentalmente para cada cimento, analisando o gráfico do grau de hidratação em função da relação água/cimento para tempo constante, traçado a partir dos parâmetros obtidos e da equação 71.

Na Tabela 8, Anexo VI, as diferenças entre os coeficientes de correlação *linear* quando se passa respectivamente das equações 81 ou 73 (primeiro modelo) para as equações 82 ou 74 (segundo modelo), apresentam-se em geral pequenas. Deve-se lembrar que tais coeficientes de correlação referem-se às equações *linearizadas*; as linearizações equivalem a se efetuarem deformações, por vezes formidáveis, nos domínios das variáveis, de modo que a comparação tem que ser feita com cautela. Além disso, na situação de convergência que se pode visualizar nas Figuras 17 e 18, depreende-se que um bom ajuste pode ser obtido em ambas as configurações, pois os pontos experimentais reais sempre estarão afastados significativamente das relações água/cimento nulas.

Pode-se então aceitar ambos os modelos como válidos; o segundo, representado pelas equações 82 ou 74 mostrou-se porém mais apurado; no caso de se empregarem relações água/cimento muito reduzidas, especialmente as associadas a cimentos com certas características de reatividade, é preferível usar o segundo modelo. A diferença marcante entre os dois modelos é o ponto de cruzamento das curvas nos gráficos das Figuras 17 e 18; quanto mais próxima de zero a relação $-\log E/\log D$, mais os modelos se aproximam; essa relação é igual a $-g_h'_{\text{máx}}/g_{h_0}$, o que quer dizer a "velocidade" inicial

máxima de hidratação dividida pela derivada da "velocidade" de hidratação em relação à relação água/cimento. Quando o cimento apresentar um gráfico análogo ao da Figura 16 com um baixo valor de g_{ho}' e/ou um alto valor de g_{ho}'' , o primeiro modelo apresentará um bom ajuste. Parece que esse ajuste será, em geral, um pouco pior do que para o segundo modelo; as exceções foram cimentos nos quais as idades pesquisadas foram até valores relativamente baixos, com apenas dois traços programados, cimentos 17 e 19, além do cimento 23, único dentro dos padrões típicos a contrariar o exposto.

Interessa notar que nenhum dos modelos, se adotado, deixa de ser coerente com a equação de Abrams, que se mostrou um caso particular de ambos.

Em que pesem também as adoções de simplificações nas hipóteses, tais como tempo de dormência desprezível, pode-se ainda afirmar que as constantes dos modelos apresentam possibilidade de interpretação física com razoável coerência, notadamente g_{ho}' , g_{ho}'' e g_{ho} .

Os modelos levam em conta somente efeitos da hidratação, não tendo sido contempladas as distorções que se observaram no andamento das curvas resistência *versus* tempo para relações água/cimento constantes. Nessas curvas, geralmente a idades da ordem de 1 a 10 anos, ocorreram quedas de resistência com tendência à volta ao andamento anterior por volta de 25 anos. Essa perturbação pode ter sido ocasionada não por alguma falha no ensaio, o que não deixa todavia de ser um possível fator colaborador, mas por algum efeito deletério causado pela expansão do gel de C-S-H ou outros compostos expansivos em hidratação: o produto formado poderia, em certa idade, não ter mais espaço disponível ou sua mobilidade dentro do próprio gel não ser mais suficiente para ocorrer uma acomodação; ocorreria um micro-fissuramento que enfraqueceria a massa; em consequência seriam abertos novos espaços (das fissuras) que voltariam a ser preenchidos por produto de hidratação (inclusive a velocidade de hidratação poderia aumentar devido ao melhor acesso

da água aos grãos ainda anidros); a resistência mecânica sofreria novo acréscimo devido a essa *recuperação autógena*, que também pode ser observada provocando a micro-fissuração de corpos de prova sem desagregá-los e em seguida deixando-os em cura úmida.

As quedas de resistência, no transcorrer do tempo, eventualmente comprometeriam a estabilidade estrutural somente se fosse modificado o padrão de uso da estrutura de concreto, contando com um acréscimo de resistência muito grande; em casos normais, não haveria problema, já que as resistências às idades onde ocorreu perturbação, mesmo menores que às idades anteriores, conservaram-se acima dos níveis de 28 dias. Essa afirmação é corroborada pelo uso desses cimentos durante as décadas passadas, sem problemas do tipo.

Também não se considerou muito significativa a melhoria do nível de previsão do primeiro modelo para o segundo modelo; provavelmente a equação empregada para cálculo de g_{ho}' em função de x (equação 69) deva também empregar um expoente de ajuste z , ficando:

$$1/g_{ho}' = 1/g_{ho}'_{max} + (1/g_{ho}'').(1/x^z)$$

Esse expoente alteraria a curvatura de um gráfico como o da Figura 16, podendo melhorar o nível de previsão.

Tanto uma pesquisa sobre eventuais efeitos expansivos como o ajuste de novos modelos, levando em conta a equação acima e também as equações 61 e 62 devem ser propostos como continuidade deste trabalho, que se mostra apenas no início.

5.4. Simulação de extrapolações

Supondo constante a relação água/cimento (x) ambos os modelos propostos podem ser linearizados, com relação ao tempo.

O primeiro modelo (equação 77),

$$f_c = A / (B^x \cdot C^{x/T})$$

pode ser transformado em:

$$\log f_c = \log A - (\log B) x - (\log C) x \cdot 1/T$$

sendo: $\log A - (\log B) x = \text{constante} = K_1$

e, $(\log C) x = \text{constante} = K_2$

temos: $\log f_c = K_1 - K_2 \cdot 1/T$ (equação 86)

No segundo modelo (equação 78),

$$f_c = A / (B^x \cdot D^{x/T} \cdot E^{1/T})$$

$$\log f_c = \log A - (\log B)x - (\log D)x \cdot (1/T) - (\log E)(1/T)$$

$$\log f_c = \log A - (\log B)x - [(\log D)x + \log E] (1/T)$$

sendo: $\log A - (\log B)x = \text{constante} = K_1$

e, $[(\log D)x + \log E] = \text{constante} = K_2'$

temos: $\log f_c = K_1 - K_2' (1/T)$ (equação 87)

Lembrando que $T = t^n$.

A linearização da função relacionando a resistência à compressão com o tempo propicia a extrapolação de resistências a partir do conhecimento dos resultados a duas idades, o que foi sugerido anteriormente (2.95, 92).

Para tanto, é necessário o conhecimento do expoente n para o caso em questão (4).

O gráfico da Figura 19 mostra o que foi dito.

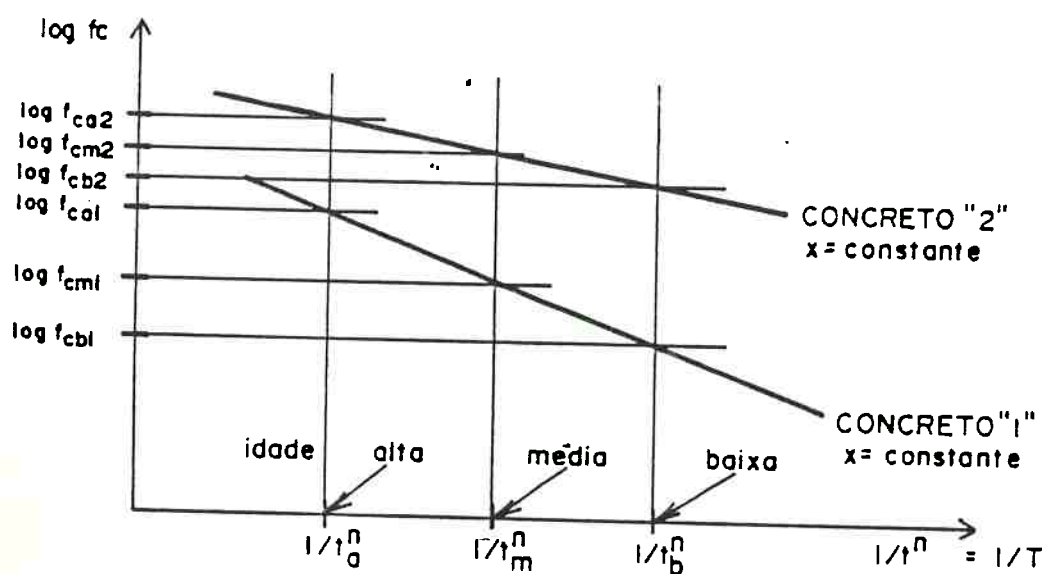


Figura 19 - Linearização de f_c em função do tempo.

(4) n , conforme visto, foi adotado com o valor $1/2$.

Da Figura 19, podemos deduzir, genericamente:

$$\frac{(\log f_{ca} - \log f_{cb})}{(\log f_{ca} - \log f_{cb})} = \left[\frac{(1/t_a^n) - (1/t_m^n)}{(1/t_a^n) - (1/t_b^n)} \right]$$

(equação 88)

onde:

f_{ca} = resistência à compressão, à idade "alta";

f_{cm} = resistência à compressão, à idade "média";

f_{cb} = resistência à compressão, à idade "baixa";

t_a = idade "alta";

t_m = idade "média";

t_b = idade "baixa";

n = constante dependente dos materiais e condições do estudo.

Como os termos à esquerda e à direita na equação 88 podem ser repetidos muitas vezes, convém simplificá-los, usando o que se chamará de operador AMEBA, associado às idades alta, média e baixa (**), aplicável ao $\log f_c$ ou a $1/t^n$:

$$\text{AMEBA}_{a,m,b}(\log f_c) = (\log f_{ca} - \log f_{cb}) / (\log f_{ca} - \log f_{cb})$$

(equação 89)

$$\text{AMEBA}_{a,m,b}(1/t^n) = \left[\frac{(1/t_a^n) - (1/t_m^n)}{(1/t_a^n) - (1/t_b^n)} \right]$$

(equação 90)

Da equação 88, tiramos que:

$$\log f_{ca} = [1 - \text{AMEBA}_{a,m,b}(1/t^n)] \log f_{cb} + [\text{AMEBA}_{a,m,b}(1/t^n)] \log f_{ca} \quad (\text{equação 91})$$

(**) procurou-se uma palavra mneumônica: "AMEBA" vem de "A" (alta), "ME" (média) e "BA" (baixa) idades.

Adotando para n o valor $1/2$, efetuaram-se simulações de previsão de resistência sumarizadas na Tabela 9, com os dados experimentais da Tabela 7, Anexo V.

Tabela 9 - Condições para simulações de previsão de resistência usando dados da Tabela 7, Anexo V.

Dados básicos de previsão:		Resistências	
Resistências às idades		a prever à	Simulação
baixa	média	idade	n.
		alta	
2 dias	3 dias	28 dias	1
3 dias	7 dias	28 dias	2
3 dias	7 dias	90 dias	3
7 dias	28 dias	90 dias	4
7 dias	28 dias	1 ano	5
7 dias	180 dias	1 ano	6
90 dias	180 dias	1 ano	7
1 ano	5 anos	10 anos	8
1 ano	10 anos	25 anos	9
5 anos	10 anos	25 anos	10
6 meses	5 anos	50 anos	11
6 meses	10 anos	50 anos	12
6 meses	25 anos	50 anos	13

Os gráficos comparando as resistências previstas com as obtidas apresentam-se nas figuras 20 a 32.

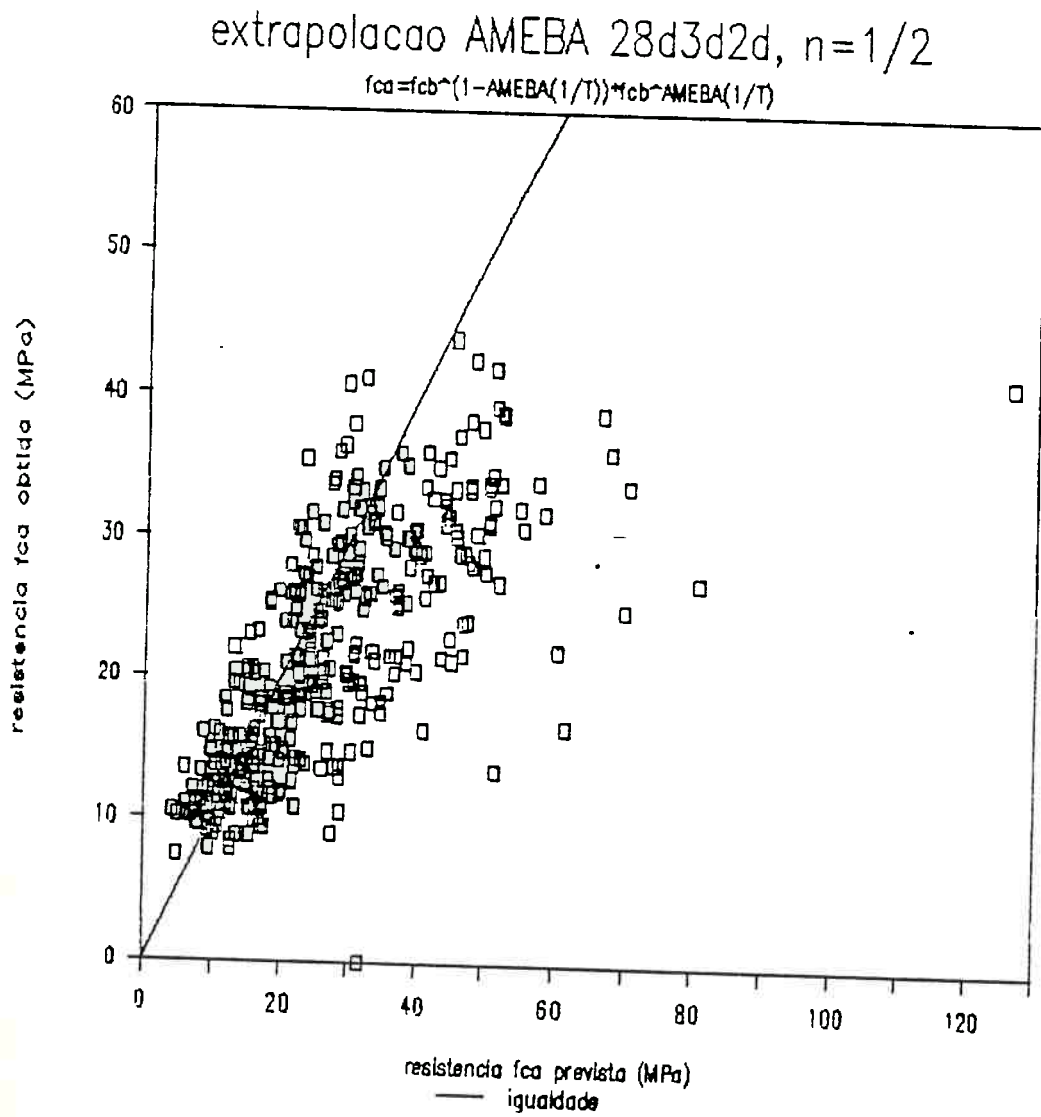


Figura 20 - Previsão de resistências a 28 dias a partir dos resultados a 2 e 3 dias de idade. ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

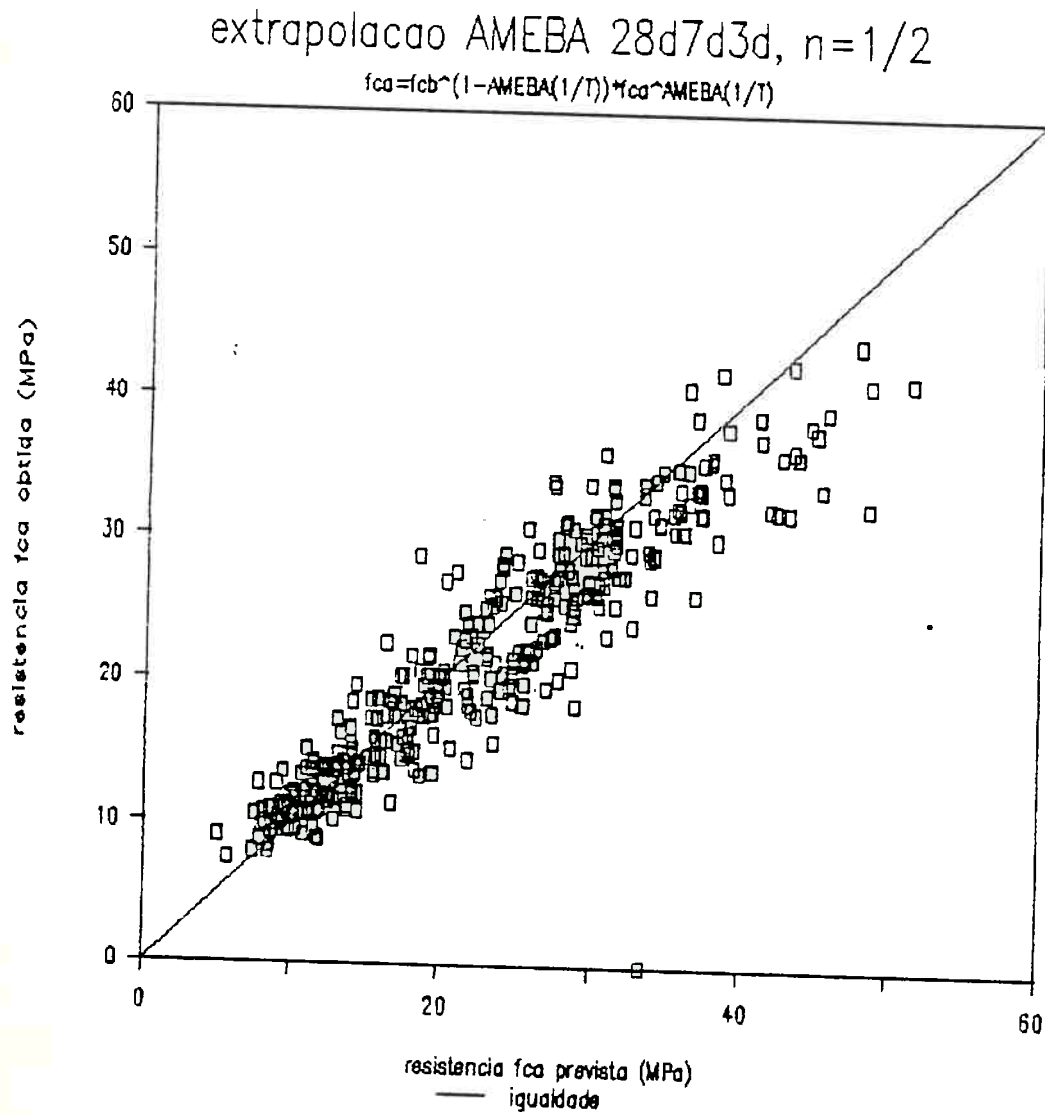


Figura 21 - Previsão de resistências a 28 dias a partir dos resultados a 7 e 3 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

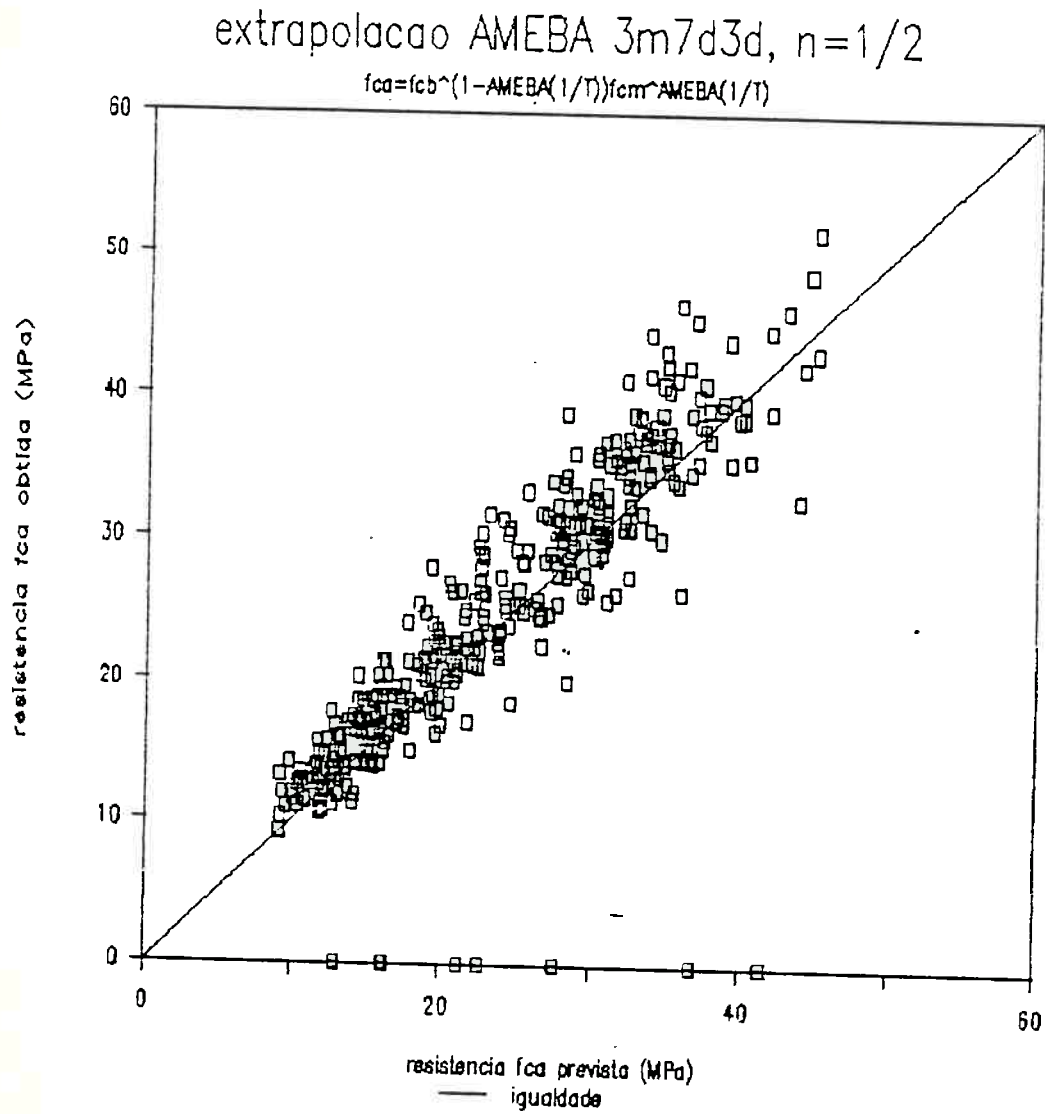


Figura 22 - Previsão de resistências a 90 dias a partir dos resultados a 3 e 7 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

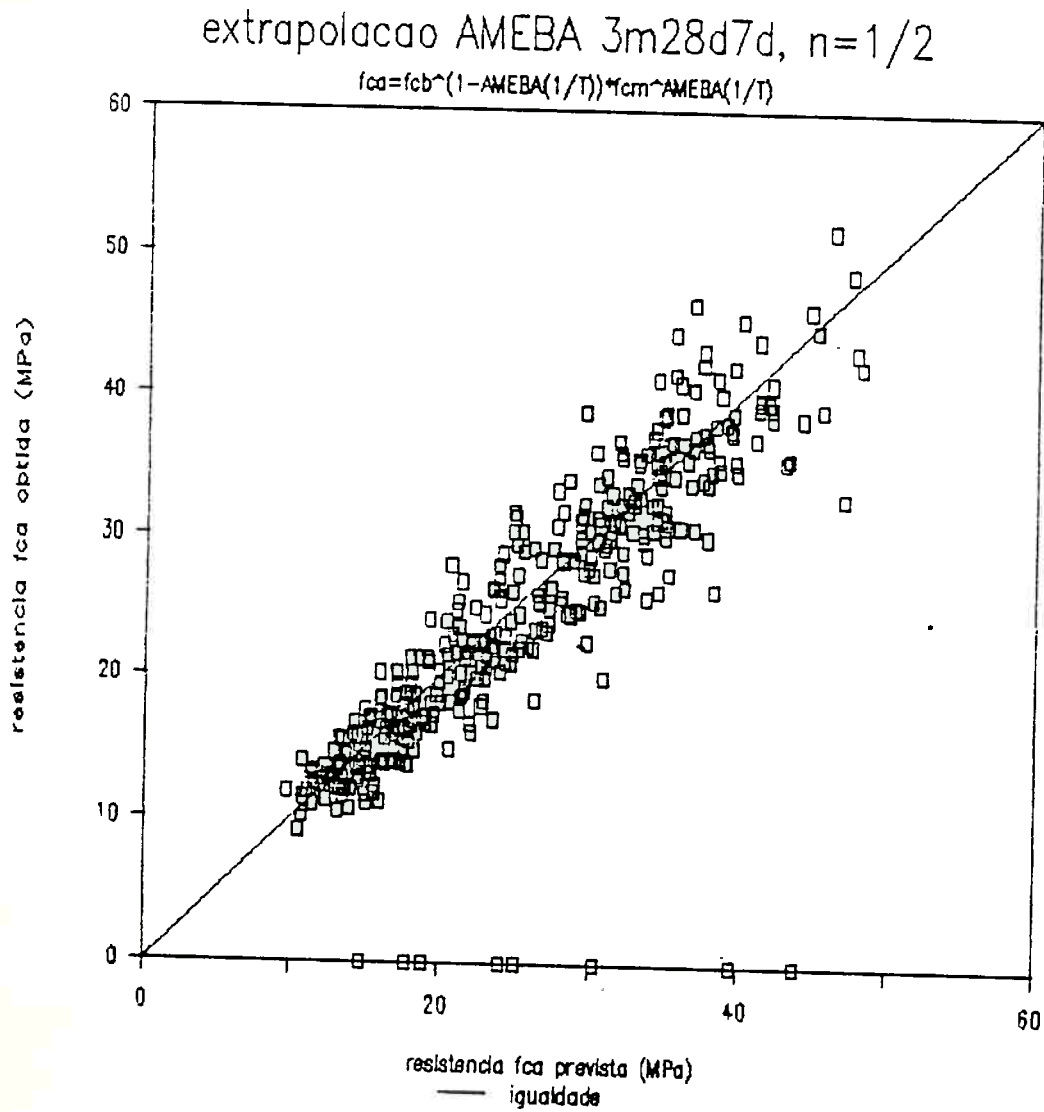


Figura 23 - Previsão de resistências a 90 dias a partir dos resultados a 7 e 28 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

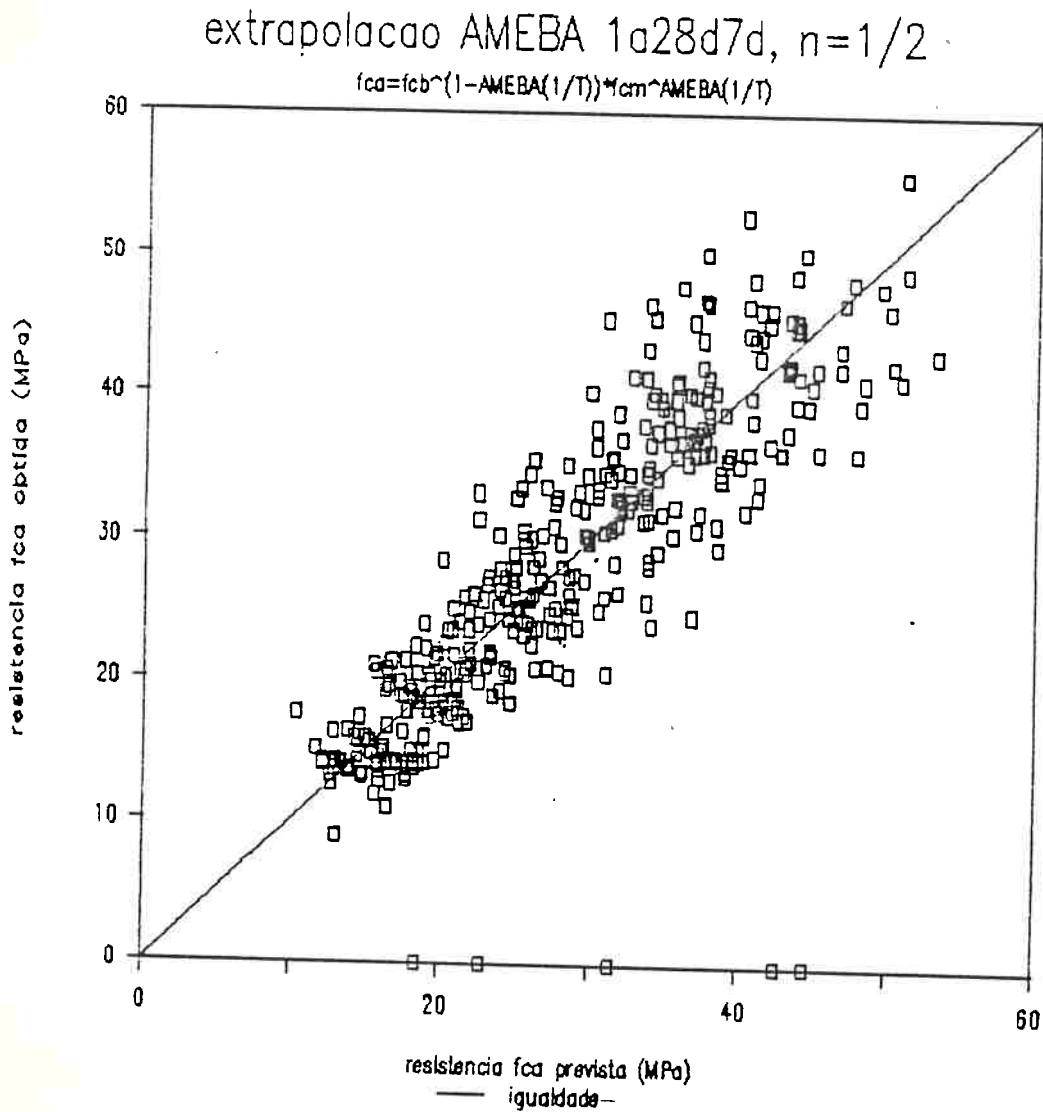


Figura 24 - Previsão de resistências a 1 ano a partir dos resultados a 7 e 28 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

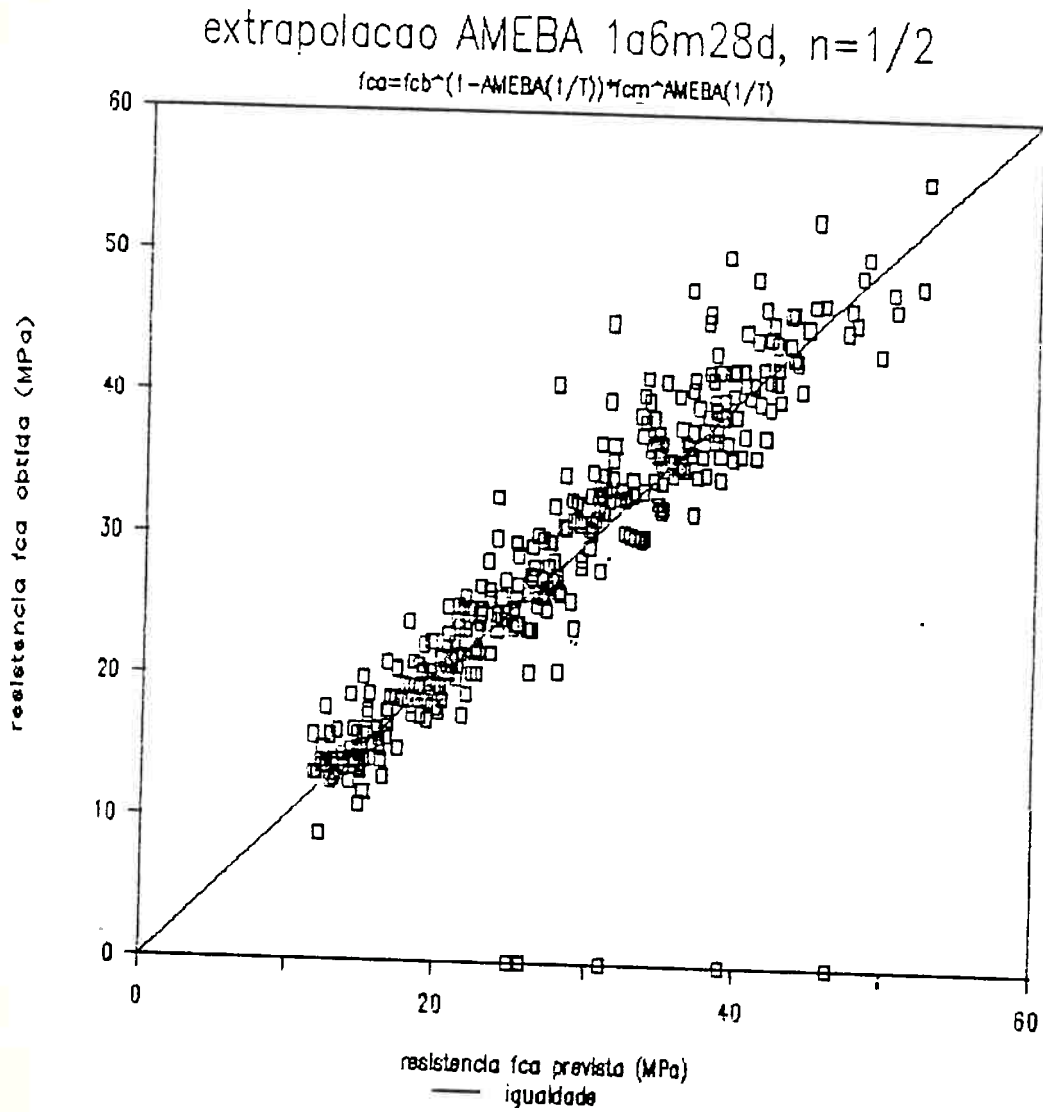


Figura 25 - Previsão de resistências a 1 ano a partir dos resultados a 7 e 180 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

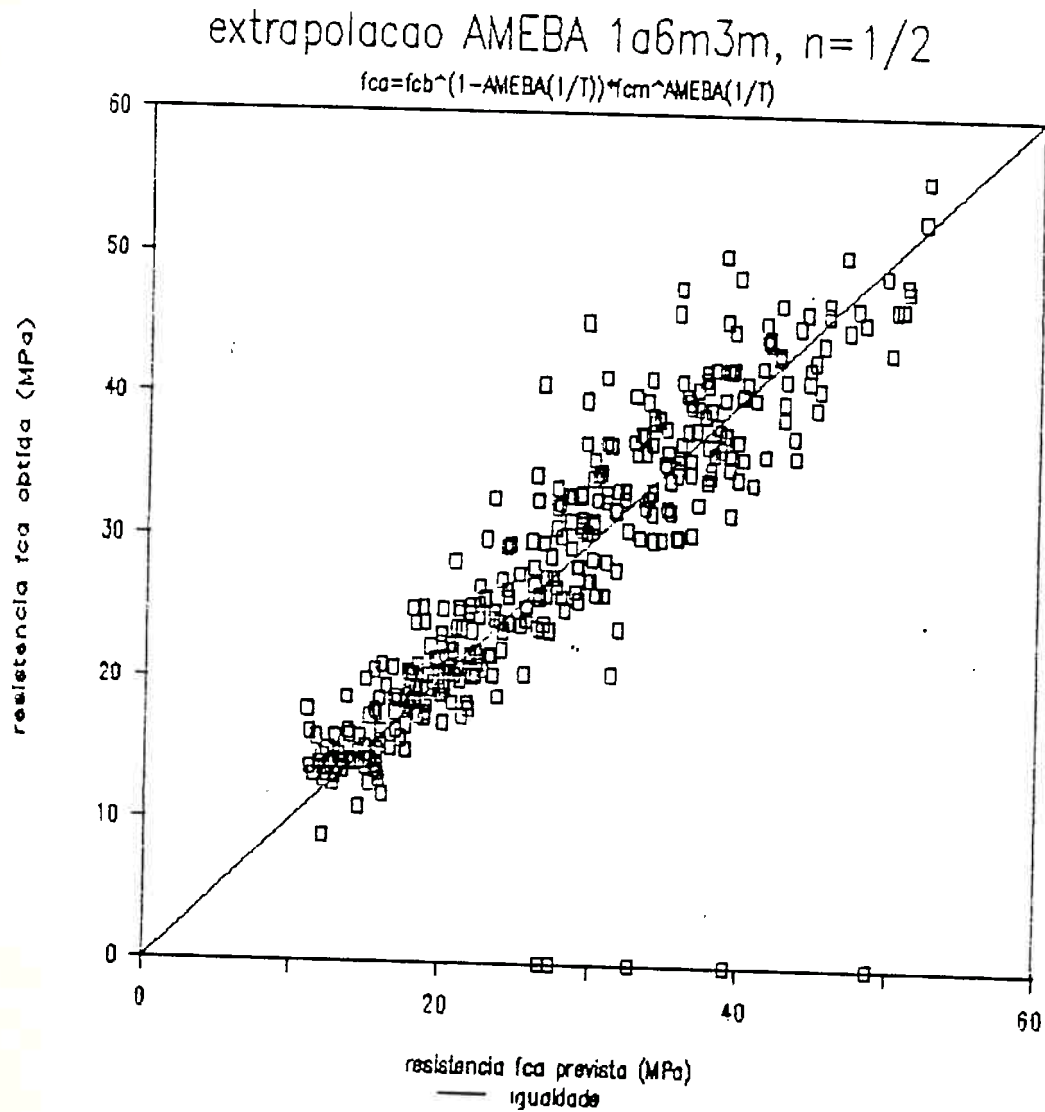


Figura 26 - Previsão de resistências a 1 ano a partir dos resultados de 90 e 180 dias de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

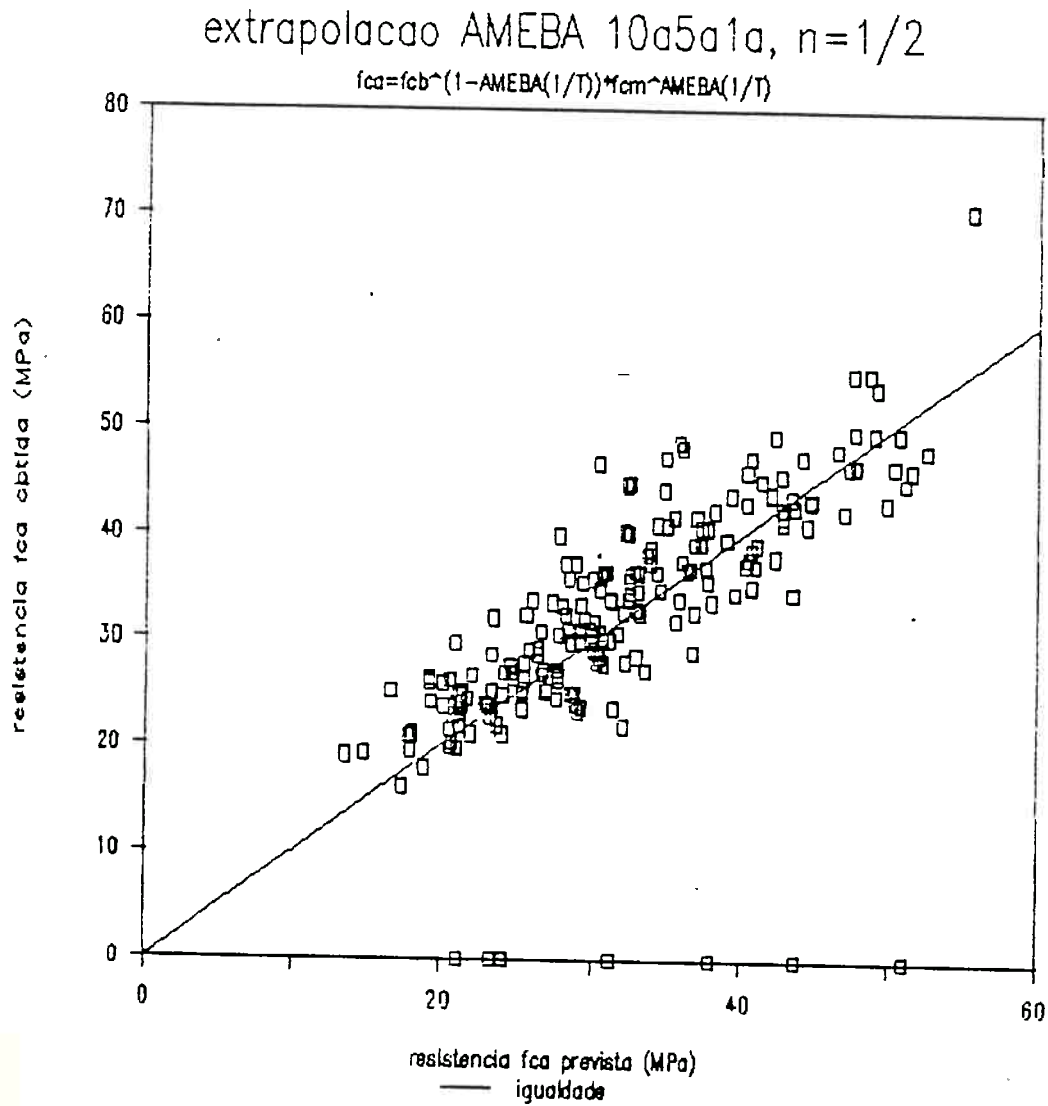


Figura 27 - Previsão de resistências a 10 anos a partir dos resultados de 1 e 5 anos de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

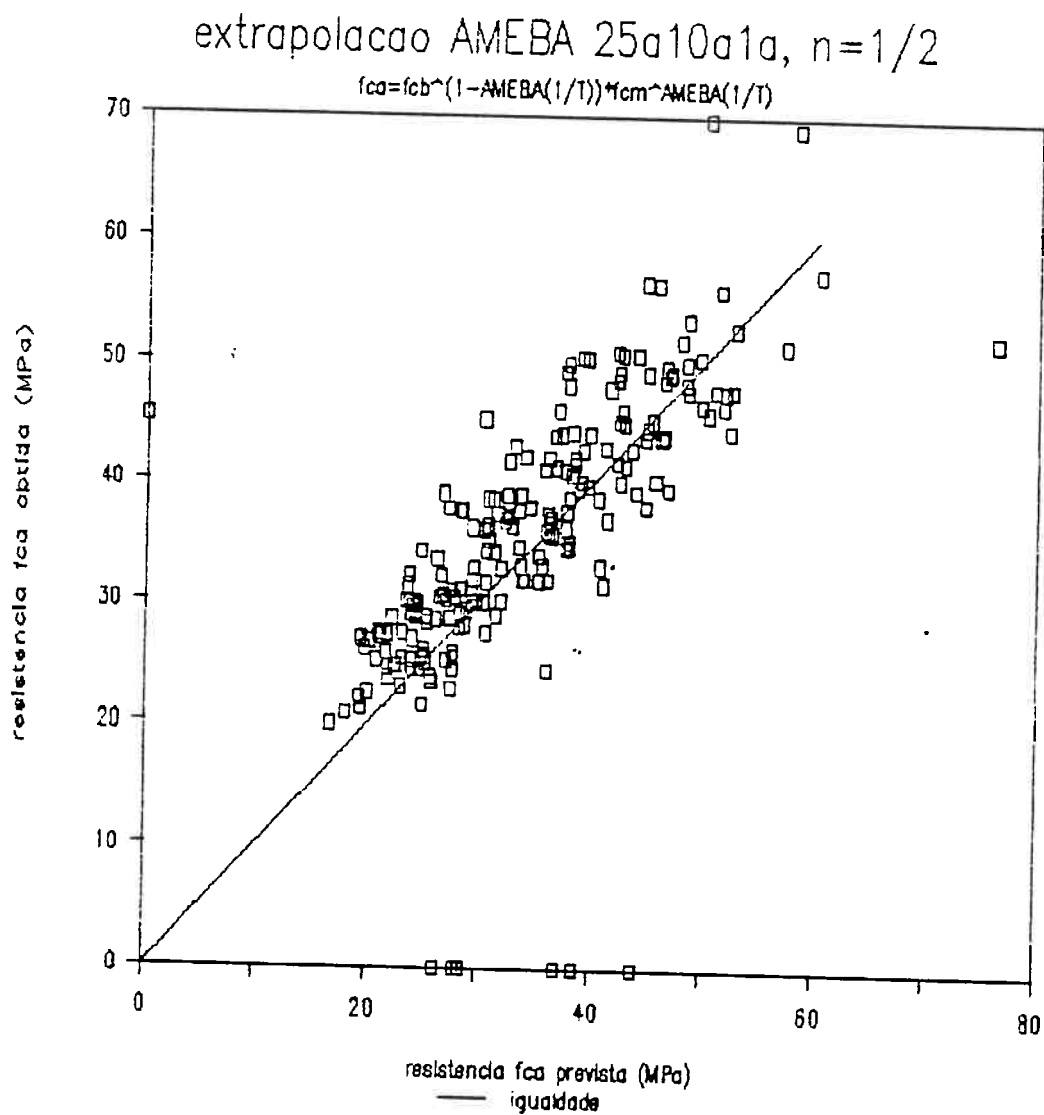


Figura 28 - Previsão de resistências a 25 anos a partir dos resultados de 1 e 10 anos de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

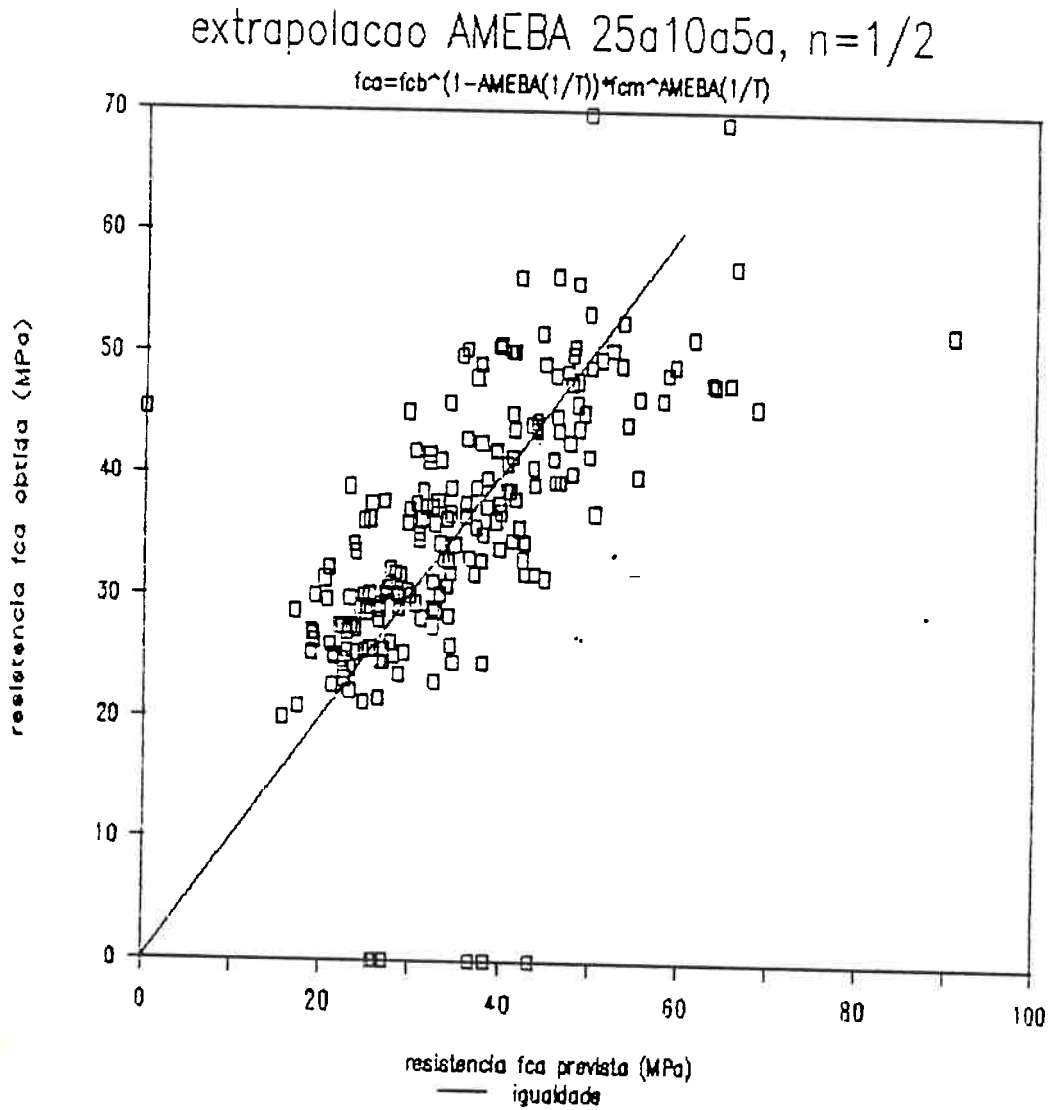


Figura 29 - Previsão de resistências a 25 anos a partir dos resultados de 5 e 10 anos de idade ($n = 1/2$), todas as marcas e relações água/cimento.

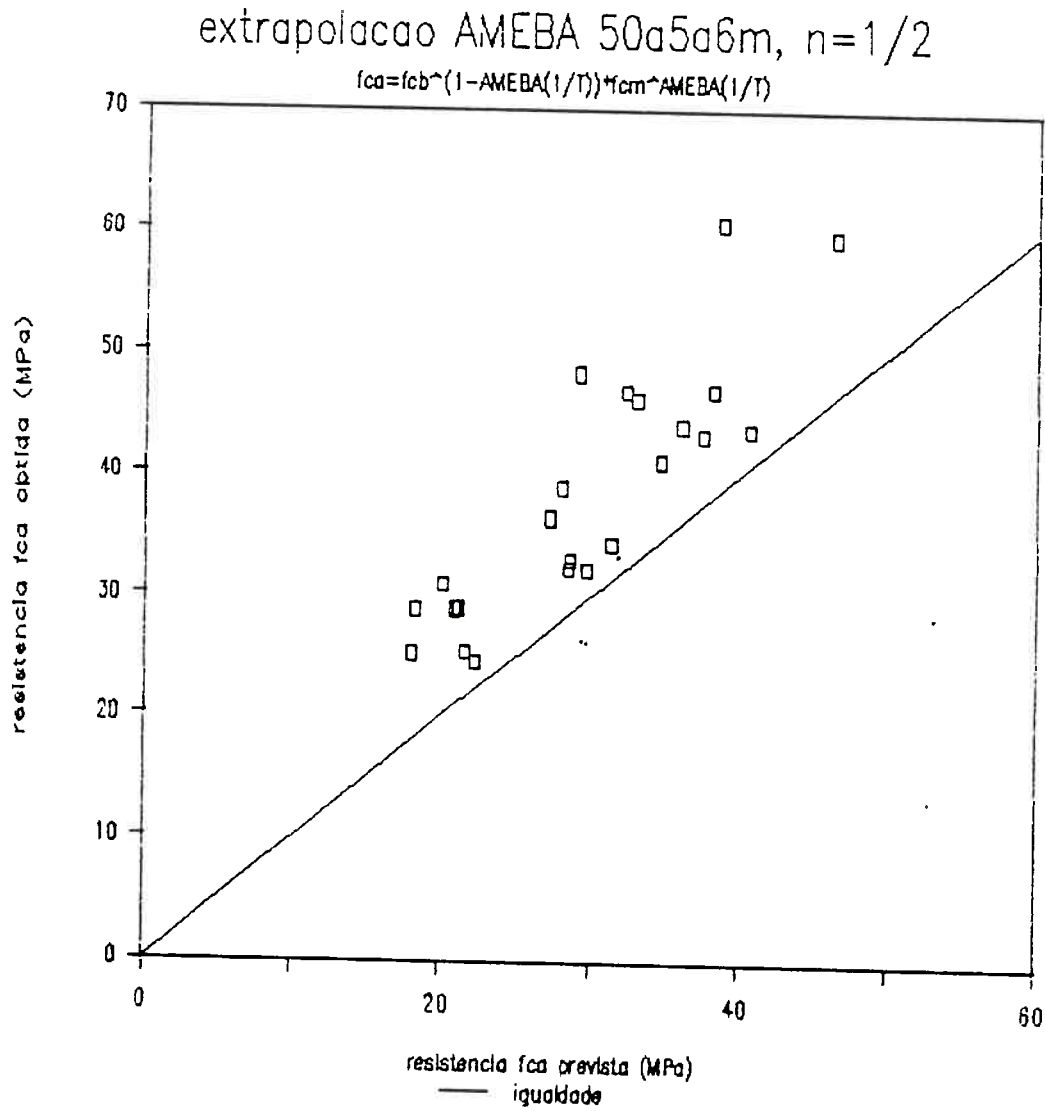


Figura 30 - Previsão de resistências a 50 anos a partir dos resultados de 6 meses e 5 anos de idade ($n = 1/2$), todas as relações água/cimento e marcas 1, 3 e 5..

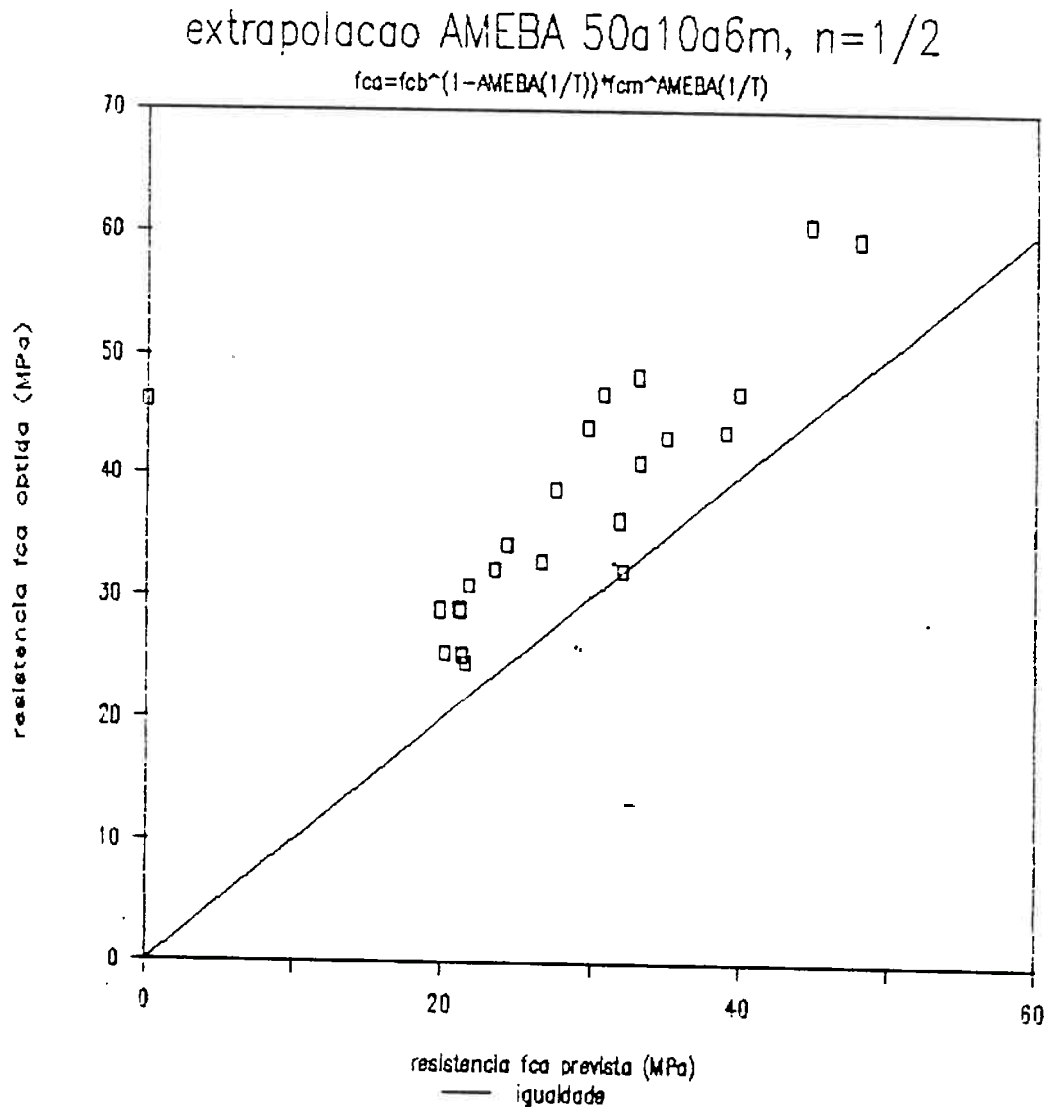


Figura 31 - Previsão de resistências a 50 anos a partir dos resultados de 6 meses e 10 anos de idade ($n = 1/2$), todas as relações água/cimento e marcas 1, 3 e 5.

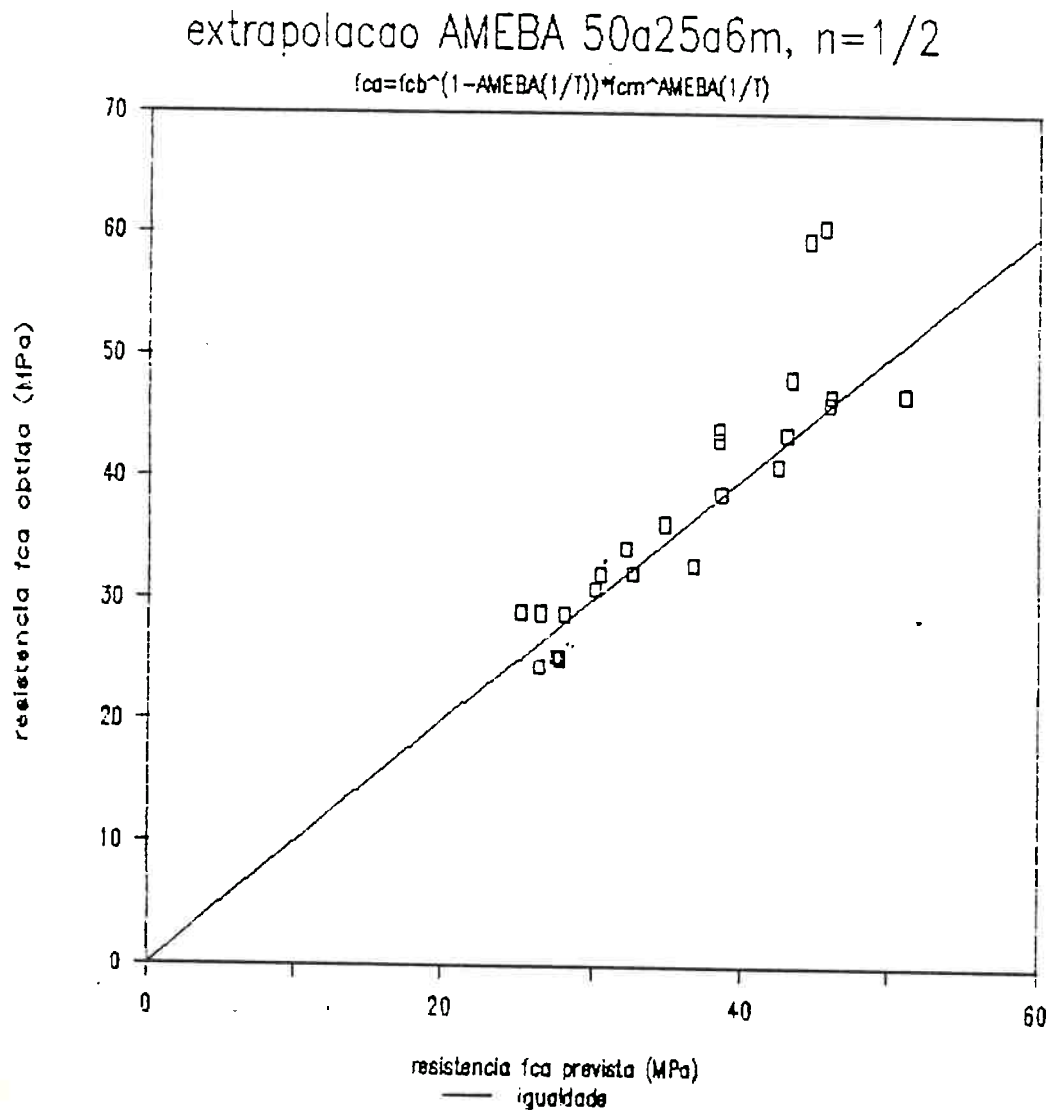


Figura 32 - Previsão de resistências a 50 anos a partir dos resultados de 6 meses e 25 anos de idade ($n = 1/2$), todas as relações água/cimento e marcas 1, 3 e 5..

Observa-se, nas figuras acima, que as extrapolações a partir de idades baixa e média apresentam resultados menos dispersos e mais próximos dos reais, em geral, quando: (a) a idade média é a mais próxima possível da idade alta e a idade baixa mais afastada; (b) quando não ocorrem perturbações no desenvolvimento da resistência com tempo, como as quedas e recuperações observadas a idades entre 1 e 10 anos: exemplos são as Figuras 30 e 31; (c) quando as idades baixas são superiores a 2 ou 3 dias, pois estas idades devem ser afetadas pela falta da consideração do período de dormência: veja-se na Figura 20 a dispersão, assimétrica em torno da reta de igualdade, mostrando tendência de aumento dos valores previstos, o que ocorre também, em bem menor escala, todavia, na Figura 21.

O nível da previsão poderia ser melhorado se fosse feita uma extrapolação a partir de 3 pontos, isto é, uma estimativa caso a caso do valor de n . Essa estimativa poderia ser feita encontrando (por tentativas ou graficamente, por exemplo) um valor de n que satisfaça a relação:

$$\text{AMEBA}_{1,2,3}(\log f_c) = \text{AMEBA}_{1,2,3}(1/t^n)$$

onde f_{c1} , f_{c2} e f_{c3} e t_1 , t_2 e t_3 seriam resistências, e tempos, respectivamente, a três idades genéricas baixa, média e alta.

Encontrado um valor ajustado de n , a partir, por exemplo das resistências f_{c1} e f_{c3} , estimar-se-ia outra resistência ainda mais alta f_{c4} :

$$\log f_{c4} = [1 - \text{AMEBA}_{1,3,4}(1/t^n)]f_{c1} + [\text{AMEBA}_{1,3,4}(1/t^n)]f_{c3}$$

Este tipo de estimativa deve ser pesquisado numa continuação deste trabalho.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto com o tempo pode ser modelado com base na relação água/cimento e no desenvolvimento do grau de hidratação com o tempo, para cada particular conjunto de materiais e condições ambientais em questão.

Nas verificações experimentais, constatou-se que ao longo do tempo ocorreram perturbações no desenvolvimento crescente das resistências à compressão, que podem ser atribuídas inclusive a um fenômeno de expansão e micro fissuração. Essas perturbações geralmente apresentaram tendência de retorno ao regime inicial ou próximo deste, possivelmente devido a um fenômeno de recuperação autógena. Essas ocorrências sem dúvida atrapalharam o ajuste dos modelos propostos.

Os modelos propostos foram dois: um primeiro, considerando que a hidratação se dá igualmente para todas as relações água/cimento, e um segundo, no qual se admitiu um crescimento inicial da velocidade de hidratação com a relação água/cimento, vindo a atingir um patamar assintótico de estabilização. O segundo modelo apresentou-se mais apurado que o primeiro, mas o primeiro pode ser empregado sem grande prejuízo à qualidade do ajuste. Esses modelos são dados respectivamente pelas equações:

$$f_c = A / (B^* \cdot C^{x/T}) \quad (\text{equação 77})$$

$$e, \quad f_c = A / (B^* \cdot D^{x/T} \cdot E^{1/T}) \quad (\text{equação 78})$$

onde os parâmetros C, D e E relacionam-se com parâmetros da evolução do grau de hidratação com o tempo e eventualmente com a relação água/cimento.

Sendo ambos os modelos linearizáveis, propôs-se um método para extrapolação de resistências a partir do conhecimento das mesmas a duas idades anteriores à em questão (equação 91); a simulação de situações diversas de previsão mostrou resultados satisfatórios, não se adequando, porém, aos períodos de perturbação no crescimento de resistência que foram observados, tendo também limitações de uso com idades muito baixas como dados iniciais de extrapolação. Como o método não requer, a princípio, uma correlação preliminar com os materiais da obra, apresentando bom nível de acerto independentemente de traço ou marca de cimento empregados, poderá se prestar ao emprego em obras correntes.

O desenvolvimento deste trabalho ainda não passa do início, pois além de existirem outras expressões básicas para se pesquisar, além das propostas, há também a possibilidade de um estudo das influências das características dos cimentos nos parâmetros dos modelos e do uso de métodos mais aprimorados de extrapolação das resistências, e ainda uma pesquisa aprofundada sobre as causas de perturbações no seu crescimento. Isso tudo empregando os resultados experimentais ou os corpos de prova do programa do qual este trabalho se ocupou, que se completarão em 2015.

Estendendo tantas indagações para os cimentos que são produzidos atualmente, nota-se que é urgente a retomada de programas congêneres - agora auxiliados por maiores recursos tecnológicos - para que gerações futuras possam colher informações de proveito.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WHITNEY, M.O. *Fifty year compression test of concrete* - Journal of the American Concrete Institute, n. 6, Proceedings V, 58, December 1961, pp. 695-712.
- (2) TANGO, C.E.S. *Contribuição ao estudo da previsão da resistência à compressão de cimentos e concretos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo, 1983.
- (3) FERET, R. *Sur la Compacité des Mortiers Hydrauliques* - Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents, 7. série, TOME IV, n. 21, 2. semestre, 1891, pp. 5-164.
- (4) FERET, R. *Essais de divers sables pour mortiers*. Annales des Ponts et chaussées, mémoires et Documents, 7. série, TOME XIII, n. 41, 2. semestre, 1896, pp. 174-197.
- (5) ABRAMS, D.A. *Design of Concrete Mixtures*. Bulletin 1. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Dec. 1918.
- (6) POWERS, T.C. & BROWNYARD, T.L. *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste*. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 18, Oct., Nov., Dec., 1946; Jan., Feb., Mar., Apr., 1947.
- (7) POWERS, T.C. *The Nonvaporable Water Content of Hardened Portland - Cement Paste - It's Significance for Concrete Research and It's Method of Determination*. ASTM Bulletin n. 158, May, 1949, pp. 68-76.
- (8) POWERS, T.C. *The Physical Structure of Portland Cement Paste*. In: *The Chemistry of Cements*, Ed. H.F.W. TAYLOR, Academic Press, London, 1964. pp. 391-416.
- (9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland Comum - Especificação*. NBR-5732, ABNT, Rio de Janeiro, 1988.
- (10) OUDA, W.H. *Cement data-book*. 2. Ed. Bauverlag GmbH - Wiesbaden and Berlin; Macdonald & Evans - London, 1977.
- (11) COUTINHO, A.S. *Fabrica e Propriedades do Betão*. Curso 120, 2 v., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Setembro de 1973.
- (12) CZERNIN, W. *La química del Cemento*. (Zement-chemie). 1. Ed., Ediciones Palestra, Barcelona, 1963.

- (13) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Cimento Portland de Alto Forno - Especificação*. NBR-5735, ABNT, Rio de Janeiro, 1987.
- (14) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Cimento Portland Pozolânico - Especificação*. NBR-5736, ABNT, Rio de Janeiro, 1986.
- (15) MIDGLEY, H.G. *The Formation and Phase Composition of Portland Cement Clinker*. In: *The Chemistry of Cement*, Ed. H.F.W. Taylor, Vol. I, Academic Press, London and New York, 1964. pp. 89-130.
- (16) GLASSER, F.P. *Kinetics of Cement - Making Reactions - Principal Report, Sub-Theme 1.1, Kinetics of Clinker Formation*, 8. Congresso Internacional de Química do Cimento, Rio de Janeiro, 1986.
- (17) BOGUE, R.H. *Calculation of Compounds in Portland Cement*. Industrial and Engineering Chemistry (Analytical Edition), Vol. 1, Oct. 1919, Rock Products, Vol. 32, Nov., 1929.
- (18) BERGER, R.L.; FROHNSDORF, G.F.C.; HARRIS, P.H. & JOHNSON, P.P. *Application of X-ray diffraction to routine mineralogical analysis of portland cement*. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. SR-90, Highway Research Board, Washington, 1966.
- (19) KIHARA, Y. *Curso de Microscopia de Clinquer de Cimento Portland*. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1979.
- (20) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da área específica - método de ensaio*. NBR-7224, ABNT, Rio de Janeiro, 1984.
- (21) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Ensaio de cimento portland - método de ensaio*. NBR-7215, ABNT, Rio de Janeiro, 1982.
- (22) WAGNER, L.A. *A rapid method for the determination of the specific surface of Portland Cement*. Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Vol. 33, 1933, p. 553.
- (23) COLLEPARDI, M. *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*. Ulrico Hoepli. Milano, 1980.
- (24) BERNARD, J.P. *Le durcissement des pâtes de ciment portland*. Publication CERILH n. 261, Ciments Betons Plâtres Chaux, n. 6/78, 715. pp. 359-366.
- (25) LOCHER, F.W. & RICHARTZ, W. *Study on the hydration mechanics of cement*. A principal paper, International Congress on the Chemistry of Cement, 6th, V. 1. Moscow, 1974.

- (26) RICHARTZ, W. *Electron Microscopic Investigations about the Relations between Structure and Strength of Hardened Cement*. Supplementary Paper III-125, Vol. III, Proceedings of the Fifth International Congress on the Chemistry of Cements. Tokyo, 1968. pp. 129-137.
- (27) TAYLOR, H.F.W. *Chemistry of Cement Hydration*. 8. Congresso Internacional de Química do Cimento. Principal Report, sub-item 2.1, Vol. I. Rio de Janeiro. 1986. pp. 82-110.
- (28) TAYLOR, H.F.W. & ROY, D.M. *Structure and Composition of Hydrates*. Principal Report, Sub-theme II-2, Vol. I, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980.
- (29) LACHOWSKY, E.F.; MOHAN, K. & TAYLOR, H.F.W. *Analytical Electron Microscopy of Cement Pastes: II, Pastes of Portland Cements and Clinkers*. Journal of the American Society, Vol. 63, No 7-8, Jul-Aug 1980, pp. 447-452.
- (30) SKALNY, J. & YOUNG, J.F. *Mechanisms of Portland Cement Hydration*. Principal Report, theme II-1, Vol. I, 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, 1980.
- (31) YOUNG, J.F. & TONG, H.S. *Microstructure and Strength Development of Beta-Dicalcium Silicate Pastes with and without admixtures*. Cement and Concrete Research, 7, 627. 1977.
- (32) FELDMAN, R.F. & SEREDA, P.J. "A New Model for Hydrated Portland Cement and its Practical Implications". Engineering Journal, 53, (8-9), 1970. pp. 53-59.
- (33) FELDMAN, R.F. & SEREDA, P.J. *Written Discussion*. In: VERBECK, G.J. & HELMUTH, R.H. *Structures and Physical Properties of Cement Paste*. A Principal Paper, Proceedings of the Fifth International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. III. Tokyo, 1968.
- (34) SOROKA, I & SEREDA, P.J. *The Structure of Cement-Stone and the Use of Compacts as Structural Models*. Supplementary Paper III-34, Vol. III. Fifth International Congress on the Chemistry of Cements. Vol. III. Tokyo, 1968. pp. 67-73.
- (35) NEVILLE, A.M. *Hardened Concrete: Physical and Mechanical Aspects*. ACI, Monograph, n. 6. Published jointly by the American Concrete Institute and the Iowa State University Press, Detroit, 1971.
- (36) TORRES, A.F. *Dosagem dos Concretos*. Boletim n. 1, Laboratório de Ensaio de Materiaes, Escola Polytechnica de São Paulo, Junho de 1927; 2. Edição revista, Fevereiro de 1932; 3. Edição revista, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, boletim n. 1, Setembro de 1936.

- (37) TORRES, A.F. *Introdução ao Estudo da Dosagem Racional do Concreto*. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1955.
- (38) BROWN, W.; POMMERSHEIM, J.M. & FROHNSDORFF, G. *Kinetic Modeling of Hydration Processes*. American Ceramic Society, Cements Research Progress 1983, Ohio, 1984. pp. 245-260.
- (39) JANDER, W. *Reaktionen in Festem Zustande bei Hoheren Temperaturen*. Z-anorg. allgem. Chem. 163, 1-30 (1927). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (40) GINSTLING, A.M. & BROUNSHTEIN, B.I. *Concerning the Diffusion Kinetics of Reactions in Spherical Particles*. J. Appl. Chem. USSR, 23, 1237-1338 (1950). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (41) ERDFEYEV, B.V. *A Generalised Equation of Chemical Kinetics and Its Application Involving Solids*. Doklady. Akad-Nauk. USSR, 52, 511-514 (1946). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (42) DHARA, M. & REID, R. *Modeling Crystal Rates from Solution*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1973. [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (43) AVRAMI, M. *Kinetics of Phase Change. I*. J. Chem Phys, 2, 1103-1112. (1939). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (44) AVRAMI, M. *Kinetics of Phase Change. II*. J. Chem Phys, 8, 212-224. (1940). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (45) MAMPEL, K.L. Z. Phys-Chem, 412Z (43) 235 (1940). [In: Ref. Bibliográfica 38].
- (46) BESJAK, A. *Kinetics Analysis of Cement Hydration Including Various Mechanistic Concepts. I. Theoretical Development*. Cement and Concrete Research, Vol. 13, N. 3, May, 1983.
- (47) KNUDSEN, T. *The Dispersion Model for Hydration of Portland Cement. I. General Concepts*. Cement and Concrete Research. Vol. 14, n. 5, Sept. 1984. pp. 622-630.
- (48) KNUDSEN, T. *The dispersion model for hydration of cements. II. Influence of Fineness*. 8. Congresso Internacional de Química do Cimento, Rio de Janeiro, 1986. Volume III. pp. 369-374.
- (49) BROWN, P.W.; POMMERSHEIM, J. & FROHNSDORFF, G. *A Kinetic Model for the Hydration of Tricalcium Silicate*. Cement and Concrete Research, Vol. 15, n. 1, Jan. 1985. pp. 35-41.
- (50) PARRY-JONES, G.; AL TAYYIB, A.J. & AL-MANA, A.I. *Evaluation of Degree of Hydration in Concrete Using ²⁹Si Magic Angle Spinning NMR in Solids*. Cement and Concrete Research, Vol. 18, N. 2, March, 1988. pp. 229-234.

- (51) PARRY-JONES.; AL-TAYYIB, A.J.; AL-DULAIJAN, S.V. & AL-MANA, A.I. ^{29}Si MAS-NMR Hydration and Compressive Strength Study in Cement Paste. Cement and Concrete Research, Vol. 19, N. 2, March. 1989. pp. 228-234.
- (52) GRANJU, J.L. & GRANDET, J. *Characterization of the Hydration State of Portland Cement Pastes*. Cement and Concrete Research, Vol. 18, N. 6, Nov. 1988. pp. 886-894.
- (53) COPELAND, L.E. & KANTRO, D.L. *Chemistry of Hydration of Portland Cement at Ordinary Temperature*. In: TAYLOR, H.F.W. ed. *The Chemistry of Cements*. Vol. I, Academic Press, London and New York. 1964. pp. 313-370.
- (54) SANTOS, M.V. *Adaptação de Método de Medida da Água Quimicamente Ligada, para Avaliação da Hidratação em Pastas de Cimento Portland*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.
- (55) GRANJU, J.L. & MASO, J.C. *Hardened Portland Cement Pastes, Modelisation of the Micro-Structure and Evolution Laws of Mechanical Properties. I - Basic Results*. Cement and Concrete Research. Vol. 14, N. 2, March. 1984. pp. 249-256.
- (56) GRANJU, J.L. & MASO, J.C. *Hardened Portland Cement Pastes, Modelisation of the Micro-Structure and Evolution Laws of Mechanical Properties. II - Compressive Strength Law*. Cement and Concrete Research. Vol. 14, N. 3, May. 1984. pp. 303-310.
- (57) GRANJU, J.L. & MASO, J.C. *Hardened Portland Cement Pastes, Modelisation of the Micro-Structure and Evolution Laws of Mechanical Properties. III - Elastic Modulus*. Cement and Concrete Research. Vol. 14, N. 4, July. 1984. pp. 539-545.
- (58) RÖSSLER, M. & ODLER, I. *Investigations on the Relationship Between Porosity, Structure and Strength of Hydrated Portland Cement Pastes. I - Effect of Porosity*. Cement and Concrete Research. Vol. 15, N. 2, March. 1985. pp. 320-330.
- (59) VERBECK, G.J. & HELMUTH, R.H. *Structures and Properties of Cement Paste*. Principal Paper. Session III - 1 Vol. III. Proceedings of the Fifth International Congress on the Chemistry of Cement. Tokyo. 1968. pp. 1-44.
- (60) ODLER, I.; YUDENFREUND, M. & SKALNY, J. *Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity. III. Degree of Hydration. Expansion of Paste. Total Porosity*. Cement and Concrete Research, Vol. 2, N. 4, 1972. pp. 463-480.
- (61) COPELAND. L.E. & KANTRO, D.L. *Hydration of Portland Cement*. Principal Paper, Proceedings, Vol. II, Fifth International Congress on the Chemistry of Cements, Tokyo, 1968. pp. 387-421.

- (62) YAMAGUCHI, G.; SHIRASUKA, K. & OTA, T. *Comparison of Hydration Properties between Monoclinic and Inverted Triclinic Alite*. Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Special Report 90, Highway Research Board, Washington, 1966. pp. 263-268.
- (63) NURSE, R.W.; MIDGLEY, H.G.; GUTT, W. & FLETCHER, K.E. *Effect of Polymorphism of Tricalcium Silicate on its Reactivity*. Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Special Report 90, Highway Research Board, Washington, 1966. pp. 258-262.
- (64) POPOVIC, S. *Phenomenological Approach to the Role of CaA in the Hardening of Portland Cement Pastes*. Cement and Concrete Research. N. 6, 1976.
- (65) DELANI, A.; COLLEPARDI, M. & RIO, A. *L'Influenza del Gesso e del Cloruro di Calcio sulla Idratazione del Silicato Tricalcico*. Industria Italiana del Cemento. Vol. 36, N. 7, Jul. 1966. pp. 669-678.
- (66) KANTRO, D.L.; WEISE, C.H. & BRUNAUER, S. *Paste Hydration of Beta-Dicalcium Silicate Tricalcium Silicate and Alite*. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Highway Research Board, Special Report SR 90. Washington, 1966. pp. 309-328.
- (67) SEKI, S.; KASAHARA, K.; KURIYAMA, T. & KAWASUMI, M. *Effects of Hydration of Cement on Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Creep of Concrete*. Supplementary Paper III-97. Vol. III, Proceedings of the Fifth International Congress on the Chemistry of Cements. Tokyo, 1968. pp. 175-185.
- (68) POPOVIC, S. *Strength Development of Portland Cement Paste*. Supplementary Paper, Section II, The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974. pp. 359-369.
- (69) SIERRA, R. *Mécanismes d'hydratation et de Durcissement des Ciments Portland*. Synthèse des communications, B - Hydratation et Durcissement du Ciment, VI^e Congrès International de La Chimie du Ciment. Ciments Bétons Plâtres Chaux. N. 692, Jan., Fév. 1975. pp. 17-22.
- (70) TAPLIN, J.H. *A Method for following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste*. Australian Journal of Applied Science, Vol. 10, N. 3, Sept. 1959. pp. 329-345. [In: ref. 68].
- (71) POPOVIC, S. *Comparison of Various Measurements Concerning the Kinetics of Hydration of Portland Cements*. Supplementary Paper III - 1 Vol. III. Proceedings of the Fifth International Congress on the Chemistry of Cements. Tokyo, 1968. pp. 129-137.
- (72) POPOVIC, S. *Generalization of the Abram's Law - Prediction of Strength Development of concrete from Cement Properties*. Journal of the American Concrete Institute. March, April. 1981. pp. 123-129.

- (73) POPOVICS, S. *A Model for the Kinetics of Hardening of Portland Cement*. Highway Research Record n. 192, Highway Research Board, Washington, 1967. pp. 14-35.
- (74) POPOVICS, S. *Modeling Mathematically the Effect of Curing Temperature on the Strength Development of Cements*. 8. Congresso Internacional de Química de Cimento - Vol. VI. Rio de Janeiro, 1986. pp. 471-475.
- (75) LAWRENCE, F.V.; YOUNG, J.F. & BERGER, R.L. *Hydration and Properties of Calcium Silicate Pastes*. Supplementary Paper, Section II - Vol. II - The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974. pp. 129-135.
- (76) JAMBOR, J. *Phase Composition Structure and Strength of Hardened Cement Pastes*. Supplementary Paper - Section II - Vol. II - The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974. pp. 413-422.
- (77) BUDNIKOV, P.P. & STRELKOV, M.I. *Some Recent Concepts on Portland Cement Hydration and Hardening*. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Special Report 90, Highway Research Board, Washington, 1966. pp. 447-464.
- (78) ALEXANDER, K.M.; TAPLIN, J.H. & WARDLAW, J. *Correlation of Strength and Hydration with Composition of Portland Cement*. Supplementary Paper III-72, Vol. III. Fifth International Congress on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968. pp. 152-166.
- (79) GONNERMAN, H.F. *Study of Cement Composition in Relation to Strength, Length Changes, Resistance to Sulfate Waters and to Freezing and Thawing, of Mortars and Concrete*. Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Part II, Vol. 34, 1934. pp. 245-295.
- (80) RAPIYO, P.S. *Estudo da Relação entre Composição Química e Resistência à Compressão de Cimento Portland*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Publicação 203, Separata n. 221, Revista Politécnica n. 147, ano 41. São Paulo, Julho, 1945.
- (81) BOGUE, R.H. & LERCH, W. *Hydration of Portland Cement Compounds*. Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 26, N. 8, Aug. 1934. pp. 837-847.
- (82) ALEXANDER, L.M. *The relationship between strength and the Composition and Fineness of Cement*. Cement and Concrete Research, Vol. 2, N. 6, Nov. 1972.
- (83) ALDRIDGE, L.P. *Estimating Strength from Cement Composition*. 7th International Congress on the Chemistry of Cements. Vol. III. Paris, 1980.

- (84) VON EUW, W. & GOURDIN, P. *Le Calcul Prévisionnel des Résistances des Ciments Portland*. *Matériaux et Constructions*, Vol. 3, N. 17, Sept., Oct. 1970.
- (85) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Estudo sobre a Previsão da Resistência à Compressão de Cimentos e Concretos*. Relatório n. 17.002, projeto interno n. 8036.01.1 - 2 vol. São Paulo, 1983.
- (86) TANGO, C.E.S. *Previsão da Resistência do Cimento e do Concreto a Partir de Características Físicas e Químicas*. Publicação IPT n. 1741. Anais da Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON. São Paulo, 1986.
- (87) SADLAN, G. & DELLYES, R. *Représentation Linéaire de la Résistance Mécanique des Ciments en Fonction du Temps. Application à la Normalisation*. *Révue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics - Ciments & Bétons*. N. 606, Mars, 1966. pp. 93-106.
- (88) KEE, C.F. *Relation Between Strength and Maturity of Concrete*. *Journal of the American Concrete Institute*, N. 3, Proceedings V. 68, March. 1971. pp. 196-203.
- (89) PLOWMAN, J.M. *Maturity and the Strength of Concrete*. *Magazine of Concrete Research (London)*. V. 8, N. 22, Mar. 1956. pp. 13-22.
- (90) LEW, H.S. & REICHARD, T.W. *Mechanical Properties of Concrete at Early Ages*. *Journal of the American Concrete Institute*, N. 10, Proceedings V. 75, October. 1978. pp. 533-542.
- (91) JERATH, S. & KABBANI, I.A. *Computer Aided Concrete Mix Proportioning*. *Journal of the American Concrete Institute*. N. 4, Proceedings V. 80, July, August, 1983. pp. 312-317.
- (92) TANGO, C.E.S. *Previsão da Resistência do Cimento e do Concreto a Partir de Ensaios a Baixas Idades*. Publicação IPT n. 1742. Anais da Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, São Paulo, 1986.
- (93) HELENE, P.R.L. *Contribuição ao Estabelecimento de Parâmetros para Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.
- (94) CATTANEO, H.A. *Resistencia y Edad de Morteros y Hormigones de Cemento Portland*. 1. Conferencia del Hormigón y Otras Aplicaciones del Cemento Portland. Tomo I. Comité Permanente de las Conferencias del Hormigón, Buenos Aires, 1950. pp. 161-178.
- (95) FAVA, A.S.C. *Resistencia de Rotura a la Compresión en Función de la Relación Agua/Cemento y de la Edad*. Conferencia del Hormigón y Otras Aplicaciones del Cemento Portland. Tomo I. Comité Permanente de las Conferencias del Hormigón, Buenos Aires, 1950. pp. 61-100.

- (96) WASHA, G.W.; SAEMANN, J.C. & CRAMER, S.M. *Fifty Year Properties of Concrete Made in 1937*. American Concrete Institute Materials Journal, Vol. 86, N. 4. July, August. 1989. pp. 367-371.
- (97) WITHEY, M.D. *Some Long-Time Tests of Concrete*. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings V. 27. N. 6. Feb. 1931. pp. 547-582.
- (98) WITHEY, M.D. & WENDT, K.F. *Some Long-Time Tests of Concrete*. Journal of the American Concrete Institute, proceedings. V. 29. N. 4. Feb. 1943. pp. 221-240.
- (99) WASHA, G.W. & WENDT, K.F. *Fifty Year Properties of Concrete*. Journal of the American Concrete Institute, proceedings V. 72, N. 1, Jan. 1975. pp. 20-28.
- (100) LEITHOLD, L. *O Cálculo com Geometria Analítica*. [The Calculus with Analytic Geometry]. Trad. PAQUES, A.; PAQUES, D.T.W.; JOSÉ, F.S.A. Ed. Harper & Row do Brasil. São Paulo. 1977.
- (101) ESCOLA POLYTECHNICA DE SÃO PAULO - LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE MATERIAES. *Ensaio de Concreto de Longa Duração*. Ensaio Oficial n. 3931. São Paulo, 1933.
- (102) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Ensaio de Concreto de Longa Duração*. Ensaio Oficial n. 3931. São Paulo. [1935?].
- (103) TORRES, A.F.; SILVA, F.T.A.; LUDOLF, M.L.; PEREIRA, A.A. *Especificações - Simplificação dos Materiais de Construção*. Boletim N. 4, I.P.T. Publicação IPT N. 4, São Paulo, 1931.
- (104) TORRES, A.F. *Organização de Cadernos de Especificações para o Recebimento de Materiais*. Boletim N. 67. Instituto de Engenharia. São Paulo, 1931.
- (105) TORRES, A.F. & ROMANO, R.L. *Um Método para Ensaio Mecânico dos Cimentos*. Boletim N. 11. I.P.T. Publicação IPT N. 19, São Paulo, 1933.
- (106) TORRES, A.F. & ROMANO, R.L. *Consistência Normal*. Boletim N. 90. Instituto de Engenharia. São Paulo. 1933.
- (107) TORRES, A.F. & ROMANO, R.L. *Medida da Consistência das Argamassas*. Boletim N. 92. Instituto de Engenharia. São paulo. 1933.
- (108) ROMANO, R.L. *Especificações para os Cimentos*. Boletim N. 5. IPT. Publicação IPT n. 10. São Paulo. 1935.
- (109) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Cimento Portland - Métodos de Ensaio e Especificações - Método de Ensaio M-1*. Publicação IPT N. 42. São Paulo. 1935.

- (110) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaio de Cimento Portland - Método Brasileiro*. MB-1, ABNT, Rio de Janeiro. 1937.
- (111) TANGO, C.E.S. *Incurção ao Passado das Normas de Cimento Portland*. A Construção em São Paulo N. 2061. 10/08/1987. pp. 29-30.
- (112) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland. Método de Ensaio*. NBR-7215, ABNT, Rio de Janeiro. 1982.
- (113) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Moldagem e Cura de Corpos de Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos*. Procedimento. NBR-5738. Rio de Janeiro. 1984.
- (114) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - Método de Ensaio*. NBR-7223. Rio de Janeiro. 1982.
- (115) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto - Método de Ensaio*. NBR-5739. Rio de Janeiro. 1980.
- (116) UNIVERSITY OF CALIFORNIA. *BMDP Statistical Software Manual*. W.J. Dixon, Ch. Ed. UCLA Press, Berkeley. 1985.

ANEXO I

TABELA 3

TABELA 3 - amostras de cimento, datas de amostragem, números de certificados oficiais do IPT e códigos dos fabricantes

número da amostra	código da marca	data de amostragem (mês/ano)	nos. de cert. (em cimentos)		nos. de certificados de ensaios de concreto (resistência)										
			fís.	quím.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.	
1	3	06/1933	3932	3932	3931	3931	3931	3931	3931	3931	3931	3931	3931	3931	678755
2	3	11/1935	6470	6471	6469	6469	6469	6469	6469	6469	6469	6469	6469	6469	1727722
3	5	08/1937	9882	10298	9883	9883	9883	9883	9883	9883	9883	9883	9883	212920	1773521
4	5	01/1939	13841	13842	13839	13839	13839	13839	13839	13839	13839	13839	13839	222244	1773522
5	3	01/1939	13844	13845	13843	13843	13843	13843	13843	13843	13843	13843	13843	233009	1773523
6	3	12/1939	17249	17248	17251	17251	17251	17251	17251	17251	17251	17251	17251	245611	1777864
7	5	12/1939	17253	17252	17255	17255	17255	17255	17255	17255	17255	17255	17255	245612	1777865
8	1	12/1939	17270	17269	17272	17272	17272	17272	17272	17272	17272	17272	17272	246432	1777866
9	3	09/1940	21152	21151	21153	21153	21153	21153	21153	21153	21153	n.p.	n.p.	n.p.	
10	3	01/1941	22142	22144	22143	22143	22143	22143	22143	22143	22143	22143	22143	261673	01/1991
11	5	01/1941	22163	22165	22164	22164	22164	22164	22164	22164	22164	22164	22164	261674	01/1991
12	1	01/1941	22166	22168	22167	22167	22167	22167	22167	22167	r.p.	22167	22167	261675	02/1991
13	3	02/1941	23396	23398	23397	23397	23397	23397	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
14	5	02/1942	28355	28357	28356	28356	28356	28356	28356	28356	28356	28356	28356	274985	03/1992
15	3	02/1942	28416	28418	28417	28417	28417	28417	28417	28417	28417	28417	28417	274986	03/1992
16	1	02/1942	28907	28909	28908	28908	28908	28908	28908	28908	28908	28908	28908	274987	03/1992
17	3	04/1942	30844	30847	30845	30845	30845	30845	30845	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
18	3	05/1942	31142	31145	31143	31143	31143	31143	31143	31143	31143	31143	31143	277880	05/1992
19	3	06/1942	31368	31772	31769	31769	r.p.	31769	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
20	3	11/1942	35061	35064	35062	35062	35062	35062	35062	35062	35062	35062	35062	289026	12/1992
21	5	11/1942	35065	35067	35066	35066	35066	35066	35066	35066	35066	35066	35066	289027	12/1992
22	1	12/1942	35180	35182	35181	35181	35181	35181	35181	35181	35181	35181	35181	289028	12/1992
23	5	05/1944	42214	42216	42215	42215	42215	42215	42215	42215	42215	42215	42215	308566	06/1994
24	3	01/1944	42226	42228	42227	42227	42227	42227	42227	42227	42227	42227	42227	308583	02/1994
25	3	02/1945	48975	48977	48976	48976	48976	48976	48976	48976	48976	48976	48976	312414	02/1995
26	5	04/1945	49052	49054	49053	49053	49053	49053	49053	49053	49053	49053	49053	314794	03/1995
27	3	03/1946	58934	58936	58935	58935	58935	58935	58935	58935	58935	58935	58935	332907	03/1996
28	3	01/1947	66109	66112	66110	66110	66110	66110	66110	66110	66110	66110	66110	360383	01/1997
29	5	01/1947	66307	66309	66308	66308	66308	66308	n.p.	66308	66308	66308	66308	360384	02/1997
30	5	01/1948	73517	73519	73518	73518	73518	73518	73518	73518	73518	73518	73518	384837	01/1998
31	3	01/1948	73520	73523	73521	73521	73521	73521	73521	73521	73521	73521	73521	384836	01/1998
32	3	02/1949	80691	80694	80692	80692	80692	80692	80692	80692	80692	80692	80692	412094	02/1999
33	5	02/1949	80695	80698	80696	80696	80696	80696	80696	80696	80696	80696	80696	412095	02/1999
34	5	02/1950	86909	86912	86910	86910	86910	86910	86910	86910	86910	86910	86910	442540	03/2000
35	3	02/1950	87046	87049	87047	87047	87047	87047	87047	87047	87047	87047	87047	442541	03/2000
36	5	01/1951	92650	92653	92651	92651	92651	92651	92651	92651	92651	92651	92651	490275	02/2001
37	3	01/1951	92654	92657	92655	92655	92655	92655	92655	92655	92655	92655	92655	490276	02/2001
38	3	01/1952	99256	99259	99257	99257	99257	99257	99257	99257	99257	99257	99257	205010	02/2002
39	5	02/1952	99385	99388	99386	99386	99386	99386	n.p.	99386	99386	99386	99386	205011	03/2002
40	5	01/1953	109353	109356	109354	109354	109354	109354	109354	109354	109354	109354	109354	219704	02/2003

n.p. = ensaios não programados para a data.

MM/AAAA = data prevista para o ensaio (mês e ano).

r.p. = resultado(s) perdido(s).

(continua)

TABELA 3 - amostras de cimento, datas de amostragem, números de certificados oficiais do IPT e códigos dos fabricantes

número da amostra	código da marca	data de moldagem (mês/ano)	nos. de cert. (em cimentos)		nos. de certificados de ensaios de concreto (resistência)													
			fís.	quím.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.				
41	3	01/1953	109357	109360	109358	109358	109358	109358	109358	109358	109358	109358	1218703	1532573	102/2003			
42	3	05/1954	121792	121795	121793	121793	121793	121793	121793	121793	121793	1237511	1237511	1567431	106/2004			
43	5	05/1954	121796	121799	121797	121797	121797	121797	121797	121797	121797	1237512	1237512	1567430	106/2004			
44	3	05/1955	128046	128049	128047	128047	128047	128047	128047	128047	128047	128047	1247665	1589496	103/2005			
45	5	05/1955	128153	128156	128154	128154	128154	128154	128154	128154	128154	128154	1247666	1589498	103/2005			
46	2	02/1956	136248	136251	136249	136249	136249	136249	136249	136249	136249	136249	1264290	1618943	103/2006			
47	5	02/1956	136256	136259	136257	136257	136257	136257	136257	136257	136257	136257	1262291	1618944	103/2006			
48	3	02/1956	136260	136263	136261	136261	136261	136261	136261	136261	136261	136261	1262292	1618945	103/2006			
49	3	02/1957	145898	145898	145899	n.p.	n.p.	145899	145899	145899	145899	1206357	n.p.	1650860	103/2007			
50	5	02/1957	145901	145901	145902	145902	145902	145902	145902	145902	145902	1206358	1275091	1650857	104/2007			
51	4	03/1957	145966	145966	145967	145967	145967	145967	145967	145967	145967	1206490	1276626	1650859	104/2007			
52	2	04/1957	146519	146519	146520	146520	146520	146520	146520	146520	146520	1206491	1206491	1277881	1650858	104/2007		
53	5	04/1958	154194	154194	154195	154195	154195	154195	154195	154195	154195	1194523	1222010	1308567	1676862	105/2008		
54	4	04/1958	154223	154223	154224	154224	154224	154224	154224	154224	154224	1194524	1222011	1308531	1676863	104/2008		
55	3	04/1958	154249	154249	154250	154250	154250	154250	154250	154250	154250	1194525	1222009	1308584	1676861	105/2008		
56	3	04/1959	165027	165027	165028	165028	165028	165028	165028	165028	165028	1194526	1208964	1236928	1308585	1695770	105/2009	
57	4	04/1959	165032	165032	165033	165033	165033	165033	165033	165033	165033	1194527	1207984	1236438	1308532	1695768	105/2009	
58	5	04/1959	165037	165037	165038	165038	165038	165038	165038	165038	165038	1194528	1207983	1236378	1308568	1695769	105/2008	
59	4	02/1960	176275	176275	176276	176276	176276	176276	176276	176276	176276	1194529	1207982	1222008	1249984	1316187	1716979	105/2010
60	3	05/1960	177519	177519	177520	177520	177520	177520	177520	177520	177520	1195569	1210262	1224842	1252394	1318517	1716980	107/2010
61	5	05/1960	177570	177570	177571	177571	177571	177571	177571	177571	177571	1195570	1209775	1224841	1252395	1318516	1716981	106/2010
62	3	01/1961	188470	188470	188471	193144	196819	204129	218156	232621	261676	1328499	1728232	101/2011				
63	4	01/1961	188475	188475	188476	193145	196196	202709	218138	232343	260460	1328497	1730040	101/2011				
64	5	02/1961	188591	188591	188592	204115	204116	204128	219702	233010	261677	1328498	1728615	102/2011				
65	5	04/1962	202839	202839	202840	210643	213732	221302	235957	249985	276627	1360846	1773524	104/2012				
66	4	04/1962	202849	202849	202850	210263	214733	221303	235437	248927	276628	1360847	1773525	104/2012				
67	3	04/1962	202896	202896	202897	210644	214734	221304	235958	249986	276629	1360848	1773526	104/2012				
68	4	01/1963	217449	217499	217500	222104	227405	233011	246431	261678	1308533	1384835	1773527	101/2013				
69	5	01/1963	218462	218462	218463	224105	228560	234992	262823	262823	1390820	1390820	1773528	103/2013				
70	3	04/1963	221345	221345	221346	226823	229664	236082	249987	264144	1308586	1397839	1773529	104/2013				
71	4	03/1964	233555	233558	233556	239974	242049	248928	263787	274989	1308534	1773530	1773530	103/2014				
72	5	04/1964	234489	r.p.	234490	239973	242738	249988	263788	276630	1306569	1415620	1773531	104/2014				
73	3	09/1964	237744	237747	237745	245540	247844	255666	n.p.	289766	1308665	1429530	1774340	109/2014				
74	5	08/1965	254022	254022	254023	258676	n.p.	268290	280573	322044	322044	1457018	108/1990	108/2015				
75	4	10/1965	255558	255558	255559	260461	266633	269490	289767	308535	323986	1462783	110/1990	110/2015				

n.p. = ensaios não programados para a data.

MM/AAAA = data prevista para o ensaio (mês e ano).

r.p. = resultado(s) perdido(s).

ANEXO II

TABELA 4

TABELA 4 - ensaios físicos, mecânicos e químicos das amostras de cimento

am. no.	finura (%)	início pega (min)	água p/pasta (%)	água p/largam. (cm ³ /g)	resistências a compressão (MPa)			p. ao fogo (%)	insolúveis (%)	(SiO ₂) (%)	(Al ₂ O ₃) (%)	(Fe ₂ O ₃) (%)	(CaO) (%)	(MgO) (%)	(K ₂ O) (%)	(SO ₃) (%)	(Na ₂ O) (%)	(CaO) (%)	caí cálica-livre (%)
					3d.	7d.	28d.												
1	7.2	145	26.3	0.506	14.5	21.0	32.4	1.45	0.06	21.4	5.27	2.42	63.9	2.58	0.51	1.91			
2	8.9	30	25.5	0.494	11.8	13.3	24.6	1.52	0.48	21.4	6.04	2.54	59.9	5.42	0.52	1.70	0.54	0.40	0.38
3	7.0	145	25.0	0.488	13.9	19.7	26.7	2.52	0.62	20.6	4.57	2.79	62.7	4.11	0.49	1.43	0.10	0.27	0.46
4	4.9	93	26.5	0.494	15.8	23.2	29.3	1.26	0.18	20.0	6.76	3.94	62.7	2.17	0.60	1.87	0.50	1.36	0.90
5	3.0	125	25.5	0.494	10.4	17.8	28.1	1.66	0.54	20.1	5.65	2.69	61.9	5.56	0.46	1.51	0.22	1.20	0.53
6	4.0	117	24.0	0.481	13.0	21.3	31.7	1.22	0.44	21.6	4.18	2.92	62.7	4.70	0.43	1.37	0.10	0.84	0.38
7	0.9	100	27.0	0.488	17.4	24.5	31.0	2.12	0.43	18.8	7.11	4.35	61.5	2.47	0.83	1.80	0.40	0.69	0.94
8	5.3	105	26.0	0.500	14.9	22.2	32.9	1.59	0.08	20.3	5.63	2.37	64.5	3.33		1.98			
9	9.4	125	26.0	0.512	11.2	20.3	30.9	1.12	0.07	20.5	4.87	2.98	62.8	5.43		1.52		0.30	
10	7.5	160	26.5	0.500	11.4	18.9	31.1												
11	5.5	92	26.0	0.494	14.9	21.5	25.7	1.83	0.21	20.0	6.51	3.69	61.8	2.32	0.75	2.14	0.55	0.39	1.05
12	5.2	135	26.0	0.500	17.7	26.8	36.3	2.00	0.17	21.3	5.94	1.86	65.5	0.93		2.07			
13	6.3	130	26.5	0.520	15.1	24.9	35.9	1.30	0.09	21.2	5.33	2.25	64.3	3.55		1.58		0.90	
14	7.5	110	24.5	0.494	16.9	27.4	43.0	1.24	0.07	20.3	5.17	3.11	63.6	5.47		1.17		0.80	
15	6.3	130	29.0	0.520	17.4	23.6	34.0	2.88	0.13	20.7	6.10	2.02	64.9	0.92		2.00		3.20	
16	4.8	105	26.0	0.500	13.8	21.2	30.1	2.95	0.22	21.1	5.22	2.46	63.0	3.40		1.78		0.47	
17	6.7	115	23.5	0.500	15.1	23.7	32.8	1.51	0.08	19.4	5.63	3.02	63.1	5.53		1.33		1.11	
18	5.1	110	27.0	0.520	13.7	19.5	29.1												
19	0.6	100	26.5	0.468	28.9	40.3	48.7	1.35	0.30	20.0	5.98	3.40	62.5	5.35		1.90		0.24	
20	7.0	100	23.0	0.513	19.22	18.2	32.4	0.92	0.07	19.8	6.11	3.46	62.9	5.95		1.03		0.92	

obs: em branco, ensaios não programados ou não encontrados

(continua)

TABELA 4 - ensaios físicos, mecânicos e químicos das amostras de cimento

am. no.	finura (%)	tempo de pega (min)	água p/ pasta (%)	água p/ argam. (cm ³ /g)	resistências a compressão (MPa)			p. ao fogo (%)	insolúveis (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	cal cálcica livre (%)
					3d.	7d.	28d.													
21	3.0	140	26.5	0.519	17.4	27.0	39.3	0.97	0.07	22.1	5.89	2.38	64.4	2.44		1.75				0.47
22	4.2	155	26.5	0.520	17.3	24.6	33.0													
23	4.5	150	27.5	0.513	13.5	20.6	29.4	1.94	0.13	21.0	5.78	2.93	63.5	2.54		1.53				0.87
24	6.7	115	25.0	0.529	15.6	21.5	32.3	1.94	0.14	20.5	5.26	2.85	62.1	5.77		1.19				0.73
25	6.7	135	25.5	0.500	14.4	21.3	32.0	1.22	0.04	21.1	5.78	2.84	63.9	2.96		1.30				1.12
26	6.8	127	25.5	0.500	19.3	23.6	31.7	1.62	0.22	19.4	5.56	2.76	62.2	5.63		1.90				1.88
27	6.0	160	26.0	0.507	12.7	18.0	32.1	0.94	0.10	21.3	5.11	3.91	60.3	5.99		1.42				0.16
28	5.9	100	26.0	0.488	15.1	22.7	31.4	1.85	0.10	20.7	6.90	2.68	62.6	3.70		1.18				1.22
29	2.1	110	25.5	0.481	15.9	27.4	39.7	0.91	0.08	21.0	5.12	3.08	61.8	6.25		1.31				0.52
30	3.3	115	27.0	0.494	15.9	23.0	35.7	1.28	0.10	20.3	5.16	3.24	62.8	5.73		0.96				0.99
31	5.3	111	26.5	0.494	12.2	17.9	28.7	1.10	0.08	20.9	5.55	3.05	61.5	6.05		1.57				1.32
32	10.1	100	24.5	0.494	16.1	22.3	32.5	1.36	0.18	21.0	6.04	2.44	62.0	5.26		1.24				0.90
33	2.9	145	27.5	0.481	16.1	23.3	30.8	1.99	0.31	19.1	6.58	4.40	61.9	2.32	0.87	1.97	0.53	0.55		1.07
34	5.5	235	25.0	0.488	13.2	22.6	34.1	1.99	0.35	21.3	4.47	3.21	62.9	4.32	0.50	0.98	0.05	0.07		0.38
35	5.1	145	25.0	0.494	17.2	23.2	35.1	1.10	0.12	20.9	5.85	2.63	63.2	4.32		1.67				0.81
36	2.2	173	27.0	0.494	11.0	18.2	31.9	1.00	0.10	20.9	5.99	3.16	61.1	6.08		1.55				0.32
37	6.3	110	25.0	0.507	15.9	21.7	27.4	1.10	0.12	19.8	5.72	2.28	62.4	6.09		1.85				1.80
38	2.0	175	25.0	0.494	9.71	16.5	27.7	0.78	0.11	20.4	5.85	3.07	62.2	6.10		1.25				0.30
39	6.3	115	25.5	0.494	11.2	19.6	31.4	1.88	0.10	20.5	5.21	2.79	62.8	4.88		1.30				1.01
40	4.7	155	26.5	0.494	12.3	22.2	37.4	1.15	0.10	21.0	5.61	3.59	61.2	5.90		1.30				0.15

obs: em branco, ensaios não programados ou não encontrados

(continua)

TABELA 4 - ensaios físicos, mecânicos e químicos das amostras de cimento

Amo- no.	Finura (%)	início pega (min)	água p/ pasta (%)	água p/ argam. (cm ³ /g)	resistências a compressão (MPa) 3d. 7d. 28d.	p.ao fogo (%)	insol- úveis (%)	(SiO ₂) (%)	(Al ₂ O ₃) (%)	(Fe ₂ O ₃) (%)	(CaO) (%)	(MgO) (%)	(K ₂ O) (%)	(SO ₃) (%)	(Na ₂ O) (%)	(CaO) (%)	(Na ₂ O) (%)	cal cálc- livre lis
41	7.9	153	25.0	0.481	15.6 19.8 30.0	1.10	0.10	21.8	5.09	2.61	61.4	4.92		2.43				0.70
42	3.8	203	26.0	0.475	13.7 19.2 33.6	0.70	0.10	21.7	5.69	3.07	61.2	6.00		1.45				0.14
43	7.3	65	25.0	0.481	18.3 26.7 40.1	1.50	0.10	20.9	5.28	2.92	62.7	4.63		1.89				2.07
44	3.7	145	26.0	0.494	11.0 19.0 31.1	1.00	0.11	21.8	5.37	3.07	61.2	5.60		1.47				0.23
45	3.7	145	26.5	0.500	12.9 18.6 30.5	0.80	0.10	20.3	6.14	2.46	61.8	5.94		1.85				traco
46	5.3	90	25.5	0.481	18.5 25.5 35.6	2.30	0.16	21.0	4.30	2.50	62.2	5.79		1.44				0.48
47	5.6	100	25.5	0.481	20.6 25.8 35.0	1.50	0.12	20.4	4.93	3.37	61.6	5.35		2.16				0.54
48	5.0	80	26.5	0.494	16.3 23.9 36.1	1.60	0.12	20.7	5.34	3.06	63.7	3.82		1.40				0.81
49	4.4	130	26.0	0.481	10.7 18.6 32.3	1.21	0.10	20.4	5.38	3.22	62.1	6.22		1.17				0.38
50	3.1	95	26.0	0.494	21.7 28.6 41.6	1.22	0.17	20.3	6.10	3.37	62.0	4.05		2.16				0.61
51	1.2	120	27.5	0.494	18.1 27.0 36.9	2.24	0.34	20.0	6.19	3.85	61.4	2.21		2.10				1.68
52	8.0	115	25.0	0.481	16.1 24.2 35.9	0.24	0.26	21.5	6.95	2.91	61.2	4.61		2.08				0.12
53	4.4	125	25.5	0.494	12.7 22.2 39.2	0.49	0.28	21.0	6.84	3.14	61.7	4.95		1.49				0.28
54	8.7	125	25.0	0.488	15.4 20.6 30.3	1.10	0.25	19.8	6.12	2.98	62.2	5.75		1.42				0.70
55	8.9	90	25.5	0.494	10.2 15.7 29.6	0.65	0.15	21.8	6.25	3.15	61.8	3.91		1.41				0.42
56	1.4	125	27.5	0.498	16.7 24.9 33.3	1.05	0.30	20.9	6.83	3.77	63.7	1.56		1.51				1.54
57	10.7	140	24.5	0.488	14.5 21.3 30.1	2.17	0.41	20.4	5.17	3.05	62.5	4.76		1.23				1.08
58	8.3	170	25.5	0.488	16.0 25.4 35.1	1.28	0.18	19.4	5.55	3.13	63.9	4.33		1.36				2.63
59	2.3	145	27.5	0.494	14.0 23.4 33.1	2.17	0.18	21.1	5.98	4.42	62.1	2.21		1.47				1.08
60	10.5	129	26.0	0.507	13.3 20.6 32.4	1.50	0.17	20.4	5.33	2.51	62.1	5.45		1.30				0.78

obs: em branco, ensaios não programados ou não encontrados

(continua)

TABELA 4 - ensaios físicos, mecânicos e químicos das amostras de cimento

am. no.	finura (%)	início pega (min)	água p/ pasta (%)	argam. (cm ³ /g)	resistências a compressão (MPa)			p. ao fogo (%)	insolúveis (%)	químicos (%)									
					3d.	7d.	28d.			(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	(Fe ₂ O ₃)	(CaO)	(MgO)	(K ₂ O)	(SO ₃)	(Na ₂ O)	(CaO)	(Na ₂ O)
61	8.8	130	25.5	0.494	17.0	23.1	32.6	1.10	0.15	20.9	4.47	3.07	62.5	4.27	1.06	0.31			
62	2.8	150	27.5	0.488	17.7	27.7	33.2	2.20	0.20	20.9	6.80	1.86	63.3	1.54	1.52	1.99			
63	7.5	140	25.0	0.500	12.3	17.9	28.0	1.00	0.15	21.1	4.75	3.15	62.8	4.99	1.41	0.73			
64	7.7	187	25.0	0.500	12.0	18.0	34.4	1.55	0.10	20.5	5.41	3.49	61.0	6.15	1.46	0.66			
65	6.3	121	26.0	0.500	12.3	18.7	25.0	2.30	0.70	20.1	6.08	4.32	60.8	2.25	2.19	1.66			
66	7.5	143	26.2	0.513	12.1	20.2	33.1	0.92	0.10	20.3	5.26	3.44	62.6	6.12	1.31				
67	?	99	25.0	0.483	9.51	17.5	29.9	1.80	0.08	20.7	5.50	1.86	64.4	6.16	0.97				
68	5.0	175	26.0	0.494	15.2	27.0	40.9	1.25	0.10	20.1	5.32	3.11	63.8	5.53	0.91				
69	1.7	65	28.0	0.504	28.8	37.9	45.1	1.62	0.07	20.5	5.32	2.97	62.9	5.64	1.78	0.20			
70	2.3	122	26.0	0.494	11.8	19.8	30.5	0.80	0.10	21.1	5.80	2.44	62.4	6.51	0.30	0.51			
71	11.4	154	25.0	0.494	8.43	13.1	21.5	0.88	0.13	22.3	5.58	2.58	60.8	5.90	0.50	1.39	0.05	0.07	0.38
72	6.3	135	25.0	0.500	15.1	23.4	36.1	1.65	0.16	21.4	5.23	2.30	64.6	3.16	1.58				
73	7.7	170	22.5	0.513	9.41	15.2	29.6	0.93	0.06	21.4	5.78	2.85	62.3	5.52	1.16				
74	0.8	60	26.0	0.474	24.0	35.4	49.0	1.39	0.13	19.7	5.83	3.46	62.0	5.28	1.73	0.45			
75	1.0	80	25.5	0.474	30.8	40.7	48.6	2.01	0.14	19.2	5.07	2.98	63.1	5.88	1.52	2.18			

Obs: em branco, ensaios não programados ou não encontrados

ANEXO III

TABELA 5

ANEXO IV

TABELA 6

TABELA 6 - temperaturas médias mensais de câmara úmida

ano	temperatura média, no mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1933					20.5		21.1			19.0	22.2	
1934		23.0			21.0							
1935			22.2	20.8	21.5	21.0	19.2	19.9	23.0	21.0		
1936	25.0	23.8		22.5	22.5	21.6	19.5	20.3	19.5		21.1	23.0
1937							20.2	20.7	21.6	21.0	22.6	
1938	25.0	24.7	24.0	22.3	20.3	19.5	21.0	20.9	20.9	20.9	21.0	22.0
1939	22.0	24.0	23.7	21.8	21.0	21.2	19.5	21.0	21.0	23.1	23.0	23.8
1940	24.3	23.2	23.5	23.0	22.0	21.0	21.0	21.2	20.5	21.4	22.0	23.9
1941	24.0	24.5	23.0	23.6	23.5	20.5	20.5	22.3	19.0	20.1	21.2	23.4
1942	23.9	23.9	24.0	22.8	21.8	19.5	18.0	18.8	19.2	20.7	21.3	21.1
1943	21.4	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0		
1944							21.2	21.0	21.5	21.0	21.0	
1945	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1946	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1947	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1948	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1949	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1950	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1951	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1952	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1953	21.0	21.0	21.0	21.2	21.0	21.0	21.0	20.7	21.0	21.0	21.0	21.0
1954	21.0	21.0	21.0	21.2	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1955	21.0	21.0	21.4	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1956	22.7	24.8	21.2	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1957	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	19.7	19.3	21.0	21.0	21.0	23.0	21.0
1958	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
1959	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.8
1960	21.0	21.0	21.0	21.0	20.7	20.7						22.5
1961	24.0	24.6	24.1	24.3	23.0	21.8	21.7	21.0	22.3	22.4	22.0	22.0
1962	23.1	22.0	23.3	22.9	23.0	20.3	19.8	20.6	21.0	21.0	21.0	21.0
1963	26.3	26.0	26.3	25.2	22.4	19.9	19.7	20.8	22.2	22.9	24.1	24.3
1964	24.7	24.8	25.3	25.0	23.0	22.0	18.0	20.3		22.0	21.0	23.4
1965	24.3	24.6	23.9	24.9	22.6	21.3	20.3	21.8	23.6	22.5	24.0	23.7
1966	24.5	27.7	24.7	24.4	23.0	21.7	21.5	21.0	22.5	22.5	24.0	24.8
1967	24.8	26.7	26.1	24.7	23.5	20.7	21.0	22.7	22.5	23.2	23.7	23.5
1968	24.7	25.5	25.5	24.2	20.2	20.4	19.6	20.0	20.6	21.7	25.6	25.5
1969	27.0	26.3	26.4	24.5	24.0	21.7	19.7	20.5	21.3	21.6	23.6	23.2
1970	24.3	25.5	26.0	24.4	24.5	23.0	20.9	21.8	23.0	23.6	23.0	26.3

Obs: em branco, dados não encontrados

(continua)

TABELA 6 - temperaturas médias mensais de câmara úmida

ano	temperatura média, no mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1971			23.7				20.5	22.3	23.1	23.6	23.8	25.1
1972	26.5	25.8	26.0	24.4	25.3	24.0	21.5	21.7	23.0	24.3	27.0	26.7
1973	28.0	28.5	29.0	28.0	28.2	23.0	22.0	21.0	22.2	21.7	24.3	26.0
1974	26.3	29.5	23.0	24.0	23.5	20.5	21.8	22.5		23.2	24.8	22.0
1975	25.2	27.7			23.0		20.0	19.0			22.0	
1976				23.3	22.3	21.8	21.2	22.0	19.3		22.8	22.4
1977	23.0	23.0		22.5	20.0	20.7	19.5	21.5	22.6	18.0	23.5	21.7
1978	19.3	22.7	21.8	19.2	17.5	18.7	18.0	20.2	19.7	19.2	20.0	22.5
1979	20.7	21.2	26.0	24.0	20.2	18.3	17.5	19.0	19.0	24.7	22.3	22.0
1980	24.0	22.3	21.3	22.2	22.3	21.0	20.0	20.8	23.5	23.0	20.5	24.0
1981	22.0	24.0	21.2	20.0	23.0	21.0	22.0	22.0	23.3	19.7	22.0	22.0
1982	22.5	24.5	25.1	23.0	20.6	21.3	21.3	22.0	21.3	20.3	23.3	23.3
1983	22.7	24.3	23.0	22.2	23.5	23.6	23.3	22.1	20.6	21.7	22.0	21.8
1984	21.0	23.0	22.8	23.0	22.1	22.6	22.3	19.8	20.0	20.0	22.0	20.7
1985	24.7	25.0	25.0	24.3	24.3	23.0	23.0	22.0	22.0	21.7	22.0	24.5
1986	26.7	26.3	23.7	25.0	25.0	24.0	24.0	24.3	24.5	24.3		26.3
1987	24.7	26.3	25.0	23.7		24.0						
1988		22.0				18.7	17.3	18.0	20.0	17.0	16.0	24.0
1989	25.0	26.0		22.5	23.2	20.5	19.7	19.7	21.3	21.7	25.0	25.0

Obs: em branco, dados não encontrados

ANEXO C

TABELA 7

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	no.	marca	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
				2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
1	3	4	0.409	11.9	16.2	26.6	36.0	39.2	42.5	40.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.478	17.65	11.8	19.1	31.4	37.4	35.0	36.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		6	0.600	14.31	7.45	14.0	22.1	23.8	25.5	25.8	30.2	28.6	28.5	30.9	30.1	32.1		
		7	0.715	12.64	4.41	8.92	14.5	18.7	18.2	18.2	22.7	23.5	21.1	21.0	25.8	24.6		
	3	4	0.835	11.66	2.94	6.47	10.8	14.5	12.9	14.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		2	3	4	0.425	13.1	18.5	27.8	38.8	44.7	48.2	47.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
				5	0.533	17.94	11.8	20.7	30.6	35.5	36.9	36.1	34.1	38.2	39.7	38.6	42.6	43.6
				6	0.660	14.70	7.25	12.9	22.5	24.8	27.1	25.5	26.5	26.6	28.0	23.9	32.2	32.2
7	0.810			13.23	4.70	7.74	13.9	16.6	17.2	17.9	21.1	19.4	20.4	19.7	26.8	25.4		
3	5	4	0.930	12.15	3.13	5.78	9.61	12.3	12.9	13.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
		4	0.449	14.3	18.1	25.4	30.8	33.7	36.7	36.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
		5	0.507	12.0	14.4	21.2	27.8	31.0	34.8	35.0	39.0	42.3	33.4	r.p.	45.3	46.0		
		6	0.570	19.31	11.6	18.0	25.0	29.8	28.9	33.0	36.1	35.6	33.1	32.5	41.6	41.0		
4	5	7	0.734	14.51	7.06	10.9	17.5	21.4	22.6	24.2	24.9	26.0	21.2	20.2	26.2	28.8		
		8	0.858	13.33	4.02	7.74	12.0	13.6	15.8	16.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		4	0.421	118.7	20.7	27.2	31.8	37.6	39.1	41.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.483	12.5	14.8	16.5	28.6	33.8	36.8	r.p.	36.2	37.8	37.8	39.4	50.2	46.8		
5	3	6	0.600	16.76	8.92	12.3	18.3	21.7	24.8	27.1	25.2	22.5	26.5	30.7	34.2	36.2		
		7	0.710	15.10	6.08	10.6	13.7	17.0	19.8	20.2	20.9	17.1	18.4	21.0	27.2	25.2		
		8	0.890	13.33	4.31	6.96	12.1	12.3	12.7	13.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		4	0.421	14.3	17.0	27.5	36.3	39.6	44.7	r.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
6	3	5	0.482	19.31	12.2	15.8	26.8	30.6	35.3	36.0	32.0	33.3	30.4	33.3	42.9	48.2		
		6	0.590	15.29	9.12	12.9	21.6	24.9	29.2	r.p.	26.2	30.6	28.6	26.8	36.2	32.9		
		7	0.718	13.13	5.19	8.53	13.8	18.6	19.1	21.4	19.5	19.7	18.4	20.8	27.5	28.7		
		8	0.874	12.35	3.23	5.68	11.1	13.1	14.1	14.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
7	5	4	0.404	18.63	13.7	18.9	30.7	38.0	38.9	48.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.477	16.27	10.3	17.9	30.1	34.7	32.2	41.4	42.0	40.8	42.4	45.5	43.8	59.5		
		6	0.576	14.12	6.57	12.1	18.9	22.4	22.7	29.9	26.2	25.7	32.2	28.5	37.5	44.0		
		7	0.696	12.64	4.31	6.96	15.1	18.5	19.9	23.6	23.8	21.9	28.0	23.6	31.3	34.3		
8	1	8	0.82	11.17	2.45	5.10	10.7	11.1	11.8	14.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
		4	0.418	14.3	17.8	23.0	30.3	41.2	40.9	40.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
		5	0.481	11.0	14.3	22.1	29.2	35.3	37.9	35.8	40.7	37.7	38.5	43.7	45.1	60.6		
		6	0.575	17.45	10.5	16.2	19.7	26.6	27.6	31.2	32.2	31.4	34.8	33.8	37.8	43.2		
9	3	7	0.694	15.29	7.25	11.4	15.1	19.4	23.7	r.p.	20.8	19.8	20.8	22.0	29.7	30.9		
		8	0.824	12.94	4.51	7.35	11.9	15.7	15.4	14.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		4	0.422	15.7	21.0	25.8	30.9	36.0	36.7	38.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.500	11.4	16.2	19.5	23.9	29.2	30.8	32.8	30.5	34.9	31.8	30.7	45.1	46.7		
9	3	6	0.614	18.53	11.1	14.9	18.8	23.0	24.9	25.9	25.6	25.2	27.1	27.0	37.7	38.7		
		7	0.710	15.68	8.73	11.6	17.2	21.5	24.4	r.p.	21.0	20.4	21.8	21.5	25.1	28.9		
		8	0.824	13.72	5.68	8.33	11.8	14.7	15.4	15.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		4	0.400	13.4	23.5	35.1	41.3	46.1	48.2	43.4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
9	3	5	0.500	19.81	14.8	25.2	32.2	36.7	36.5	34.7	32.5	40.2	37.2	n.p.	n.p.	n.p.		
		6	0.592	17.65	12.0	17.8	24.0	29.2	31.8	30.0	27.1	30.1	25.1	n.p.	n.p.	n.p.		
		7	0.697	14.12	7.25	13.4	20.5	20.9	26.4	20.6	r.p.	21.1	20.9	n.p.	n.p.	n.p.		
		8	0.818	13.04	5.19	9.31	13.5	16.8	15.9	17.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados

r.p.=resultados perdidos

a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa

a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

no.	marca	a	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
				2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
10	3	4	0.394	16.2	19.2	30.9	41.2	32.8	34.5	41.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.486	11.2	14.0	25.6	33.7	26.2	33.9	34.0	35.3	37.3	r.p.	39.9	42.8	a.r.		
			0.600	16.27	9.31	18.0	26.0	20.0	22.4	23.9	26.6	26.7	27.0	33.1	33.9	a.r.		
			0.715	13.62	6.37	11.9	18.2	16.7	17.1	18.3	23.8	24.8	26.1	24.9	33.6	a.r.		
			0.853	12.35	3.53	6.57	10.8	12.0	14.2	11.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
11	5	4	0.413	16.1	21.1	28.2	33.3	38.8	37.3	39.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.506	11.7	16.0	22.7	27.3	27.7	33.1	34.1	30.0	31.2	33.8	38.7	44.0	a.r.		
			0.607	16.86	10.9	16.8	21.1	22.2	22.3	26.4	23.6	25.9	26.6	25.0	34.3	a.r.		
			0.723	14.31	7.16	11.5	15.0	15.9	18.1	19.0	21.2	23.6	22.3	23.1	25.3	a.r.		
			0.862	12.64	3.92	6.86	10.6	12.2	12.5	13.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
12	1	4	0.441	16.0	18.4	23.7	29.4	31.8	30.7	34.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.506	12.8	14.0	18.2	25.2	24.7	29.7	31.8	28.6	29.7	r.p.	31.2	38.5	a.r.		
			0.613	18.43	9.51	15.3	19.3	22.6	22.7	25.5	22.6	22.3	r.p.	26.2	30.4	a.r.		
			0.731	15.88	6.47	10.7	15.9	17.1	17.5	19.3	20.5	21.7	r.p.	24.0	25.5	a.r.		
			0.871	13.33	4.61	6.96	11.4	13.5	14.0	10.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
13	3	4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.558	15.3	16.9	21.0	27.1	30.9	28.0	32.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.726	10.2	13.5	13.9	19.6	22.6	21.0	24.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
14	5	4	0.416	17.7	19.9	29.8	36.0	37.7	42.1	46.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.488	11.1	16.2	21.5	31.1	30.7	32.5	38.3	35.4	33.8	37.0	39.2	50.2	a.r.		
			0.561	19.31	13.1	18.7	25.8	30.5	29.6	33.1	29.4	28.4	27.4	29.1	37.5	a.r.		
			0.682	15.59	8.63	12.1	18.9	19.9	20.3	22.4	23.2	21.9	21.4	21.8	27.4	a.r.		
			0.816	13.72	5.78	7.25	12.6	14.1	14.3	15.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
15	3	4	0.394	20.0	24.9	33.0	42.5	43.1	46.7	48.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.479	10.9	14.9	24.0	35.9	35.4	36.0	39.4	35.9	31.6	40.6	37.0	45.9	a.r.		
			0.571	17.74	12.4	19.4	26.7	29.5	29.3	31.3	32.3	28.7	35.5	36.7	35.1	a.r.		
			0.666	15.78	9.12	13.3	21.5	23.5	22.0	24.9	20.6	21.9	24.2	26.7	25.3	a.r.		
			0.789	13.62	5.68	8.14	14.2	14.9	r.p.	16.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
16	1	4	0.428	14.0	15.8	21.6	29.7	35.2	36.1	37.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.500	10.3	12.6	19.9	27.3	26.0	r.p.	29.1	29.5	31.4	32.2	36.3	38.6	a.r.		
			0.587	17.16	9.71	14.6	22.8	25.3	22.5	28.3	25.8	30.0	30.2	30.1	30.0	a.r.		
			0.682	14.80	6.96	10.9	17.4	20.2	18.0	20.7	22.8	21.9	26.9	24.9	24.0	a.r.		
			0.813	12.84	4.12	6.96	12.4	14.0	13.9	15.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
17	3	4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.469	19.5	21.5	28.1	40.7	42.1	42.2	43.0	44.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.551	13.8	16.3	21.2	34.0	39.2	35.3	36.1	37.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
18	3	4	0.393	28.9	32.3	39.5	43.9	51.6	51.2	48.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.456	23.1	26.9	31.3	34.9	46.4	48.8	46.4	50.6	51.2	49.8	49.6	69.7	a.r.		
			0.555	14.4	19.0	25.1	30.9	37.1	33.2	36.8	46.2	r.p.	40.1	39.1	39.7	a.r.		
			0.652	18.82	13.2	18.9	22.8	21.6	26.2	25.9	29.5	27.2	29.1	28.8	30.0	a.r.		
			0.763	16.08	8.92	13.3	17.6	20.4	21.4	20.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados
 r.p.=resultados perdidos
 a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa
 a/c=relação água/cimento em massa
 (continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

no.	marca	m (kg/kg)	a/c	Resistências à compressão (MPa)															
				2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.			
19	3	4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.457	23.4	28.6	32.5	38.6	39.5	r.p.	45.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
			0.559	16.7	22.0	26.3	33.5	34.1	r.p.	35.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
			n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
			0.408	11.1	17.4	27.0	38.7	39.1	40.3	42.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
			0.500	15.78	11.1	16.4	26.9	28.8	28.6	29.4	37.8	36.1	28.5	35.8	43.9	a.r.			
			0.627	13.23	5.88	11.8	18.8	20.6	20.5	20.7	23.8	24.4	22.4	23.4	29.0	a.r.			
20	3	4	0.762	11.76	3.23	6.57	11.6	14.9	15.4	12.9	16.5	15.4	16.3	15.9	20.0	a.r.			
			0.924	10.98	1.86	4.02	7.94	10.3	11.2	8.92	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.430	13.3	18.7	23.7	33.8	34.7	40.3	39.4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.530	18.04	12.5	18.8	27.9	30.3	35.2	31.8	35.2	36.1	28.0	33.5	42.0	a.r.			
			0.667	15.00	7.55	12.0	19.6	22.0	24.6	23.5	27.7	23.3	23.3	25.0	28.8	a.r.			
			0.808	12.74	4.90	7.74	13.6	16.3	17.7	17.2	19.6	18.4	14.1	19.0	21.2	a.r.			
			0.945	12.25	3.33	5.49	9.41	12.8	11.7	13.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.427	14.5	17.8	25.0	31.1	36.1	40.2	37.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
21	5	4	0.533	19.90	12.3	18.3	22.8	27.2	31.8	30.2	34.3	34.3	29.4	35.4	35.6	a.r.			
			0.645	16.08	7.84	13.3	17.8	22.2	24.9	23.4	27.8	23.8	21.9	24.3	29.2	a.r.			
			0.778	13.43	4.51	7.84	12.4	16.9	18.3	19.8	20.0	19.6	15.5	19.2	22.1	a.r.			
			0.925	12.45	3.43	5.49	9.22	12.6	13.6	14.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.450	16.3	19.7	26.2	34.8	35.4	38.8	36.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.512	19.02	12.5	19.1	27.3	26.3	31.3	30.3	31.2	33.5	29.9	30.6	36.2	a.r.			
			0.627	15.39	8.24	14.0	20.1	21.1	24.0	23.6	r.p.	22.9	23.8	21.0	25.3	a.r.			
			0.739	13.33	5.78	8.82	14.7	16.0	18.3	16.9	16.9	15.4	18.4	17.8	20.8	a.r.			
22	1	4	0.854	12.15	3.23	5.78	10.3	11.6	13.8	13.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.391	16.1	20.9	29.6	37.1	43.9	45.7	44.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.493	19.31	12.5	19.0	27.7	33.8	34.3	35.3	34.4	36.4	38.2	39.6	38.6	a.r.			
			0.600	15.49	7.94	11.4	22.5	25.1	22.7	24.5	27.8	28.3	29.3	27.7	28.0	a.r.			
			0.715	13.72	5.00	7.84	13.8	18.8	18.8	17.5	17.9	19.7	17.8	19.5	22.6	a.r.			
			0.844	12.84	3.43	5.68	10.3	12.8	12.3	12.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.400	20.0	22.1	28.7	33.4	40.9	41.3	44.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.473	13.9	16.0	21.9	26.1	34.0	37.1	34.3	35.4	37.2	39.0	37.1	49.7	a.r.			
23	3	4	0.574	17.94	10.3	16.5	21.3	26.7	25.3	29.4	29.8	26.7	32.6	27.1	38.9	a.r.			
			0.685	15.19	6.96	10.4	14.5	17.1	18.3	22.2	21.6	20.1	20.8	19.8	27.0	a.r.			
			0.809	14.02	4.90	7.35	10.5	13.0	15.2	16.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.400	15.8	19.2	26.8	33.3	40.5	38.6	38.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
			0.483	19.51	12.9	19.8	25.9	32.3	31.0	32.7	34.6	32.6	36.5	36.8	47.9	a.r.			
			0.587	15.68	9.31	11.1	16.2	24.0	20.7	24.0	22.8	23.2	26.9	30.6	32.8	a.r.			
			0.696	13.62	5.68	9.51	13.6	18.4	19.2	21.2	21.1	20.9	21.1	24.6	25.0	a.r.			
			0.818	12.64	3.43	6.47	10.8	12.2	14.0	13.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			
24	3	4	0.400	11.4	14.8	22.4	r.p.	36.8	40.2	41.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.				
			0.461	17.94	12.5	17.5	28.7	30.8	29.4	32.9	39.0	39.5	45.1	55.2	57.1	a.r.			
			0.563	14.31	6.96	11.1	20.2	23.3	24.5	20.5	22.0	23.2	26.4	37.1	36.8	a.r.			
			0.692	12.74	4.41	5.88	12.5	18.0	19.9	17.3	20.2	20.4	22.9	26.7	29.3	a.r.			
			0.827	12.15	2.55	4.41	10.4	13.1	14.3	14.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.			

n.p.=ensaios não programados

r.p.=resultados perdidos

a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa

a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	no.	marca	m	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
			(kg/kg)	(kg/kg)	2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
	28	3	4	0.400	10.7	17.0	23.0	36.1	38.4	41.6	46.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.469	17.84	12.4	16.2	27.5	30.1	32.9	31.9	34.3	38.2	35.2	48.2	47.3	a.r.		
			6	0.577	14.31	7.35	12.3	20.3	22.0	27.2	23.7	28.3	25.7	25.4	33.7	31.8	a.r.		
			7	0.692	12.64	4.80	7.45	13.6	17.5	16.7	19.4	15.8	18.0	19.2	26.2	24.6	a.r.		
			8	0.814	11.37	2.94	5.49	10.4	12.1	12.3	14.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	29	5	4	0.400	11.6	15.2	25.7	32.0	34.3	35.8	40.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.476	17.55	10.4	18.4	25.3	28.9	29.0	30.9	n.p.	34.6	34.0	47.2	47.5	a.r.		
			6	0.587	14.21	6.27	13.7	18.3	22.7	24.1	23.8	n.p.	24.1	23.4	32.0	31.8	a.r.		
			7	0.705	13.04	4.31	9.90	14.5	16.4	17.5	17.3	n.p.	18.8	18.8	25.8	25.8	a.r.		
			8	0.830	12.45	4.02	6.08	9.41	11.0	11.6	13.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	30	5	4	0.409	10.9	13.0	16.8	24.7	31.5	35.1	34.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	17.94	10.4	15.1	22.2	25.8	29.0	31.9	31.4	33.1	33.4	37.2	41.4	a.r.		
			6	0.560	14.61	7.16	10.6	17.2	18.7	22.8	25.7	23.3	26.4	29.3	28.8	31.8	a.r.		
			7	0.669	13.13	4.41	7.55	11.8	15.7	19.5	20.6	20.0	22.2	25.9	24.3	25.5	a.r.		
			8	0.805	12.25	4.21	4.61	9.02	12.8	14.1	17.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	31	3	4	0.409	15.4	20.6	30.8	37.6	39.9	39.5	44.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.469	10.6	15.5	22.3	30.3	35.4	36.9	38.1	39.9	38.6	41.3	49.4	46.2	a.r.		
			6	0.566	16.86	10.8	16.8	21.4	26.1	25.9	29.8	31.9	30.9	32.1	36.5	34.6	a.r.		
			7	0.676	14.21	8.24	10.7	16.5	18.1	19.8	20.7	21.2	23.3	26.0	26.5	25.6	a.r.		
			8	0.806	12.55	4.12	6.36	10.7	13.5	15.5	15.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	32	3	4	0.418	10.9	15.7	23.4	28.9	30.9	32.5	33.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	17.16	12.6	18.5	24.9	24.5	30.9	30.5	36.9	35.3	30.3	46.6	45.7	a.r.		
			6	0.574	13.82	6.57	11.7	18.1	22.2	23.2	26.9	28.1	27.9	25.6	27.6	30.4	a.r.		
			7	0.684	12.06	4.61	8.24	13.5	16.0	17.7	19.3	20.6	23.5	20.3	21.3	23.8	a.r.		
			8	0.8	11.47	2.64	5.68	8.82	14.1	13.3	14.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	33	5	4	0.400	16.1	19.3	24.4	30.9	33.7	37.0	37.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	11.3	15.0	20.0	26.4	27.3	29.6	32.0	38.5	39.0	35.0	48.7	47.5	a.r.		
			6	0.574	17.45	9.31	13.7	19.0	20.3	22.5	26.2	26.4	28.5	29.3	31.7	36.3	a.r.		
			7	0.684	14.51	6.18	9.61	14.1	14.1	18.1	18.3	21.7	24.1	20.4	24.0	26.1	a.r.		
			8	0.800	13.92	5.19	7.25	10.9	12.1	14.1	13.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	34	5	4	0.418	15.4	18.7	25.6	31.0	32.3	33.4	38.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	12.5	15.4	21.7	26.6	29.8	30.0	34.5	40.6	35.4	42.4	43.1	44.4	a.r.		
			6	0.560	18.63	10.8	16.8	21.4	27.9	28.8	30.5	26.1	26.5	22.4	29.6	32.9	a.r.		
			7	0.653	16.08	8.14	12.2	16.6	21.2	22.8	23.4	20.0	21.5	17.7	25.1	28.3	a.r.		
			8	0.783	13.92	5.10	7.94	13.9	16.2	15.9	18.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	35	3	4	0.418	10.1	13.5	20.6	31.6	35.6	40.5	42.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	17.74	10.8	17.5	27.2	32.8	38.7	36.0	35.8	32.9	32.9	44.6	48.3	a.r.		
			6	0.560	14.61	7.25	10.7	17.1	24.7	28.4	27.7	31.4	27.5	29.9	34.8	36.8	a.r.		
			7	0.653	12.74	4.31	7.74	14.2	21.2	22.5	24.7	23.4	23.2	26.0	26.6	30.2	a.r.		
			8	0.747	11.96	3.43	5.98	12.0	17.3	19.5	19.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
	36	5	4	0.400	16.2	19.9	26.1	31.7	38.5	39.3	40.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			5	0.467	11.6	15.0	20.8	25.6	28.4	31.8	30.1	32.6	33.1	43.0	42.1	37.9	a.r.		
			6	0.560	17.74	10.1	14.3	20.1	22.9	25.7	25.8	25.1	26.3	31.9	38.1	31.4	a.r.		
			7	0.669	15.39	7.45	10.4	14.0	17.4	20.8	18.8	17.6	18.3	20.2	26.0	22.9	a.r.		
			8	0.818	13.13	4.80	6.96	9.41	11.4	14.2	15.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados

r.p.=resultados perdidos

a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa

a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

no.	marca	n	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
				2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
37	3	4	0.400	17.25	11.1	20.3	33.5	40.9	38.9	41.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	14.70	7.94	15.7	25.3	30.5	32.9	32.2	33.9	30.2	r.p.	37.8	40.0	a.r.		
			0.560	12.94	5.59	11.9	21.0	23.2	26.2	26.1	27.3	24.9	30.8	32.6	31.8	a.r.		
			0.669	12.64	3.82	6.67	12.7	16.2	18.8	20.3	20.8	18.3	22.5	22.5	23.1	a.r.		
			0.783	11.66	2.94	5.19	9.90	13.7	13.5	14.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
38	3	4	0.409	11.4	16.1	25.4	33.3	36.4	37.7	40.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	17.35	11.3	18.9	26.7	33.0	33.0	37.4	39.8	43.8	45.4	49.7	44.2	a.r.		
			0.573	15.19	8.04	12.9	19.5	26.2	27.7	27.9	r.p.	r.p.	30.0	36.0	34.5	a.r.		
			0.700	12.64	4.80	7.94	12.9	18.5	19.4	20.4	r.p.	r.p.	21.1	24.9	23.5	a.r.		
			0.845	11.86	3.23	5.19	10.0	13.9	13.2	14.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
39	5	4	0.409	10.0	13.1	19.1	26.9	31.0	32.4	39.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	17.55	10.1	14.8	21.1	26.0	26.8	30.8	n.p.	34.5	38.2	42.9	40.1	a.r.		
			0.560	15.39	6.57	13.1	18.3	23.5	22.5	21.7	n.p.	23.6	27.0	29.8	28.9	a.r.		
			0.684	13.23	4.12	7.74	11.9	12.9	13.5	14.0	n.p.	18.6	19.6	22.9	21.5	a.r.		
			0.853	11.56	2.64	4.80	8.43	10.9	11.9	12.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
40	5	4	0.445	12.8	15.7	21.8	28.8	30.5	29.8	36.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.478	10.9	12.9	19.5	25.8	27.4	29.1	34.7	41.5	41.0	45.8	49.6	52.5	a.r.		
			0.574	16.37	8.73	14.9	18.5	23.9	24.2	25.8	26.3	32.2	35.0	35.6	37.5	a.r.		
			0.685	14.12	5.10	9.90	13.3	16.3	18.4	19.5	18.4	21.8	25.2	25.1	28.5	a.r.		
			0.800	13.23	4.02	5.68	9.71	11.3	12.1	15.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
41	3	4	0.445	11.7	14.3	20.2	30.9	37.3	36.2	46.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	10.2	14.0	18.1	25.8	33.8	34.3	37.9	31.7	50.0	46.6	53.9	51.3	a.r.		
			0.560	16.47	7.94	12.4	20.2	29.4	25.1	25.2	27.0	36.1	39.2	42.5	39.4	a.r.		
			0.685	13.92	5.39	8.53	13.1	20.2	19.0	19.4	21.2	24.1	24.7	28.5	27.5	a.r.		
			0.800	12.84	3.43	5.78	10.9	12.7	13.9	13.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
42	3	4	0.418	16.47	10.0	15.3	25.0	30.0	29.6	39.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.463	15.68	8.14	13.4	19.3	22.3	22.9	32.7	41.6	41.8	36.1	41.6	42.7	a.r.		
			0.556	13.53	5.78	10.4	17.5	16.1	20.3	24.0	27.7	33.5	32.9	31.8	34.6	a.r.		
			0.680	12.25	3.72	6.37	11.4	11.7	14.5	18.7	19.0	21.1	22.5	21.8	24.9	a.r.		
			0.818	11.47	2.35	4.21	7.94	9.22	10.8	13.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
43	5	4	0.409	16.3	17.6	23.7	30.6	32.4	30.6	45.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.481	10.3	12.7	18.5	27.0	27.5	26.8	40.8	43.4	39.7	35.8	44.1	48.9	a.r.		
			0.577	17.55	9.31	14.5	20.3	17.0	17.7	23.9	30.9	32.7	34.7	33.6	35.8	a.r.		
			0.674	15.10	5.98	9.90	14.6	14.0	14.5	19.9	24.3	26.4	27.8	28.0	30.2	a.r.		
			0.800	12.15	3.62	6.47	10.5	10.5	11.1	15.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
44	3	4	0.418	11.0	12.7	17.9	26.0	32.1	35.9	45.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	19.02	10.3	14.8	23.0	28.2	31.3	38.7	38.6	40.2	47.3	43.0	50.5	a.r.		
			0.560	15.88	7.84	10.5	18.4	26.1	27.0	32.4	29.2	30.6	38.9	35.1	41.0	a.r.		
			0.669	13.92	5.10	7.45	13.3	16.2	18.3	22.5	22.5	25.0	29.4	23.5	29.9	a.r.		
			0.765	12.84	3.23	5.59	10.2	13.8	15.9	20.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
45	5	4	0.409	13.7	16.4	22.2	26.9	38.8	40.3	45.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.467	10.9	13.5	17.2	23.9	33.2	34.9	37.6	37.9	45.5	48.4	46.2	51.6	a.r.		
			0.560	17.74	9.12	13.0	17.9	27.8	28.6	33.0	31.2	34.5	35.4	37.4	41.9	a.r.		
			0.669	15.10	6.67	9.41	14.8	20.3	21.2	23.3	23.4	25.9	24.9	26.1	30.6	a.r.		
			0.783	13.04	4.80	7.06	11.4	16.7	17.5	19.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados

r.p.=resultados perdidos

a.r.=aguardam-se resultados

n=teor agregado/cimento em massa

a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	marca	m	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
no.		(kg/kg)	(kg/kg)	2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
46	2	4	0.391	114.8	17.7	24.8	34.1	38.8	38.3	42.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.467	19.31	12.2	18.9	26.4	29.2	30.1	32.6	43.7	37.8	47.8	48.0	55.8	a.r.		
		6	0.560	16.86	8.33	13.1	20.6	r.p.	26.3	27.2	32.8	31.4	39.7	34.5	41.9	a.r.		
		7	0.669	14.21	5.19	9.81	14.8	r.p.	17.6	19.3	23.1	20.3	26.7	23.3	29.6	a.r.		
		8	0.783	12.25	3.33	6.57	11.4	r.p.	12.4	14.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		47	5	4	0.409	121.1	21.6	28.6	35.4	38.1	40.0	44.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.467	116.0	18.5	24.3	29.6	33.0	34.8	40.2	42.2	41.4	46.0	55.2	69.0	a.r.
				6	0.560	110.8	12.3	17.3	25.4	25.4	27.9	31.2	31.8	28.3	31.9	40.3	41.5	a.r.
7	0.669			16.76	8.24	12.5	18.2	18.9	20.6	25.1	26.5	25.7	28.8	29.9	35.2	a.r.		
8	0.801			14.21	5.68	8.43	13.6	14.1	12.1	17.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
48	3			4	0.400	112.5	18.1	25.7	32.0	44.4	43.2	46.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.478	17.94	11.9	16.9	25.7	34.3	36.2	39.2	36.9	38.5	41.4	43.8	56.3	a.r.
				6	0.587	14.51	6.76	10.3	18.5	20.4	21.5	24.4	28.1	24.7	36.0	34.5	41.2	a.r.
		7	0.700	13.04	4.61	7.84	13.6	14.7	15.9	18.4	22.4	16.5	27.6	28.3	31.6	a.r.		
		8	0.818	12.25	3.04	5.39	11.1	11.8	12.2	14.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		49	3	4	0.400	114.8	20.2	30.7	39.2	n.p.	n.p.	46.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.456	110.7	15.8	25.1	34.3	n.p.	n.p.	42.0	46.0	46.9	49.1	n.p.	52.9	a.r.
				6	0.560	16.47	10.0	16.9	25.3	n.p.	n.p.	28.5	32.1	37.5	40.3	n.p.	40.2	a.r.
7	0.669			13.92	6.08	10.9	18.9	n.p.	n.p.	27.9	24.7	26.7	30.5	n.p.	30.8	a.r.		
8	0.783			12.55	3.92	6.67	13.7	n.p.	n.p.	20.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
50	5			4	0.409	118.1	20.6	28.5	37.9	35.7	37.6	41.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.467	112.9	15.1	21.4	31.6	30.0	30.6	36.6	39.1	43.2	45.3	46.4	47.4	a.r.
				6	0.574	17.35	9.61	14.8	23.9	22.5	26.0	28.0	23.9	30.9	33.1	34.7	36.5	a.r.
		7	0.684	15.10	6.18	9.90	15.7	16.6	17.6	21.0	19.2	23.4	23.7	27.4	28.1	a.r.		
		8	0.801	12.84	3.92	7.06	11.9	13.7	13.7	16.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		51	4	4	0.418	118.7	23.2	29.8	35.6	40.1	41.0	44.4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.478	113.3	15.2	23.6	30.6	34.4	35.2	36.8	37.0	41.3	45.0	46.4	49.8	a.r.
				6	0.573	17.94	10.5	17.6	24.6	24.4	28.7	30.7	29.1	33.9	33.5	36.4	36.1	a.r.
7	0.685			15.78	7.55	11.5	18.3	19.9	19.9	23.1	21.3	24.2	23.7	24.6	25.6	a.r.		
8	0.801			13.43	3.92	8.92	13.5	13.9	13.7	18.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
52	2			4	0.400	120.9	26.1	31.8	41.8	48.6	50.7	55.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.467	115.7	20.7	23.9	33.7	42.1	45.5	45.5	43.6	56.5	53.3	70.6	51.9	a.r.
				6	0.560	110.5	15.4	19.7	28.3	29.7	33.0	35.9	32.5	40.0	41.3	42.4	39.2	a.r.
		7	0.669	17.35	10.4	14.3	21.7	22.0	26.2	26.9	25.1	28.0	30.3	33.7	31.7	a.r.		
		8	0.783	14.12	5.98	9.81	15.6	18.1	19.6	22.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		53	5	4	0.409	112.6	16.6	21.5	29.9	31.3	33.3	36.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.467	118.82	11.6	20.1	28.6	25.7	27.6	30.7	40.9	41.3	40.6	43.4	43.6	a.r.
				6	0.560	16.76	7.94	14.5	22.0	25.3	26.0	29.7	31.0	31.0	32.2	32.9	33.1	a.r.
7	0.653			14.12	5.39	11.1	17.4	17.6	19.1	19.2	20.8	23.2	20.8	23.7	24.6	a.r.		
8	0.765			12.84	3.72	7.74	13.3	14.9	18.6	17.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
54	4			4	0.427	111.7	17.5	25.8	31.7	31.8	32.6	37.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.467	118.92	13.4	19.4	28.8	26.1	28.3	30.9	36.9	37.7	36.0	40.8	41.3	a.r.
				6	0.560	15.00	9.31	15.4	22.0	22.2	26.8	25.9	30.8	28.8	30.9	33.8	33.2	a.r.
		7	0.660	13.33	5.98	10.7	17.4	19.0	21.4	20.3	22.9	27.7	25.2	26.9	28.9	a.r.		
		8	0.783	12.45	3.43	7.16	10.7	14.7	14.8	15.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados
r.p.=resultados perdidos
a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa
a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	marca	m	a/c	resistências à compressão (MPa)														
no.		(kg/kg)	(kg/kg)	2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
55	3	4	0.400	10.8	15.4	23.9	32.6	36.8	41.5	43.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.445	18.53	12.4	17.4	27.8	31.1	33.7	35.6	40.5	47.5	42.7	43.2	43.6	a.r.		
			0.533	14.21	7.06	12.9	21.8	30.8	32.2	32.2	38.9	41.6	36.1	39.2	33.1	a.r.		
			0.638	12.94	4.70	8.24	15.1	18.7	22.4	24.2	31.0	29.6	29.6	33.8	24.6	a.r.		
			0.747	12.06	3.13	5.68	11.8	16.4	17.8	18.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
56	3	4	0.408	14.5	18.9	24.5	32.7	42.2	45.3	46.4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.456	11.9	14.9	22.0	27.3	36.1	37.5	36.9	41.3	41.3	47.3	46.4	48.1	a.r.		
			0.562	17.45	10.5	15.7	21.5	31.6	29.1	33.5	29.8	32.5	36.1	32.6	37.0	a.r.		
			0.678	15.29	6.47	10.0	14.5	20.2	23.7	23.9	23.4	24.3	24.9	23.2	27.5	a.r.		
			0.788	13.92	5.78	9.22	14.1	17.3	19.2	18.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
57	4	4	0.427	11.6	15.7	22.4	30.4	30.8	37.2	38.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.478	10.2	12.8	19.3	24.1	28.4	34.2	35.1	43.4	41.6	41.2	41.1	45.0	a.r.		
			0.562	17.84	9.31	14.5	20.6	25.5	27.9	28.5	32.7	32.6	29.5	31.0	37.3	a.r.		
			0.678	15.10	6.57	10.4	15.6	17.2	20.5	21.6	21.4	23.6	21.1	21.7	24.7	a.r.		
			0.773	13.53	5.00	8.53	13.3	15.7	17.1	18.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
58	5	4	0.418	12.7	17.0	23.7	29.0	36.1	40.7	41.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.479	10.0	12.2	19.7	23.2	31.3	33.2	35.4	41.3	41.9	42.4	41.0	50.8	a.r.		
			0.575	16.96	8.92	14.6	17.6	21.0	26.2	28.4	33.3	33.9	30.2	36.4	44.1	a.r.		
			0.678	15.00	6.18	10.1	13.5	17.1	20.0	21.1	26.5	25.9	24.7	28.9	34.3	a.r.		
			0.817	13.43	4.51	7.35	8.92	11.9	14.6	17.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
59	4	4	0.424	12.3	16.9	25.4	31.8	36.8	37.9	50.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.485	10.7	13.6	19.9	25.2	31.7	32.2	40.2	41.5	34.6	38.5	42.2	44.8	a.r.		
			0.564	17.35	10.9	16.6	21.5	28.7	27.1	34.4	30.3	29.1	32.7	35.6	37.3	a.r.		
			0.674	14.31	6.37	11.1	18.7	21.9	21.8	24.6	23.8	20.4	24.6	26.2	32.2	a.r.		
			0.790	13.13	4.41	8.53	15.6	15.0	17.9	20.5	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
60	3	4	0.423	10.7	16.3	23.5	33.9	45.4	46.2	50.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.483	18.43	12.8	20.3	30.6	37.2	41.4	42.7	45.7	42.2	40.8	45.9	49.4	a.r.		
			0.602	15.29	8.14	11.9	20.2	29.0	31.2	30.2	29.0	29.9	29.0	37.1	39.4	a.r.		
			0.701	13.04	5.00	8.33	14.2	21.2	25.0	24.9	23.3	24.6	23.5	28.6	30.7	a.r.		
			0.793	12.84	4.31	7.65	14.0	18.7	19.6	20.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
61	5	4	0.413	17.1	22.4	26.5	33.8	33.8	43.5	52.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.482	14.3	18.0	23.9	29.2	29.0	40.0	46.4	42.5	45.6	46.4	48.0	53.3	a.r.		
			0.564	19.61	12.9	18.8	24.8	25.7	32.5	36.3	34.1	33.2	31.8	36.4	43.7	a.r.		
			0.647	17.25	9.81	14.0	19.6	20.6	24.2	28.7	31.3	31.6	30.6	30.1	35.9	a.r.		
			0.765	14.61	6.67	9.71	14.7	18.8	21.2	21.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
62	3	4	0.403	16.1	21.1	30.9	38.2	38.5	37.5	39.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.471	10.5	15.3	23.0	28.8	32.3	35.3	36.6	39.7	39.8	42.5	47.3	50.3	a.r.		
			0.589	15.88	8.82	15.2	19.8	22.5	25.5	30.2	31.9	31.3	31.9	36.1	40.9	a.r.		
			0.674	14.21	5.88	11.9	15.6	18.8	21.6	22.1	22.8	24.2	23.0	r.p.	30.3	a.r.		
			0.808	12.45	3.82	8.14	11.3	15.6	14.1	14.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
63	4	4	0.403	15.2	18.3	23.0	30.7	38.7	35.7	41.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
			0.471	12.1	15.1	19.9	25.8	31.0	30.4	35.6	35.5	37.7	39.6	47.2	46.2	a.r.		
			0.551	18.43	11.1	15.0	20.2	24.4	25.3	27.8	26.0	31.6	27.7	39.9	39.9	a.r.		
			0.687	14.61	6.76	10.8	15.4	16.9	16.0	17.4	21.0	22.2	19.5	25.7	28.6	a.r.		
			0.850	12.45	3.43	6.18	9.12	11.4	11.5	14.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados
r.p.=resultados perdidos
a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa
a/c=relação água/cimento em massa

(continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	marca	m	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
no.		(kg/kg)	(kg/kg)	2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
64	5	4	0.403	13.9	17.0	24.0	33.1	41.3	42.6	45.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.471	10.0	12.0	19.6	27.9	32.6	33.3	36.8	39.0	38.0	40.4	45.1	48.7	a.r.		
		6	0.562	16.08	8.82	12.9	20.6	24.4	24.8	27.4	27.1	30.2	31.8	34.6	35.7	a.r.		
		7	0.715	13.33	5.39	7.94	14.1	17.8	16.3	20.6	19.0	19.8	20.2	23.5	24.6	a.r.		
		8	0.878	12.35	3.13	5.39	10.3	10.7	13.1	12.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		65	5	4	0.413	10.8	13.0	20.0	25.9	30.5	33.8	35.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.471	19.02	10.4	17.1	23.2	25.4	26.5	32.1	34.7	31.1	36.5	40.6	49.0	a.r.
				6	0.551	16.47	8.63	13.1	18.2	21.6	24.1	26.5	28.7	24.5	27.8	32.4	38.8	a.r.
7	0.674			13.92	5.19	8.63	12.1	15.9	15.8	20.9	21.0	20.0	22.4	23.8	29.0	a.r.		
8	0.822			12.74	3.53	6.47	9.61	13.4	14.8	16.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
66	4			4	0.413	12.8	16.8	24.7	35.0	37.0	38.1	41.9	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.471	10.6	14.7	20.9	29.9	27.4	31.6	34.1	37.9	40.2	32.7	44.8	48.9	a.r.
				6	0.551	17.06	10.2	16.5	22.2	22.6	24.3	25.0	31.6	32.4	28.9	35.8	40.6	a.r.
		7	0.674	13.72	5.78	10.3	16.6	18.2	19.2	18.8	24.4	20.8	21.3	26.6	31.0	a.r.		
		8	0.822	12.25	3.53	7.16	12.4	11.2	11.8	15.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		67	3	4	0.413	12.6	15.7	20.5	27.3	29.9	36.6	43.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.482	18.82	11.2	15.8	23.1	26.3	29.5	33.4	32.4	36.5	34.1	41.0	45.8	a.r.
				6	0.564	16.18	8.63	11.7	18.6	18.3	20.8	25.6	28.8	27.0	28.3	29.9	38.5	a.r.
7	0.687			14.02	5.68	7.35	13.5	13.8	16.1	18.5	19.0	20.9	20.6	23.4	28.8	a.r.		
8	0.822			12.25	3.53	5.29	8.32	11.9	12.8	14.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
68	4			4	0.440	13.3	17.5	22.8	28.7	35.7	39.6	39.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.493	10.1	14.5	21.1	26.8	28.6	33.2	32.5	32.5	37.6	40.2	37.9	50.3	a.r.
				6	0.602	16.08	9.31	15.0	21.1	24.0	25.9	26.4	27.3	30.0	34.4	28.9	36.1	a.r.
		7	0.681	15.00	7.45	13.5	19.3	20.6	21.0	23.4	22.3	24.9	21.3	23.4	30.1	a.r.		
		8	0.788	13.23	5.49	9.41	14.7	15.4	16.6	15.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		69	5	4	0.413	14.5	19.1	26.2	32.2	41.5	43.9	46.7	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.474	10.9	15.1	20.1	29.2	34.8	37.6	40.3	38.3	47.8	48.7	44.9	56.2	a.r.
				6	0.547	17.65	10.5	17.1	23.0	18.4	18.8	20.2	17.8	22.4	24.1	23.4	27.0	a.r.
7	0.690			14.51	6.27	9.12	17.1	17.9	19.4	20.8	21.2	26.5	29.5	21.9	28.6	a.r.		
8	0.813			12.84	4.31	7.16	12.1	13.6	15.7	17.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
70	3			4	0.421	10.6	14.8	20.5	29.0	37.0	38.3	42.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.488	17.84	10.6	17.1	25.4	31.3	33.7	34.6	34.1	35.4	34.9	40.9	48.5	a.r.
				6	0.583	15.10	7.25	11.0	18.4	21.1	25.7	26.9	28.1	28.1	29.7	30.8	37.3	a.r.
		7	0.651	14.21	5.59	8.92	15.5	19.6	21.0	21.9	21.4	24.3	25.5	26.6	30.9	a.r.		
		8	0.805	12.25	3.33	5.39	10.8	14.2	15.0	15.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		71	4	4	0.419	15.4	18.2	26.6	30.0	36.8	37.1	41.3	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.492	12.9	14.5	21.9	23.9	30.4	31.0	33.4	35.7	37.9	32.5	40.1	47.7	a.r.
				6	0.577	19.31	11.3	18.2	20.9	24.9	25.9	27.1	31.4	32.0	25.8	32.4	37.6	a.r.
7	0.688			16.47	8.14	12.7	16.1	19.4	18.5	20.3	23.2	24.6	22.4	23.6	29.9	a.r.		
8	0.808			14.12	5.78	9.02	11.1	13.7	13.8	14.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
72	5			4	0.463	16.86	10.0	21.1	31.9	34.9	36.3	41.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
				5	0.505	15.88	9.31	15.8	26.1	32.3	32.4	36.9	40.0	42.0	35.7	41.6	50.5	a.r.
				6	0.612	13.62	5.00	11.8	19.5	22.9	23.8	29.6	32.0	30.0	29.4	31.9	38.8	a.r.
		7	0.728	12.35	3.33	7.84	14.8	17.3	19.9	21.5	23.5	23.3	19.7	24.0	29.8	a.r.		
		8	0.878	11.66	2.45	5.00	9.61	12.6	13.6	14.8	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados
 r.p.=resultados perdidos
 a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa
 a/c=relação água/cimento em massa
 (continua)

TABELA 7 - traços, relações água/cimento e resistências dos concretos ensaiados a compressão

am.	!	!	!	a/c	Resistências à compressão (MPa)														
no.	marca	(kg/kg)	(kg/kg)		2d.	3d.	7d.	28d.	3m.	6m.	1a.	2a.	3a.	5a.	10a.	25a.	50a.		
73	3	4	0.413		16.76	9.90	15.5	28.1	36.3	37.7	37.4	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.482		14.70	6.08	12.4	20.4	30.4	30.6	33.1	n.p.	37.2	35.7	36.6	49.0	a.r.		
		6	0.564		13.13	4.21	8.82	16.1	25.3	20.7	24.9	n.p.	25.9	27.5	30.9	36.7	a.r.		
		7	0.674		11.76	3.04	5.00	10.6	17.6	17.8	20.4	n.p.	20.4	20.6	22.7	25.5	a.r.		
		8	0.793		10.98	1.47	2.94	7.45	13.2	11.9	16.1	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
74	5	4	0.392		18.04	11.1	23.7	32.4	43.1	n.p.	48.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.471		15.78	8.04	17.5	26.0	27.7	n.p.	31.7	36.1	39.8	40.4	41.8	a.r.	a.r.		
		6	0.577		14.21	5.88	13.0	20.1	21.0	n.p.	23.4	25.4	27.7	30.5	34.5	a.r.	a.r.		
		7	0.674		12.55	4.02	9.31	15.3	16.7	n.p.	16.9	16.3	22.1	25.1	26.1	a.r.	a.r.		
		8	0.822		11.47	2.15	5.39	10.2	15.5	n.p.	15.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
75	4	4	0.413		14.8	18.3	24.1	30.0	35.6	37.1	37.6	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		
		5	0.482		11.9	14.5	21.0	26.0	28.4	31.3	32.9	36.2	38.7	38.8	37.7	a.r.	a.r.		
		6	0.564		18.33	11.0	16.9	21.3	23.1	20.4	25.0	29.1	31.9	30.6	28.0	a.r.	a.r.		
		7	0.674		15.39	7.74	12.3	17.5	20.0	18.7	19.8	22.8	20.7	24.0	25.2	a.r.	a.r.		
		8	0.808		13.92	5.49	8.24	12.8	11.8	11.5	13.2	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.		

n.p.=ensaios não programados

r.p.=resultados perdidos

a.r.=aguardam-se resultados

m=teor agregado/cimento em massa

a/c=relação água/cimento em massa

ANEXO VI

TABELA 8

TABELA B - coeficientes das equações 81, 82, 73 e 74 calculados por regressão múltipla

am. no.	n. casos	primeira equação (*)						segunda equação (**)							
		r2	s	log A	log B	log C	gh'	r2	s	log A	log B	log D	log E	gh' max	gh'
1	47	0.9842	0.0429	2.0166	0.86194	1.83909	0.469	0.9874	0.0387	2.11769	1.01656	1.29528	0.35384	0.785	2.073
2	53	0.9805	0.0468	2.03877	0.8322	1.54685	0.538	0.9891	0.0354	2.16934	1.01784	0.80804	0.52628	1.260	1.934
3	52	0.9804	0.0389	1.98948	0.77396	1.42205	0.544	0.982	0.0376	2.04096	0.8541	1.10246	0.2082	0.775	4.102
4	52	0.9549	0.0599	1.98323	0.85799	1.30078	0.660	0.9626	0.0551	2.09177	1.02727	0.64949	0.42536	1.582	2.415
5	51	0.9724	0.053	1.96696	0.80329	1.61823	0.496	0.9755	0.0505	2.04482	0.92489	1.15124	0.30353	0.803	3.047
6	53	0.9724	0.0635	2.01996	0.83662	2.17865	0.384	0.9793	0.0557	2.16377	1.07086	1.25193	0.57744	0.855	1.854
7	52	0.9662	0.0534	2.01981	0.855	1.5146	0.565	0.9749	0.0465	2.1457	1.06057	0.70711	0.50341	1.500	2.107
8	52	0.9619	0.0478	1.93489	0.76711	1.24231	0.617	0.9636	0.0472	1.98417	0.84518	0.93706	0.1952	0.902	4.330
9	43	0.9588	0.0594	2.02241	0.84408	1.44055	0.586	0.9622	0.0576	2.10738	0.98032	0.95386	0.30651	1.028	3.198
10 #	49	0.9565	0.0635	1.99864	0.85519	1.48523	0.576	0.9567	0.0641	2.01489	0.88026	1.38984	0.06159	0.633	14.292
11 #	50	0.9783	0.0411	2.01671	0.91763	1.29572	0.708	0.9785	0.0414	2.0353	0.94646	1.18643	0.07141	0.798	13.254
12 #	47	0.9777	0.0372	1.89789	0.76969	1.15324	0.667	0.9778	0.0375	1.91164	0.79072	1.07422	0.05228	0.736	15.125
13	14	0.9627	0.0314	1.83623	0.5932	0.7846	0.756	0.9688	0.0301	1.94299	0.75669	0.23505	0.35885	3.219	2.109
14	50	0.9745	0.0413	2.03829	0.9343	1.27277	0.734	0.9795	0.0374	2.12749	1.08084	0.71472	0.34458	1.512	3.137
15	49	0.9725	0.0445	2.07047	0.94956	1.37287	0.692	0.9747	0.0431	2.13617	1.06048	0.97148	0.24177	1.092	4.386
16	49	0.9872	0.0306	1.94074	0.79943	1.45655	0.549	0.9877	0.0302	1.97465	0.85421	1.25181	0.12802	0.682	6.672
17 #	16	0.9776	0.0267	2.04246	0.77506	1.22577	0.632	0.978	0.0275	1.99816	0.68876	1.55155	0.16722	0.444	4.119
18	49	0.9694	0.04	2.17166	1.035	1.06512	0.972	0.9701	0.0399	2.2008	1.08503	0.87227	1.11352	1.244	0.974
19 #	12	0.9744	0.0218	1.9667	0.67025	0.852	0.787	0.9744	0.0231	1.96528	0.66749	0.86025	-0.00423	0.776	-157.799
20	50	0.9757	0.0609	2.03747	0.97248	1.79528	0.542	0.9786	0.0577	2.12446	1.10156	1.30097	0.33864	0.847	3.253
21	50	0.9783	0.0468	1.95127	0.77356	1.41938	0.545	0.9832	0.0417	2.04522	0.90617	0.90693	0.3677	0.999	2.464
22	50	0.9863	0.0351	1.95188	0.78563	1.37877	0.570	0.9877	0.0337	1.9918	0.85807	1.10342	0.19234	0.778	4.461
23 #	49	0.9814	0.0408	2.06575	1.02909	1.3812	0.745	0.9815	0.041	2.04597	0.99897	1.49861	-0.07792	0.667	-12.820
24	50	0.9825	0.0417	2.06279	1.0001	1.5152	0.660	0.989	0.0334	2.17733	1.18064	0.83029	0.43987	1.422	2.684
25	50	0.9769	0.041	2.05387	0.99305	1.30223	0.763	0.9794	0.0392	2.11674	1.09637	0.90541	0.24462	1.211	4.482
26 #	50	0.9804	0.0422	2.00472	0.92153	1.55331	0.593	0.9816	0.0414	2.05261	0.99895	1.25727	0.18536	0.795	5.389
27	49	0.9607	0.0711	1.98233	0.85348	1.92668	0.443	0.9668	0.0661	2.10408	1.05282	1.16025	0.4749	0.907	2.217
28	50	0.9786	0.0517	2.04635	0.9755	1.88774	0.517	0.9821	0.0477	2.14167	1.13122	1.28522	0.37359	0.880	3.028
29	47	0.9588	0.0666	1.93177	0.80712	1.69439	0.476	0.9724	0.0551	2.10411	1.00303	0.65498	0.6566	1.654	1.649
30	50	0.9742	0.0506	1.84017	0.68494	1.82567	0.375	0.9792	0.046	1.94557	0.86106	1.14956	0.41066	0.749	2.097
31	50	0.9852	0.0365	2.09045	0.99997	1.55337	0.644	0.9873	0.0342	2.15458	1.10637	1.14365	0.25045	0.967	4.418
32 #	50	0.9803	0.0489	1.98913	0.90036	1.94883	0.462	0.9803	0.0494	1.99508	0.91017	1.91042	0.02359	0.476	38.583
33	50	0.9599	0.0546	1.97661	0.90118	1.38299	0.652	0.9671	0.05	2.08395	1.07841	0.69659	0.42084	1.548	2.563
34	50	0.9681	0.0442	1.95385	0.83615	1.33533	0.626	0.9698	0.0435	2.00536	0.92354	1.00003	0.20036	0.924	4.609
35	50	0.9892	0.0358	1.98722	0.8118	2.13556	0.300	0.9896	0.0355	2.02544	0.87734	1.8797	0.15062	0.467	5.825
36	50	0.9727	0.0447	1.98986	0.93934	1.32996	0.706	0.9777	0.0408	2.07853	1.08701	0.76838	0.34272	1.415	3.172
37	49	0.97	0.0637	1.91831	0.77103	2.17952	0.354	0.9878	0.0411	2.15956	1.17488	0.6483	0.9231	1.812	1.273
38	46	0.9823	0.0478	1.98809	0.82055	1.86727	0.439	0.9896	0.0371	2.11803	1.03147	1.06431	0.50429	0.969	2.045
39	47	0.9747	0.054	1.90455	0.83199	1.74941	0.476	0.9829	0.0499	2.03843	1.04961	0.93578	0.50904	1.122	2.062
40	50	0.9598	0.0609	2.06866	1.00892	1.57943	0.639	0.9656	0.057	2.18551	1.20058	0.82436	0.46637	1.456	2.574

r2=coeficiente de correlação ao quadrado

s=desvio padrão de previsão de log fc

(*) ver equação 81 ou 73 no texto

(**) ver equação 82 ou 74 no texto

#=1a. Equação já satisfaz

(continua)

TABELA 8 - coeficientes das equações 81, 82, 73 e 74 calculados por regressão múltipla

am. no.	n. casos	primeira equação (*)						segunda equação (**)							
		r ²	s	log A	log B	log C	gh'	r ²	s	log A	log B	log D	log E	gh' max	gh'
41	50	0.9654	0.0608	2.0805	0.9795	1.75216	0.559	0.9741	0.0532	2.22658	1.22107	0.7886	0.59113	1.548	2.066
42	50	0.9599	0.0752	1.89222	0.78106	2.1304	0.367	0.9773	0.0571	2.11754	1.15443	0.67765	0.89114	1.704	1.295
43 #	50	0.9423	0.0737	2.05903	1.00231	1.5783	0.635	0.9431	0.074	2.10307	1.07503	1.3015	1.6967	0.826	0.634
44	50	0.9654	0.0612	1.9657	0.7988	1.94313	0.411	0.9725	0.0551	2.10554	1.03514	1.01431	0.55536	1.021	1.864
45	50	0.9701	0.051	1.97072	0.77556	1.69832	0.457	0.9775	0.045	2.09142	0.97861	0.91172	0.47337	1.073	2.067
46	47	0.9713	0.0565	2.05783	0.96475	1.77801	0.543	0.9754	0.0529	2.16137	1.14103	1.12962	0.38779	1.010	2.942
47	50	0.9511	0.0587	2.07971	0.96053	1.30698	0.735	0.954	0.0575	2.1479	1.07462	0.86832	0.26599	1.238	4.040
48	50	0.9627	0.0679	2.06074	0.95594	1.85084	0.516	0.9708	0.0607	2.20654	1.19135	0.94347	0.56867	1.263	2.095
49	37	0.9919	0.0319	2.07978	0.86769	1.8607	0.466	0.9927	0.0309	2.13438	0.96042	1.57345	0.1713	0.610	5.607
50	50	0.9784	0.0432	2.07981	1.0064	1.49105	0.675	0.9788	0.0432	2.10701	1.05128	1.31644	0.10719	0.799	9.808
51	50	0.9829	0.0364	2.09978	0.99975	1.40896	0.710	0.9837	0.0359	2.13832	1.0631	1.16351	0.15116	0.914	7.033
52	50	0.9766	0.0411	2.13221	0.94209	1.40616	0.670	0.9798	0.0386	2.20534	1.06521	0.93172	0.28526	1.143	3.734
53	50	0.9753	0.046	1.94115	0.79447	1.71791	0.462	0.9774	0.0445	2.01019	0.91233	1.26455	0.26861	0.721	3.396
54 #	50	0.9785	0.0448	1.97574	0.84061	1.74916	0.481	0.9786	0.0452	1.99052	0.86556	1.65227	0.05816	0.524	14.882
55	50	0.9859	0.0422	2.00636	0.8156	2.22808	0.366	0.987	0.041	2.06388	0.91704	1.83248	0.22722	0.500	4.036
56	50	0.9757	0.0432	1.97067	0.77112	1.5389	0.501	0.9862	0.0329	2.10177	0.99063	0.67491	0.52258	1.468	1.896
57	50	0.9763	0.0419	1.95151	0.79484	1.54475	0.515	0.9866	0.0319	2.0931	1.03131	0.6161	0.56192	1.674	1.835
58	50	0.9539	0.0638	1.97344	0.8042	1.59541	0.504	0.9665	0.055	2.13537	1.06987	0.58022	0.62773	1.844	1.704
59	50	0.9795	0.0408	1.96738	0.75973	1.62871	0.466	0.9819	0.0388	2.0392	0.87906	1.16996	0.27947	0.751	3.145
60	50	0.9812	0.0456	2.0178	0.77051	1.89703	0.406	0.9879	0.0369	2.15278	0.988	1.04188	0.53529	0.948	1.846
61	50	0.9682	0.0447	2.01763	0.79494	1.42908	0.556	0.9702	0.0437	2.08041	0.9018	1.02613	0.23931	0.879	3.768
62	49	0.9783	0.0458	2.06251	0.93395	1.63453	0.571	0.979	0.0456	2.10125	0.99792	1.3919	0.14912	0.717	6.692
63	50	0.9722	0.0498	2.01221	0.93447	1.4435	0.647	0.976	0.0468	2.09223	1.06533	0.94394	0.31133	1.129	3.422
64	50	0.9782	0.0486	1.99024	0.86192	1.61038	0.535	0.9892	0.0346	2.13024	1.08437	0.75189	0.5509	1.442	1.968
65	50	0.9664	0.0546	1.8512	0.68965	1.66302	0.415	0.9746	0.048	1.97657	0.8979	0.86532	0.48842	1.038	1.838
66	50	0.9708	0.0527	2.01963	0.91555	1.61438	0.567	0.9734	0.0509	2.092	1.03576	1.1539	0.28194	0.898	3.674
67	50	0.9693	0.0541	1.96382	0.88755	1.62474	0.546	0.9749	0.0495	2.0721	1.06471	0.94642	0.42069	1.125	2.531
68	50	0.9702	0.0461	1.96831	0.79218	1.47669	0.536	0.9742	0.0433	2.06093	0.94269	0.89407	0.3619	1.054	2.605
69	50	0.9195	0.0835	1.99642	0.88683	1.4798	0.599	0.9214	0.0834	2.05494	0.98349	1.10353	0.23121	0.891	4.254
70	50	0.9851	0.0392	1.97859	0.8323	1.8351	0.454	0.9907	0.0314	2.10684	1.04532	1.04201	0.48417	1.003	2.159
71	50	0.9643	0.0464	1.97971	0.8594	1.23391	0.696	0.973	0.0408	2.0948	1.04687	0.51726	0.44521	2.024	2.351
72	50	0.9765	0.0586	1.96026	0.71993	2.05274	0.351	0.9896	0.0393	2.16931	1.04029	0.80937	0.82409	1.285	1.262
73	47	0.987	0.0491	1.99398	0.88525	2.52093	0.351	0.9911	0.0412	2.13261	1.11517	1.66087	0.52414	0.671	2.128
74	42	0.9697	0.0675	1.90554	0.70671	2.12125	0.333	0.981	0.0541	2.11519	1.05229	0.96894	0.70872	1.086	1.485
75	47	0.9672	0.0457	1.95872	0.87397	1.2507	0.699	0.9777	0.0381	2.08658	1.08485	0.46756	0.48054	2.320	2.258

r²=coeficiente de correlação ao quadrado

s = desvio padrão de previsão de log fc

(*) ver equação 81 ou 73 no texto

(**) ver equação 82 ou 74 no texto

#=1a. Equação já satisfaz