

DARIO DE ARAÚJO DAFICO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DOSAGEM DO
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

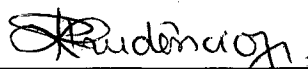
**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

ORIENTADOR : Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

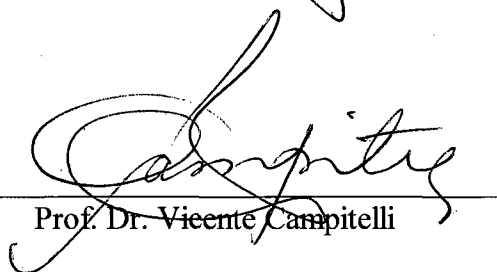
**Santa Catarina
1997**

FOLHA DE APROVAÇÃO


Dissertação defendida e aprovada em 23/05/97
pela comissão examinadora



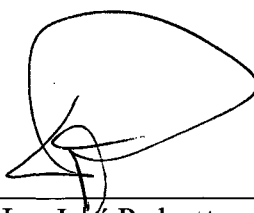
Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. - Orientador - Moderador



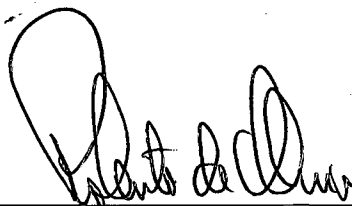
Prof. Dr. Vicente Campitelli



Prof. Dr. Ruy Alberto Cremonini



Prof. Dr. Ivo José Padaratz



Prof. Dr. Roberto de Oliveira - Coordenador do CPGEC

Aos meus pais José e Ana, que me ensinaram a reconhecer e enfrentar os mais longos e tortuosos caminhos que conduzem à minha porta. E à minha esposa Adriana, que esteve ao meu lado durante toda a caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me dado a vida, boa saúde e vontade de realizar.

Ao meu pai José, que além de bom pai, sendo engenheiro e professor dedicado, tem sido o modelo por mim perseguido.

À minha mãe, que além de boa mãe, como minha primeira professora, me proporcionou a base sólida para que pudesse caminhar com segurança.

À minha esposa Adriana, que esteve sempre ao meu lado dando apoio e incentivo.

Agradeço à Capes que, através do Programa de Incentivo à Capacitação Docente, me concedeu a bolsa de estudos.

Agradeço à Universidade Católica de Goiás, que me concedeu a licença do Departamento de Engenharia para os estudos de pós-graduação. Da UGC meus agradecimentos especiais :

- Da Reitoria ao Prof^o Ivo Mauri e à atual Reitora Prof^a Clélia Brandão;
- Da VPG ao Prof^o Italiano Monini, ao Prof^o José Baldino, e à Sra. Dalva Coseco, que se preocupou em nunca me deixar esquecer dos prazos;
- Do Departamento de Engenharia, ao irmão e amigo Prof^o Alberto Dafico que, de tanto, me faltam até palavras. Ao também amigo de longa data, Prof^o Argemiro Mendonça, Diretor do Departamento, que tem me dado imenso apoio em todas minhas solicitações. E a todos os colegas do Departamento, que me apoiaram unanimemente no meu pedido de licença para o mestrado.

Agradeço também à todos os professores, funcionários e colegas do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, que sempre foram gentis e solícitos. Da UFSC meus agradecimentos especiais :

- Ao amigo e orientador da minha dissertação, Prof^o Luiz Prudêncio, que me orientou com grande dedicação.
- Ao amigo e professor do mestrado, Prof^o Luiz Heineck, que tem sido um grande divulgador do curso por todo o Brasil.

SUMÁRIO

Resumo.....	VI
Abstract.....	VII
Notação e nomenclatura.....	VIII
Lista de figuras.....	X
Lista de tabelas.....	XIV
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO I	
OS CRITÉRIOS PARA ESTABELECIMENTO DA RESISTÊNCIA DE DOSAGEM E O CONTROLE DE QUALIDADE	
1.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE A NORMA BRASILEIRA DE CÁLCULO, DOSAGEM E CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO.....	7
1.2 RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA E RESISTÊNCIA DE DOSAGEM.....	9
1.3 ESTABELECIMENTO DO DESVIO-PADRÃO DE UMA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE DOSAGEM.....	11
1.4 VARIABILIDADE REAL E VARIABILIDADE APARENTE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO E ENSAIO.....	12
1.5 INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DO CIMENTO NA VARIABILIDADE DE UMA PRODUÇÃO DE CONCRETO.....	15
1.6 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES À RESPEITO DA NORMA NBR-12655/96.....	21
CAPÍTULO II	
O ESTUDO DA DOSAGEM DO CONCRETO	
2.1 OBJETIVO DE UM ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO.....	25
2.2 O ESTUDO DE TRABALHABILIDADE DO CONCRETO.....	27
2.3 A ÁGUA DO CONCRETO.....	29
2.4 SEQUÊNCIA GERAL DE UM ESTUDO DE DOSAGEM.....	32
2.4.1 Estudo das cinco condições que o concreto deverá atender.....	32
2.4.1.1 Exigências de projeto.....	33
2.4.1.2 Condições de exposição e operação.....	33
2.4.1.3 Tipo de agregado disponível economicamente.....	33

2.4.1.4 Técnicas de execução	33
2.4.1.5 Custo	34
2.4.2 Decisão sobre materiais e parâmetros de dosagem.....	34
2.4.3 Realização de ensaios preliminares.....	34
2.4.4 Cálculo analítico do traço provável.....	34
2.4.5 Elaboração de mistura experimental.....	34
2.4.6 Ajuste experimental ou analítico do traço.....	35
2.4.7 Ajustes periódicos.....	35

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO SUCINTA E ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE ALGUNS MÉTODOS DE DOSAGEM CONHECIDOS NO BRASIL

3.1 MÉTODO DA ABCP/ACI.....	36
3.1.1 Fundamentos básicos.....	36
3.1.2 Principais requisitos de projeto	37
3.1.3 Ensaio preliminares necessários	37
3.1.4 Etapas da dosagem	37
3.1.5 Vantagens e desvantagens do método	39
3.2 MÉTODO IPT / EPUSP.....	40
3.2.1 Fundamentos básicos.....	40
3.2.2 Principais requisitos de projeto	41
3.2.3 Ensaio preliminares necessários	41
3.2.4 Etapas da dosagem	41
3.2.5 Vantagens e desvantagens do método	42
3.3 MÉTODO DO INT.....	43
3.3.1 Fundamentos básicos.....	43
3.3.2 Principais requisitos de projeto	43
3.3.3 Ensaio preliminares necessários	43

3.3.4	Etapas da dosagem	44
3.3.5	Vantagens e desvantagens do método	45
3.4	MÉTODO DO ITERS / CIENTEC	46
3.4.1	Fundamentos básicos.....	46
3.4.2	Principais requisitos de projeto	46
3.4.3	Ensaio preliminares necessários	47
3.4.4	Etapas da dosagem	47
3.4.5	Vantagens e desvantagens do método	48
3.5	MÉTODO CUBANO.....	50
3.5.1	Fundamentos básicos.....	50
3.5.2	Principais requisitos de projeto	50
3.5.3	Ensaio preliminares necessários	51
3.5.4	Etapas da dosagem	51
3.5.5	Vantagens e desvantagens do método	52

CAPÍTULO IV ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	54
4.1.1	Problematização.....	54
4.1.2	Hipóteses	56
4.1.2.1	Hipótese geral	56
4.1.2.1	Hipóteses adjacentes	56
4.1.3	Objetivos.....	57
4.1.3.1	Objetivos gerais	57
4.1.3.2	Objetivos específicos	57
4.2	ESTUDO DA VARIABILIDADE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO DEVIDA À VARIABILIDADE DO CIMENTO - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	58
4.2.1	Introdução e objetivos.....	58

4.2.2	Execução de ensaios e obtenção de dados de outros trabalhos	58
4.2.2.1	Dosagem de concretos e ensaios de cimento de amostras semanais de um mesmo cimento	58
4.2.2.2	Tratamento de dados fornecidos através de outros trabalhos	63
4.2.3	Análise de resultados.....	65
4.2.3.1	Influência das variabilidades na curva de Abrams encontrada.....	65
4.2.3.2	Desvio-padrão da resistência do cimento e do concreto.....	74
4.2.3.3	O Fator de Eficiência de um cimento.....	77
4.3	ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS PARA COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES TIPOS E MARCAS DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	89
4.3.1	Introdução e objetivos.....	89
4.3.2	Programação e execução de ensaios.....	89
4.3.2.1	Dosagens de concretos de mesmos parâmetros de dosagem com diferentes tipos e marcas de cimento	89
4.3.2.2	Dosagens de concretos com diferentes parâmetros de dosagem	91
4.3.3	Análise dos resultados.....	92
4.3.3.1	Curvas de regressão entre resistência do cimento e resistência do concreto utilizados para dosagem.....	92
4.3.3.2	A demanda de água do cimento e a lei de Lyse.....	97
4.3.3.3	A influência da demanda de água do cimento no consumo de cimento pelo concreto.....	99
4.3.3.4	Equações de Abrams, do traço "m" em função da relação a/c e de Molinari para os concretos estudados.....	107
4.3.3.5	Estudo da influência do abatimento do concreto, do teor de argamassa e do dimensão máxima característica do agregado, na resistência e no consumo de cimento.....	110
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	119
	ANEXOS	120
	BIBLIOGRAFIA	149

RESUMO

O estudo das quantidades adequadas de cada componente de uma mistura de concreto, de forma que o material atenda às especificações de projeto e condições da obra, é de fundamental importância para a construção de uma estrutura de concreto. Apesar da existência de vários métodos de dosagem, verifica-se uma limitação comum à todos eles, que é a antecipação do valor da resistência à compressão. As diferenças entre os valores previstos pelos distintos métodos indicam a necessidade de maiores investigações a respeito dos fatores que influenciam nesses resultados.

O estudo da influência de vários fatores sobre a resistência do concreto, já citados por diversos pesquisadores, é realizado no presente trabalho. Através de um estudo de caso, verifica-se a influência da resistência, finura e teor de adições do cimento na resistência à compressão do concreto, e é um dos principais objetivos deste estudo. Para isso foram dosadas várias misturas, utilizando-se de diferentes tipos de cimento consumidos na região da grande Florianópolis, para que a alteração na composição química, finura e teor de adições do cimento, e conseqüentemente sua influência no concreto, pudesse ser facilmente identificada.

Testou-se também o efeito dos erros de dosagem e ensaio, tanto do cimento quanto do concreto, para verificar até que ponto um estudo de dosagem consegue fornecer informações seguras a respeito do concreto que se irá produzir. Utilizou-se ainda no presente estudo, de dados provenientes de trabalhos de outros pesquisadores, com o objetivo de estudar a influência da composição química do cimento na resistência do concreto.

Os resultados obtidos indicam a conveniência da realização de um maior número de misturas nos estudos de dosagem, para que o diagrama de dosagem represente de modo mais confiável a característica resistente média do concreto que se irá produzir. Mostram também que, em certos casos, a finura e teor de adições do cimento influenciam de maneira significativa o seu consumo pelo concreto. Verifica-se ainda que a lei de Lyse não se ajusta bem aos casos de concretos de baixas relações água/cimento dosados com cimentos finos e de elevados teores de adições. Dentre outros resultados, também foram obtidos indícios da existência de fenômenos ligados à composição química do cimento, que provocam a alteração na resistência do cimento, de modo diferente do que no concreto de mesma relação água/cimento.

ABSTRACT

The study of adequate quantities for each component of a mixture, in a way that the concrete fulfills the project's conditions and specifications, is of great importance in the building of a concrete structure. Despite the existence of several methods of proportioning concrete mixtures, it was found a common limitation in all of them. That is the prediction of the compressive strength value. The differences between the values estimated through different methods indicate the necessity of deeper knowledge concerning the factors that influence the results.

The study of the influence of several factors over the concrete compressive strength, mentioned by many researches already, is achieved in this work. Through a carried out study, it was verified the influence of the cement compressive strength, fineness and its content of mineral admixtures, in the concrete compressive strength, and this is one of the main objectives of this study. For this, it was done a variety of concrete mixtures trying out different kinds of cement used in the Florianópolis region, in such a way that the alterations in the cement chemical composition, fineness and its content of mineral admixtures, could be easily identified.

It was also tried the effects of errors in the mixture proportioning and testing for the cement and the concrete. That was done to verify to what can a mixture proportioning study provide reliable information about the concrete production. Also in this study it was used data from other researches, aiming to study the influence of the cement's chemical composition in the concrete compressive strength.

The results obtained point to the advantages of making a greater number of mixtures in the mixture proportioning study. So, the mixture proportioning diagram will represent more accurately the characteristics of the average concrete compressive strength to be produced. It also shows that in certain cases, the cement fineness and content of mineral admixtures, have significant influence in the cement's consumption by the concrete. It was also verified that Lyse's law does not apply to a concrete with low water / cement ratio and fine cement. Among other results, it was also obtained signs that the alteration of the cement's chemical composition change the cement compressive strength differently from the concrete with same water / cement ratio.

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

- f_{cj} - resistência à compressão do concreto à " j " dias de idade, em MPa ;
- f_{ccj} - resistência à compressão do cimento no ensaio normal à " j " dias de idade, em MPa ;
- $f_{ccj(m)}$ - resistência à compressão média do cimento à " j " dias de idade, com a/c = 0,48, em MPa;
- A e B - constantes da curva de Abrams que dependem do cimento e agregados utilizados;
- a/c - relação água/cimento do concreto;
- $(a/c)_m$ - relação água/cimento média do concreto, em Kg/Kg;
- S_c - desvio-padrão de produção e ensaio de uma amostra de concreto;
- S_d - desvio-padrão de dosagem;
- S_n - desvio-padrão da amostra n;
- σ_{cj} - desvio-padrão (população) da resistência à compressão do concreto a " j " dias de idade, em MPa;
- σ_{ccj} - desvio-padrão (população) da resistência à compressão do cimento, em MPa;
- $\sigma_{a/c}$ - desvio-padrão da relação a/c do concreto, em Kg/Kg;
- σ_e - desvio padrão das operações de ensaio, em MPa.
- N - número de exemplares da amostra;
- f_i - resistência à compressão do exemplar "i" (um exemplar é o valor que representa uma amassada, e é representado pelo valor mais alto do corpo-de-prova da amassada);
- \bar{f} - média dos valores de todos f_i .

- K - constante qualquer;
- α - teor de argamassa do concreto;
- m - traço;
- H - relação água / materiais secos;
- C - consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
- Ic - índice de consistência;
- HN - água da pasta de consistência normal;
- r - coeficiente de correlação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de correlação entre a resistência do concreto para a/c fixa em torno de um valor médio, em função da resistência do cimento, encontradas a partir do estudo com os cimentos A, B e C.....	20
Figura 2 - Mudança na centragem da média do processo de produção e ensaio do concreto em função do tempo, como decorrência da variação de alguns fatores que influem na resistência à compressão do concreto.....	22
Figura 3 - Sentido de evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo.....	26
Figura 4 - A porcentagem de água/ materiais secos "H" é praticamente independente do traço para um mesmo abatimento.....	30
Figura 5 - Variação do traço "m" com a relação água/cimento "a/c" considerando a relação água/ materiais secos "H" constante	31
Figura 6 - Curvas de trabalhabilidade do método do ITERS / CIENTEC.....	48
Figura 7 - Curvas de Abrams para a idade de 3 dias do concreto obtidas a partir de três amostras diferentes do mesmo cimento.....	70
Figura 8 - Curvas de Abrams para a idade de 28 dias do concreto obtidas a partir de três amostras diferentes o mesmo cimento.....	70
Figura 9 - Curva de Abrams do concreto aos 3 dias de idade com os limites de confiança da média obtida a partir de 9 misturas efetuadas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.....	73
Figura 10 - Curva de Abrams do concreto aos 28 dias de idade.....	74
Figura 11 - Sequência das resistências das amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32 na idade de 3 dias (f_{cc3}), e dos concretos (f_{c3}) correspondentes de relações a/c=0,48	77
Figura 12 - Sequência das resistências das amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32 na idade de 28 dias (f_{cc28}) e dos concretos (f_{c28}) correspondentes de relações a/c=0,48.....	78

Figura 13 - Sequência do fator de eficiência para a idade de 3 dias.....	79
Figura 14 - Sequência do fator de eficiência para a idade de 28 dias.....	79
Figura 15 - Sequência das resistências do cimento " A " e dos concretos correspondentes de relação $a/c = 0,48$	80
Figura 16 - Sequência das resistências do cimento " B " e dos concretos correspondentes de $a/c = 0,48$	80
Figura 17 - Sequência das resistências do cimento " C " e dos concretos correspondentes de $a/c = 0,48$	81
Figura 18 - Sequência do fator de eficiência do cimento " A "	81
Figura 19 - Sequência do fator de eficiência do cimento "B".....	82
Figura 20 - Sequência do fator de eficiência do cimento " C "	82
Figura 21 - Quadro-resumo da estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " A " com a finura e composição química	83
Figura 22 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " B " com a finura e composição química	84
Figura 23 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " C " com a finura e composição química, com comprovação de validade estatística	85
Figura 24 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " C " com a composição química, independente da finura, com comprovação de validade estatística	86
Figura 25 - Estatística de regressão da resistência do cimento " C " com a finura e a composição química, com comprovação de validade estatística	87
Figura 26 - Estatística de regressão da resistência do cimento " C " com a composição química, independente da finura, com comprovação de validade estatística	88

Figura 27 -Variação da resistência do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, na idade "j", com a correspondente resistência do cimento	93
Figura 28 - Curvas de correlação entre a resistência do cimento e do concreto para a/c fixa	94
Figura 29 - Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 35 MPa	95
Figura 30 - Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 40 MPa	96
Figura 31 - Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 44 MPa	96
Figura 32 - Curvas de Lyse para os concretos feitos com os vários cimentos estudados	98
Figura 33 - Variação da relação água/materiais secos em função da relação água/cimento para diferentes cimentos	98
Figura 34 -Regressão entre os valores do ensaio da água da pasta de consistência normal com o índice de consistência para cinco tipos / marcas de cimento.....	100
Figura 35 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação a/c = 0,38	101
Figura 36 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação a/c = 0,48	101
Figura 37 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação a/c = 0,38	102
Figura 38 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da relação a/c e da água da pasta de consistência normal, aos 28 dias.....	103
Figura 39 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da resistência do cimento f_{cc28} , da resistência do concreto f_{c28} e da água da pasta de consistência normal, para todos os cimento, aos 28 dias de idade.....	105

- Figura 40 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da resistência do cimento f_{cc28} , da resistência do concreto f_{c28} e da água da pasta de consistência normal, para os cimentos Itambé CPI-S-32, Itambé ARI e Votoran CPI-S-32, aos 28 dias de idade..... 106
- Figura 41 - Consumo de cimento em função da resistência de dosagem do concreto para os cinco cimentos utilizados no estudo 107
- Figura 42 - Influência da dimensão máxima característica do agregado nas curvas de Abrams de concretos com mesmos teores de argamassa e abatimento..... 111
- Figura 43 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto com brita 1 e 2 e o concreto só com brita 1..... 111
- Figura 44 - Influência do teor de argamassa nas curvas de Abrams de concretos com mesmos agregados e abatimento..... 112
- Figura 45 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto com teor de argamassa igual a 50 % e o concreto com teor de argamassa igual a 56 %.. 112
- Figura 46 - Influência do abatimento nas curvas de Abrams de concretos com mesmos teores de argamassa e dimensão máxima característica do agregado..... 113
- Figura 47 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto de abatimento igual a 60 mm e o concreto de abatimento de 100 mm..... 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições típicas de erros de produção e ensaio.....	14
Tabela 2 - Desvio-padrão de dosagem em função da condição de preparo da NBR-12655/96....	23
Tabela 3 - Desvio-padrão de dosagem em função da condição de preparo sugeridos por Helene	24
Tabela 4 - Influência da área específica do cimento na tensão limite de cisalhamento de pastas de relação água/cimento igual a 0,40	28
Tabela 5 - Quadro-resumo das características dos materiais usados nas dosagens de concreto.	59
Tabela 6 - Valores das dosagens e resistências à compressão dos concretos feitos com as 14 amostras do cimento Votoran CPI-S-32.....	61
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência das amostras do cimento Votoran CPI-S-32 e ensaios de índice de consistência	63
Tabela 8 - Características dos concretos das “Dosagens do Mês”.....	64
Tabela 9 - Tabela dos valores da constante d_2 em função do número de corpos-de-prova moldados simultaneamente	67
Tabela 10 - Tabela dos desvios-padrão do concreto aos 3 e 28 dias	69
Tabela 11 - Tabela dos parâmetros das equações de Abrams e valores dos multiplicadores / divisores que dão os limites inferior e superior de cada curva média, para a idade de 28 dias, no ponto de relação $a/c = 0,48$, obtidos de misturas feitas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.....	71
Tabela 12 - Parâmetros das equações de Abrams e valores dos multiplicadores / divisores que dão os limites inferior e superior de cada curva média, para a idade de 28 dias, no ponto de relação $a/c = 0,48$, quando as equações são obtidas aumentando-se o número "N" de dados obtidos de misturas feitas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.....	72
Tabela 13 - Desvios-padrão calculados pela equação teórica deduzida por Fusco (1975) e diretamente das resistências dos concretos pela equação do desvio-padrão.....	75

Tabela 14 - Desvios-padrão do cimento aos 3 e 28 dias.....	77
Tabela 15 - Valores das resistências à compressão e traços obtidos das dosagens realizadas com os diferentes cimentos	90
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e caracterização dos cimentos.	91
Tabela 17 - Valores das resistências obtidas dos concretos dosados com diferentes parâmetros de dosagem e os parâmetros de cada traço	92
Tabela 18 -Tabela com os coeficientes de correlação " r " para todos os cimentos em conjunto	92
Tabela 19 - Coeficientes de correlação na regressão linear para C x Ic e para C x HN	100

INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é um material para construção que se constitui da mistura de agregado miúdo e agregado graúdo, cimento, água, e eventualmente aditivos orgânicos ou minerais, que endurece por reação do cimento com a água, e se convenientemente adensado, durante a hidratação tende a colmatar os espaços vazios. O aglomerado que se forma após o endurecimento da mistura possui várias características que o torna um material ideal para construção de estruturas, ou outros fins. Dentre elas destacam-se o fato do concreto, desde que convenientemente dosado, possuir uma das melhores relações custo/resistência mecânica entre os materiais estruturais, ter baixa permeabilidade e ainda grande estabilidade frente aos mais diversos meios agressivos.

É o material mais largamente utilizado em construção civil no mundo. Em muitos países, o consumo de concreto é 10 vezes maior que o de aço. Em artigo publicado pela revista Scientific American em 1964, cita-se que o consumo mundial total de concreto no ano anterior fora estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água. Hoje estima-se que o atual consumo mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano (Mehta & Monteiro, 1994).

Mehta & Monteiro (1994) também afirmam que apesar do concreto não ser nem tão resistente nem tão tenaz quanto o aço, há algumas razões para ser o material mais largamente usado na engenharia, quais sejam :

- Possui excelente resistência à água, podendo ser utilizado na construção de barragens, canais, tanques, aquedutos, pontes, túneis, pavimentos, etc.;
- Pode receber armaduras de aço e outros materiais, aumentando suas propriedades mecânicas de acordo com as necessidades da obra;
- Pode ser moldado em várias formas e tamanhos, propiciando grande liberdade de projeto arquitetônico;
- É o material estrutural normalmente mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras;
- É o material estrutural que consome menor energia total na fabricação, incluídos aí a energia para fabricação do cimento e extração e britagem dos agregados;

- E ainda pode receber grande quantidade de restos industriais em substituição de parte do cimento ou agregados, diminuindo os custos e ainda contribuindo com a conservação do meio ambiente.

Na reação de hidratação do cimento no concreto, os compostos formados vão aos poucos preenchendo os vazios da mistura, formando uma massa sólida que, com o tempo, adquire as propriedades mecânicas que dele se espera. O sólido que se forma após o endurecimento da mistura tem como uma de suas características principais possuir um valor alto entre a relação resistência à compressão e resistência à tração, sendo da ordem de 10 vezes o valor dessa relação.

Powers (1968) demonstrou que a resistência à compressão do concreto está diretamente relacionada à porosidade da pasta, que por sua vez é função da relação a/c do concreto, do grau de hidratação do cimento e do teor de ar (Sobral, 1977). Por outro lado, a resistência à tração do concreto, especialmente importante nas peças sujeitas a esforços de flexão, correlaciona-se muito bem com a resistência à compressão (Bucher & Rodrigues, 1983; Macedo et alii, 1988). A porosidade da pasta é também responsável pela permeabilidade ao ar e à água e por isso também está diretamente relacionada com a capacidade do concreto de reter água ou de resistir à agressividade do ambiente (Mehta & Monteiro, 1994).

Cada projeto de estrutura de concreto tem suas próprias exigências de resistência mecânica (compressão e tração). Como a porosidade está diretamente relacionada à capacidade do concreto de suprir essas exigências, parece lógico que o projeto deveria fornecer os valores referentes à porosidade máxima que o concreto necessita ter, para cada obra, na idade especificada. Porém, a determinação da porosidade é muito difícil, se comparado por exemplo, ao ensaio de resistência à compressão do concreto. Por isso, a resistência à compressão do concreto quase sempre é o único parâmetro de projeto a que se refere ao concreto endurecido.

Mesmo para os casos em que a exigência de resistência mecânica é muito baixa, e considerando o fato de que o concreto sempre está exposto a alguma agressividade química do meio ambiente, a norma NBR-6118 (1978) não estabelece um valor máximo para a relação a/c do concreto com vista a restringir a porosidade e evitar a degradação prematura do material. O item 8.3.1.a, que trata da fixação da relação a/c faz apenas a recomendação de que esta decorrerá “... das peculiaridades da obra relativas à sua durabilidade (tais como impermeabilidade e resistência ao desgaste, à ação de líquidos e gases agressivos, a altas temperaturas e a variações bruscas de temperatura e umidade) e relativas à prevenção contra

retração exagerada”. E no item 5.4.1 a mesma norma prescreve a multiplicação do coeficiente de minoração γ_c pelo valor 1,2 nos casos de “... *quando a peça estiver exposta à ação prejudicial de agentes externos, tais como ácidos, álcalis, águas agressivas, óleos e gases nocivos, temperatura muito alta ou muito baixa*”.

Duff Abrams introduziu o conceito da relação água/cimento em 1918 (Abrams, 1925), ao publicar o primeiro método de dosagem de concreto em que a resistência era explicada não pela interação entre os grãos dos agregados, como se pensava na época, mas pelo espaço a ser preenchido pelo cimento. Abrams (1925), que também introduziu o conceito de módulo de finura para exprimir em um só número a granulometria do agregado. Demonstrou pelo resultado de 50.000 testes, que para um determinado cimento e conjunto de agregados, a resistência à compressão do concreto segue uma curva que pode ser expressa pela seguinte forma :

$$f_{cj} = \frac{A}{B^{a/c}} \quad \text{onde;}$$

f_{cj} = Resistência do concreto na idade j dias;

A e B = Constantes que dependem do cimento e agregados utilizados;

a/c = Relação água/cimento do concreto.

No trabalho Abrams (1925) explica pela primeira vez, que a influência da granulometria do agregado se relaciona mesmo é com o consumo de água, que por sua vez acarreta em variação da relação a/c do concreto, considerando um mesmo consumo de cimento pelo concreto. Demonstrou que não importa muito o traço do concreto, que a resistência depende mesmo é da relação água/cimento.

Hoje, após o trabalho de Powers (1968) , sabe-se que a relação a/c explica a resistência do concreto porque é responsável pela maior parte da porosidade da pasta de cimento à uma certa idade. Mesmo assim, pela simplicidade do conceito introduzido por Abrams (1925) , a relação a/c continua a ser o parâmetro mais importante numa dosagem, que se relaciona à resistência à compressão do concreto endurecido.

A resistência á compressão do concreto é dada por um número, em MPa, obtido através de ensaio à compressão de corpos-de-prova que representam o concreto que se deseja avaliar. A carga de compressão axial é dada através de prensa mecânica ou hidráulica e todo o procedimento relativo à obtenção desse número é normalizado (NBR-5739, 1990). O número obtido representa a resistência potencial do concreto. É um valor obtido em laboratório e sofre

as influências para mais ou para menos, das variáveis que ocorrem no laboratório, mas são muito menores que as influências que ocorrem na obra devido ao transporte do concreto, adensamento, cura, etc.(Coutinho, 1974)..Para efeito de cálculo estrutural, esse número é reduzido ao valor com a probabilidade mínima de ocorrer no **laboratório**, chamado de resistência característica (f_{ck}), e mais tarde é reduzido novamente por meio de cálculo probabilístico e uso de coeficiente de minoração (Uriart, 1982) , para transformá-lo na resistência com a mínima probabilidade de ocorrer na peça estrutural da **obra** (resistência de cálculo).

Por causa da influência de vários fatores que ocorrem na obtenção desse número (resistência à compressão do concreto), é muito importante conhecer quais os mais importantes a influenciar na sua obtenção, para que a dosagem do concreto e o controle de qualidade se faça com a confiança que se deseja. Atenção também deve ser dada ao ensaio de resistência á compressão do cimento, pois ele também sofre a influência de diversos fatores, alterando seu resultado (Esper & Silva, 1983; Basílio, 1954, 1958; Coutinho, 1974, Munhoz, 1991).

Helene (1987) afirma que: *"A inexistência de um consenso nacional sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem levou a que vários pesquisadores propusessem métodos de dosagem - logo confundidos como uma recomendação da instituição para a qual trabalhavam, ou pela qual foram publicados seus trabalhos."*

Esta falta de consenso perdura ainda hoje, e se deve em grande parte à necessidade de respostas rápidas sobre a resistência provável do concreto dosado, para liberação dos serviços de concretagem de uma obra, antes que os resultados dos ensaios de compressão possam ser fornecidos pelo laboratório. Por este motivo surgiram métodos que propõem a utilização de curvas para estimativa da resistência do concreto, baseadas em correlações entre a resistência à compressão do concreto, a resistência do cimento e a relação a/c (Rodrigues, 1983, 1995) ou de curvas de Abrams médias nacionais (Helene, 1987).

Entretanto, a divergência entre os resultados da previsão feita por um método e outro é relativamente grande, o que nos leva a crer que outros parâmetros além da resistência do cimento e da relação a/c exercem influência expressiva sobre a resistência do concreto, mais do que tem defendido muitos pesquisadores. Em vista disso, verificou-se a necessidade da realização de um estudo com o objetivo de esclarecer o motivo de haver tantas diferenças entre os valores obtidos por um ou outro pesquisador.

Para isso foi realizado o presente trabalho, que visou estudar alguns dos fatores que influenciam nos resultados dos ensaios de resistência à compressão do cimento e do concreto, e verificar a importância disso para o estabelecimento de critérios para a dosagem e o controle de qualidade do concreto. Este estudo tem como objetivos gerais a verificação, através de um estudo de caso, da influência da variabilidade da resistência de um mesmo cimento na variabilidade da resistência do concreto e, ainda, estudar a influência das características físico-químicas dos cimentos, expressas indiretamente em função do tipo, classe e marca de cimento, nas propriedades do concreto endurecido, no seu consumo, e ainda na reologia do concreto fresco.

O trabalho inicia com o capítulo 1 fazendo um breve histórico sobre as normas brasileiras de cálculo e controle de qualidade do concreto. Continua com uma revisão sobre os critérios usados para o estabelecimento da resistência característica e resistência de dosagem. Segue então estabelecendo uma linha de raciocínio que procura mostrar que são muitos os fatores que influenciam no resultado do ensaio de resistência à compressão do cimento e do concreto. Destaca a importância desses fatores, pois a partir dos resultados desses ensaios que são estabelecidos os parâmetros de dosagem e controle de qualidade do concreto. O capítulo é então finalizado com algumas considerações à respeito da norma NBR-12655 (1996).

O capítulo 2 revisa os conceitos de dosagem do concreto e fala dos objetivos de um estudo de dosagem. Em seguida destaca a importância do estudo de trabalhabilidade no estudo de dosagem. Finalmente lista e descreve sucintamente as etapas comuns à todos os métodos de dosagem. Já no capítulo 3 é feita uma breve descrição de alguns dos métodos de dosagem mais conhecidos no Brasil e também são feitas algumas considerações à respeito de cada método, mostrando os pontos fortes e fracos de cada um.

O capítulo 4 descreve toda a parte experimental do trabalho. Inicia com uma problematização, coloca as hipóteses e objetivos, e segue com a descrição dos experimentos. Com eles o trabalho procura mostrar, através de um estudo de caso, que ainda não existe um meio seguro de liberar os serviços de concretagem de uma obra, antes dos resultados dos ensaios à compressão, a não ser que se utilize de um desvio-padrão de dosagem muito alto. Também mostra que no estudo de dosagem deve-se ter o cuidado de realizar um número suficiente de misturas, pois são várias as variabilidades que ocorrem na dosagem e, se o número de misturas não for suficiente, isso pode deturpar os resultados.

Posteriormente é feito um estudo da influência da composição química do cimento na sua capacidade de produzir aumento na resistência à compressão do concreto, sem que isso signifique necessariamente um aumento na resistência à compressão do cimento. Logo após

passa a investigar a influência da resistência à compressão e da demanda de água do cimento na resistência e no consumo de cimento pelo concreto, usando diferentes tipos e marcas de cimento.

Verifica-se também que a lei de Lyse não se ajusta muito bem a concretos de baixas relações a/c produzidos com cimentos de elevada finura e altos teores de adições. Por este motivo sugere-se a adoção, nesses casos, do traçado de uma curva polinomial, para representar a variação do traço em função da relação a/c , no diagrama de dosagem.

Estuda-se também a possibilidade de se obter curvas por regressão múltipla entre o consumo de cimento e a resistência do cimento e sua demanda de água, para cada conjunto de materiais que se deseje estudar, e que serviriam para a seleção do cimento mais econômico para esses materiais. Por fim são testadas as influências da dimensão máxima característica do agregado, do teor de argamassa, e do abatimento da mistura, na resistência à compressão de um concreto de mesma relação a/c , e também no consumo de cimento por metro cúbico de concreto, para concretos de mesma resistência à compressão.

CAPÍTULO I

OS CRITÉRIOS PARA ESTABELECIMENTO DA RESISTÊNCIA DE DOSAGEM E O CONTROLE DE QUALIDADE

1.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE A NORMA BRASILEIRA DE CÁLCULO, DOSAGEM E CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO

Todos os métodos de dosagem de concreto utilizam o valor da resistência de dosagem do concreto (também chamada de resistência potencial) como parâmetro inicial para o estabelecimento da proporção ideal entre os materiais. A resistência potencial é o valor médio obtido das amostras colhidas do concreto fresco, que após a cura em condições controladas no laboratório, são então ensaiadas. É diferente do valor médio do mesmo concreto, mas que foi lançado na estrutura. A resistência do concreto da estrutura sofre mais influências devido ao transporte, adensamento e meio externo, e tende a ser menor. Porém os dois valores médios sofrem conjuntamente das influências na resistência, causadas por variações na produção do concreto, como por exemplo, os pequenos erros nas quantidades dos materiais que são introduzidos na betoneira (Coutinho, 1974).

O objetivo do cálculo estrutural é assegurar que a obra tenha uma mínima probabilidade de ruína (Santos, 1977), e o objetivo da dosagem e do controle de qualidade é, entre outros, o de garantir que o concreto lançado na estrutura tenha uma mínima probabilidade de ter resistência menor que a especificada no cálculo (Coutinho, 1974). Os níveis de confiança (ou probabilidade), à partir dos quais são calculados os esforços máximos e as resistências mínimas, têm mudado algumas vezes na história recente à medida que os conhecimentos acerca dos materiais e dos fenômenos naturais que regem a ocorrência dos esforços são melhor conhecidos (Carneiro, 1993).

O primeiro texto consensual nacional sobre projeto e execução de obras de concreto foi o “Regulamento para as Construções de Concreto Armado” publicado em 1931 pela ABC - Associação Brasileira de Concreto. O regulamento em questão introduzia critérios de segurança baseados no Método das Tensões Admissíveis, mas não levava em consideração a diferente variabilidade da resistência do concreto em obras distintas, pois trabalhava com resistências médias e não resistências características. O texto prescrevia que a resistência média de dosagem deveria ser 4 vezes superior à tensão limite admissível adotada para o dimensionamento de pilares com cargas axiais ou 3 vezes aquela adotada para as demais situações (Helene, 1987).

Em 1936 é fundada a ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland e publicado em 1937 o texto denominado “Normas para Execução e Cálculo de Concreto Armado”. O texto indicava que a resistência média de dosagem deveria ser 3,5 vezes superior à tensão admissível à compressão adotada para o dimensionamento de peças em compressão axial ou flexão composta (referida ao centro de gravidade) ou pelo menos 2,5 vezes para flexão simples ou composta (referida à borda da seção), mas mantinha a não consideração da diferença de variabilidade na resistência do concreto de empresas ou obras distintas.

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas foi fundada em 1940, e após pequenas revisões na norma da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, foi publicada a NB-1 (1940), primeira norma de caráter efetivamente nacional. Prescrevia que a resistência média de dosagem deveria ser 3 vezes superior à tensão admissível à compressão adotada para o dimensionamento das peças em compressão axial ou flexão composta e 2,5 vezes para os demais casos. Também mantinha a não consideração da diferente variabilidade da resistência do concreto.

A NB-1 foi revisada em 1943 e 1950, mas nessas duas revisões foram alterados apenas alguns aspectos relativos ao cálculo da estrutura. Uma modificação significativa só ocorreu em 1960, numa época em que foram publicados vários artigos nacionais e internacionais a respeito da importância da consideração da variabilidade da resistência do concreto no cálculo da resistência de dosagem. Com a revisão, a NB-1 (1960) passou a incorporar o conceito de resistência característica do material à compressão (f_{ck}) para um quantil de 5 %. A forma de fixação da resistência inicial de dosagem daquela norma, baseados no coeficiente de variação, apesar de ter sido a última palavra em conhecimento científico sobre o assunto naquela época, é vista hoje como deficiente, se comparada aos conhecimentos da atualidade.

O texto da NB-1 (1960), que vigorou por 18 anos, foi revisado em 1978 quando foi publicado com a numeração do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia NBR-6118 (1978), apresentando modificações sensíveis no estabelecimento do traço, que deveria atender a critérios de resistência e trabalhabilidade, expressa esta última pela consistência, além de considerar peculiaridades da obra relativas à sua durabilidade. A mesma norma modificou também a forma de cálculo da resistência de dosagem, que passou a utilizar o desvio-padrão de produção e ensaio no lugar do coeficiente de variação. Ainda nessa norma foram inseridos alguns critérios para estabelecimento do rigor do controle de qualidade. No caso de projetos com resistência característica $f_{ck} > 16$ MPa ou $\gamma_c < 1,4$ a norma prescreve a adoção de controle sistemático, dividindo a totalidade da estrutura em lotes para efeito de controle e aceitação. O controle assistemático é feito nos outros casos, quando o concreto de toda a estrutura é considerado globalmente.

Na mesma norma também foram inseridos alguns critérios para estabelecimento do rigor do controle de produção, baseados na forma de medição das quantidades dos materiais para mistura durante a fabricação do concreto (massa ou volume), com o propósito de fixar o valor do desvio-padrão, quando esse ainda não é conhecido. Faz parte ainda do texto da norma a prescrição do uso de um coeficiente de majoração (K_n) do desvio-padrão médio obtido de várias amostras da produção, para a dosagem inicial ou ajuste, e que tem a função de diminuir a probabilidade para apenas 5%, de se utilizar um valor do desvio-padrão menor que o desvio-padrão da população. Ou seja, o K_n é nada mais que o multiplicador do valor médio do desvio-padrão, que dá o limite superior de confiança da média (95 % de confiança), dependendo do número de exemplares considerado.

Atualmente a NBR-6118 (1978) continua vigorando, mas desde 1992 quando ABNT publicou a NBR-12655 (1992, 1996) "Preparo, Controle e Recebimento de Concreto", temos uma norma específica para o controle de qualidade do concreto e que fixa vários critérios estatísticos para aceitação do concreto lançado em obra. Nessa nova norma o coeficiente K_n foi suprimido, e isso tem como consequência o aumento da probabilidade de rejeição do concreto lançado na obra, por adotar o desvio-padrão para o cálculo da resistência de dosagem como sendo o valor observado em uma amostra. Helene escrevendo sobre a questão do controle de aceitação afirma que ". . . Nessas circunstâncias, o produtor estaria, pelo menos teoricamente, fornecendo um concreto estritamente conforme o especificado no projeto estrutural. No entanto, poderia ver rejeitado seu concreto uma em cada duas vezes que o apresentar ao controle de aceitação conforme recomendado pela NBR-6118" (Helene & Terzian, 1992). A norma também instrui sobre a formação dos lotes de concreto a serem avaliados, e prescreve ainda o número mínimo de ensaios a serem realizados, de acordo com o tamanho dos lotes e o tipo da obra.

1.2 RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA E RESISTÊNCIA DE DOSAGEM

A resistência do concreto é uma variável dependente de um conjunto de fatores de variação : qualidade dos materiais empregados, proporções da mistura, meios de produção e execução dos ensaios.

Acontece que a melhor representação da resistência de uma partida ou lote de concreto, será exatamente todo o universo ou população de resultados dos "n" corpos-de-prova possíveis de serem moldados com o volume de concreto produzido. A experiência tem demonstrado que a dispersão desses resultados individuais se ajusta muito bem a uma distribuição estatística normal ou gausseana (Walker, 1944 apud Uriart).

A função de distribuição de Gauss depende de dois parâmetros, o valor da média dos resultados do universo e do desvio-padrão do universo, que define a variabilidade dos resultados em torno da média. Sempre que forem calculados os dois parâmetros estatísticos, todo o universo de resultados pode ser representado por esses dois valores. Como o que interessa para o calculista é saber qual o valor de resistência que tem a mínima probabilidade de ocorrer, não interessando qual é o valor médio, é possível uma segunda simplificação na representação da distribuição das resistências, que é o recurso da fixação de um valor característico (f_{ck}). A resistência característica f_{ck} é um dos valores da distribuição, cujo número é menor que o valor médio, e que tem uma probabilidade menor que 5 % de ocorrer valores menores que ele. Essa resistência mínima (f_{ck}) o calculista ainda a minora usando o coeficiente de segurança γ_c , que tem o objetivo de considerar as variabilidades devido ao transporte, lançamento e cura do concreto na obra, que diminuem a resistência do concreto na estrutura (Coutinho, 1974). O número encontrado após a minoração do f_{ck} é o valor que o calculista considera no cálculo da estrutura, e é chamado de resistência de cálculo (f_{cd}).

Para o tecnologista de concreto o número que interessa é a resistência média da mistura endurecida que se pretende dosar. Como o concreto dosado deve atender às exigências do projeto estrutural, a dosagem tem que ser realizada de forma que menos de 5 % dos corpos-de-prova do concreto produzido tenham resistências menores que o valor do f_{ck} , que é o valor fornecido pelo projeto. A fixação da resistência média que se pretende atingir vai depender então do valor do f_{ck} fornecido pelo projeto e da variabilidade com que o concreto costuma ser produzido, que depende do rigor com que são preparadas as misturas e da variabilidade dos materiais, e que é representado pelo desvio-padrão dessa produção (S_d).

Então, para realização de uma dosagem experimental de concreto, a resistência à compressão característica do concreto é o requisito mais importante fornecido pelo projeto estrutural da obra. Com o valor da resistência característica à compressão (f_{ckj}), calcula-se o valor da resistência de dosagem (f_{cj}), a “j” dias, geralmente 28, fazendo NBR-6118 (1978) :

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d, \quad \text{onde :} \quad S_d = K_n \cdot S_c \quad \text{NBR-6118 (1978)} \quad \text{ou}$$

$$S_d = S_c \quad \text{NBR -12655 (1996)} ;$$

e sendo que :

- S_c é o valor médio do desvio-padrão de produção e ensaio; e
- S_d é o limite superior (ou valor máximo provável) para o desvio-padrão (quantil de 5 %).

A NBR-12655 (1996) dispensa a multiplicação do valor encontrado do desvio-padrão da amostra, pelo coeficiente K_n da norma NBR-6118 (1978), e isso tem algumas consequências que serão expostas mais tarde. A função do multiplicador K_n da norma NBR-6118 (1978) é a de obter o valor do limite superior do desvio-padrão, para uma probabilidade de 5 % dos valores serem maiores que ele, já que na prática se trabalha com amostras, e não com o universo. Trabalhando com o limite superior do desvio-padrão corre-se menos risco de se subestimar o valor da variabilidade da produção, diminuindo o risco de rejeição de lotes de concreto não conformes (Helene, 1987).

Calculada a resistência de dosagem, e levando-se também em consideração outros fatores como durabilidade da estrutura ao fixar a relação a/c máxima, e ainda a trabalhabilidade requerida pela mistura fresca, além da dimensão máxima característica dos agregados, parte-se para o estudo de dosagem.

1.3 ESTABELECIMENTO DO DESVIO-PADRÃO DE UMA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE DOSAGEM

A NBR-12655 (1996) prescreve a obtenção do valor do desvio-padrão da produção em duas situações distintas. A primeira, descrita na norma em 6.4.3.2, é o caso de já se possuir resultados anteriores da mesma produção. Neste caso fixa um mínimo de 20 resultados para o cálculo do desvio-padrão, obtidos no intervalo de 30 dias. Também proíbe a adoção de um desvio menor que 2 MPa. O desvio-padrão da amostra, cujo $N > 20$ é calculado diretamente pela fórmula do desvio-padrão :

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}{N - 1}} \quad \text{onde :}$$

S_n = desvio-padrão da amostra;

N = número de exemplares da amostra;

f_i = resistência à compressão do exemplar "i" (um exemplar é o valor que representa uma amassada, e é representado pelo valor mais alto do corpo-de-prova da amassada);

\bar{f} = média dos valores de todos f_i .

Para o caso de não se ter valores anteriores de resistências para o cálculo do desvio-padrão, ou quando houver alterações no processo de produção, a NBR-12655 (1996) fornece uma tabela de desvios-padrão que depende do rigor da medição dos materiais. Para a condição mais favorável, denominada "A", em que todos os materiais são medidos em massa, o desvio-padrão a adotar é 4,0 MPa. Para a situação média, denominada "B", quando o cimento é medido em massa e a água em volume, com dispositivo dosador, e os agregados são medidos em massa ou volume, com controle de umidade e inchamento, a norma manda usar 5,5 MPa. Na pior condição, chamada de "C", quando o cimento é medido em massa e os agregados e a água de amassamento medidos em volume, com correção da quantidade de água em função da consistência do concreto NBR-7223 (1982), o número a adotar é 7,0 MPa.

Para o caso de concreto dosado em central, a norma NBR-7212 (1984) estabelece uma forma de se calcular o desvio-padrão á partir de valores de concretos com diferentes resistências de dosagem. Isso é importante para as usinas, pois elas trabalham alternando a produção entre concretos de diferentes resistências de dosagem.

1.4 VARIABILIDADE REAL E VARIABILIDADE APARENTE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO E ENSAIO

Como já foi visto anteriormente, são vários os fatores que influenciam a resistência do concreto. Em se tratando de risco de ruína, o valor que interessa é a resistência mínima provável que o concreto possui (Santos, 1977). Com relação à economia, interessa também o valor do desvio-padrão da produção, pois quanto menor o desvio-padrão, menor será o valor da resistência de dosagem, necessário para produzir um concreto cuja resistência característica estimada ($f_{ck_{est}}$) seja maior ou igual a resistência característica de projeto (f_{ck}) (Helene, 1987).

O controle de uma produção de concreto é feito pela avaliação da média e do desvio-padrão. Uma mudança na centragem da média geralmente indica uma mudança de qualidade nos materiais (por exemplo a melhoria na resistência do cimento). A alteração do desvio-padrão indica uma mudança no comportamento da produção, ou seja, alteração no rigor com que o concreto é produzido (Fusco, 1979).

A identificação dos fatores que provocam as alterações na resistência são muito importantes para que se tomem medidas saneadoras o mais rapidamente possível. Podem-se considerar três os grupos fundamentais de causas de variação acidental das tensões de ruptura à compressão dos corpos-de-prova de controle do concreto (Coutinho, 1974) :

I- Variações acidentais nas características dos componentes, que por sua vez são devidas a :

- Variações na qualidade do cimento (resistência à compressão do cimento e taxa de endurecimento);
- Variações na granulometria dos agregados;
- Variações nos teores de impurezas, como pó, argila, matéria orgânica, etc.;
- Variações na temperatura dos componentes.

II- Causas acidentais inerentes ao equipamento de fabricação e ao pessoal que o opera, ou seja, a erros de amassamento e erros de medição da quantidade dos materiais :

- Variações acidentais da quantidade de cimento;
- Variações acidentais da quantidade de agregado;
- Variações acidentais da quantidade de água;
- Variações acidentais da quantidade de aditivo;
- Variações no tempo de mistura;
- Alterações na ordem de introdução dos componentes.

III- Erros acidentais de amostragem e ensaio :

- Erros acidentais de amostragem, que provocam variação no grau de uniformidade da amostra nas dosagens de cimento e de água, e nas proporções entre o agregado graúdo e a argamassa;
- Variações acidentais no grau de compacidade atingido nos diferentes corpos-de-prova;
- Variações acidentais na cura : cuidado em evitar a secagem inicial, em manter úmido o corpo-de-prova durante o tempo necessário até o ensaio, variação na temperatura de conservação;

- Erros acidentais na determinação da tensão de ruptura : irregularidade nos moldes, grau de planicidade das faces de contato com os pratos da prensa, influência do material de capeamento, retificação das faces, excentricidade na carga aplicada, variações na velocidade da aplicação da carga, grau de rigidez da máquina de ensaio, aferição da prensa, erros de leitura, etc.

De todos os erros, os mais importantes são os sete primeiros. A variação na qualidade do cimento sai do controle da central de concreto, e as causas de variação introduzidas devido a erros de amostragem e de ensaio (erros de ensaio), podem e devem ser controladas pelos laboratoristas para se tornarem mínimas.

Pela teoria de propagação dos erros acidentais, sabe-se que conhecido numericamente cada um desses erros acidentais, a sua contribuição numérica para o erro total é feita através da raiz quadrada da soma de seus quadrados. Ou seja, a variância total é a soma das variâncias. A tabela 1 ilustra os resultados obtidos por Grant (apud Coutinho, 1974) para os desvios-padrão típicos de produções de concreto com diferentes graus de controle :

Tabela 1 - Composições típicas de erros de produção e ensaio

Fonte de variação	Notação	Desvios-padrão em MPa, para diferentes graus de controle		
		Excelente	Bom	Ruim
Qualidade do cimento proveniente de uma só fábrica	Sc	2,1	2,8	2,8
Qualidade do agregado	Sa	0,7	1,4	2,1
Equipamento de fabricação e pessoal que utiliza	Sf	2,1	2,8	4,9
Amostragem e ensaio	Se	0,7	1,4	2,1
Desvio-padrão total ($ST^2 = Sc^2 + Sa^2 + Sf^2 + Se^2$)	ST	3,1	4,4	6,4

Helene (1987) chama de desvio-padrão aparente o desvio-padrão total porque nele está incluído o erro de medição das outras variabilidades (erro de ensaio). Quer dizer, dependendo do valor do desvio-padrão de ensaio "Se", o valor do desvio-padrão total pode se tornar relativamente alto, mas isso não quer dizer que haja variabilidade grande no concreto produzido, mas sim que há um descontrole na execução dos ensaios. O desvio-padrão real é a parte do desvio-padrão total que não sofre as influências das operações de ensaio, ou seja:

$$S_{\text{real}}^2 = Sc^2 + Sa^2 + Sf^2$$

O modo como se calcula a separação do desvio-padrão de ensaio do desvio-padrão total (ou aparente), está presente no item 6.2.2.2 da norma NBR-7212 (1984), e possibilita o controle das operações do laboratório. A determinação dos desvios-padrão das operações de

ensaio são particularmente importantes nos estudos de dosagem, quando são utilizadas curvas que fazem correlações entre resistência do cimento e resistência do concreto, e é preciso ter uma maior confiança nesses resultados. É muito importante também para estabelecer confiança na curva de dosagem encontrada, já que o número de ensaios geralmente é muito pequeno.

1.5 INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DO CIMENTO NA VARIABILIDADE DE UMA PRODUÇÃO DE CONCRETO

Na sua tese de doutorado, Helene (1987) termina o capítulo 2 colocando duas questões:

- 1) Qual a influência da variabilidade da resistência do cimento na variabilidade da resistência à compressão dos concretos ?
- 2) Existe correspondência entre a resistência do concreto e a resistência do cimento empregado na dosagem desse concreto ?

Helene (1987) colocou essas duas questões porque a resposta para elas tem duas consequências muito importantes para o estabelecimento de parâmetros para a dosagem. Com relação à primeira questão, se a variabilidade imposta ao concreto em função da variabilidade na resistência de um cimento de mesmo tipo, classe e marca não for muito importante, então a curva de dosagem, ou o valor médio encontrado após o rompimento dos primeiros corpos-de-prova moldados no estudo de dosagem, reproduz bem a média da resistência à compressão do concreto que será produzido. Se não, corre-se o risco do estudo de dosagem ter sido feito com uma amostra de cimento que pode dar uma resposta muito otimista, ou muito pessimista, deturpando a realidade. Além disso, a variabilidade na resistência do cimento torna-se também muito importante no estabelecimento do desvio-padrão de dosagem, influenciando no consumo de cimento do concreto:

Se a resposta da segunda questão for sim, isso significa que todas as outras variáveis podem ser bem controladas numa produção de concreto, pois variação na resistência de um concreto de traço fixo seria explicada na maior parte pela variação na resistência do cimento. Neste caso, a utilização de curvas de correlação poderia ser um instrumento útil para dosar o concreto e iniciar a produção para a obra, com confiança suficiente de que a resistência estará próxima da esperada. Alguns métodos de dosagem utilizam-se de curvas de correlação deste tipo, como o da ABCP/ACI (Rodrigues, 1995) ou o do IPT/EPUSP (Helene & Terzian, 1992).

Entretanto, se a resposta for não, pode haver duas explicações. A primeira é que, mesmo que as outras variáveis externas ao cimento sejam todas controladas, ainda assim a resistência à compressão do cimento não explicaria suficientemente a variação na resistência à compressão do concreto. Poderiam haver outros fenômenos importantes na resistência do concreto, como por exemplo a capacidade do cimento em formar ligações na zona de transição pasta / agregado no concreto, responsáveis em parte na resistência à compressão do concreto, mas não na resistência do cimento. A outra explicação, para o caso de se ter uma correlação ruim entre a resistência à compressão do cimento e do concreto, seria simplesmente que as outras variáveis que ocorrem na produção do concreto, e influenciam na sua resistência, como a pesagem, mistura, ensaio, etc., são tão ou mais significativas que a variação real que ocorre na resistência do cimento.

Alguns autores (Coutinho, 1974; Piccoli, 1983) sugerem a correção da curva de Abrams encontrada no estudo de dosagem, se o valor da resistência à compressão obtido no ensaio da amostra de cimento usada no estudo for muito diferente da média conhecida desse cimento. Considera-se que o laboratório possua o conhecimento dessa média, através de ensaios próprios, ou pelos relatórios de controle de qualidade fornecidos pelas fábricas de cimento.

Coutinho (1974) sugere a adoção do método de Wischers, que se utiliza de uma curva média obtida a partir de um estudo, feito com um grande número de amostras de cimento e dos concretos correspondentes, que fôra realizado em seu país. O gráfico dessa curva tem no eixo das abcissas as relações a/c dos concretos, e no eixo das ordenadas, os valores encontrados da relação resistência do concreto, para cada relação a/c, e a resistência do cimento no ensaio padrão, na idade considerada, ou seja $f_{cj(a/c)} / f_{ccj}$. Na verdade trata-se de uma curva média nacional de Abrams do país em questão, onde o eixo das ordenadas foi substituído pela razão f_{cj} / f_{ccj} . Assim, para se fazer a correção da curva encontrada em um estudo de dosagem, faz-se o cálculo do valor (f_{cj} / f_{ccj}) encontrado pelo estudo, para a relação a/c referente à resistência desejada, e depois divide-se essa mesma resistência do concreto pela resistência média conhecida do cimento $(f_{cj} / f_{ccj(m)})$. Levando-se os dois valores da razão resistência do concreto / resistência do cimento, encontram-se dois valores da relação a/c. O módulo da subtração desses valores dá o quanto têm-se que diminuir ou aumentar a relação a/c da curva de Abrams do estudo de dosagem, para encontrar a relação a/c que propiciará a resistência média que se deseja obter do concreto.

Já Piccoli (1983) aconselha a correção da curva multiplicando a equação de Abrams (1925) encontrada no estudo de dosagem, pelo número 0,95 e mais a relação entre a resistência mínima conhecida do cimento num período em torno de um semestre anterior à data

de dosagem e a resistência da amostra de cimento utilizada na dosagem ($f_{ccj}(\text{mínima}) / f_{ccj}(\text{amostra})$), ou seja :

$$f_{cj} = 0,95 \cdot \frac{f_{ccj}(\text{mínima})}{f_{ccj}(\text{amostra})} \cdot \frac{A}{B^{a/c}}$$

Em ambos os métodos, ao se fazer a correção da curva de dosagem, está se supondo a existência de uma boa correlação entre o resultado do ensaio de resistência do cimento e o resultado do ensaio de resistência do concreto. Afinal a correção da curva é feita com base nesses resultados, e para tal, é necessário que haja confiança nesses resultados.

No método de Wischers, são utilizados os resultados dos ensaios do cimento e do concreto ao mesmo tempo, corrige-se os valores da relação a/c através de um gráfico que traduz o comportamento médio de combinações de cimento e agregados de uma região da Europa. Porém esse comportamento pode ser bastante distinto dos concretos de outras regiões.

O método sugerido por Piccoli (1983) faz a suposição de que a resistência do concreto varia na mesma proporção do aumento ou diminuição da resistência do cimento em relação à sua resistência mínima, não importando qual a relação a/c do concreto. O método utiliza também um coeficiente de minoração ao multiplicar o resultado por 0,95.

A importância da variabilidade da resistência do cimento sobre a resistência do concreto é ressaltada por Fusco (1975), que constrói uma equação a partir de deduções teóricas da equação de Abrams, onde deduz uma função que correlaciona o desvio-padrão da resistência do concreto com o desvio-padrão da resistência do cimento e o desvio-padrão da relação a/c, além de outros fatores menos importantes. Assim, afirma, demonstra-se a importância de controlar a variabilidade da resistência do cimento, para um bom controle na resistência do concreto, pois a variabilidade não ocorre apenas entre cimentos produzidos por fábricas diferentes, mas também para um mesmo tipo e classe de cimento de uma mesma fábrica, produzidos em épocas diferentes.

Fusco (1975) toma o modelo de Abrams expresso por:

$$f_{cj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad \text{onde :}$$

f_{cj} = resistência à compressão do concreto à j dias de idade, em MPa;

K_1 e K_2 são constantes que dependem dos materiais utilizados na mistura;

a/c = relação água / cimento em massa (Kg / Kg) .

Afirma Fusco (1975) que a resistência à compressão do cimento à 28 dias de idade no ensaio padrão (areia normal e relação $a/c = 0,48$) pode ser considerada como uma variável aleatória contínua e independente (das outras variáveis da equação de Abrams, ou seja, do valor da resistência média do concreto ou da relação a/c pois esta é fixa no ensaio de cimento), sendo então dependente apenas de sua composição química (e finura), sendo expressa por :

$$f_{ccj} = f_{ccmj} + z \cdot \sigma_{ccj}$$

Faz então a transformação da constante K_1 da Equação de Abrams , fazendo-a diretamente proporcional à razão entre a resistência de uma amostra de cimento e a média de várias amostras (de partidas diferentes), logo:

$$K_1 = K_0 \cdot \frac{f_{ccj}}{f_{ccmj}}$$

A constante K_2 é mantida inalterada, supondo-se que ela não exprime nenhuma relação com as características do cimento. A equação de Abrams é então expressa por :

$$f_{cj} = \frac{K_0 \cdot f_{ccj}}{f_{ccmj} \cdot K_2^{a/c}} + \Delta e \text{ , onde } \Delta e \text{ é o erro de ensaio}$$

Fazendo o desenvolvimento por série de Taylor, Fusco (1975) chega à seguinte equação para exprimir o desvio-padrão do concreto em função da variabilidade do cimento e da variabilidade da relação a/c :

$$\sigma_{cj} = \sqrt{\left(\frac{K_0 \cdot \sigma_{ccj}}{f_{ccmj} \cdot K_2^{(a/c)m}} \right)^2 + \left(\frac{K_0 \cdot \ln K_2 \cdot \sigma_{a/c}}{K_2^{(a/c)m}} \right)^2} + \sigma_e^2 \quad \text{onde:}$$

σ_{cj} = desvio-padrão da resistência à compressão do concreto a " j " dias de idade, em MPa;

σ_{ccj} = desvio-padrão da resistência à compressão do cimento, em MPa;

f_{ccmj} = resistência à compressão média do cimento à " j " dias de idade, com $a/c = 0,48$, MPa;

K_2 e K_0 = constantes que dependem das características dos agregados empregados no concreto;

$(a/c)_m$ = relação água/cimento média do concreto, em Kg/Kg;

$\sigma_{a/c}$ = desvio padrão da relação a/c do concreto, em Kg/Kg;

σ_e = desvio padrão das operações de ensaio, em MPa.

Partindo do mesmo raciocínio, Helene (1987) procurou correlacionar a resistência do cimento com a resistência do concreto, utilizando de dados de ensaios realizados mensalmente no IPT no período de maio de 1964 a abril de 1981, com três marcas de cimento denominadas no estudo de A, B e C. Todo mês eram coletadas uma amostra de cada um dos cimentos e realizados os ensaios de resistência do cimento e resistência do concreto em traços padronizados.

Apesar de, naquele período a resistência dos cimentos estudados terem tido variações consideráveis, os valores dos coeficientes de correlação encontrados foram muito baixos, da ordem de 0,55 a 0,66. Os baixos valores indicam que as resistências obtidas nos ensaios de concretos produzidos com mesmos materiais e relações a/c fixas, são influenciadas por outras variáveis desconhecidas, além da resistência do cimento. Entretanto, essas outras variáveis desconhecidas parecem ser simplesmente as variabilidades que ocorrem na dosagem e ensaio dos materiais, sendo esses erros que causariam a dispersão que leva ao baixo valor do coeficiente de correlação " r ".

Helene (1987) obteve as equações que correlacionam a resistência do concreto com a resistência dos cimentos A, B e C, fazendo uma regressão aos mínimos quadrados, para uma equação de resistência do concreto em função da resistência do cimento e da relação a/c do concreto, deduzida à partir do mesmo estudo teórico de Fusco (1975). Para isso ele linearizou a equação encontrada, através do uso de logaritmos, fazendo:

$$\log f_{cj} = K_5 \cdot \log (f_{ccj}) - K_6 \cdot a/c + K_7 \quad , \quad \text{onde :}$$

f_{cj} = resistência à compressão do concreto à " j " dias de idade, em MPa ;

f_{ccj} = resistência à compressão do cimento no ensaio normal à " j " dias de idade, em MPa ;

a/c = relação água / cimento do concreto, em kg / kg ;

K_5 , K_6 e K_7 são constantes que dependem dos materiais

Encontradas as equações de correlação entre a resistência do concreto e a resistência do cimento e a relação a/c , Helene (1987) plotou as curvas em um gráfico, fazendo constantes as relações a/c , igualando-as aos seus valores médios de cada traço padrão. Na figura 1 é apresentado o gráfico obtido por Helene (1987) com as quatro curvas encontradas que correlacionam a resistência do cimento e a resistência do concreto, para relações a/c fixas dos concretos :

As equações de correlação usadas para a construção do gráfico foram :

Traço 1:5 - $f_{c28} = 6,76 \cdot f_{cc28}^{0,45}$ - $(a/c)_m = 0,42$

Traço 1:6 - $f_{c28} = 5,14 \cdot f_{cc28}^{0,46}$ - $(a/c)_m = 0,51$

Traço 1:7 - $f_{c28} = 3,54 \cdot f_{cc28}^{0,49}$ - $(a/c)_m = 0,62$

Traço 1:8 - $f_{c28} = 2,15 \cdot f_{cc28}^{0,53}$ - $(a/c)_m = 0,76$

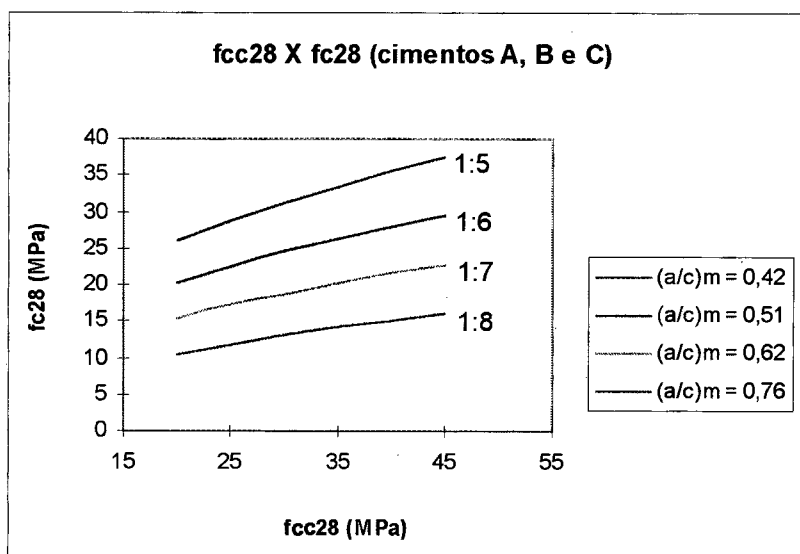


Figura 1 - Curvas de correlação entre a resistência do concreto para a/c fixa em torno de um valor médio, em função da resistência do cimento, encontradas à partir do estudo com os cimentos A, B e C.

É fácil perceber pelo gráfico, que as variações na resistência à compressão do concreto são bem menores que as variações na resistência do cimento. Também se pode observar com

facilidade que para relações a/c mais baixas, as variações na resistência do cimento influenciam mais fortemente a resistência do concreto. Isso significa que não é uma boa atitude fazer a correção da curva de Abrams obtida no estudo de dosagem, na mesma proporção dos valores calculados para variação da resistência da amostra de cimento utilizado no estudo de dosagem, em relação à resistência média conhecida desse cimento.

1.6 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES À RESPEITO DA NORMA NBR-12655/96

A NBR-12655 (1996) prescreve em 6.4.3.2 que *...Quando o concreto for elaborado com os mesmos materiais, mediante equipamentos similares e sob condições equivalentes, o valor numérico do desvio-padrão S_d deve ser fixado com no mínimo 20 resultados consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias, em período imediatamente anterior. Em nenhum caso o valor de S_d adotado pode ser menor que 2 MPa*.

Na prática isso equivale a uma amostra por dia de trabalho em uma usina de concreto, funcionando de segunda à sexta-feira. Como uma usina de porte médio recebe em torno de 2,5 a 5 carretas de cimento por semana, o desvio-padrão do concreto calculado segundo a norma NBR-12655/96 proporciona a oportunidade de variação de 10 a 20 lotes de cimento fornecidos à usina. Isso significa que a central recebe quase tantos lotes de cimento quanto o número de exemplares usados no cálculo do desvio-padrão de produção e ensaio. Logo, para o caso de usinas de produção de concreto, o cálculo do desvio-padrão segundo essa norma, avalia razoavelmente a variabilidade do concreto, produzida pela variabilidade do cimento dentro do mês.

Entretanto, há casos em que podem ocorrer problemas na avaliação do desvio-padrão real dentro do mês. O primeiro caso é o de pequenas produções de concreto (produção na própria obra). Se o desvio-padrão for calculado como prescreve a norma, com *...resultados consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias...*, o número de lotes de concreto pode ser insuficiente para proporcionar um valor do desvio-padrão, que inclua a variabilidade causada pela variação de partidas de cimento, por causa do baixo número de recebimentos de lotes de cimento pela obra. Dessa forma o desvio-padrão obtido tende a estar subestimado.

Outro problema é que essa norma suprimiu a utilização do coeficiente K_n da NBR-6118 (1978), seção 8.3, usado para obter o limite superior provável do desvio-padrão da população. Entretanto a NBR-12655 (1996) continua a prescrever a utilização na dosagem, de um desvio-padrão " S_c " obtido de uma amostra de apenas 20 exemplares. Se a amostra tem só 20 exemplares, há 90 % de probabilidade de que o desvio-padrão da população " σ_c " esteja no intervalo compreendido de $0,79 \cdot S_c \leq \sigma_c \leq 1,37 \cdot S_c$. Isto significa que ao usar na dosagem

um desvio-padrão igual ao desvio-padrão da amostra ($S_d = S_c$), corre-se um risco de 50 % de estar usando um desvio-padrão subestimado, e têm-se também uma chance de 5 % do desvio-padrão populacional ser maior que 137 % do valor utilizado no cálculo da dosagem. Como consequência, aumenta-se também o risco de rejeição dos lotes de concreto produzidos com base no $S_d = S_c$, quando do controle de aceitação do concreto (Helene & Terzian, 1995).

Helene (1987) propôs a substituição do coeficiente K_n da NBR-6118 (1978), quando na época ainda não existia a norma NBR-12655 (1996), pelo cálculo de um $f_{ck(real)}$ esperado, em função do f_{ck} de projeto e do desvio-padrão da produção. Esse novo valor calculado ($f_{ck(real)}$ esperado) seria à critério do produtor, com base de cálculo na probabilidade de aceitação ou rejeição que o mesmo queira correr, cuja obtenção é fácil através das curvas de eficiência do estimador, que foram publicadas por Helene no citado trabalho. Ao invés disso, a NBR-12655 (1996), editada posteriormente, simplesmente suprimiu o uso do K_n , mas não colocou nenhuma outra orientação sobre como diminuir-se o risco de rejeição do concreto.

Há de se comentar também sobre o período de cálculo do desvio-padrão. Vários são os fatores que influenciam na variação da resistência do concreto. Alguns pesquisadores têm constatado que durante a produção do concreto há uma constante alteração na centragem da média, mantendo-se porém a resistência como variável gaussiana e estacionária somente durante um certo período (McIntosh, 1963; Fusco, 1979). Essa mudança na centragem da média é devida à mudança nas características do cimento entre partidas, da evaporação maior ou menor da água de amassamento em função do clima, da variação nas características dos agregados utilizados, etc. (Coutinho, 1974). A figura 2 mostra esquematicamente o fenômeno:

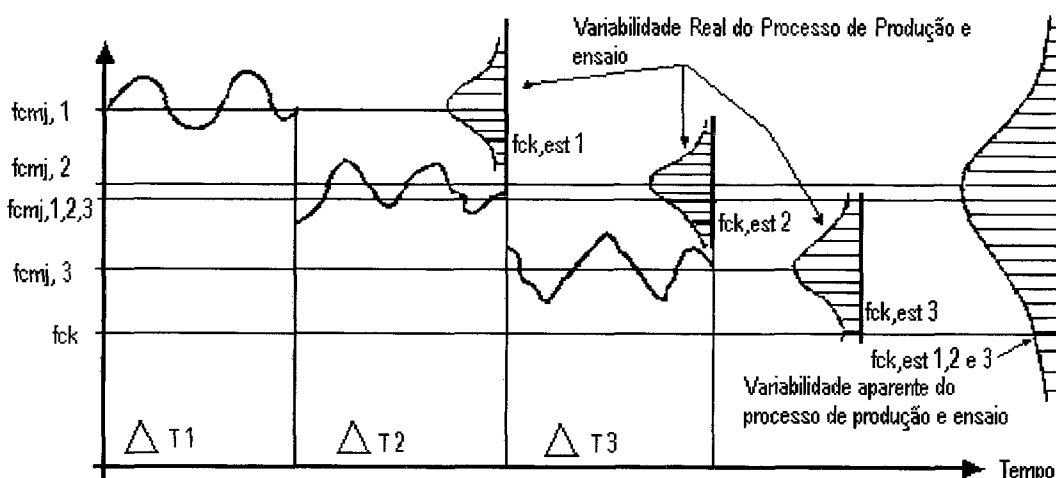


Figura 2 - Mudança na centragem da média do processo de produção e ensaio do concreto em função do tempo, como decorrência da variação de alguns fatores que influem na resistência à compressão do concreto. Fonte (Helene & Terzian, 1995).

Para efeito do controle de aceitação de lotes de concreto, faz-se necessário que esses não sejam formados a partir de um número muito grande de exemplares (Uriart, 1982), é isso que recomenda a NBR-12655 (1996). Dessa forma diminui-se o risco de avaliar um concreto baseado numa variabilidade aparente, devido à mudança na centragem da média. Isso evita que, no caso da não aceitação de algum lote de concreto, que os prejuízos sejam minimizados.

Já para a dosagem, não tem muito sentido usar um desvio-padrão obtido a partir de um período muito curto. Apesar da economia de cimento que teoricamente isso proporciona, o risco de produção de lotes de concreto de resistência inferior ao critério de aceitação aumenta. É o caso por exemplo, de quando se adota um desvio-padrão obtido num período de apenas 30 dias, como prescreve a NBR-12655 (1996). Certamente o desvio-padrão calculado nesse período não vai detectar as variações que causam as alterações na centragem da média. Como é uma realidade que ocorrem as mudanças na centragem da média, e como não existe um método que seja economicamente viável para prever essas alterações, é interessante que se dispenda um pouco a mais de cimento, ao usar um desvio-padrão maior, mas se aumente a chance de aceitação do concreto quando a mudança ocorrer. Seria mais seguro se o desvio-padrão para o cálculo da resistência de dosagem fosse obtido de um período maior, por exemplo 90 dias, ou poderia a NBR-12655 (1996) adotar o critério do uso do limite superior do desvio-padrão, como ainda prescreve a NBR-6118 (1978).

No item 6.4.3.3 da NBR-12655 (1996), a norma fornece os valores do desvio-padrão de dosagem para o caso de não se conhecerem resultados anteriores dessa produção, que permitam o cálculo do desvio-padrão. Esses valores, que dependem da condição do preparo do concreto (condição A, B ou C), já referidos no item 2.3, são colocados na tabela 2 :

Tabela 2 - Desvio-padrão de dosagem em função da condição de preparo da NBR-12655 (1996)

Condição de preparo	Desvio-padrão (MPa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Helene (1987) fez um exaustivo estudo para avaliar esses valores, referidos na época à norma NBR-6118 (1978). Para isso ele enviou formulários à várias empresas do país, os quais deveriam ser preenchidos com os valores do desvio-padrão dos lotes de concreto produzidos pelas respectivas empresas, além de outros dados, que serviram para classificação das produções de acordo com a condição de preparo do concreto. Com base nesses resultados ele sugeriu a modificação da norma para adotar os valores mostrados na tabela 3:

Tabela 3 - Desvio-padrão de dosagem em função da condição de preparo sugeridos por Helene

Condição de preparo	Desvio-padrão (MPa)
A	3,0
B	4,0
C	5,5

O tamanho dos lotes de onde foram obtidos os valores dos desvios-padrão foram muito variados, mas em geral, pelo volume de concreto informado de cada lote, pode-se concluir que a maioria dos lotes são referentes a concretagens realizadas num período menor que uma semana. Desse modo, os valores obtidos são menores por não considerarem muitas das variáveis que poderiam ocorrer em períodos mais prolongados. Ou seja, são desvios-padrão médios de lotes de concreto e não da produção em si. Por isso, não parece ser recomendável a modificação dos valores dos desvios-padrão da NBR-6118 (1978), agora também constantes da NBR-12655 (1996), tendo como base somente o estudo realizado por Helene (1987).

No entanto, outros pesquisadores têm referendado a posição de Helene (1987), afirmando que os valores dos desvios-padrão de dosagem previstos nas duas normas são bem maiores que o necessário. Prudêncio (Prudêncio et alii, 1995) encontrou valores significativamente menores que os prescritos nas normas num estudo de caso de produção de concreto no próprio canteiro de obra. De qualquer forma, nenhum estudo realizado no país parece ser conclusivo sobre os valores que seriam mais adequados à realidade brasileira.

CAPÍTULO II

O ESTUDO DA DOSAGEM DO CONCRETO

2.1 OBJETIVO DE UM ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO

Cada obra tem suas próprias particularidades, que a faz singular com relação às características necessárias ao concreto para a moldagem de suas peças estruturais. A resistência mecânica está ligada ao projeto estrutural, que por sua vez reflete exigências impostas pelo projeto arquitetônico. A consistência necessária ao concreto fresco é função da maior ou menor dificuldade de lançá-lo e adensá-lo devido às dimensões das fôrmas, equipamentos disponíveis, acessibilidade ao ponto de concretagem e outras dificuldades. A máxima permeabilidade (máxima relação a/c) e a resistência aos meios agressivos (utilização de aditivos, tipo de cimento, etc.) depende das condições de exposição aos agentes agressivos que a estrutura estará sujeita durante sua vida útil, e do tempo de vida útil que dela se espera. A dimensão máxima característica do agregado do concreto depende da dimensão mínima da fôrma e entre as barras de armadura, que por sua vez dependem dos projetos de arquitetura e estrutura. O conjunto de materiais da mistura é função também da disponibilidade de materiais de qualidade próximos ao local da obra de modo a propiciar um concreto econômico (Sobral, 1971).

Como se verifica, são várias as exigências ao concreto que o engenheiro precisa estudar para encontrar a "dose" adequada de cada material componente. Segundo Prizskulnik (1977) constitui objetivo da dosagem do concreto, a recomendação da proporção adequada de aglomerante, agregados miúdo e graúdo, água, e, eventualmente aditivos, visando a obtenção de um concreto que :

a) Quando fresco, seja trabalhável e mantenha a sua homogeneidade nas etapas de sua produção (mistura, transporte, lançamento e adensamento);

b) Quando endurecido, apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural, e a aparência estabelecida no projeto arquitetônico;

c) Seja durável, isto é, pelo menos, mantenha as suas propriedades ao longo da vida útil prevista para a estrutura, resistindo, pois, a eventuais efeitos danosos oriundos de reações entre os seus componentes, e das ações físicas e químicas do meio;

d) Seja econômico.

De certa forma, o estudo de dosagem consiste em equilibrar as características contraditórias que um concreto deve ter, para que possua ao mesmo tempo, as qualidades mecânicas requeridas e a trabalhabilidade adequada à obra. Helene (1987) resume em um quadro de maneira muito clara o sentido de evolução dos diversos parâmetros de dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência e do custo. Esse quadro é reproduzido na figura 3 abaixo :

PARÂMETROS DE DOSAGEM DO CONCRETO	PARA UMA BOA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO FRESCO	PARA UMA BOA RESISTÊNCIA DO CONCRETO ENDURECIDO	PARA REDUÇÃO DO CUSTO
Granulometria do agregado miúdo	de preferência fina	de preferência grossa	grossa
Relação grão / miúdo	a diminuir	a aumentar	a maior possível
Consumo de água	a aumentar até certo ponto	a diminuir	a aumentar
Granulometria total	preferível contínua	preferível descontínua	a disponível
Dimensão característica máxima do agregado	de preferência pequena	de preferência grande	a maior possível
Geometria do grão de agregado grão	de preferência esférica (pedregulho)	de preferência irregular (brita)	esférica (pedregulho)

Figura 3 - Sentido de evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo.

Mehta (Mehta & Monteiro, 1994) diz que *"Apesar da dosagem dos concretos ser governada por sólidos princípios técnicos, pode-se dizer, por várias razões plausíveis, que o processo de dosagem não está inteiramente no campo da ciência"*. Mais adiante Mehta ainda reafirma *"... Pelas razões expressas anteriormente, este processo é considerado mais uma arte que uma ciência"*

Muitos pesquisadores têm tentado exprimir todas as variáveis que influenciam nas propriedades desejáveis do concreto em uma única expressão matemática (Camargo, 1977). Porém, a diversidade de métodos de dosagem existentes, havendo em todos eles a necessidade de comprovação experimental da trabalhabilidade e da resistência mecânica, demonstra que ainda há muito que caminhar nesse campo, e talvez, a dosagem do concreto nunca deixe de ter um pouco de arte.

2.2 O ESTUDO DE TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

O estudo de trabalhabilidade consiste na parte do estudo de dosagem referente a determinação da proporção de materiais da mistura, em especial a água, que dê a consistência requerida para o concreto fresco, de forma que, quando o concreto estiver endurecido, ele possua as características mecânicas e de durabilidade requeridas.

A trabalhabilidade é frequentemente expressa em termos de consistência, pois trabalhabilidade é um termo muito amplo, e não existe um método de ensaio que possa medi-la. Uma das melhores definições para a trabalhabilidade talvez seja a feita por K. Newman que a define como a medida, no mínimo, de três propriedades : adensabilidade, mobilidade e estabilidade. Para a estabilidade, entendida como sendo a resistência à segregação, B. P. Huges considera duas etapas : a estabilidade durante o transporte e a estabilidade durante o adensamento (apud Prizskulnik, 1977).

Segundo J. P. Bombled, a trabalhabilidade do concreto resulta da composição de dois fatores :

- a) Fator dinâmico : é a fluidez ou a aptidão a deformações sob o efeito de um dado método de adensamento , pois é preciso preencher o molde com facilidade e rapidez;
- b) Fator estático : a estabilidade ou a aptidão à conservação da homogeneidade (isto é, a ausência de segregação e de sedimentação). No caso de uma desforma antes da pega, deseja-se adicionalmente, a conservação da forma (apud Prizskulnik, 1977).

Um concreto é dito trabalhável quando ele possui as características de fluidez e estabilidade que os meios de transporte, adensamento e acabamento exigirão para esse concreto. Um concreto pode ser trabalhável para um tipo de serviço e não ser trabalhável para outro. De qualquer forma, a trabalhabilidade sempre estará associada à determinada necessidade de fluidez e estabilidade. Por isso a consistência é sempre usada como parâmetro de dosagem para exprimir a trabalhabilidade que se requer do concreto.

A fluidez e a estabilidade também são fatores que de certa forma também caminham em sentidos opostos. Quanto maior a disponibilidade de água de uma mistura, mais fluida ela é, e maior também é a tendência à segregação de seus componentes. Para um concreto se deformar pela aplicação de uma energia de adensamento, moldando-se no espaço da fôrma, é preciso

que sejam vencidas as forças que tendem a manter a massa aglomerada. Essas forças podem ser divididas em duas classes : de atração e de atrito.

As forças de atração (ou coesão) são devidas principalmente a :

- Forças de Van der Waals, nas interfaces;
- Forças de origem capilar;
- Força gravitacional, responsável pela sedimentação.

Nas misturas mais pobres e com teores de água menores que o limite de saturação, a coesão é principalmente devida às forças de origem capilar, ou seja, devido aos tubos capilares de ligação entre os grãos, em função das minúsculas bolhas de ar presentes na mistura (Sobral, 1990). Nos traços mais ricos em cimento, as forças elétricas nas interfaces dos grãos (forças de Van der Waals) produzem o efeito maior de atração entre os componentes da mistura. Como são forças que atuam nas interfaces dos grãos, elas aumentam com o aumento da área específica, logo aumentam com o teor de cimento e da finura do cimento (ou outros materiais finos). Os valores da tabela 4 feita por J. P. Bomble, mostram como a tensão limite de cisalhamento do concreto fresco aumenta rapidamente com o aumento da área específica do cimento (apud Prizskulnik, 1977). Isso, mais a forma, textura, porosidade e composição química das partículas, explica porque os cimentos pozolânicos, de finura maior que 400 m²/Kg, têm elevada demanda por água :

Tabela 4 - Influência da área específica do cimento na tensão limite de cisalhamento de pastas de relação água/cimento igual a 0,40.

Área específica do cimento (m ² / Kg)	Tensão limite de cisalhamento (Pa)
235,0	1.400
278,0	2.650
329,0	7.500
442,5	16.550
560,0	725.000

As forças de atrito são devidas à interação (ou ancoragem) entre os grãos graúdos e miúdos da mistura. Elas dependem da forma, granulometria, dimensão máxima característica do agregado, teor de argamassa da mistura, teor de pasta e características da pasta

(disponibilidade de água), teor e finura do cimento (e outros finos). Como se verifica, é um conjunto muito grande de influências que geralmente são expressas por um único ensaio (de consistência). É difícil acreditar que esses fatores contraditórios (fluidez e estabilidade) possam ser bem expressos por um único número. E realmente não é. Apesar de aceito como uma medida desses fatores, dois concretos com mesma consistência podem possuir características de trabalhabilidade muito diferentes entre si (Sobral, 1971).

Por exemplo, para um mesmo conjunto de materiais, um traço rico em cimento, com um abatimento do tronco de cone de 60 mm, será muito coeso mas a argamassa do concreto proporcionará pouco atrito. Em compensação, um traço muito pobre com os mesmos materiais e mesmo abatimento, terá pouca coesão (e tendência à desagregação e segregação), mas terá um atrito entre os grãos maior, devido à falta de pasta para "lubrificar" as superfícies. Uma coisa compensa a outra "no ensaio" de consistência, porém não compensa com relação às características desejáveis para o concreto.

O engenheiro tem que estar muito atento às essas questões para não se deixar enganar. Ao dosar o concreto, ele precisa avaliar se a mistura realmente atende às necessidades de transporte, adensamento e acabamento, que o estudo de trabalhabilidade deve responder. Nesta fase é necessária especial atenção para que não seja fornecido para a obra um traço que dê a consistência requerida no ensaio, mas não permita ser trabalhado de modo satisfatório.

2.3 A ÁGUA DO CONCRETO

Como não poderia deixar de ser, a água também tem efeitos contraditórios nas qualidades do concreto. Para cada composição de cimento e agregados, existe uma quantidade de água necessária para proporcionar determinado abatimento. Ao colocar água à mais, pode-se talvez até melhorar o concreto em termos de adensabilidade, o que é bom, mas geralmente piora em termos de estabilidade. Além do mais, devido ao aumento da relação água / cimento (e conseqüentemente da porosidade capilar), diminui-se a resistência mecânica e aumenta-se a permeabilidade. Por isso o abatimento deve ser o mínimo necessário.

A quantidade de água ideal para uma mistura está diretamente ligada à quantidade de vazios que esta mistura seca possui. É claro que não é exatamente na mesma quantidade dos vazios. Como a água age juntamente com o cimento como lubrificante dos componentes do concreto, é necessário haver uma distância mínima entre os grãos, para o lubrificante agir, e isso depende da viscosidade desse lubrificante (pasta = água + cimento) e da rugosidade da superfície das faces de deslizamento, ou seja, da granulometria dos agregados. Quanto mais rugosas as superfícies de deslizamento, maior tem que ser a espessura da camada lubrificante,

ou maior (até um certo limite) deveria ser a viscosidade do lubrificante. Entretanto, o aumento na viscosidade não produz aumento no abatimento, porque vem acompanhado do aumento da coesão da mistura, o que acaba anulando o efeito esperado de aumento no abatimento, ou até mesmo pode produzir perda de abatimento. Contudo, em concretos normais a variação da relação a/c de uma mistura com teor constante de água, geralmente produz muito pouca alteração no abatimento. Para se ter consideráveis alterações no abatimento do concreto, só mesmo variando o volume de água da mistura, ou seja, a relação água / materiais secos. É nisso que se baseia a lei de Lyse.

Inge Lyse, publicou em 1931 sua contribuição ao estudo da dosagem dos concretos, demonstrando que, dentro de certos limites, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos demais materiais da mistura. Essa verdade se verifica sempre que sejam mantidos materiais de mesma natureza, com grãos de mesma forma, textura e dimensão característica. Petrucci (1993) apresenta um gráfico mostrando que variando o traço de 1:3 para 1:9, em proporções usuais, mantêm-se praticamente constante a quantidade total de água empregada. Esse gráfico é reproduzido na figura 4, com a introdução dos teores de argamassa α , das relações areia/materiais secos total ($a/(1+m)$) e das relações areia/agregado total (a/m) para cada traço. Nota-se que no exemplo colocado por Petrucci, o teor de argamassa é variável com o traço, mas a relação areia/agregados é mantida constante.

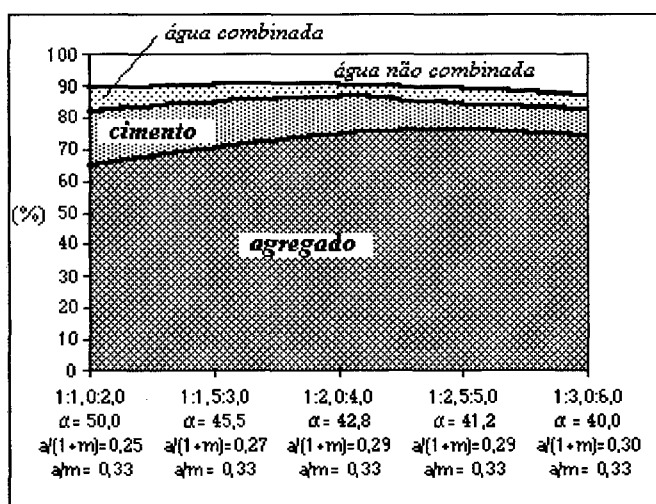


Figura 4 - A porcentagem de água/ materiais secos (H) é praticamente independente do traço para um mesmo abatimento (Adaptado de Petrucci, 1993)

Pode-se verificar na figura 4 que o teor de água pouco se altera com a variação do traço, mas alguma variação existe. Alguns métodos de dosagem chegam a considerar que não existe nenhuma alteração da relação água/materiais secos "H" com a variação do traço. Ao encontrar o H de um traço, simplesmente se adota esse valor, qualquer que seja o traço. Mas

como isso não é totalmente verdadeiro, pode-se prejudicar o desempenho da usina, ao levá-la a produzir um concreto com menor trabalhabilidade. Para compensar a perda de abatimento na obra, certamente será colocada mais água, elevando a relação a/c, e diminuindo-se consequentemente a resistência esperada do concreto.

No Brasil é freqüente a utilização da expressão “lei de Lyse”, quando se deseja considerar absolutamente invariável a relação água / materiais secos “H” de um concreto, dado um abatimento, para qualquer proporção entre os materiais, apesar de Lyse (1931) não ter afirmado exatamente isto. Mas nestes termos, se um método de dosagem considera inteiramente válida a lei de Lyse, então a variação do traço “m” em função da relação água / cimento “a/c” deveria aparecer como uma reta no seu diagrama de dosagem, como as do gráfico da figura 5 , onde estão plotadas as variações de "m" com "a/c", para o caso de "H" ser considerado constante. Na figura 5, cada reta é para um H diferente (abatimento diferente também), sendo os valores de H iguais a 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 %.

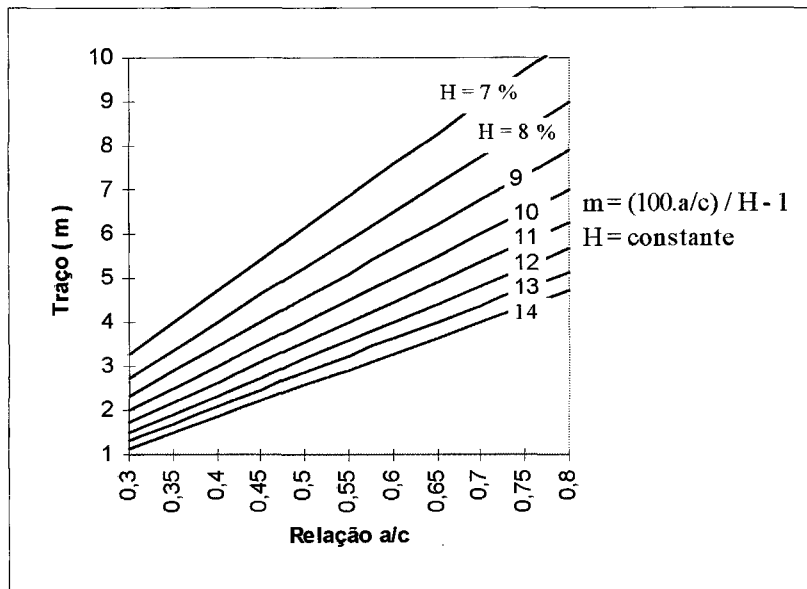


Figura 5 - Variação do traço "m" com a relação água/cimento "a/c" considerando a relação água/ materiais secos "H" constante

No entanto, como nem sempre “H” é absolutamente constante, alguns autores (Helene & Terzian, 1992) recomendam fazer uma regressão aos mínimos quadrados à uma reta do traço "m" em função da relação a/c, encontrando as constantes da reta para construir o diagrama de dosagem, sendo a equação :

$$m = k_3 \cdot a/c + k_4 \quad \text{onde } k_3 \text{ e } k_4 \text{ são as constantes da reta.}$$

Além de ser estatisticamente um bom procedimento para o ajuste de valores obtidos experimentalmente, isso também compensa parte dos erros advindos da consideração que “H” seja absolutamente constante quando não o for.

Quando na regressão o valor de “ k_4 ” encontrado é igual a (-1), “H” realmente é constante e é igual a “ k_3 ”. Entretanto, para o caso de se encontrar um valor para “ k_4 ” diferente de (-1), como freqüentemente acontece, isto significa que há alguma variação de “H” para manter o abatimento constante, quando “a/c” é variado, pois por definição, “m” é função de “H” e “a/c”, segundo a expressão :

$$m = (100. a/c) / H - 1$$

Não parece haver motivo justo para se utilizar uma reta para representar a variação do traço “m” com a relação a/c, já que normalmente se admite que há alguma variação de “H”, quando é alterada a relação a/c do concreto. Provavelmente uma curva polinomial se ajustaria melhor que uma reta.

A despeito das pequenas variações que existem no “H” para traços de diferentes “a/c”, ainda assim a lei de Lyse é muito importante para a estimativa da quantidade de água de uma mistura. Como a variação é pequena entre traços de diferentes relações a/c, então qualquer que seja a relação a/c que se deseje, o teor de água necessário para determinado abatimento dependerá principalmente do número de vazios da mistura de agregados. Logo, como o volume de vazios de uma mistura de agregados depende mais da dimensão máxima característica do agregado, do que qualquer outro fator, praticamente todos os métodos de dosagem estimam a quantidade de água por volume de concreto, para a primeira tentativa experimental, em função da dimensão máxima característica do agregado. Isto facilita muito a determinação da quantidade de água ideal da mistura.

2.4 SEQUÊNCIA GERAL DE UM ESTUDO DE DOSAGEM

2.4.1 Estudo das cinco condições que o concreto deverá atender

Helene (1987) enumera cinco condições que devem ser analisadas em todo estudo de dosagem de concreto :

2.4.1.1 Exigências de projeto :

As principais exigências de projeto são : a resistência característica à compressão do concreto na idade de controle, e também, em função das dimensões mínimas do espaçamento das armaduras, a dimensão máxima característica do agregado, e ainda a exigência de trabalhabilidade, expressa em termos de abatimento. Dependendo da obra, podem vir exigências como resistência característica à tração, módulo de elasticidade, resistividade elétrica, permeabilidade máxima, acabamento, fluência, condutividade térmica, calor de hidratação, tenacidade, etc..

2.4.1.2 Condições de exposição e operação :

Dependendo das condições de exposição à água, solo ou atmosfera agressiva, ou mesmo á abrasão, exposição ao Sol, produtos químicos e outros, a estrutura deverá ter uma proteção que garanta a durabilidade exigida para a obra. Em geral a resistência aos meios agressivos é controlada pelo grau de permeabilidade do concreto. A permeabilidade pode ser controlada através de uma relação a/c máxima, ou, em certos casos, de um consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto. Pode haver necessidade de uso de aditivos orgânicos ou minerais, ou ainda de tipo especial de cimento, em função do agente agressivo predominante.

2.4.1.3 Tipo de agregado disponível economicamente :

Como em alguns locais há dificuldade de se encontrar agregados ideais, e o transporte desse material á longas distâncias é altamente dispendioso, há de se estudar as características dos agregados disponíveis. Por exemplo, o consumo elevado de água devido à forma irregular, ou a reatividade com os álcalis do cimento, exige que se tomem medidas que minimizem ou eliminem os efeitos indesejáveis que possam causar.

2.4.1.4 Técnicas de execução :

Se relacionam aos equipamentos para transporte, lançamento e adensamento. Dependendo das condições de transporte pode haver necessidade de maior coesão (estabilidade). O lançamento por meio de bomba exige maior teor de argamassa e abatimento mais elevado, e também restringe a dimensão máxima característica do agregado. Os equipamentos disponíveis para adensamento e a velocidade com que se pretende realizar a concretagem, fazem também exigência quanto ao abatimento da mistura.

2.4.1.5 Custo :

Atendidas todas as outras exigências, o concreto deve ter o custo mínimo entre todas as possibilidades existentes.

2.4.2 Decisão sobre materiais e parâmetros de dosagem

Para o atendimento das cinco condições anteriores, verificadas no primeiro passo do estudo de dosagem, o engenheiro deve escolher o tipo, classe e marca de cimento que atenda àquelas condições. Deve também calcular a resistência de dosagem de acordo com a resistência característica e o desvio-padrão da produção. Também deve decidir sobre a origem e a dimensão máxima característica do agregado e o abatimento do concreto.

2.4.3 Realização de ensaios preliminares

Cada método de dosagem têm suas próprias exigências quanto à necessidade de ensaios preliminares para caracterização dos materiais. Quanto mais analítico o método, mais caracterizações preliminares dos materiais são necessárias.

2.4.4 Cálculo analítico do traço provável

O primeiro passo para o cálculo das proporções entre os materiais é a determinação da relação a/c mais provável. Alguns se utilizam da experiência e do conhecimento dos materiais da região para estabelecer a relação a/c inicial. Outros utilizam de curvas médias de Abrams nacionais para cada tipo e classe de cimento, ou curvas de Abrams em função da resistência média conhecida do cimento.

Com base na relação água/cimento estimada, no abatimento desejado, e nos ensaios de caracterização dos agregados, é feita uma estimativa para o consumo de água por metro cúbico de concreto, e conseqüentemente, o consumo de cimento. Alguns métodos também já estimam a quantidade de brita e areia.

2.4.5 Elaboração de mistura experimental

É feita uma mistura experimental, onde os materiais são geralmente colocados aos poucos, para ajustar a quantidade de água ideal. Alguns métodos ajustam o teor de argamassa juntamente com o teor de água, colocando areia aos poucos, até o concreto apresentar-se bem argamassado. Encontradas as proporções ideais entre os materiais, mantida a relação a/c , são

moldados corpos-de-prova para verificação do acerto da resistência através de ensaio à compressão axial na idade de controle.

Alguns métodos fazem três ou mais misturas, de relações a/c diferentes, e moldam corpos-de-prova para ruptura à compressão, com o objetivo de construir a curva de Abrams específica para os materiais do estudo e ainda as outras curvas do diagrama de dosagem.

2.4.6 Ajuste experimental ou analítico do traço

Após o resultado do ensaio de resistência à compressão, dependendo da resistência verificada, é feita nova mistura experimental, alterando a relação a/c para obtenção da resistência desejada. Moldam-se novos corpos-de-prova para nova comprovação.

No caso dos métodos onde são construídas as curvas de Abrams, é feito o cálculo analítico do traço ajustado, que deve ser então dosado na obra e moldados corpos-de prova para ruptura à compressão para comprovação da adequação às condições na obra. Essa comprovação do traço às condições na obra deve ser feita, qualquer que seja o método de dosagem (NBR-12655, 1996 - item 6.5.1.1). Porém a norma diz que “... *Este procedimento é desnecessário, quando se utilizar concreto dosado em central ou quando já tenham sido elaborados concretos com os mesmos materiais e em condições de execução semelhantes*”.

2.4.7 Ajustes periódicos

Devido às mudanças nas características do cimento e agregados, e das alterações do rigor da produção do concreto, são necessários ajustes periódicos do traço encontrado, de acordo com os resultados dos ensaios, para controle da produção.

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO SUCINTA E ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE ALGUNS MÉTODOS DE DOSAGEM CONHECIDOS NO BRASIL

3.1 MÉTODO DA ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland / ACI - American Concrete Institute (Rodrigues, 1995)

3.1.1 Fundamentos básicos

a) A resistência do concreto depende fundamentalmente da resistência do cimento e da relação a/c do concreto, desde que tenha trabalhabilidade adequada;

b) A consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo britado do concreto, que por sua vez depende da dimensão máxima característica do agregado. Isto é, quanto maior esta dimensão máxima, menor o consumo de água do concreto.

c) O teor de argamassa da mistura depende fundamentalmente do volume de vazios deixados pelo agregado graúdo no concreto (que depende da dimensão máxima característica), da capacidade de "lubrificação" da argamassa (quanto mais fina a areia menor a quantidade de argamassa necessária), e da forma do agregado graúdo (forma essa expressa indiretamente através do ensaio da massa unitária compactada seca). Isto é, quanto pior a forma do agregado, dado uma dimensão máxima característica, menor a massa unitária, e maior a necessidade de argamassa.

d) No método ABCP, o ajuste da trabalhabilidade e do teor de argamassa ideal, fundamenta-se na lei de Lyse, que diz que a relação água/materiais secos de uma mistura praticamente independe da proporção entre os materiais dessa mistura.

No método do ACI, o ajuste da trabalhabilidade fundamenta-se no mesmo princípio usado para determinar o teor de água estimado da mistura, ou seja, que o abatimento do concreto depende do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo do concreto. Dessa forma, a alteração na proporção entre a areia e a brita altera não somente o teor de argamassa, bem como o abatimento da mistura.

3.1.2 Principais requisitos de projeto

- a) Resistência característica à compressão do concreto;
- b) Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- c) Abatimento;
- d) Dimensão máxima característica do agregado.

3.1.3 Ensaio preliminares necessários

- a) Resistência à compressão do cimento (ou o valor conhecido da média do cimento), e massa específica;
- b) Granulometria do agregado graúdo (dimensão máxima característica), massa específica, e massa unitária compactada seca;
- c) Granulometria do agregado miúdo (módulo de finura), e massa específica.

3.1.4 Etapas da dosagem

- a) Ensaio preliminares;
- b) Fixação da relação a/c através de um gráfico em função da resistência do cimento e da resistência requerida ao concreto;
- c) Determinação do consumo de água através de tabela em função do abatimento desejado e do dimensão máxima característica do agregado;
- d) Determinação do consumo de cimento fazendo : $C_c = C_{H_2O} / (a/c)$

e) Determinação do consumo de agregado graúdo (que é o mesmo que determinar o consumo de argamassa), através de tabela que fornece o volume unitário do agregado graúdo do concreto em função da dimensão máxima característica do agregado e do módulo de finura da areia. Multiplica-se esse valor pelo valor da massa unitária compactada seca, obtendo-se o consumo de agregado graúdo em kilogramas por metro cúbico de concreto.

f) Determinação do volume estimado de areia por metro cúbico de concreto, diminuindo-se de 1 metro cúbico, os volumes anteriormente encontrados para a água, cimento, e agregado graúdo. Multiplicando-se esse valor pela massa específica obtêm-se a massa estimada da areia.

g) Mistura experimental para o ajuste de trabalhabilidade e do teor de argamassa, que tem uma pequena diferença entre os métodos da ABCP e do ACI :

- No método da ABCP, a água é introduzida aos poucos na betoneira até que seja encontrada a consistência desejada. Se a quantidade de água encontrada não for exatamente igual à água estimada, há alteração da relação a/c prevista. Por isso, caso a quantidade de água seja maior que a prevista, é necessário colocar mais cimento para manter a relação a/c prevista. Isso é feito através de nova mistura com a mesma quantidade de água encontrada experimentalmente, determinando-se os outros componentes como feito anteriormente. Dessa forma o teor de argamassa será o mesmo, mas a proporção entre o cimento e a areia será maior. Como se verifica, considera-se que não há nenhuma variação no abatimento do concreto com a variação na reologia da argamassa, desde que H seja mantida constante.

Além do acerto no teor de água, pode ser necessário fazer o acerto no teor de argamassa do concreto. Segundo Rodrigues (1995), as tabelas foram elaboradas para produzirem concretos pouco argamassados com o objetivo de facilitar o acerto do teor de argamassa. Ele sugere a correção desse teor, caso seja necessário, variando a proporção entre a areia e a pedra, ou seja, acrescentando-se areia, água e cimento, mantendo-se o mesmo traço 1: m e mesmo H, para manter a mesma relação a/c. Assim, segundo Rodrigues, varia-se o teor de argamassa da mistura sem alterar o abatimento.

Mehta (Mehta & Monteiro, 1994), ao descrever o método do ACI, sugere para estudo de trabalhabilidade a colocação de toda a água estimada. Então, para corrigir o abatimento, diz para variar a proporção entre a areia e a pedra, mantendo-se o mesmo traço total 1:m e mesmo H, ou seja, conservando a relação a/c. Segundo ele, assim consegue-se, pela incorporação de mais areia na mistura, diminuir o abatimento do concreto. Isso leva a crer que as tabelas para estimativa dos materiais pelo método do ACI tendem a proporcionar misturas com

abatimentos um pouco mais elevados que o procurado. Verifica-se aí a diferença nas recomendações para o acerto de trabalhabilidade entre os dois métodos.

h) Moldagem de corpos-de-prova para ruptura à compressão com o fim de confirmar o acerto na resistência.

3.1.5 Vantagens e desvantagens do método

a) Vantagens

- O cálculo dos valores estimados do traço, desde que se tenham os valores dos ensaios preliminares, é muito rápido e simples;
- O acerto no teor de argamassa é feito experimentalmente, produzindo um concreto adequado às necessidades, desde que o tecnologista tenha boa experiência;

b) Desvantagens

- Necessita-se da realização de vários ensaios preliminares;
- No caso da resistência à compressão obtida ser diferente da esperada, têm-se que fazer nova dosagem para corrigir a relação a/c, e mesmo que não se espere mais os 28 dias para a nova confirmação, essa nova dosagem necessitará de mais um acerto de trabalhabilidade e do teor de argamassa;
- São moldados corpos-de-prova de um único traço experimental para verificação do acerto da resistência. Como a resistência à compressão obtida no ensaio está sempre sujeita às variabilidades da dosagem, ensaio, amostra de cimento e agregados, não há confiança de que o traço experimentado esteja realmente conforme as necessidades;
- As tabelas foram feitas a partir de vários agregados graúdos britados estudados pela ABCP. Dependendo do conjunto de agregados que forem usados em um estudo de dosagem, ou no caso da dosagem de um concreto com seixo rolado, as tabelas poderão não fornecer valores adequados.

3.2 MÉTODO IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo / EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Helene & Terzian, 1992)

3.2.1 Fundamentos básicos

a) A resistência do concreto depende fundamentalmente do tipo e classe do cimento utilizado e da relação a/c do concreto, desde que tenha trabalhabilidade adequada;

b) A consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo do concreto, que por sua vez depende da dimensão máxima característica do agregado e de sua forma.

c) O teor ideal de argamassa da mistura depende fundamentalmente do volume de vazios deixados pelo agregado graúdo no concreto (que depende da dimensão máxima característica) e da capacidade de "lubrificação" da argamassa (que depende das características do cimento e areia). Esse teor de argamassa ideal, que é independente da relação a/c do concreto, é melhor determinado experimentalmente, pela aparência do concreto fresco no abatimento desejado, e ao demonstrar boa estabilidade da massa.

d) A lei de Lyse se adapta relativamente bem às situações dos concretos normais. Considera-se que, mantendo-se constante o teor de argamassa do concreto para traços de com diferentes relações a/c, haverá pouca variação na relação água / materiais secos necessário para manter o mesmo abatimento. O método usa uma regressão linear aos mínimos quadrados, para encontrar uma reta que correlacione "m" com "a/c" ($m = k_3 \cdot a/c + k_4$), com o objetivo de montar o diagrama de dosagem.

Entretanto, sistematicamente, vários estudos de dosagem de concreto têm resultado em valores de " K_4 " significativamente diferentes do valor (-1) da equação teórica do traço "m" em função do "H" e "a/c", ou seja, ($m = (100/H) \cdot a/c - 1$). Isto demonstra que o "H" não é sempre constante, e desse modo, uma reta nem sempre se ajusta bem ao valor do traço "m" em função da relação a/c, como unanimemente se aceita

e) Pode ser construído um diagrama único de dosagem para um dado conjunto de materiais, onde os parâmetros resistência à compressão " f_{cj} ", traço "m", e consumo de cimento por metro cúbico de concreto "C", são plotados em função da relação a/c. Isso facilita que posteriormente se possa obter de imediato, o traço adequado de qualquer concreto com resistência à compressão no intervalo considerado pelo diagrama.

3.2.2 Principais requisitos de projeto

- a) Resistência característica à compressão do concreto;
- b) Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- c) Abatimento;
- d) Dimensão máxima característica do agregado.

3.2.3 Ensaio preliminares necessários

- a) Conhecimento do tipo e classe do cimento a ser utilizado;
- b) Avaliação visual do tipo de agregado a ser utilizado e da dimensão máxima característica, para se ter uma primeira estimativa da relação água/ materiais secos.

3.2.4 Etapas da dosagem

- a) Ensaio preliminares (simples avaliação visual);
- b) Estimativa de uma relação água/materiais secos relativamente próxima do valor que proporcionará a trabalhabilidade adequada a um traço 1:5 (essa estimativa não é necessária mas facilita o estudo de trabalhabilidade);
- c) Mistura experimental do traço 1:5 , colocando água aos poucos até que se obtenha a consistência desejada. Avalia-se o teor de argamassa da mistura, experimentando a coesão da massa e estabilidade, usando da experiência que o tecnólogo de concreto possui. Se o teor de argamassa não estiver bom, coloca-se mais areia, mais cimento, e acrescenta-se mais água, mantendo-se o traço 1:5, até dar novamente a consistência desejada. Avalia-se mais uma vez o teor de argamassa, repetindo o procedimento até que se obtenha o teor adequado. A relação água / materiais secos encontrada passa a ser o valor estimado para todas as misturas, e o teor de argamassa é fixado para todos os traços;
- d) São feitas 3 misturas de traços 1:3,5 , 1:5 e 1:6,5 , com o teor de argamassa encontrado, acrescentando-se água aos poucos em cada mistura, até se encontrar o abatimento desejado. Moldam-se então corpos-de-prova para ensaio á compressão na idade de controle;

e) Com os valores da resistência obtida nos ensaios dos corpos-de-prova, e dos valores de m em função de a/c , constrói-se o diagrama de dosagem. A curva de consumo de cimento em função do traço, também é obtida através da massa específica do concreto fresco, ou a partir da massa específica do cimento e agregados.

3.2.5 Vantagens e desvantagens do método

a) Vantagens

- Não são necessários ensaios preliminares;
- O teor de argamassa ideal é obtido experimentalmente evitando-se dosar um concreto com deficiência ou excesso de argamassa;
- É obtido um diagrama de dosagem que serve para qualquer resistência desejada ao nível dos concretos normais. Não é necessário fazer novas misturas para o acerto da dosagem;
- É rápido e prático de se fazer, desde que o tecnologista tenha alguma experiência com dosagem.

b) Desvantagens

- O teor de argamassa ideal encontrado para o traço 1:5 é mantido constante para os outros traços. Isso pode causar uma certa deficiência ou excesso de argamassa nos traços mais extremos;
- Na construção do diagrama de dosagem, força-se a aderência dos dados para correlação entre o traço " m " e a relação a/c à uma reta. Entretanto algumas vezes uma curva pode representar melhor a correlação entre essas duas variáveis. A consequência de forçar uma reta é que os traços representados pelo diagrama de dosagem podem ter uma maior ou menor demanda por água que o esperado.
- Propõe-se a construção do diagrama de dosagem a partir de apenas 3 misturas, sendo que, as variações que ocorrem na dosagem, ensaio e nos materiais, podem levar à obtenção de uma curva de Abrams significativamente diferente da curva média para os materiais do estudo.

3.3 MÉTODO DO INT - Instituto Nacional de Tecnologia (Carneiro, 1937; Petrucci,1993)

3.3.1 Fundamentos básicos

a) Para cimentos e agregados semelhantes, a resistência à compressão do concreto depende fundamentalmente da relação a/c do concreto, desde que se tenha trabalhabilidade adequada;

b) A consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo do concreto, que por sua vez depende da dimensão máxima característica do agregado;

c) Para cada dimensão máxima característica do agregado, existe uma distribuição granulométrica ideal, formada pela mistura do cimento, areia e pedra. A função da dosagem é encontrar a proporção entre os materiais, de forma a aproximar ao máximo dessa distribuição granulométrica, obtendo um concreto de trabalhabilidade adequada e com relação a/c que dê a resistência requerida;

d) O ajuste da dosagem fundamenta-se na lei de Lyse, que afirma que para um dado conjunto de materiais, a alteração na proporção entre os mesmos, desde que na faixa dos concretos usuais, não altera significativamente o valor de "H" para uma mesma trabalhabilidade.

3.3.2 Principais requisitos de projeto

- a) Resistência característica à compressão do concreto;
- b) Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- c) Abatimento;
- d) Dimensão máxima característica do agregado.

3.2.3 Ensaios preliminares necessários

- a) Granulometria da areia;

b) Granulometria da brita.

3.2.4 Etapas da dosagem

a) Ensaio preliminares;

b) Fixação da relação a/c através de uma curva de Abrams obtida para materiais e cimento semelhantes;

c) Estimativa da relação água / materiais secos "H", através de uma tabela que fornece um valor de referência em função do abatimento do concreto e da dimensão máxima característica do agregado;

d) Determinação do traço (1 : m) à partir do "H" e da relação a/c, ou seja :

$$m = (100 / H).a/c - 1 ;$$

e) Determinação da proporção entre cimento, areia e pedra que dê a granulometria que mais se aproxima da curva granulométrica ideal, fornecida através das curvas de Bolomey, adaptadas para os gnaisses do Rio de Janeiro por Lobo Carneiro (Petrucci, 1993). A determinação é feita por processo analítico (mínimos quadrados) ou gráfico.

f) Faz-se a mistura experimental introduzindo na betoneira a água aos poucos até ser obtida a consistência desejada;

g) A quantidade de água necessária para obtenção da consistência requerida, é dividida pela massa de materiais secos utilizados, para obtenção do H estimado. Calcula-se então novo traço (1 : m) , repetindo todo o procedimento anterior, até que a mistura calculada dê o abatimento requerido, com a quantidade exata da água estimada.

h) Moldagem de corpos-de-prova para ruptura à compressão axial, com o propósito de confirmar o acerto da dosagem.

3.2.5 Vantagens e desvantagens do método

a) Vantagens

- Os ensaios preliminares consistem apenas da granulometria dos agregados graúdo e miúdo;
- Com o desenvolvimento dos microcomputadores tornou-se muito fácil e rápido o cálculo analítico da proporção dos materiais que dê a curva granulométrica que mais se aproxime da ideal;
- A mistura experimental é muito fácil de ser realizada porque o acerto de trabalhabilidade é feito variando somente a quantidade de água;
- O traço final geralmente é encontrado com apenas 2 ou 3 misturas experimentais.

b) Desvantagens

- No caso da resistência à compressão obtida ser diferente da esperada, têm-se que fazer nova dosagem para corrigir a relação a/c, e mesmo que não se espere mais os 28 dias para nova confirmação, essa nova dosagem necessitará de novo acerto de trabalhabilidade;
- São moldados corpos-de-prova de um único traço experimental para verificação do acerto da resistência. Como a resistência à compressão obtida no ensaio está sujeita às variabilidades da dosagem, ensaio, amostra de cimento e agregados, não há confiança de que o traço experimentado esteja realmente adequado às necessidades.
- As curvas granulométricas disponíveis se restringem às construídas por Lobo Carneiro (baseadas nas de Bolomey), para as britas de gnaisses do Rio de Janeiro. Além disso, quando essas curvas foram elaboradas, os cimentos nacionais eram produzidos com uma finura menor, e conseqüentemente menor resistência que os cimentos de hoje. Logo, as curvas granulométricas foram feitas para um consumo maior de cimento, que o consumo de cimento normalmente utilizado atualmente, se for considerado um mesmo nível de resistência. Por este motivo, a utilização dessas curvas para dosagem podem proporcionar misturas inadequadas, com baixos teores de argamassa e tendência à desagregação, mesmo que o ensaio do abatimento do tronco de cone dê o valor especificado.

3.4 MÉTODO DO ITERS - Instituto de Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul / CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (Petrucci, 1993)

3.4.1 Fundamentos básicos

a) Para cimentos e agregados semelhantes, a resistência do concreto depende fundamentalmente da relação a/c do concreto, desde que se tenha trabalhabilidade adequada;

b) A consistência do concreto, medida pelo tempo de remoldagem de Powers (ou abatimento do tronco de cone), depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado miúdo e graúdo, que por sua vez depende da granulometria e forma dos agregados, e da dimensão máxima característica do agregado;

c) A proporção ideal entre a areia e a pedra, para um traço qualquer (1 : m) , é aquela que proporciona a menor relação água/materiais secos "H" para o abatimento requerido, pois será o traço mais econômico;

d) Para traços próximos de um traço experimentado, considera-se que o "H" permanece absolutamente constante com a variação na proporção dos materiais secos da mistura;

e) Encontrada a porcentagem ideal de areia em relação aos materiais secos totais, ou o teor de argamassa, ou ainda a porcentagem de areia no agregado total, para traços próximos do experimentado, a fixação de qualquer um desses valores levará a traços adequados.

3.4.2 Principais requisitos de projeto

a) Resistência característica à compressão do concreto;

b) Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;

c) Abatimento;

d) Dimensão máxima característica do agregado.

3.4.3 Ensaios preliminares necessários

a) Avaliação visual do tipo de agregado utilizado e de sua dimensão máxima característica, para uma primeira estimativa de "H".

3.4.4 Etapas da dosagem

a) Ensaios preliminares;

b) Estimativa de acordo com a experiência local, de um traço 1:m relativamente próximo do traço que deverá proporcionar a resistência desejada;

c) Estimativa de uma relação água / materiais secos "H" relativamente próxima do valor que proporcionará a trabalhabilidade adequada ao traço 1:m ;

d) Mistura experimental para determinação do teor ideal de areia e do H ideal, fazendo 3 ou mais misturas com diferentes teores de areia e mesma relação 1:m estimada anteriormente. Medida da consistência de cada mistura para 3 ou mais valores pré-definidos da relação água / materiais secos (H_1, H_2, H_3 , etc.);

e) Traçado de um gráfico de consistência em função do teor de areia, sendo uma curva para cada relação água / materiais secos pré-definidos (H_1, H_2, H_3 , etc.). Unindo-se por uma reta os pontos de maior abatimento de cada curva, obtêm-se uma reta que dá o teor de areia ideal e a relação água / materiais secos ideal para qualquer abatimento que se deseje, com os materiais estudados. A figura 6 ilustra o gráfico utilizado para determinação do teor de areia ideal:

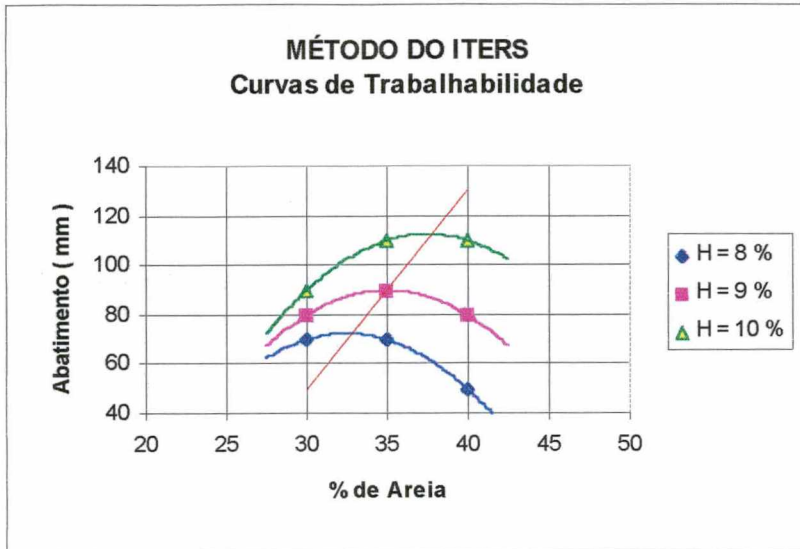


Figura 6 - Curvas de trabalhabilidade do método do ITERS / CIENTEC

f) Mistura e moldagem de corpos-de-prova para 3 ou mais traços próximos do traço estimado, utilizando sempre a mesma relação água / materiais secos ideal encontrada pelo gráfico, e fixando-se o teor de argamassa α , ou o teor de areia em relação ao agregado total a/m , ou mesmo o teor de areia em relação aos materiais secos totais $a / (1+m)$. Supõe-se então que o “H” permanece absolutamente constante dado um conjunto de materiais e um abatimento;

g) Com os resultados do ensaio à compressão, traça-se a curva de Abrams e obtêm-se a relação a/c que irá produzir a resistência desejada;

h) Calcula-se o novo traço, utilizando o mesmo valor do H ideal anteriormente encontrado, fazendo : $m = (100/ H).a/c - 1$. Desdobra-se o traço utilizando-se do mesmo valor fixo adotado de α , a/m ou $a / (1+m)$, que foi anteriormente encontrado junto com o H ideal.

3.4.5 Vantagens e desvantagens do método

a) Vantagens

- Como é obtida a curva de Abrams dos materiais estudados, logo após a ruptura dos corpos-de-prova, então o traço de ajuste é encontrado diretamente da curva, sem a necessidade de uma nova mistura. Só é necessário mesmo a experimentação desse traço fazendo a mistura na obra, como prescreve a NBR-12655 (1996).

- Não há necessidade de ensaios preliminares, a não ser uma avaliação visual dos agregados;
- O traço encontrado experimentalmente é o mais econômico, pois para um dado abatimento, é escolhido o teor de areia que proporciona um menor valor para a relação água/materiais secos. Conseqüentemente, o traço encontrado é o que consome menos cimento para uma dada relação a/c.

b) Desvantagens

- O número de misturas para o estudo de trabalhabilidade é maior que nos outros métodos;
- Além do estudo de trabalhabilidade, têm-se também que realizar mais três misturas, para moldagem de corpos-de-prova, que visa a obtenção da curva de Abrams;
- Considera-se o "H" absolutamente constante, a ponto de desconsiderar a necessidade de avaliar a consistência para os outros traços dosados para a construção da curva de Abrams. Como conseqüência, o traço final obtido pode não ter a consistência desejada;
- Não é determinada a proporção de areia ideal para os traços adjacentes às do traço inicial do estudo. Ao fixar um dos valores α , a/m ou $a / (1+m)$, os outros traços podem resultar em misturas com teores inadequados de argamassa;
- Considera-se que o teor ótimo de areia é aquele que produz um valor mínimo da relação água / materiais secos, ou seja, o mínimo índice de vazios, que dê o abatimento requerido. Como a trabalhabilidade não é totalmente medida pelo ensaio de consistência, é possível que o concreto possua deficiência de argamassa, dificultando o lançamento e o adensamento.

3.5 MÉTODO CUBANO (Diaz, 1996)

3.5.1 Fundamentos básicos

a) A resistência do concreto depende fundamentalmente da resistência do cimento utilizado, da forma do agregado graúdo, da consistência, e da relação a/c do concreto;

b) A consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo do concreto, que por sua vez também depende da forma do agregado. A menor quantidade de água necessária para o abatimento desejado será aquela obtida através de uma mistura de pedra e areia que dê a menor porcentagem de vazios.

c) O teor de argamassa ideal da mistura é aquela que proporciona uma menor porcentagem de vazios entre os grãos de areia e pedra. Fundamenta-se aqui no princípio do menor consumo de cimento e não da melhor trabalhabilidade (esse valor ideal de a/m é mantido inalterado para todo o estudo que se segue);

d) Variando o teor de água de uma mistura, consegue-se ajustar a consistência do concreto, mas como consequência é alterada a relação a/c. Baseado no fato de que para pequenas variações nas proporções dos materiais, o abatimento tende a ter uma variação muito pequena se a relação água/ materiais secos for mantida inalterada, ao usar o H encontrado experimentalmente para recalcular o traço, este será muito próximo do traço ideal. Então fazendo-se nova mistura para encontrar o H, e recalculando as proporções entre os materiais, encontra-se o traço ideal por iteração, quando a quantidade de água prevista for exatamente igual à encontrada na mistura experimental.

3.5.2 Principais requisitos de projeto

- a) Resistência característica à compressão do concreto;
- b) Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- c) Abatimento;
- d) Dimensão máxima característica do agregado.

3.5.3 Ensaios preliminares necessários

a) Avaliação visual dos materiais a serem utilizados, para, com base na experiência do tecnologista, fazer uma primeira estimativa do volume de água necessário;

b) Massa específica da areia e do agregado graúdo

c) Resistência à compressão do cimento, ou o conhecimento do seu valor médio;

3.5.4 Etapas da dosagem

a) Ensaios preliminares;

b) Estimativa, com base na experiência e conhecimento dos materiais da região e do cimento, de um traço 1:m relativamente próximo do traço que deverá proporcionar a resistência desejada;

c) Mistura de areia seca e pedra nas proporções de 35:65 , 40:60 , 45:55, 50:50 e 55:45, para encontrar a proporção que deverá dar o menor índice de vazios para a mistura seca. A proporção encontrada torna-se a proporção definitiva para a relação entre a areia e a pedra, qualquer que seja o traço ($a/m = \text{constante}$);

d) Determinação experimental da quantidade necessária de água para o abatimento desejado. É feita uma mistura de areia e pedra na proporção encontrada entre os agregados, mais a quantidade de cimento estimada, e introduz-se a água aos poucos até encontrar a consistência requerida;

e) Moldam-se corpos-de-prova para o ensaio de compressão axial;

f) Faz-se o ensaio de compressão axial do cimento;

g) Calcula-se um valor que expressa a influência da forma dos agregados na resistência do concreto (fator A), à partir dos resultados obtidos da resistência à compressão do concreto, da resistência do cimento, da relação a/c , e dois valores tabelados M_1 e M_2 , que dependem do abatimento da mistura;

h) Calcula-se a relação a/c para a resistência desejada em função do "fator A" encontrado, da resistência do cimento e do abatimento do concreto;

i) Calcula-se o teor de cimento, com base na quantidade de água encontrada experimentalmente;

j) De posse da nova relação a/c e da proporção a/m fixada, dosa-se a mistura, colocando-se a água aos poucos até ser obtida a consistência requerida;

k) A nova quantidade de água é usada para calcular o teor de cimento novamente, fazendo nova mistura e adição de água aos poucos, até a consistência que se quer. Essa iteração é feita até que a quantidade prevista de água seja exatamente igual à quantidade necessária para proporcionar o abatimento requerido;

obs.: O "fator A" do método também pode ser obtido por método físico-matemático, ou seja, determinando-se o "fator A" a partir das propriedades de forma dos grãos dos agregados graúdos, denominadas de fatores de esfericidade e de redondez. Fazendo-se dessa maneira, são dispensadas as etapas "e" e "g", economizando-se ainda o tempo de espera que seria necessário para obtenção dos valores da resistência à compressão.

3.5.5 Vantagens e desvantagens do método

a) Vantagens

- A determinação do "Fator A" é um bom instrumento para a escolha de agregados graúdos que sejam mais econômicos, ou seja, que propiciem um menor consumo de cimento;
- O acerto do traço é feito sem a necessidade de novo ensaio de compressão, o que economiza tempo.

b) Desvantagens

- São necessários ensaios preliminares de massa específica dos agregados;
- É necessário o ensaio de compressão axial do cimento ou o conhecimento da resistência média desse cimento em período recente;

- Para uma previsão relativamente próxima do traço e da quantidade de água ideais, é necessário que se tenha bom conhecimento dos materiais a serem utilizados. Sem isso, aumentam-se o número de iterações para se encontrar o traço;
- São feitas muitas misturas entre a determinação do teor ótimo de areia, o acerto da água e o acerto do traço definitivo;
- São usados muitos valores tabelados, que foram obtidos experimentalmente em pesquisa realizada em Cuba. Pode ser que esses dados não se comportem muito bem para materiais provenientes de outras regiões, com outras formas, dimensões máximas características e origens mineralógicas diversas;
- A equação utilizada supõe que a resistência do cimento influencia a resistência do concreto na mesma proporção da variação da resistência do cimento, e que essa influência é independente da relação a/c do concreto;
- Supõe-se ainda que a influência do "fator A" é independente da resistência do concreto. Ou seja, supõe-se que a influência da forma da agregado graúdo na resistência do concreto não depende do grau de resistência do concreto.

CAPÍTULO IV

ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1.1 Problematização

O objetivo de um estudo de dosagem de concreto é encontrar a proporção mais econômica entre os materiais, de forma a produzir um concreto que atenda às especificações do projeto.

A principal característica especificada é a resistência à compressão, que passa a ser o parâmetro principal da dosagem, juntamente com as exigências de trabalhabilidade. A relação água / cimento mínima também está presente em muitos projetos, para garantir a durabilidade do material frente aos vários agentes agressivos presentes no meio ambiente.

Para que o estudo de dosagem não se torne um processo muito longo, envolvendo tentativa e erro, os vários métodos fornecem valores estimados para a quantidade de água do concreto, em função das características do agregado, do teor de argamassa ideal e do valor da relação a/c, em função da resistência do cimento. Dessa forma é mais fácil "acertar o alvo", com um menor número de tentativas.

O estudo de trabalhabilidade, que é realizado durante o estudo de dosagem, se feito com base nesses parâmetros estimados, se torna muito mais rápido, e não fosse a incerteza quanto ao valor a ser obtido da resistência à compressão, poder-se-ia iniciar a produção do concreto para a obra, logo após o estudo de trabalhabilidade.

Alguns autores (Helene & Terzian, 1995 ; Rodrigues, 1995), sugerem que podem ser iniciados os serviços de concretagem, desde que se conheçam os materiais empregados, antes mesmo da obtenção dos resultados do ensaio de compressão axial. Fazem isso com base nos bons coeficientes de correlação por eles encontrados, quando da execução dos respectivos trabalhos, da regressão entre a resistência e a relação a/c do concreto, para diferentes tipos de cimento (Helene, 1987), ou para diferentes níveis de resistência do cimento (Rodrigues, 1984, 1995), quando utilizaram cada um, diferentes agregados e cimentos. Segundo Helene (1987), alguns países como a Alemanha, Estados Unidos e Suíça, adotam curvas obtidas de forma semelhante para normalização nacional da dosagem de concreto.

Apesar dos bons coeficientes de correlação encontrados em cada trabalho, as curvas fornecidas pelos autores são significativamente diferentes entre si, o que leva a crer na existência de outras variáveis que afetam a resistência à compressão do concreto, e que não se manifestam através da resistência à compressão do cimento.

Necessário se faz a verificação do quanto essas curvas diferem entre si, e se realmente existem outras características ligadas ao cimento, que afetam a resistência do concreto, sem afetar a resistência do cimento. Os erros na dosagem e ensaio, e a variabilidade na resistência do cimento entre partidas diferentes de fabricação, também parecem ser importantes na determinação da curva de dosagem, e o conhecimento de sua ordem de magnitude pode auxiliar a estabelecer o número de ensaios a serem realizados no estudo de dosagem, a fim de se ter maior confiança no resultado do estudo.

Sabe-se que a finura do cimento e as características das partículas como forma, textura, porosidade e composição química, têm influência na reologia do concreto fresco (Priszkulnik, 1977, 1978). Conseqüentemente, também deve ter no consumo de cimento pelo concreto, pela maior demanda de água que provoca. Entretanto, os métodos de dosagem não fazem menção à influência do tipo de cimento no seu consumo pelo concreto para uma dada relação a/c. Logo é interessante procurar obter uma correlação entre o consumo de cimento e as variáveis resistência do cimento, resistência do concreto e demanda de água do cimento, que são as variáveis que devem influenciar mais fortemente o consumo de cimento por um concreto, dado um conjunto de agregados disponível. Pode ser muito útil encontrar um método que permita aos produtores de concreto estimar o consumo de cimento de um concreto, quando uma usina tiver a necessidade de mudar o tipo ou marca do cimento utilizado na produção. Outro ponto interessante seria confirmar a influência que a dimensão máxima característica do agregado tem sobre a resistência à compressão do concreto, já citada por grande número de pesquisadores (Saad et alii, 1983; Neville, 1988).

Considera-se que o teor de argamassa ideal deva ser um valor mínimo que produza a trabalhabilidade requerida ao concreto para que seja o mais econômico possível. Entretanto, o teor de argamassa é avaliado nos estudos de dosagem pela aparência e pelo ensaio de abatimento do tronco de cone. Como esse ensaio não é suficiente para representar a trabalhabilidade do concreto, mas sim a consistência do mesmo, é possível que muitas misturas produzam o abatimento esperado, mas não possuam a trabalhabilidade ideal que deveriam ter.

Se o aumento no teor de argamassa, além do valor que aparentemente é ideal, tiver a capacidade de melhorar a adensabilidade do concreto, conseqüentemente reduzirá a porosidade final do concreto, acarretando em maior resistência mecânica. Logo, é também interessante

investigar a influência do aumento do teor de argamassa na resistência do concreto e no seu consumo de cimento.

Mehta (Mehta & Monteiro, 1994) afirma que o abatimento também influencia a resistência do concreto, pois abatimentos mais elevados tendem a possuir maior exsudação. A verificação da influência do abatimento também é investigada neste trabalho.

4.1.2 Hipóteses

4.1.2.1 Hipótese geral

- Se as curvas médias nacionais que correlacionam a resistência à compressão do concreto com a relação a/c e a resistência do cimento, apresentadas por diferentes autores, são significativamente diferentes entre si, então outras variáveis além da relação a/c e da resistência do cimento, também podem afetar significativamente a resistência dos concretos.

4.1.2.1 Hipóteses adjacentes

- Se a correlação entre a resistência do concreto e a resistência do cimento, quando utilizados mesmos agregados e relação a/c fixa, modificando-se somente as amostras de um mesmo cimento, resultam em coeficientes de correlação muito baixos, então as variabilidades que ocorrem na dosagem e ensaios são muito significativas em relação à variabilidade da resistência do cimento, afetando o valor do coeficiente da correlação que existe entre os dois fenômenos físicos;

- Se a correlação entre a resistência do concreto e a resistência do cimento, quando utilizados mesmos agregados e relação a/c fixa, modificando-se somente as amostras de um mesmo cimento, resultam em coeficientes de correlação muito baixos, então existem outras variáveis intrínsecas ao cimento que afetam a resistência do concreto, e que não se manifestam através da resistência do cimento ;

- Se a finura e teor de adições do cimento influencia na sua demanda por água, então para relações a/c mais baixas, cimentos mais finos e com elevados teores de adições devem produzir concretos com consumos mais elevados;

- Se o teor de argamassa, a dimensão máxima característica do agregado ou o abatimento afetam a resistência à compressão do concreto, então esses parâmetros devem ser levados em consideração na dosagem;

4.1.3 Objetivos

4.1.3.1 Objetivos gerais

- Verificar, através de um estudo de caso, a influência da variabilidade da resistência de um mesmo cimento na variabilidade da resistência do concreto, e ainda, estudar a influência das características físico-químicas dos cimentos, expressas indiretamente em função do tipo, classe e marca do cimento, nas propriedades do concreto endurecido, no seu consumo e ainda na reologia do concreto fresco.

4.1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar a magnitude dos erros que ocorrem durante um estudo de dosagem e as conseqüências que isso provoca;

- Verificar a possibilidade da existência de outras variáveis intrínsecas à composição química do cimento, que possam afetar a resistência do concreto, sem que afete a resistência do cimento;

- Obter uma equação de regressão múltipla para cada idade 3, 7 e 28 dias, que correlacione a resistência do concreto com a relação a/c e a resistência do cimento, para ser usada no dosagem de concretos, obtida à partir de um dado conjunto de agregados, mas modificando o tipo e a marca dos cimentos;

- Obter as equações de dosagem para um dado conjunto de agregados, compreendendo as equações de Abrams, Lyse e Molinari, para cada cimento do estudo;

- Estudar a influência da demanda de água do cimento no consumo de cimento pelo concreto;

- Verificar a possibilidade de correlacionar através de uma regressão linear múltipla, o consumo de cimento do concreto, com as variáveis resistência à compressão do concreto, resistência do cimento, e demanda de água do cimento, de forma a obter uma maneira de prever o consumo de cimento de um concreto, na eventualidade da substituição do cimento utilizado por um outro de tipo ou marca diferente;

- Estudar a influência do teor de argamassa, da dimensão máxima característica do agregado e do abatimento, na resistência à compressão do concreto.

4.2 ESTUDO DA VARIABILIDADE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO DEVIDA À VARIABILIDADE DO CIMENTO - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

4.2.1 Introdução e objetivos

Nos estudos de dosagem de concreto, normalmente o laboratório contratado dosa três ou mais misturas de diferentes relações a/c, utilizando uma amostra de um dado conjunto de agregados escolhido, e uma amostra do cimento, que serão utilizados para a produção do concreto. Com esses materiais é construído o diagrama de dosagem deverá ser usado durante a produção do concreto.

Muitas variabilidades podem ocorrer durante um estudo de dosagem, além do que, as amostras dos materiais, coletadas para o estudo de dosagem, têm uma certa probabilidade de terem características bem distintas da média das características dos materiais a serem usados durante a produção do concreto.

Os objetivos desta parte do trabalho compreendem o estudo das variabilidades que podem ocorrer durante um estudo de dosagem do concreto, sua influência no diagrama de dosagem a ser encontrado, e o estudo das variabilidades que ocorrem durante a produção do concreto, especialmente aquelas devidas a mudanças entre partidas de cimento.

4.2.2 - Execução de ensaios e obtenção de dados de outros trabalhos

4.2.2.1 Dosagem de concretos e ensaios de cimento de amostras semanais de um mesmo cimento

Como o objetivo do trabalho foi o de estudar a variação na resistência de um mesmo cimento e sua influência na resistência do concreto, foi necessário fixar ao máximo as outras variáveis. Para isso foi separada uma quantidade de areia e de brita de uma usina de concreto de médio porte instalada em Florianópolis, suficiente para elaboração de todos os traços de concreto, de forma a eliminar o efeito da variabilidade desses materiais.

Semanalmente, durante 14 semanas, foi também retirado do silo da usina uma amostra de cimento CP I-S-32, marca Votoran da fábrica Rio Branco, usado em seguida para dosagem de um concreto padrão de relação a/c fixa e igual a 0,48 e abatimento igual a 60 ± 10 mm, para estudo da variabilidade da resistência do cimento.

As amostras de cimento foram numeradas de 01 a 14 segundo a ordem de coleta. Para as amostras de número 02, 05 e 10 foram dosados concretos de relações a/c 0,38 e 0,58, e duas misturas de relação a/c igual a 0,48, para construção das curvas de Abrams e medidas dos erros de dosagem. Os valores obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais estão resumidos na tabela 5 abaixo, segundo as normas NBR-7211 (1982), NBR-7217 (1987), NBR-9776 (1986):

Tabela 5 - Quadro-resumo das características dos materiais usados nas dosagens de concreto

	Massa Específica (Mg/m ³)	Módulo de Finura	Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Dimensão mínima característica do agregado (mm)	observações
cimento	3,15	-----	-----	-----	Marca Votoran - Tipo CPI-S-32
areia	2,58	2,51	2,4	0,15	Areia média - zona 3 NBR-7211 (1983)
brita 1	2,69	6,57	19,0	2,4	Mistura de granito e diabásio
brita 2	2,79	7,83	25,0	12,7	Mistura de granito e diabásio

Bucher (1983) afirma que a relação a/c explica 95 % das variações na resistência do concreto. Então, para que pudessem ser dosados vários traços, variando as amostras de cimento, mas conservando a relação a/c fixa, e o mesmo abatimento, as proporções entre os agregados (ou traço) foram diferentes em cada mistura.

Escolheu-se a relação a/c = 0,48 por ser este o valor da relação a/c do ensaio de resistência à compressão do cimento (NBR-7215, 1991). Também por ser um valor que proporciona resistências elevadas mas ainda na faixa dos concretos normais, ou seja, do grupo I da NBR-8953 (1992). Já os valores de a/c iguais a 0,38 e 0,58 usados nas misturas feitas com as amostras de cimento de números 02, 05 e 10, foram escolhidos de forma a dar um intervalo de mesmo valor em relação ao a/c = 0,48 ($\Delta_{a/c} = 0,1$) e de forma a proporcionar uma região de resistências relativamente elevadas sem contudo ultrapassar o limite entre os concretos do grupo I e os do grupo II da NBR-8953 (1992). O abatimento escolhido foi de 60 ± 10 mm por ser o abatimento mais usado nas obras correntes.

Para garantir uma relação a/c constante e igual a 0,48 (ou 0,38 ou 0,58), a estratégia utilizada foi a de misturar para cada traço uma quantidade de cimento e água que desse uma relação a/c = 0,48, e logo após se fazer acréscimos de areia e pedra até atingir o abatimento de 60 ± 10 mm.

Primeiramente foi determinado o teor ideal de argamassa para o conjunto de materiais segundo o método do IPT (Helene & Terzian, 1995), isto é, partindo-se de um traço 1:5. O teor ideal de argamassa encontrado foi de 50 %. Este valor desde então passou a ser utilizado em todos os estudos posteriores como sendo o **teor de argamassa estimado** de todos os traços, independentemente da amostra de cimento utilizada.

No mesmo estudo de determinação do teor de argamassa ideal foi também encontrado o valor da relação água / materiais secos, que segundo a Lei de Lyse deve permanecer constante para um abatimento constante. Então esse valor passou a ser usado também em todos os traços como sendo a **relação água/ materiais secos estimada**, cujo valor encontrado foi de 9,1 %. Esses dois valores foram então os parâmetros para o início da dosagem, bem como a relação $a/c = 0,48$ (ou 0,38 ou 0,58).

Com esses dois valores (α_{estimado} e H_{estimado}), e de posse do estudo da massa unitária compactada das britas, que deu um valor máximo para a proporção 30 % de brita 1 e 70 % de brita 2 (1627 Kg/m^3), pôde ser calculado o **traço estimado** para qualquer relação a/c desejada. De posse do cálculo do traço estimado, calculando-se as **quantidades estimadas** para um volume de concreto suficiente para 4 corpos-de-prova de 15×30 cm mais uma pequena folga (total de 25 litros), foi possível pesar todos os materiais para cada mistura.

Para que os acréscimos de areia e brita pudessem ser efetuados rapidamente, optou-se por fazer a mistura inicial de cada traço usando 91 % dos agregados estimados e 100 % do cimento e água estimados do cálculo teórico feito para cada mistura. Daí em diante eram feitos rapidamente acréscimos de 3 em 3% da massa dos agregados estimados, até a obtenção do abatimento desejado de 60 ± 10 mm. O valor de 3% para cada acréscimo foi escolhido por ser um valor mínimo em que normalmente se consegue produzir alterações na consistência do concreto, pois significa uma alteração em torno de 0,2 % na relação água / materiais secos.

Como os primeiros 91 % da massa dos agregados estimados eram colocados na betoneira no início da mistura, eles eram usados com a umidade natural, cuja água era descontada da água da mistura de acordo com a umidade do dia. No início de cada dia de trabalho, eram retirados volumes de areia e britas das pilhas estocadas ao ar livre, em quantidade suficiente para as misturas programadas. Cada um dos volumes eram homogeneizados e colocados em tambores de 200 litros cortados transversalmente ao meio, e tampados com folha de madeira compensada úmida. Este procedimento teve por objetivo homogeneizar a umidade desses materiais. A umidade era então determinada, pesando-se uma amostra de 1000 g de cada material úmido e após secagem em estufa a uma temperatura entre $105 \text{ }^\circ\text{C}$ e $110 \text{ }^\circ\text{C}$ até constância de peso.

Tabela 6 - Valores das dosagens e resistências à compressão dos concretos feitos com as 14 amostras do cimento Votoran CPI-S-32

número da amostra	Traço de relação a/c	Resistência do concreto em MPa à idade de :		Traço m	Teor de argamassa (%) α	Relação água/materiais secos (%) H	Consumo cimento (Kg/m ³) C
		3 dias	28 dias				
N	a / c	3 dias	28 dias	m	α	H	C
01	0,48	25,1 - 25,4	39,9 - 42,1	4,54	49,5	8,7	461
02	0,38	36,7 - 38,8	49,4 - 50,0	3,27	49,7	8,9	523
02	0,48	-	43,3 - 44,4	4,34	51,6	9,0	414
02	0,48	25,9 - 23,7	42,5 - 43,7	4,54	49,5	8,7	402
02	0,58	21,3 - 21,8	32,3 - 32,3	5,69	49,6	8,7	331
03	0,48	26,9 - 26,4	40,3 - 33,9	4,54	49,5	8,7	402
04	0,48	26,9 - 28,0	40,7 - 36,0	4,28	50,0	9,1	418
05	0,38	38,8 - 39,4	42,5 - 44,7	3,09	50,4	9,3	542
05	0,48	23,7 - 26,4	39,4 - 37,8	4,80	50,0	8,3	387
05	0,48	29,3 - 28,0	41,1 - 40,1	4,54	49,5	8,7	402
05	0,58	20,8 - 21,3	28,7 - 31,1	5,69	49,6	8,7	331
06	0,48	20,8 - 28,7	41,9 - 40,8	4,54	49,5	8,8	402
07	0,48	25,3 - 24,9	40,5 - 41,0	4,54	49,5	8,7	402
08	0,48	24,5 - 22,7	43,2 - 41,1	4,80	49,0	8,3	387
09	0,48	23,7 - 24,2	41,5 - 41,0	4,41	49,7	8,9	410
10	0,38	29,6 - 29,6	45,3 - 44,8	3,27	49,7	8,9	523
10	0,48	24,2 - 24,0	36,6 - 39,0	4,67	49,2	8,5	394
10	0,48	25,3 - 25,9	39,4 - 39,6	4,80	49,0	8,3	387
10	0,58	19,3 - 20,3	29,8 - 31,2	5,54	49,8	8,9	338
11	0,48	24,9 - 26,7	(33,1 - 27,5)*	4,67	49,2	8,5	394
12	0,48	26,6 - 27,2	37,8 - 24,9**	4,54	49,5	8,7	402
13	0,48	27,2 - 27,0	40,5 - 37,6	4,80	49,0	8,3	387
14	0,48	à 7 dias (28,3 - 29,2 - 27,8 - 30,0)		4,41	49,7	8,9	410

* valores espúrios da distribuição das resistências dos concretos de relação a/c = 0,48 , e que utiliza o maior valor de cada par ; ** valor espúrio para o cálculo da amplitude entre o menor e o maior valor do par , da distribuição dos erros de ensaio.

Já os acréscimos de 3 em 3 % de areia e brita foram feitos com os materiais secos. Usando-se esta metodologia foram dosados traços usando-se relações água/cimento e abatimentos fixos, sendo mínimas as variações no teores de argamassa. No anexo A é apresentado o modelo de formulário usado na dosagem de todos os traços.

Em cada traço dosado foram moldados 4 corpos-de-prova de dimensões de 15 x 30 cm, sendo que 2 eram ensaiados aos 3 dias de idade e 2 aos 28 dias. Como mencionado anteriormente, para as amostras de cimento de número 02, 05 e 10, além do traço usual de relação $a/c = 0,48$, também foram feitas dosagens com relações $a/c = 0,38$ e $a/c = 0,58$ para permitir a construção das Curvas de Abrams, além de ser repetida a dosagem com relação $a/c = 0,48$ para servir de contra-prova, para determinação dos erros de dosagem. A amostra de cimento de número 14 foi utilizada para elaboração de um único traço de relação $a/c = 0,48$, cujos corpos-de-prova foram rompidos aos 7 dias de idade, com o objetivo de ser este dado usado em outra etapa do trabalho, descrito no item 4.4.3.1.

Os concretos foram dosados ao ar livre em área coberta, sendo misturados em betoneira de eixo inclinado de capacidade de 120 litros. A ordem de mistura dos materiais foi sempre a seguinte : As britas, parte da água, areia, cimento e restante da água. Só após essa primeira mistura, que proporcionava sempre um concreto de abatimento muito elevado devido ao excesso de água, começava-se a fazer os acréscimos dos agregados secos, com a constante medição do abatimento.

Nas primeiras 24 horas os corpos-de-prova de concreto foram curados dentro de uma caixa de isopor para evitar a perda de água por evaporação e a influência da baixa temperatura ambiente no inverno. Após a desmoldagem os corpos-de-prova eram colocados para cura em um tanque de imersão com temperatura controlada de 23 ± 2 °C. No total foram moldados e ensaiados nesta fase 90 corpos-de-prova de concreto. A tabela 6 fornece os valores obtidos nos ensaios com os concretos desta fase do estudo.

Para correlação com os resultados do concreto, e outras determinações, também foram realizados os ensaios de resistência à compressão das amostras de cimento, com repetição também das amostras de número 02, 05 e 10, além das determinações do índice de consistência (NBR-7215, 1991). Nesta fase foram moldados e rompidos um total de 96 corpos-de-prova de cimento e realizados 22 ensaios de índice de consistência. Os corpos de prova foram curados juntamente com os concretos. Os resultados estão resumidos na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência das amostras do cimento Votoran CPI-S-32 e ensaios de índice de consistência

número da amostra de cimento / ensaio	Resistência do cimento em MPa à idade de :			Índice de consistência (mm)
	3 dias	7 dias	28 dias	
01 / I	27,8 - 27,3 - 28,2	-----	38,7 - 34,5 - 38,2	196
02 / I	30,6 - 29,9	34,5 - 33,6	38,5 - 41,0	187
02 / II	33,6 - 31,8	34,7 - 36,7	42,3 - 42,3	187
03 / I	29,3 - 29,6 - 28,6	-----	39,3 - 38,6 - 39,3	200
04 / I	32,3 - 31,1 - 32,1	-----	36,0 - 40,3 - 39,6	191
05 / I	28,6 - 27,3	33,4 - 32,9	37,1 - 37,1	186
05 / II	30,9 - 29,8	31,6 - 33,7	38,1 - 38,5	185
06 / I	26,8 - 27,6 - 27,3	-----	38,8 - 35,8 - 38,2	189
07 / I	* - 25,3 - 25,8	-----	36,2 - 33,6 - 35,3	-----
08 / I	29,0 - 26,0 - 27,5	-----	36,5 - 38,2 - 37,3	184
09 / I	27,1 - 27,3 - 27,3	-----	38,7 - 39,3 - 37,7	180
10 / I	26,1 - 27,2	30,3 - 29,7	40,2 - 38,2	180
10 / II	26,1 - 27,1	30,8 - 29,8	38,2 - 37,3	180
11 / I	27,0 - 25,3 - 25,8	-----	38,2 - 37,1 - 36,2	180
12 / I	26,2 - 27,2 - 27,2	-----	38,0 - 38,3 - 37,5	-----
13 / I	23,9 - 25,1 - 24,1	-----	33,7 - 34,8 - 34,0	-----

* corpo-de-prova perdido no manuseio

4.2.2.2 Tratamento de dados fornecidos através de outros trabalhos

Os trabalhos de Tango (1983) e Helene (1987) fornecem dados obtidos através de um longo trabalho experimental feito pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, que consistiu de ensaios de caracterização física e química de três cimentos Portland comuns (no trabalho chamados de A, B e C) de três fábricas distintas, além dos ensaios de resistência à compressão axial do cimento (MB-1) e de resistência à compressão axial do concreto (MB-3), para quatro traços padronizados, com o fim da construção das respectivas curvas de Abrams, feitos mês a mês desde janeiro de 1957 até maio de 1981.

Cada amostra mensal de cimento era composta de 6 sacos coletados ao acaso, homogeneizada e a seguir desmembrada em duas porções. Uma das porções, destinava-se a ensaios físicos, mecânicos e químicos para caracterização do cimento, envolvendo as determinações :

a) Massa específica (MB-346/66);

b) Superfície específica “Blaine”(MB-348/66);

c) Água para argamassa de consistência normal 165 ± 5 mm (MB-1/37), até 1978, quando ocorreu a revisão do MB-1, quando a argamassa normal passou a ter relação a/c fixa e igual a 0,48 e a consistência resultante;

d) Resistência à compressão em argamassa normal aos 3, 7 e 28 dias (MB-1);

e) Análise química (MB-11), compreendendo as determinações : SiO_2 , $\text{Fe}_2 \text{O}_3$, $\text{Al}_2 \text{O}_3$, Ca O , S O_3 e Ca O livre.

A outra porção de cada amostra de cimento era destinada à denominada “Dosagem do Mês”, caracterizada pela confecção de concretos com as características constantes na tabela 8:

Tabela 8 - Características dos concretos das “Dosagens do Mês”

Mistura Número	1	2	3	4
Traço (kg/kg) cimento:agregado	1 : 5	1 : 6	1 : 7	1 : 8
módulo de finura agregado graúdo	7,05	7,05	7,05	7,05
módulo de finura do agregado total	5,74	5,55	5,35	5,17
Abatimento (mm)	50 ± 10			
Agregado graúdo	Seixo rolado lavado de granulometria imposta, proveniente do Rio Tietê			
Agregado miúdo	Areia lavada do Rio Tietê			
Água	Do abastecimento do IPT			
Relação água/cimento	Variável, segundo traço e a consistência			

Com os concretos descritos na tabela, moldavam-se corpos de prova de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, segundo o método MB-2 da ABNT, em número de três por condição, destinados ao ensaio de resistência à compressão axial, segundo o MB-3 da ABNT, às idades de 2, 3, 7 e 28 dias. As misturas eram preparadas em betoneira de eixo inclinado de capacidade igual a 100 dm^3 , em ambiente abrigado, sem controle de temperatura e umidade.

Diferente dos tipos de tratamento feitos com esses dados por Tango (1983) e Helene (1987), o objetivo do presente trabalho é o de verificar a existência de correlação múltipla entre a relação resistência do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48 e a resistência do cimento (relação a/c fixa e igual a 0,48), com a composição química e finura do cimento.

As resistências do concreto de a/c fixa e igual a 0,48 foram obtidas no presente trabalho, para cada amostra mensal, pela determinação da curva de Abrams de cada mês, para cada cimento A, B e C, através do método dos mínimos quadrados.

As resistências do cimento de relação a/c fixa e igual a 0,48 foram determinados diretamente dos ensaios de cimento realizados à partir de maio de 1978 quando a norma NBR-7215/78 passou a utilizar esse valor como constante. Os valores do ensaio de cimento anteriores a essa data não foram utilizados no presente estudo porque sua correção teria que ser feita com base em equação de Abrams obtida à partir de corpos-de-prova de argamassa encontrada através de estudo de outros cimentos. Esses dados estão disponíveis no anexo C.

Somente para o cimento "A" foram determinados os parâmetros da equação de Abrams de cada mês, para todo o período desde janeiro de 1957 até novembro de 1979, com o objetivo de determinar o desvio-padrão teórico do concreto em função da variabilidade do cimento, pela fórmula deduzida por Fusco (1975). Neste caso os valores dos ensaios do cimento antes de maio de 1978 foram corrigidos utilizando-se para tal a equação de Abrams obtida por Helene (1987) para o cimento Portland comum. No anexo B estão as tabelas com esses dados.

4.2.3 Análise dos resultados

4.2.3.1 Influência das variabilidades na curva de Abrams encontrada

Uma das fases mais importantes de um estudo de dosagem de concreto é a construção da Curva de Abrams para os materiais selecionados. Para isso, geralmente são dosados três traços de concreto com diferentes relações a/c e são moldados corpos-de-prova para ensaio à compressão, visando obter o valor da resistência à compressão do concreto correspondente à cada relação a/c, na idade especificada, geralmente 28 dias. Após a obtenção desses valores, a curva é construída através do método dos mínimos quadrados.

Acontece que, a curva assim obtida, pode ser significativamente diferente da Curva de Abrams Média referente aos materiais do estudo de dosagem. É que, na maioria das vezes são feitas apenas três misturas com diferentes relações a/c, para obtenção dos valores a serem

utilizados para construção da curva. Como mesmo em laboratório são muitas as variáveis que podem ocorrer e influir nos resultados da resistência à compressão do concreto (Coutinho, 1974; Basílio, 1954, 1958), é possível que algumas vezes a curva obtida no estudo seja muito otimista, o que aumenta o risco de rejeição dos lotes de concreto produzidos, ou muito pessimista, causando o aumento desnecessário no consumo de cimento na obra. Dentre os três valores encontrados para a construção da curva, se um só deles for significativamente diferente da resistência média do concreto naquele ponto, isso pode comprometer definitivamente a curva, principalmente na região próxima da relação a/c correspondente ao ponto "defeituoso".

Essas variações podem ocorrer devido a vários fatores : Pequenos erros na pesagem dos materiais, evaporação da água de amassamento, ocorrência de material deletério na porção de agregado utilizado, utilização de uma amostra de cimento de qualidade significativamente diferente da média, utilização de uma amostra de cimento alterada, problemas na mistura ou compactação, problemas na execução do ensaio, etc.(Coutinho, 1974).

Para se ter uma idéia da influência desses diversos fatores no estudo de dosagem em laboratório, foram determinados os desvios-padrão do concreto devido à diferentes fatores ou fases do estudo de dosagem. Esse estudo foi realizado utilizando-se dos dados obtidos à partir dos ensaios realizados com as 13 amostras de cimento Votoran CPI-S-32 cujos resultados estão apresentados nas tabelas 6 e 7.

Primeiramente foram calculados os desvios-padrão aparentes do concreto aos 3 e 28 dias com os valores mais altos de cada par de corpo-de-prova. Ao se fazer isso, ou usando-se a média dos pares de corpos-de-prova, é eliminada parte da variabilidade causada pelo ensaio (Fusco,1975). Também determinou-se os limites de confiança (90%) para o desvio-padrão da população. Os desvios-padrão encontrados foram :

$$\text{- Aos 3 dias : } S_{\text{aparente}} = 1,55 \text{ MPa} \quad (1,18 \leq \sigma \leq 2,36)$$

$$\text{- Aos 28 dias : } S_{\text{aparente}} = 1,69 \text{ MPa} \quad (1,27 \leq \sigma \leq 2,62)$$

Em seguida determinou-se o desvio-padrão das operações de ensaio, ou seja, entre corpos-de-prova irmãos, devido ao capeamento e ensaio de ruptura à compressão. Calculou-se um só valor para 3 e 28 dias pois o desvio-padrão das operações de ensaio não deve ser muito influenciado pela idade. Assim o número de exemplares para o cálculo foi $N = 45$, o que proporciona a vantagem de uma menor amplitude para o intervalo de confiança do desvio

padrão. Para se determinar o desvio-padrão das operações de ensaio, foram calculadas as diferenças entre o valor mais alto e o mais baixo de cada condição (par de corpos-de-prova), dividindo esse valor pelo número de exemplares (amassadas) e pelo número d_2 da fórmula apresentada na norma americana ACI 214-65 (Coutinho, 1974; Fusco, 1975):

$$S_{\text{ensaio}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n \cdot d_2}$$

onde ;

S_{ensaio} = desvio-padrão das operações de ensaio (capeamento e ruptura);

d_i = $X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$ (amplitude);

n = número de amassadas;

e d_2 é dado por :

Tabela 9 - Tabela dos valores da constante d_2 em função do número de corpos-de-prova moldados simultaneamente

Número de corpos-de-prova moldados simultaneamente (K)	d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534
7	2,704
8	2,847
9	2,970
10	3,078

Que aplicando-se aos resultados dos ensaios à compressão dos concretos deram o desvio-padrão mostrado abaixo, e cujo intervalo com 95 % de confiança para o valor médio também é apresentado :

$$\text{- Aos 3 e 28 dias : } S_{\text{ensaio}} = 1,27 \text{ MPa } (1,05 \leq \sigma \leq 1,54)$$

Com esses resultados foi possível determinar o desvio-padrão real do concreto, devido a dosagem e variabilidade do cimento fazendo (Fusco, 1975) :

$$S_{\text{real}}^2 = S_{\text{aparente}}^2 - S_{\text{ensaio}}^2 / K$$

$$\text{- Aos 3 dias : } S_{\text{real}} = 1,26 \text{ MPa}$$

$$\text{- Aos 28 dias : } S_{\text{real}} = 1,43 \text{ MPa}$$

Como houve repetição de algumas dosagens para contra-prova, foi possível também se calcular o desvio-padrão das operações de dosagem e ensaio, isto é, devido aos erros de pesagem dos materiais, evaporação da água de amassamento, problemas na mistura e compactação, cura, etc., e que também inclui parte dos erros devido ao ensaio (capeamento e ruptura) (Coutinho, 1974). Utilizou-se para isso a mesma fórmula usada para o cálculo do desvio-padrão de ensaio, sendo o desvio de cada condição (idade e relação a/c), calculado pela subtração entre o valor mais alto do par de um exemplar e o valor mais alto do outro exemplar da mesma condição. O desvio-padrão de dosagem e ensaio encontrado e o intervalo com 90 % de confiança foram :

$$S_{(\text{dosagem} + \text{ensaio})} = 1,35 \text{ MPa } (0,88 \leq \sigma \leq 3,20)$$

Para se obter o desvio-padrão de dosagem, sem influência das operações de ensaio, utilizou-se do mesmo raciocínio da determinação do desvio-padrão real, fazendo :

$$S_{\text{dosagem}}^2 = S_{(\text{dosagem} + \text{ensaio})}^2 - S_{\text{ensaio}}^2 / 2 \quad , \text{ obtendo-se :}$$

$$S_{\text{dosagem}} = 1,01 \text{ MPa}$$

Finalmente, foi obtido o desvio-padrão do concreto devido à variabilidade do cimento, fazendo-se :

$$S_{(\text{variab. cimento})}^2 = S_{\text{real}}^2 - S_{\text{dosagem}}^2$$

- Aos 3 dias : $S_{(\text{variab. cimento})} = 1,18 \text{ MPa}$

- Aos 28 dias : $S_{(\text{variab. cimento})} = 1,36 \text{ MPa}$

Mesmo sabendo que essas relações foram calculadas à partir de um número pequeno de dados, o que proporciona pequena confiança nos resultados, já que os erros se acumulam, e que é apenas um estudo de caso, além do que foi feito só para uma relação a/c, podemos afirmar com base na observação dos mesmos, que as variabilidades causadas pela dosagem e pelas operações de ensaio podem ser tão significativas quanto a influência da variabilidade do cimento, num estudo de dosagem em laboratório. A tabela 10 abaixo resume os valores encontrados:

Tabela 10 - Tabela dos desvios-padrão do concreto aos 3 e 28 dias

	Aos 3 dias	Aos 28 dias
S_{dosagem}	1,01	1,01
$S_{(\text{variab. Cimento})}$	1,18	1,36
S_{real}	1,26	1,43
S_{ensaio}	1,27	1,27
S_{aparente}	1,55	1,69

Para se ter uma idéia melhor do que pode ocorrer ao confiar em dados de apenas três misturas feitas em laboratório, para determinação de uma Curva de Abrams a ser usada para dosagem do concreto de uma obra, principalmente em se tratando de relações a/c mais baixas que as usuais, foi construído um gráfico com as três Curvas de Abrams obtidas à partir das amostras de cimento de números 02, 05 e 10. Para isso a equação de Abrams foi linearizada e os parâmetros de cada uma das equações foram obtidos através do método dos mínimos quadrados, à partir das resistências referentes às relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58. É importante lembrar aqui, que várias variáveis influíram nos dados que foram usados para construção das curvas, e não somente a mudança da partida de cimento. As figuras 7 e 8 abaixo mostram as três Curvas de Abrams referentes às amostras de cimento 02, 05 e 10 para as idades de 3 e 28 dias.

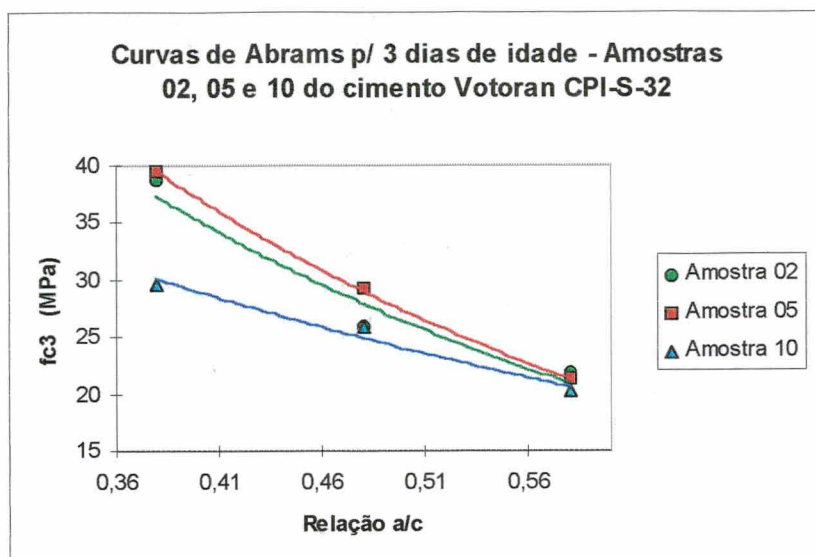


Figura 7 - Curvas de Abrams para a idade de 3 dias do concreto obtidas à partir de três amostras diferentes do mesmo cimento.

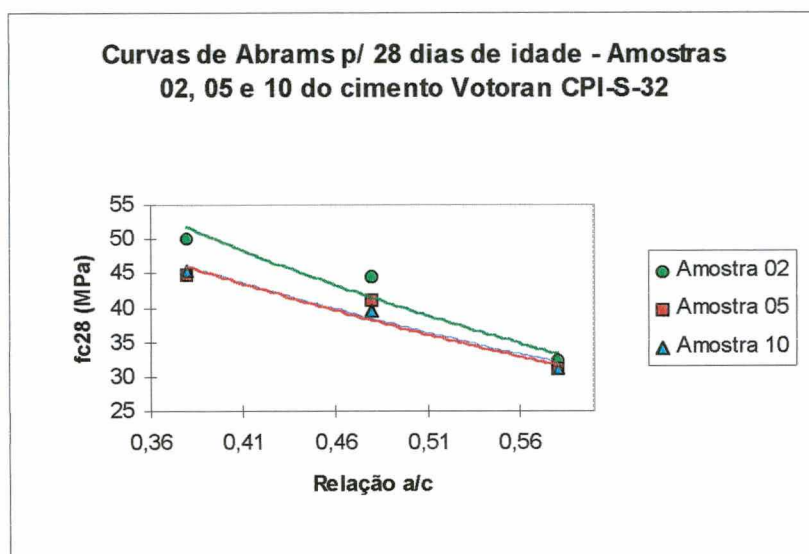


Figura 8 - Curvas de Abrams para a idade de 28 dias do concreto obtidas à partir de três amostras diferentes o mesmo cimento.

É fácil perceber que a curva obtida à partir da amostra de cimento número 10 é muito pessimista em relação às outras duas para a idade de três dias, e a curva obtida à partir da amostra de cimento número 02 é muito otimista em relação às outras duas para a idade de 28 dias. A utilização da curva muito otimista pode ocasionar a rejeição de lotes de concreto produzidos posteriormente, e o uso da curva pessimista acarreta o uso excessivo de cimento para produção do concreto, que é menos grave que arcar com os prejuízos da rejeição do concreto. Para se evitar que se utilize de uma curva média muito otimista, obtida num estudo

de dosagem feito com apenas três misturas, uma opção seria a adoção do limite inferior de confiança $(1-\alpha)$ da Curva Média de Abrams obtida com esses dados.

O problema é que, utilizando-se de apenas três misturas ($n=3$), mesmo que se use um nível de confiança relativamente baixo como por exemplo 80%, a curva obtida pelo limite inferior de confiança pode ter valores exageradamente pessimistas pela falta de dados, e portanto, ser antieconômica. Como exemplo, a tabela 11 fornece os valores que, usados como multiplicador ou divisor da equação de Abrams, fornece os valores dos limites superior e inferior respectivamente, da média da resistência aos 28 dias de idade, no ponto de relação $a/c = 0,48$, para o caso dos estudos de dosagem de concreto feitos com as amostras de cimento de números 02, 05 e 10, cada um feito com três traços de relações a/c iguais a 0,38, 0,48 e 0,58. Os valores foram calculados para três diferentes níveis de confiança, 80, 90 e 95%. A tabela 11 também fornece os valores das constantes "A" e "B" da equação de Abrams e o erro padrão de estimativa "Se", obtidos da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados após a linearização da equação de Abrams:

Tabela 11 - Tabela dos parâmetros das equações de Abrams e valores dos multiplicadores / divisores que dão os limites inferior e superior de cada curva média, para a idade de 28 dias, no ponto de relação $a/c = 0,48$, obtidos de misturas feitas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.

Amostra de cimento número	Multiplicadores/divisores da equação de Abrams p/ o nível de confiança de :			Parâmetros da regressão		
	95 %	90 %	80 %	A	B	Se
02	1,8169	1,3455	1,1556	118,57	8,89	0,0353516
05	1,7923	1,3364	1,1518	91,99	6,13	0,0345442
10	1,3651	1,1673	1,0783	93,61	6,45	0,0184273

É importante observar que, os intervalos de confiança a que se referem a tabela 11, são para cada amostra de cimento individualmente. Se fôsse considerado o intervalo de confiança para a média provável dos concretos feitos com 3 misturas de 3 partidas diferentes de um mesmo cimento, cada qual com um valor distinto de a/c , o intervalo de confiança tenderia a ser ainda maior.

Aumentando-se o número de misturas para a construção da curva de Abrams, o limite de confiança diminui rapidamente. É o que mostra o exemplo da tabela da tabela 12, onde estão colocados os valores dos multiplicadores / divisores da equação de Abrams, que fornecem os valores dos limites inferior e superior da média aos 28 dias de idade, no ponto de relação $a/c = 0,48$, para as três amostras de cimento de números 02, 05 e 10, quando o

número de misturas para obtenção da curva aumenta de 3 até 9. Os valores foram calculados para os níveis de confiança 80, 90 e 95%. A tabela também fornece os valores das constantes " A " e " B " da equação de Abrams e o erro padrão de estimativa " Se ", obtidos da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados após a linearização da equação de Abrams.

As regressões foram efetuadas utilizando-se para o cálculo da primeira, os dados obtidos das três misturas feitas com a amostra de cimento número 02. Em seguida, para o cálculo da segunda, foi acrescido o valor da resistência do concreto obtido com a relação $a/c = 0,38$ da amostra de cimento número 05. Para a terceira foi acrescentado o valor referente à relação $a/c = 0,48$ e para a quarta equação o valor correspondente ao $a/c = 0,58$ da mesma amostra número 05. A quinta, sexta e sétima equações tiveram os acréscimos dos valores de resistência referentes às relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58 , da amostra de cimento número 10, nesta mesma ordem.

Tabela 12 - Parâmetros das equações de Abrams e valores dos multiplicadores / divisores que dão os limites inferior e superior de cada curva média, para a idade de 28 dias, no ponto de relação $a/c = 0,48$, quando as equações são obtidas aumentando-se o número "N" de dados obtidos de misturas feitas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.

N	Multiplicadores/divisores da equação de Abrams p/ o nível de confiança de:			Parâmetros da regressão		
	95 %	90 %	80 %	A	B	Se
3	1,8169	1,3455	1,1556	118,57	8,89	0,0353516
4	1,2274	1,1492	1,0940	95,48	5,98	0,0413592
5	1,1177	1,0857	1,0589	95,28	5,91	0,0339482
6	1,0896	1,0681	1,0485	104,43	7,38	0,0328801
7	1,0740	1,0575	1,0418	97,10	6,46	0,0328879
8	1,0597	1,0471	1,0347	97,10	6,46	0,0291102
9	1,0520	1,0415	1,0308	100,70	7,06	0,0279403

Como podemos ver, os limites de confiança da curva média se aproximam muito rapidamente à medida que o número "N" de exemplares (misturas) aumenta de 3 para 4 ou 5. Portanto, mesmo que não se adote um limite inferior de confiança da curva média de Abrams obtida pelo estudo de dosagem, como medida de garantia para não haver rejeição de lotes de concreto a serem produzidos para a obra, é recomendável que o número de misturas realizadas para a construção da curva de dosagem seja de no mínimo 4 , sendo 5 um número que poderia ser considerado como ideal. Muito importante também, sempre que possível, usar mais de uma

amostra do mesmo cimento no estudo de dosagem e realizar as misturas em dias diferentes, diminuindo-se assim as influências do clima ou desempenho do laboratorista.

Por fim, são apresentadas nas figuras 9 e 10, as curvas médias de Abrams para as idades de 3 e 28 dias, com os seus limites de confiança (95 %), construídas à partir das 9 misturas feitas com as amostras de cimento 02, 05 e 10. Também são colocadas as equações para as idades de 3 e 28 dias e os limites de confiança da curva média.

- Equação de Abrams para a idade de 3 dias :

$$f_{c3} = \frac{95,71}{13,68^{a/c}}$$

- Limites de confiança da resistência à compressão :

$$\frac{95,71}{13,68^{a/c} \cdot 1,2561 \sqrt{\frac{1 + (a/c - 0,48)^2}{0,06}}} \leq f_{c3} \leq \frac{95,71 \cdot 1,2561 \sqrt{\frac{1 + (a/c - 0,48)^2}{0,06}}}{13,68^{a/c}}$$

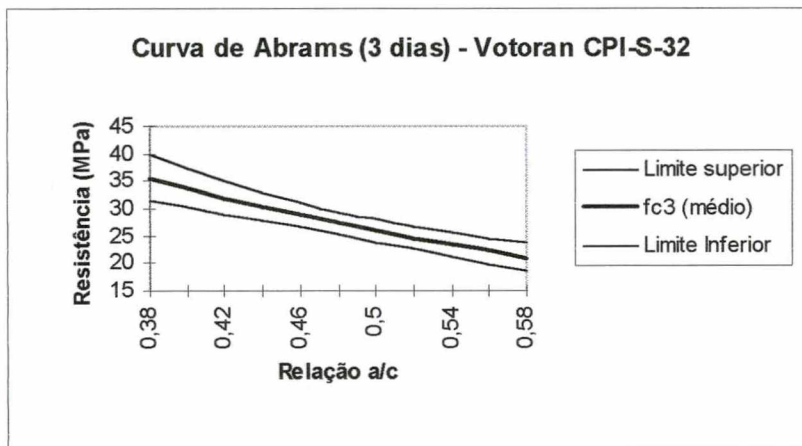


Figura 9 - Curva de Abrams do concreto aos 3 dias de idade com os limites de confiança da média obtida a partir de 9 misturas efetuadas com as amostras de cimento 02, 05 e 10.

- Equação de Abrams para a idade de 28 dias :

$$f_{c28} = \frac{100,70}{7,06^{a/c}}$$

- Limites de confiança da resistência à compressão :

$$\frac{100,70}{7,06^{a/c} \cdot 1,1643 \sqrt[9]{\frac{1 + (a/c - 0,48)^2}{0,06}}} \leq f_{c28} \leq \frac{100,70 \cdot 1,1643 \sqrt[9]{\frac{1 + (a/c - 0,48)^2}{0,06}}}{7,06^{a/c}}$$

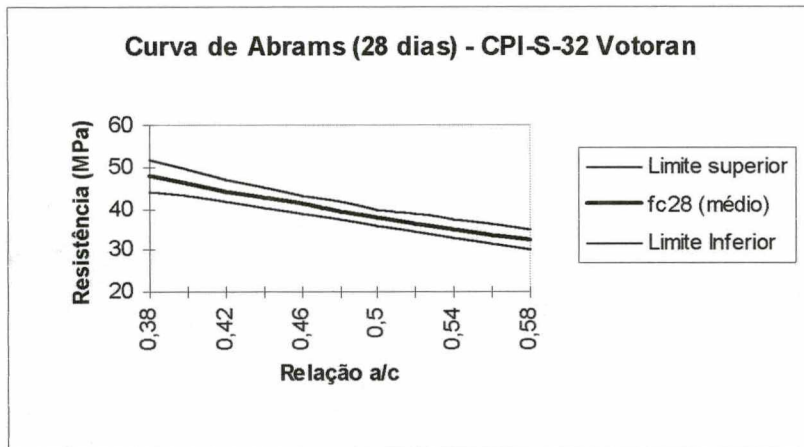


Figura 10 - Curva de Abrams do concreto aos 28 dias de idade

4.2.3.2 Desvio-padrão da resistência do cimento e do concreto

Para verificar a validade da equação obtida por Fusco (1975) para o cálculo do desvio-padrão do concreto, no presente trabalho foram calculados os desvios-padrão dos concretos feitos com o cimento "A" do estudo do IPT, na idade de 28 dias, primeiramente utilizando-se da equação obtida por Fusco (1975), e depois para comparação, também calculados os desvios-padrão diretamente dos valores das resistências dos concretos. Para isso, utilizou-se na equação obtida por Fusco (1975), do valor de 1 MPa para o desvio-padrão das operações de ensaio, por ser este um número razoável (Helene, 1987), e por não estarem disponíveis os dados para o cálculo do mesmo. Para os valores de K_2 e K_0 , que a equação teórica considera como constantes, que dependem dos materiais mas independem do cimento, foram utilizadas as médias dos 277 valores de cada. No anexo B encontram-se os dados das resistências das amostras de cimento e dos concretos utilizados para os cálculos. Os parâmetros das equações de Abrams foram calculados e também estão disponíveis no anexo. Para o período anterior à maio/ 78, em que no ensaio de cimento a relação a/c era variável, a resistência foi corrigida para a relação a/c = 0,48, como feito por Helene (1987) em seu trabalho. As constantes da equação, calculadas a partir dos resultados empíricos foram:

$$\sigma_{cj} = \sqrt{\left(\frac{K_0 \cdot \sigma_{ccj}}{f_{ccmj} \cdot K_2^{(a/c)m}}\right)^2 + \left(\frac{K_0 \cdot \ln K_2 \cdot \sigma_{a/c}}{K_2^{(a/c)m}}\right)^2} + \sigma_e^2$$

Os valores **médios** das constantes para o cimento durante o período foram :

$$K_2 = 18,93 ; \quad K_0 = 106,97 ; \quad \sigma_{cc28} = 4,38 ; \quad f_{cc28} = 30,71 ;$$

E os desvios-padrão calculados estão colocados no quadro da tabela 13 :

Tabela 13 - Desvios-padrão calculados pela equação teórica deduzida por Fusco (1975) e diretamente das resistências dos concretos pela equação do desvio-padrão.

Traço	(a/c) _m	$\sigma_{a/c}$	σ_{c28} (Equação Teórica)	σ_{c28} (Diretamente)
1 : 5	0,436	0,0346	5,01	4,17
1 : 6	0,522	0,0350	3,96	3,53
1 : 7	0,631	0,037	3,00	2,85
1 : 8	0,770	0,0428	2,23	2,12

Analisando o quadro vemos que os valores obtidos diretamente dos resultados das resistências dos concretos são significativamente menores que os valores encontrados através da equação teórica. A equação foi deduzida à partir do pressuposto que a resistência do concreto varia na mesma proporção da relação $f_{ccj} / f_{ccj(m)}$, pois para dedução da equação foi feito $K_1 = K_0 \cdot f_{ccj} / f_{ccj(m)}$. Entretanto, os resultados indicam que isso nem sempre é verdadeiro. Apesar disso, para o caso de relações a/c mais elevadas, a equação teórica dá valores até bem próximos dos desvios-padrão calculados diretamente.

Mesmo que não se faça a correção da curva de Abrams obtida na dosagem na mesma proporção da relação $f_{ccj} / f_{ccj(m)}$, como no caso do método de Wischers, ainda há o problema da baixa correlação encontrada por Helene (1987) para a resistência do concreto em função da resistência do cimento. Não há confiança de que uma variação na resistência do cimento resulte sempre em variação na resistência do concreto.

Alguns métodos de dosagem de concreto se utilizam de curvas genéricas onde a resistência à compressão do concreto é função da relação a/c do concreto e da resistência do cimento. Baseiam-se na convicção desses autores de que outros fatores, tais como a origem mineral e a granulometria dos agregados utilizados são pouco importantes para a resistência à

compressão do concreto, e de que há uma boa correlação entre resistência do cimento e do concreto de relação a/c fixa. Algumas vezes até recomendam o uso dessas curvas genéricas para o cálculo da dosagem do concreto da obra, para início de produção do concreto, antes mesmo dos primeiros resultados dos ensaios de resistência dos corpos-de-prova moldados no estudo (Helene & Terzian, 1992; Rodrigues, 1995). Contudo, se a correlação entre essas variáveis não é um número confiável, não é recomendável que se confie numa curva obtida através de outros materiais, muitas vezes bastante diferentes dos materiais que serão utilizados para a produção do concreto da obra, para que se inicie a concretagem, sem que antes tenham-se os resultados do laboratório.

É certo que correlações realizadas à partir de um número pequeno de dados, e variações muito pequenas nas variáveis que pretendemos correlacionar, quase sempre dão resultados de coeficientes de correlação muito baixos. Mesmo quando há excelente correlação entre os fenômenos físicos, o coeficiente de correlação só é razoável se o instrumento de medição (ensaios) das variáveis a serem correlacionadas, for muito preciso. Mesmo com essas limitações, só para reforçar a hipótese da grande influência dos erros de dosagem e ensaio que ocorrem num estudo de dosagem, foram calculados para o presente trabalho, os coeficientes de correlação entre a resistência do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48 e a resistência do cimento, para os resultados obtidos das 13 amostras de cimento Votoran CPI-S-32, ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC. Os resultados foram :

- Aos 3 dias de idade : $r = 0,2222$

- Aos 28 dias de idade : $r = 0,2211$

Como se pode observar, os coeficientes de correlação são baixíssimos, e uma análise superficial do problema poderia fazer crer que não existe correlação entre o fenômeno físico resistência do cimento com a correspondente resistência do concreto.

No item 4.2.3.1, foi apresentado a tabela 10 com os desvios-padrão do concreto calculados à partir dos resultados dos ensaios com as 13 amostras do cimento Votoran CPI-S-32 utilizados neste estudo. Apesar da grande amplitude provável, para o nível de confiança de 90 %, dos desvios-padrão calculados, que são apresentados no quadro, isso devido ao pequeno número de dados disponíveis para os cálculos, o mesmo mostra que as variabilidades que ocorrem devido à dosagem do concreto e no ensaio à compressão, são da mesma magnitude da variabilidade da resistência do cimento entre uma amostra e outra. Isso poderia explicar os baixos valores dos coeficientes de correlação encontrados por Helene (1987) e neste trabalho. Além disso, ainda existem as variabilidades que ocorrem no ensaio das amostras

de cimento a serem correlacionadas (Esper & Silva, 1983; Munhoz, 1991). Na tabela 14, calculados da mesma forma que os desvios-padrão do concreto, encontram-se os desvios-padrão das 13 amostras do cimento Votoran CPI-S-32, ensaiados para este trabalho:

Tabela 14 - Desvios-padrão do cimento aos 3 e 28 dias

	Na idade de 3 dias	Na idade de 28 dias
Sdosagem	1,23	1,23
Sreal	2,07	1,56
Sensaio	0,99	0,99
Saparente	2,16	1,74

4.2.3.3 O Fator de Eficiência de um cimento

Para se ter uma visualização da variação no tempo, da resistência do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, e também da resistência do cimento, foram plotados dois gráficos. São eles apresentados nas figuras 11 e 12, onde são mostradas as sequências das resistências do cimento e do concreto, para as idades de 3 e 28 dias, das 13 amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32, ensaiadas para este trabalho.

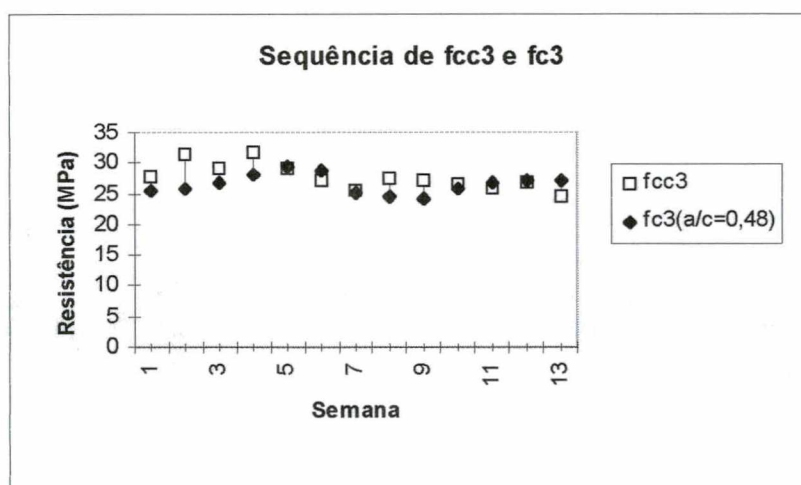


Figura 11 - Sequência das resistências das amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32 na idade de 3 dias (fcc3), e dos concretos (fc3) correspondentes de relações a/c = 0,48

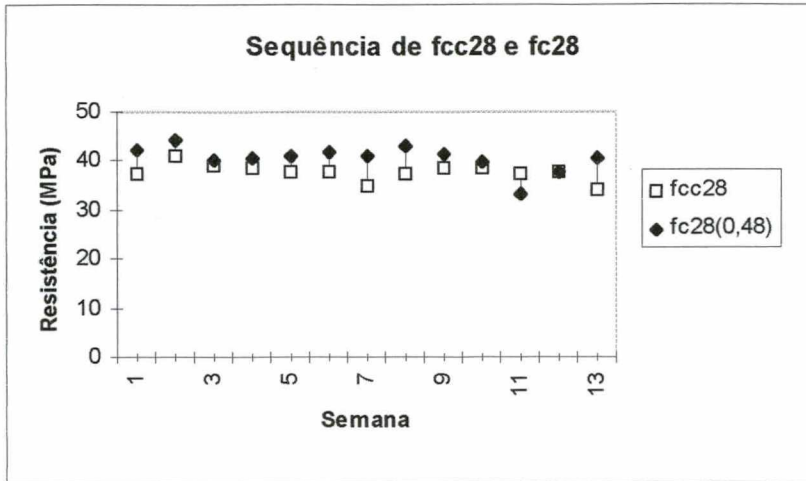


Figura 12 - Sequência das resistências das amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32 na idade de 28 dias (f_{cc28}) e dos concretos (f_{c28}) correspondentes de relações $a/c = 0,48$.

Os dois gráficos mostram bem que as variações de resistência são relativamente pequenas nos cimentos fabricados atualmente. Com pequenas variações na resistência do cimento, e consideráveis erros de ensaio, é de se esperar baixas correlações entre as resistências. Entretanto, se observamos atentamente as duas figuras, não é difícil perceber que a relação entre a resistência do concreto de relação $a/c = 0,48$ e a resistência do cimento ($f_{c(a/c=0,48)} / f_{ccj}$) é um valor que parece variar "suavemente" com o tempo. A variação do valor dessa relação, que passaremos a chamar de "Fator de Eficiência" do cimento, pode ser resultado apenas dos erros de dosagem e ensaio, mas a tendência à uma variação suave com o tempo parece indicar a existência de algum fenômeno, que influi no "aproveitamento" da resistência da pasta de cimento pelo concreto. Pode-se especular que isso seria devido à algum fenômeno químico ligado à composição do cimento, e que faz com que sejam melhores as ligações na zona de transição pasta - agregado no concreto.

É interessante notar que a variação do fator de eficiência foi suave no tempo nas duas idades estudadas. Parece que o cimento tende a ser mais eficiente para concreto em determinados períodos, mudando aos poucos essa eficiência. É claro que essas variações podem ser produzidas por diversos fatores, como mudanças no clima, aferição de equipamentos, cuidado na execução dos ensaios, etc.. Mas essa alteração suave, parece mais indicar uma mudança de composição química, devido à extração da matéria-prima para fabricação do cimento. Nas figuras 13 e 14 são plotados os gráficos de seqüência dos fatores de eficiência nas idades de 3 e 28 dias, para as 13 amostras semanais do cimento Votoran CPI-S-32.

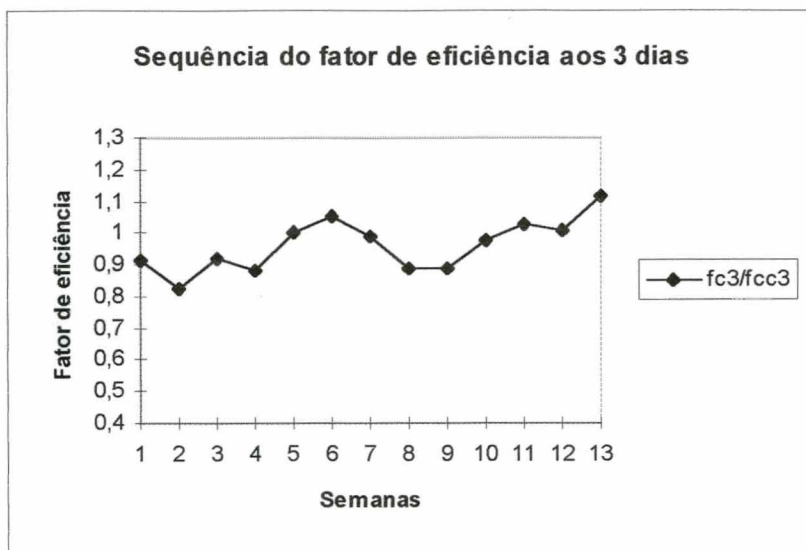


Figura 13 - Sequência do fator de eficiência para a idade de 3 dias

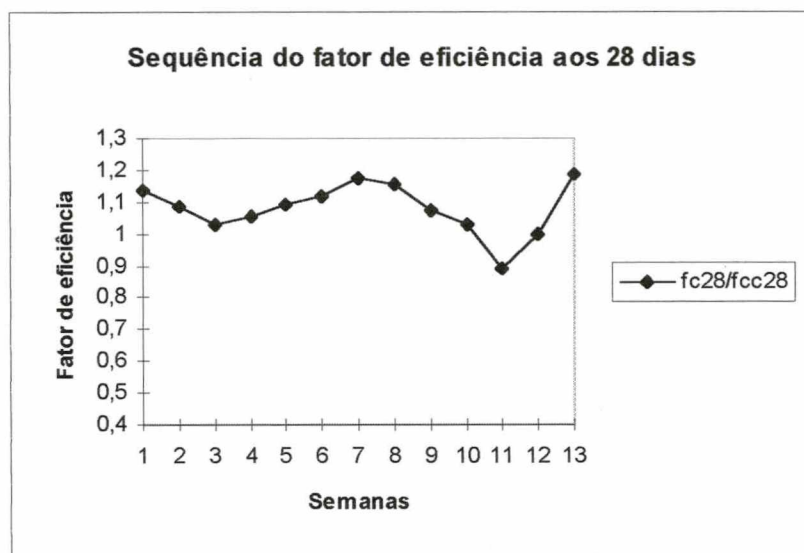


Figura 14 - Sequência do fator de eficiência para a idade de 28 dias

Para verificar a existência de algum fenômeno ligado à composição química do cimento, que possa influir no fator de eficiência, passou-se a partir deste ponto, a analisar os dados dos cimentos denominados A, B e C, do trabalho realizado no IPT, e dos concretos padronizados de cada mês, dosados com esses cimentos.

Isso foi feito porque naquele trabalho estão disponíveis a caracterização química de cada amostra de cimento, além do ensaio de finura Blaine. Para reduzir a influência da mudança da norma de execução do ensaio de cimento, que a partir de maio de 1978 passou a adotar uma relação a/c fixa e igual a 0,48, foram analisados somente os dados a partir dessa

data. Primeiramente foram plotados os três gráficos de seqüência das resistências do cimento e do concreto de relação $a/c = 0,48$, para os cimentos A, B e C, aos 28 dias de idade, que são mostrados nas figuras 15, 16 e 17 abaixo:

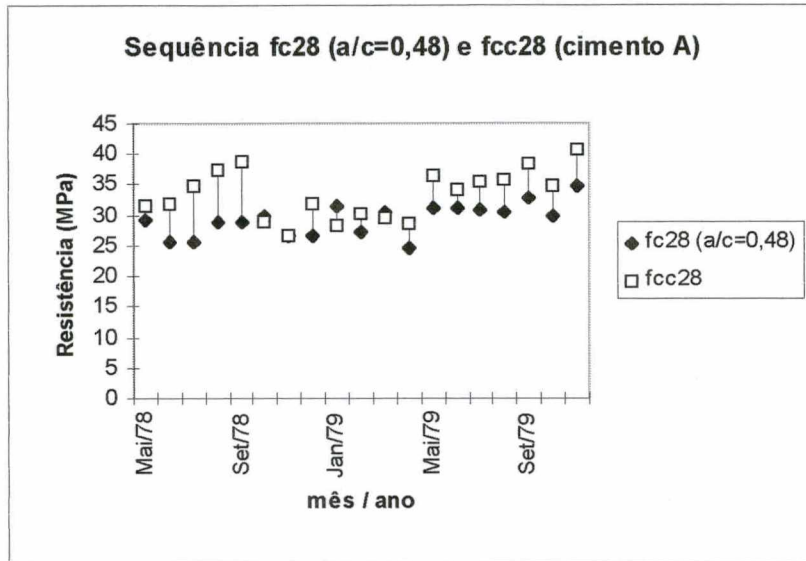


Figura 15 - Seqüência das resistências do cimento " A " e dos concretos correspondentes de relação $a/c = 0,48$

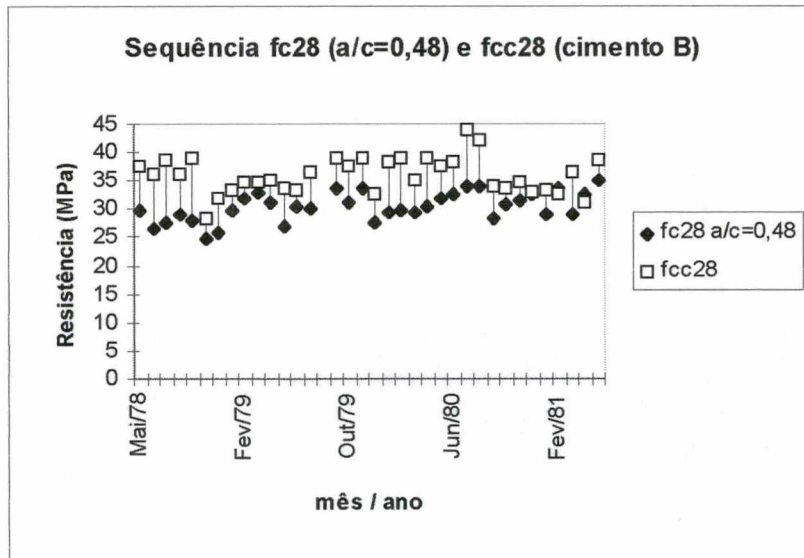


Figura 16 - Seqüência das resistências do cimento " B " e dos concretos correspondentes de $a/c = 0,48$

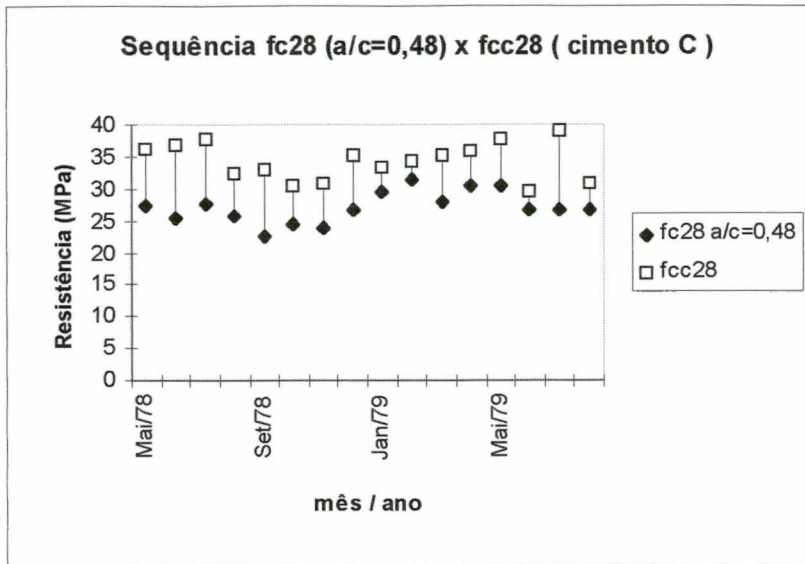


Figura 17 - Sequência das resistências do cimento " C " e dos concretos correspondentes de $a/c = 0,48$

Nas figuras anteriores podemos ver que os cimentos tiveram variações consideráveis de resistência no período estudado. Verificamos a mesma tendência, embora aparentemente um pouco menor do observado no cimento Votoran CPI-S-32, de uma variação suave do fator de eficiência. Para melhor visualização foram traçados os gráficos com a sequência dos fatores de eficiência, apresentados nas figuras 18, 19 e 20:

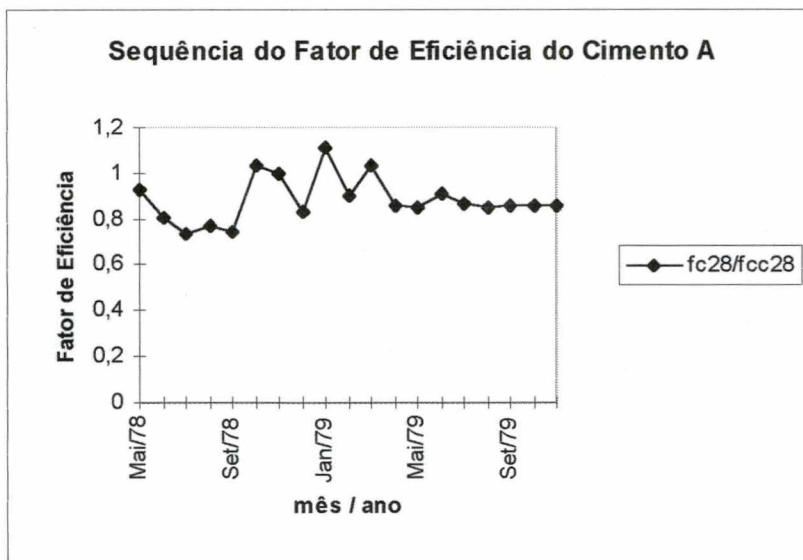


Figura 18 - Sequência do fator de eficiência do cimento " A "

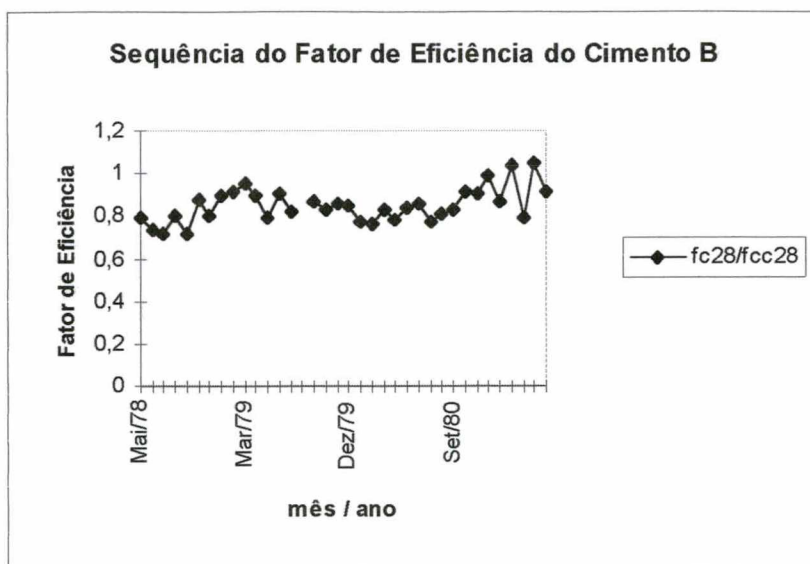


Figura 19 - Sequência do fator de eficiência do cimento "B"

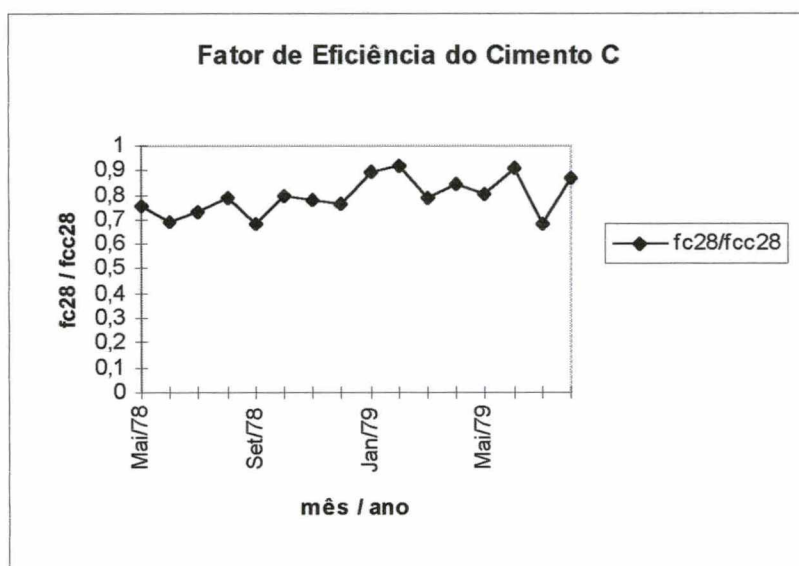


Figura 20 - Sequência do fator de eficiência do cimento " C "

Para verificar a existência de correlação entre o fator de eficiência e a composição química e finura do cimento, foram feitas regressões múltiplas dessas variáveis para os três cimentos A, B e C. Os quadros-resumo com as estatísticas de regressão estão apresentados nas figuras 21, 22 e 23 abaixo :

Estadística de regressão

R múltiplo	0,44627625
R-Quadrado	0,19916249
R-quadrado ajustado	-0,60167501
Erro padrão	0,14145369
Observações	15

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	0,03483291	0,00497613	0,24869276	0,95674547
Resíduo	7	0,14006402	0,02000915		
Total	14	0,17489693			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	4,48395864	7,07763212	0,63353938	0,54651588	-12,2519699	21,2198872
Blaine	-0,00019935	0,00020396	-0,97738859	0,36093791	-0,00068165	0,00028294
SiO ₂	-0,01055578	0,19041675	-0,05543515	0,95734085	-0,46081954	0,43970797
Fe ₂ O ₃	0,03333203	0,24022508	0,13875331	0,8935525	-0,53470962	0,60137367
Al ₂ O ₃	-0,05651054	0,21290133	-0,26543064	0,7983248	-0,55994183	0,44692075
CaO	-0,04218455	0,08646121	-0,48790149	0,64052969	-0,24663268	0,16226357
SO ₃	0,02032208	0,27779475	0,07315503	0,94372923	-0,63655764	0,67720181
CaO livre	0,0156151	0,08669356	0,18011838	0,86216304	-0,18938245	0,22061266

Figura 21 - Quadro-resumo da estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " A " com a finura e composição química

Estatística de regressão

R múltiplo	0,55244645
R-Quadrado	0,30519708
R-quadrado ajustado	0,11065227
Erro padrão	0,0774208
Observações	33

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	0,06582245	0,00940321	1,56877519	0,190792
Resíduo	25	0,1498495	0,00599398		
Total	32	0,21567195			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	2,28704124	1,4475987	1,57988622	0,12670365	-0,694342	5,26842447
Blaine	1,4752E-05	5,459E-05	0,27023773	0,78919575	-9,7678E-05	0,00012718
SiO ₂	0,02946406	0,02522136	1,16821876	0,2537388	-0,02248026	0,08140839
Fe ₂ O ₃	-0,12215091	0,08635282	-1,41455601	0,16953347	-0,29999775	0,05569594
Al ₂ O ₃	-0,03188928	0,05895288	-0,54092825	0,59334468	-0,15330492	0,08952636
CaO	-0,02188001	0,01992574	-1,09807743	0,28263432	-0,06291781	0,0191578
SO ₃	-0,13082609	0,06791454	-1,92633392	0,06550509	-0,27069861	0,00904643
CaOlivre	0,02034539	0,03320239	0,61276873	0,54556363	-0,04803617	0,08872695

Figura 22 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " B " com a finura e composição química

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,92806972
R-Quadrado	0,86131341
R-quadrado ajustado	0,66715219
Erro padrão	0,03973723
Observações	13

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	0,04903339	0,00700477	4,43607325	0,06008002
Resíduo	5	0,00789524	0,00157905		
Total	12	0,05692862			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-3,95667876	3,07115311	-1,28833653	0,25402262	-11,8513163	3,93795875
Blaine	-2,4613E-05	3,9641E-05	-0,6208906	0,56187658	-0,00012651	7,7288E-05
SiO ₂	0,10218901	0,05032625	2,03053105	0,09804478	-0,02717852	0,23155653
Fe ₂ O ₃	0,29609041	0,08860951	3,34151957	0,02051834	0,06831279	0,52386804
Al ₂ O ₃	0,068478	0,05958923	1,14916733	0,30247162	-0,08470075	0,22165674
CaO	0,02142587	0,03046667	0,70325621	0,51328374	-0,05689106	0,09974281
SO ₃	0,18442465	0,07022421	2,62622608	0,04674542	0,00390787	0,36494144
CaO livre	-0,03686511	0,03148891	-1,1707333	0,29446123	-0,11780979	0,04407957

Figura 23 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " C " com a finura e composição química, com comprovação de validade estatística

Como pode-se verificar, para os cimentos A e B não foram encontrados coeficientes de correlação significativos, mas para o cimento C, o coeficiente de correlação entre as variáveis fator de eficiência (f_{c28}/f_{cc28}) com a finura do cimento e sua composição química (porcentagem dos óxidos) podem ser considerados como muito bons. Isso porque, apesar da regressão ter sido feita através do uso de dados de variáveis independentes, cujas variações são puramente aleatórias (finura e composição química), e que devido às modernas técnicas de controle de qualidade das fábricas de cimento tendem a ser pequenas, as variações aleatórias dependentes (resistência do cimento e concreto), tendem a possuir erros consideráveis de medição, ou seja, de dosagem e ensaio de ruptura à compressão.

Como a resistência à compressão do cimento é dependente de sua composição química, e do grau de moagem, expresso pela finura, a primeira coisa que vem à mente é que o fator de eficiência deve na verdade se correlacionar com a resistência do cimento, diminuindo com o aumento da resistência do cimento, como Helene (1987) já havia demonstrado quando

construiu o gráfico de correlação f_{cj} com f_{ccj} , já apresentado na figura 1, onde as curvas diminuem sua inclinação à medida que aumenta a resistência do cimento.

Entretanto, havendo correlação do fator de eficiência com a composição química independentemente do grau de moagem do cimento, isso indicaria a existência de outros fenômenos, e que explicariam parte da dispersão encontrada nas correlações de f_{cj} com f_{ccj} . É o que mostra a figura 24 abaixo, que contém o quadro-resumo com a estatística de regressão do fator de eficiência em função da composição química do cimento, onde a finura do cimento ficou de fora do cálculo da regressão:

<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo	0,92229092					
R-Quadrado	0,85062053					
R-quadrado ajustado	0,70124107					
Erro padrão	0,03764742					
Observações	13					

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	0,04842465	0,00807078	5,69436048	0,02631028
Resíduo	6	0,00850397	0,00141733		
Total	12	0,05692862			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-4,3654528	2,8419961	-1,53605165	0,17543303	-11,3195718	2,58866622
SiO ₂	0,10473203	0,04752139	2,20389265	0,0697273	-0,01154869	0,22101276
Fe ₂ O ₃	0,31380199	0,07948028	3,94817426	0,00755344	0,11932061	0,50828337
Al ₂ O ₃	0,07602361	0,05526883	1,37552409	0,21811334	-0,05921445	0,21126167
CaO	0,02457405	0,02846186	0,86340261	0,42108405	-0,04506967	0,09421776
SO ₃	0,18314187	0,06650226	2,75391942	0,03311943	0,02041658	0,34586717
CaO livre	-0,0427762	0,02843671	-1,50425982	0,18321394	-0,11235837	0,02680597

Figura 24 - Estatística de regressão do fator de eficiência do cimento " C " com a composição química, independente da finura, com comprovação de validade estatística

O índice de correlação praticamente não se alterou quando se fez a regressão sem a variável finura do cimento. A menos que a finura tivesse permanecido constante no período, isso comprova a hipótese de que existe uma variação da eficiência de um cimento para o uso em concreto, e essa variação depende principalmente da composição química do cimento.

Em seguida foram também efetuadas duas regressões múltiplas, em que a variável dependente é a resistência do cimento, que é correlacionada na primeira regressão com a finura

e a composição química do cimento, e na segunda regressão só com sua composição química. Nas figuras 25 e 26 encontram-se os quadros-resumo dessas estatísticas :

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,90627503
R-Quadrado	0,82133444
R-quadrado ajustado	0,57120265
Erro padrão	1,54462696
Observações	13

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	54,8398685	7,83426693	3,28360676	0,10458073
Resíduo	5	11,9293623	2,38587245		
Total	12	66,7692308			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-35,0584867	119,378884	-0,2936741	0,78080653	-341,931177	271,814204
Blaine	0,00540005	0,00154089	3,50450452	0,01720138	0,00143908	0,00936102
SiO ₂	-0,96447246	1,95623306	-0,49302534	0,6428822	-5,99312141	4,06417649
Fe ₂ O ₃	-1,43739511	3,44434294	-0,41732056	0,69375755	-10,291346	7,41655581
Al ₂ O ₃	-1,45978833	2,31629473	-0,63022564	0,55622326	-7,41400377	4,4944271
CaO	1,31164177	1,18427076	1,10755227	0,31847002	-1,73261816	4,3559017
SO ₃	1,24987025	2,72968738	0,45788036	0,66624895	-5,76700309	8,26674359
CaO livre	0,43355111	1,22400622	0,35420662	0,73763213	-2,71285191	3,57995413

Figura 25 - Estatística de regressão da resistência do cimento " C " com a finura e a composição química, com comprovação de validade estatística

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,61844673
R-Quadrado	0,38247636
R-quadrado ajustado	-0,23504729
Erro padrão	2,62143659
Observações	13

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	25,5376521	4,25627535	0,61937119	0,71237528
Resíduo	6	41,2315787	6,87192978		
Total	12	66,7692308			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	54,6267376	197,891743	0,27604354	0,79177617	-429,597267	538,850742
SiO ₂	-1,5224137	3,30897356	-0,46008639	0,66165556	-9,61918623	6,57435884
Fe ₂ O ₃	-5,32332403	5,53431124	-0,96187652	0,37325702	-18,8653057	8,21865763
Al ₂ O ₃	-3,1152997	3,84843791	-0,8094972	0,44913206	-12,5320949	6,30149551
CaO	0,62093119	1,98183505	0,31331124	0,76464978	-4,22844802	5,4703104
SO ₃	1,53131252	4,63063576	0,33069164	0,75212018	-9,79945328	12,8620783
CaO livre	1,73044699	1,98008369	0,87392619	0,41576267	-3,11464681	6,5755408

Figura 26 - Estatística de regressão da resistência do cimento " C " com a composição química, independente da finura, com comprovação de validade estatística

Como era de se esperar, a correlação da resistência do cimento com sua finura e composição química se mostrou muito boa, e quando a regressão foi feita sem a variável finura do cimento, o índice de correlação se mostrou bastante deficiente. Isso enfim comprova que o fator de eficiência é uma variável dependente da composição química do cimento e muito pouco dependente do nível de resistência do cimento.

4.3 ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS PARA COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES TIPOS E MARCAS DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

4.3.1 Introdução e objetivos

É prática comum a utilização de **curvas médias nacionais**, que correlacionam a resistência à compressão do concreto com a relação a/c , para poupar tempo e dar início à produção de concreto, antes dos resultados dos ensaios de ruptura, ou para auxiliar a obtenção de um único traço padrão com menos misturas que seriam necessárias para se construir um diagrama de dosagem.

Algumas das curvas publicadas levam em consideração a influência da resistência do cimento utilizado na resistência do concreto (Rodrigues, 1995), outras simplesmente utilizam-se de um valor médio (Helene & Terzian, 1992).

Os objetivos desta parte do trabalho compreendem a realização de um estudo completo para vários tipos e marcas de cimento consumidos na região da Grande Florianópolis, e a obtenção de uma equação que correlacione a resistência do concreto com a resistência do cimento e a relação a/c , independente do tipo de cimento, para comparar com as curvas publicadas pelos diversos autores, e ainda servir de instrumento de auxílio em estudos de dosagem de concretos fabricados com esses cimentos.

Também é parte dos objetivos do presente trabalho, estudar a influência da demanda de água do cimento utilizado no concreto no consumo de cimento pelo mesmo.

Busca-se também verificar a influência do teor de argamassa do concreto, da dimensão máxima característica do agregado e do abatimento, na resistência à compressão do concreto e no seu consumo.

4.3.2 Programação e execução de ensaios

4.3.2.1 Dosagens de concretos de mesmos parâmetros de dosagem com diferentes tipos e marcas de cimento

Para cumprir o objetivo de realizar um estudo de dosagem completo para vários tipos e marcas de cimento consumidos na região da Grande Florianópolis, foi adquirida uma amostra de cada cimento de tamanho suficiente para todos os ensaios. Os cimentos foram o CPI-S-32 ,

CPII-F-32 e CPV (ARI) da Fábrica Itambé (PR), além do CPI-S-32 e CPIV-32 Votoran da Fábrica Rio Branco (PR).

A dosagem dos concretos foi realizada obedecendo os mesmos critérios adotados na etapa anterior, explicitado em 4.2.2.1, quando para a mistura eram colocados na betoneira todo o cimento e a água calculados e somente 91 % dos agregados esperados. Para se garantir as mesmas relações a/c eram então feitos acréscimos de 3 em 3 % dos agregados até se atingir o Slump desejado de 60 ± 10 mm. Para todos os cimentos foram feitos traços de concreto de relações a/c iguais a 0,38, 0,48 e 0,58. Nesta fase foram moldados e ensaiados 48 corpos-de-prova cilíndricos de 15x30 cm. A tabela 15 mostra os resultados obtidos dos concretos dosados com os cinco diferentes cimentos:

Tabela 15 - Valores das resistências à compressão e traços obtidos das dosagens realizadas com os diferentes cimentos

Cimento	a/c	Resistência do concreto em MPa à idade de :			Traço m	relação água / materiais secos(%) H	Teor de argamassa (%) α	consumo de cimento (Kg/m ³) C
		3 dias	7 dias	28 dias				
Itambé CPV	0,38	33,3 - 26,4	38,0 - 38,6	47,0 - 46,3	2,89	9,8	51,1	562
	0,48	29,6 - 28,9	32,6 - 31,8	39,4 - 36,6	4,27	9,1	50,0	418
	0,58	21,4 - 21,9	24,3 - 22,5	30,4 - 31,5	6,03	8,3	49,2	317
Itambé CPI-S-32	0,38	29,4 - 30,0	35,5 - 35,1	45,0 - 46,6	2,89	9,8	51,1	562
	0,48	25,8 - 25,5	27,9 - 30,0	37,1 - 33,9	4,42	8,9	49,6	408
	0,58	20,8 - 21,0	24,1 - 23,4	28,9 - 28,2	5,52	8,9	49,7	338
Itambé CPII-F-32	0,38	23,0 - 25,5	33,7 - 33,3	40,2 - 41,9	3,27	9,2	48,0	520
	0,48	24,7 - 22,5	29,7 - 30,3	34,3 - 39,9	4,67	8,5	49,2	392
	0,58	18,0 - 18,3	23,3 - 22,5	29,4 - 28,9	5,79	8,5	49,4	326
Votoran CPIV-32	0,38	27,1 - 25,7	31,4 - 31,0	42,4 - 43,2	1,71	14,0	50,0	733
	0,48	21,4 - 21,2	26,1 - 25,8	35,9 - 36,8	3,89	9,8	50,1	438
	0,58	17,2 - 16,7	21,5 - 21,0	31,4 - 30,9	5,07	9,6	50,8	354
Votoran CPI-S-32	0,38	35,9	-----	46,7	3,22	9,0	49,9	529
	0,48	26,4	29,6	40,6	4,58	8,6	49,6	401
	* Valores Médios	0,58	21,1	-----	31,5	5,59	8,8	49,7

* Os valores dos concretos do cimento Votoran CPI-S-32 são médias obtidas a partir das 14 amostras semanais. (Ver tabela 6)

Todos os cimentos foram ensaiados à compressão segundo o método NBR-7215/1991, feito também a determinação da Água para Consistência Normal de acordo com o NBR-11580/1991 e ainda o abatimento na mesa de consistência conforme o NBR-7215/1991. Tanto os corpos-de-prova de concreto como os de cimento foram curados em caixa de isopor nas primeiras 24 horas e em seguida colocados em cura submersa com temperatura controlada. Nesta fase do trabalho foram moldados e rompidos 72 corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão do cimento. A tabela 16 dispõe do quadro-resumo com os resultados dos ensaios realizados nessa etapa.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e caracterização dos cimentos

Cimento	Índice de Consistência "I _c "	Água da pasta de consistência normal "HN"	Resistência do cimento em MPa à idade de :			Massa específica do cimento (Mg/m ³)
	(mm)	(%)	3 dias	7 dias	28 dias	
Itambé CPV	181	29,8	34,5 - * 34,7 - 37,0	36,5 - 37,2 41,0 - 40,3	47,0 - 45,0 43,4 - 41,6	3,07
Itambé CPI-S-32	185	27,6	25,8 - 25,3 30,1 - 28,8	32,6 - 30,4 30,8 - 34,0	39,3 - 40,1 37,2 - 38,3	3,07
Itambé CPII-F-32	175	28,2	23,9 - 26,1 26,9 - 27,4	29,3 - 28,6 30,4 - 29,8	36,8 - 34,8 36,8 - 35,2	3,02
Votoran CPIV-32	162	35,6	18,9 - 18,9 19,6 - 19,4	23,4 - 23,9 24,8 - 24,2	33,8 - 34,7 37,0 - 36,3	2,82
Votoran CPI-S-32 **Valores Médios	187	26,4	27,9	32,6	37,8	3,15

* Perdido no manuseio ** Ver tabela 7

4.3.2.2 Dosagens de concretos com diferentes parâmetros de dosagem

Como na fase anterior todos os concretos foram dosados com um teor de argamassa de 50 %, com a dimensão máxima característica do agregado de 25 mm (britas 1 e 2), e com abatimento de 60 ± 10 mm, para analisar a influência da alteração de qualquer um desses parâmetros, na resistência ou no consumo de cimento do concreto, foram dosados três traços de relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58 , para cada parâmetro alterado, segundo a metodologia descrita em 4.2.2.1.

Desse modo, nesta fase foram feitas mais nove misturas, ou seja, três para verificar a influência do aumento do teor de argamassa para 56 %, outros três para o concreto com dimensão máxima característica do agregado de 19 mm (brita 1) ao invés do padrão anterior de 25 mm, e ainda mais três misturas para analisar a influência do aumento do abatimento de 60 para 100 ± 10 mm. A influência da dimensão máxima característica foi testada fazendo-se traços com o cimento Votoran CPIV-32 e as influências do teor de argamassa e do abatimento foram feitas com o cimento Itambé CPI-S-32.

Todos os concretos seriam feitos com o cimento CPIV-32, sem nenhum motivo especial, mas durante os ensaios verificou-se que seria impossível fazer um traço de relação a/c = 0,38 e abatimento de 100 ± 10 mm com esse cimento, devido à enorme demanda de água demonstrada durante a execução do traço de mesma relação a/c e abatimento de 60 ± 10 mm. Por isso, durante a execução dos ensaios, decidiu-se mudar o tipo de cimento dessa fase do experimento para o tipo CPI-S-32.

Durante esta última etapa de ensaios foram moldados um total de 36 corpos-de-prova de concreto cilíndricos de 15x30 cm. A tabela 17 mostra os resultados das dosagens efetuadas com os valores das resistências obtidas e dos parâmetros de cada traço.

Tabela 17 - Valores das resistências obtidas dos concretos dosados com diferentes parâmetros de dosagem e os parâmetros de cada traço

Cimento / Condição especial do concreto	a/c	Resistência do concreto em MPa à idade de :			Traço m	Relação água / materiais secos(%) H	Teor de argamassa (%) α	consumo de cimento (Kg/m ³) C
		3 dias	7 dias	28 dias				
Itambé CPI-S-32 ($\alpha = 56\%$)	0,38	35,7 - 35,1	-----	40,5 - 49,4	2,89	9,8	57,0	561
	0,48	27,6 - 27,5	-----	38,6 - 37,2	4,28	9,1	56,0	416
	0,58	20,1 - 21,8	-----	31,2 - 31,8	5,07	9,6	56,4	357
Itambé CPI-S-32 (Slump = 100 mm)	0,38	30,1 - 30,0	-----	41,4 - 41,4	2,71	10,2	50,4	585
	0,48	27,1 - 26,5	-----	36,6 - 33,4	4,26	9,1	48,9	419
	0,58	21,4 - 20,7	-----	30,5 - 30,5	5,38	9,1	49,1	344
Votoran CPIV-32 ($\phi_{\text{máx}} = 19\text{mm}$)	0,38	24,7 - 24,7	-----	44,3 - 41,1	1,86	13,3	52,5	697
	0,48	20,8 - 20,5	-----	35,4 - 35,4	3,66	10,3	51,1	451
	0,58	16,7 - 16,8	-----	30,4 - 30,3	4,95	9,6	50,8	356

4.3.3 Análise dos resultados

4.3.3.1 Curvas de regressão entre resistência do cimento e resistência do concreto utilizados para dosagem

Inicialmente foram calculados os coeficientes de correlação na regressão entre a resistência do cimento " f_{cc} " e a resistência do concreto " f_c " para cada uma das três relações a/c do concreto disponíveis 0,38 , 0,48 e 0,58, e para as três idades 3 , 7 e 28 dias e ainda para todas as idades ao mesmo tempo, como se apresenta na tabela da tabela 18:

Tabela 18 -Tabela com os coeficientes de correlação " r " para todos os cimentos em conjunto

Relação a/c	IDADE			
	3 dias	7 dias	28 dias	3, 7 e 28 dias
0,38	0,635	0,998	0,737	0,875
0,48	0,995	0,938	0,214	0,881
0,58	0,874	0,901	0,267	0,840

Como podemos observar na tabela de resultados dos coeficientes de correlação, os melhores resultados foram na idade de 7 dias. Provavelmente os resultados à três dias são mais

afetados pela hora de realização do ensaio, o que pode prejudicar um pouco um coeficiente de correlação calculado. Já aos 28 dias, são mais intensas as influências das ligações da pasta com o agregado, e há maior probabilidade de haver diferenças entre a resistência da pasta e do concreto, ou seja, diferentes fatores de eficiência para cimentos diferentes. Além disso, como comentado no item 4.2.3.1, as variabilidades ocorridas na dosagem e ensaio afetam fortemente o coeficiente de correlação.

De qualquer forma é importante verificar que alguns dos resultados são muito bons, o que demonstra que há uma razoável correlação na regressão entre a resistência do cimento e do concreto, mesmo utilizando na regressão diferentes tipos de cimento. Isso nos permite utilizar de equações obtidas por regressão, com o devido cuidado para não generalizar, para auxiliar nas dosagens de concreto. A figura 27 ilustra as correlações encontradas, mostrando um dos exemplos da variação da resistência do concreto com a variação da resistência do cimento.

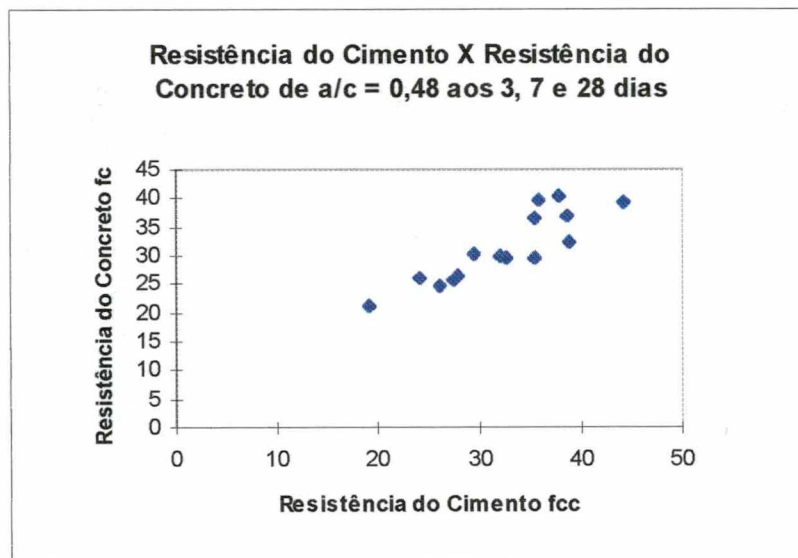


Figura 27 - Variação da resistência do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, na idade "j", com a correspondente resistência do cimento

Para encontrar uma equação que correlacionasse a resistência do concreto f_{cj} com a resistência do cimento f_{ccj} e a relação a/c, a cada idade "j", foram feitas regressões lineares múltiplas com essas variáveis. Para se fazer isso, a equação teórica da reta no espaço utilizada para se fazer cada regressão linear múltipla foi a mesma usada por Helene (1987), que é derivada da solução teórica apresentada por Fusco (1975):

$$\log f_{cj} = k_5 \cdot \log (f_{cc28}) - k_6 \cdot a/c + k_7$$

Após encontrados os coeficientes k_5 , k_6 e k_7 através da regressão, a equação é transformada para apresentação final. As equações encontradas para as idades de 3, 7 e 28 dias e os coeficientes de correlação múltipla estão colocados abaixo. Os parâmetros estatísticos completos estão no anexo D :

$$- \quad f_{c3} = \frac{14,5130 \cdot f_{cc3}^{0,4642}}{7,9046^{a/c}} \quad , \quad r_3 = 0,9441$$

$$- \quad f_{c7} = \frac{19,7487 \cdot f_{cc7}^{0,3894}}{7,3110^{a/c}} \quad , \quad r_7 = 0,9851$$

$$- \quad f_{c28} = \frac{40,9716 \cdot f_{cc28}^{0,2313}}{6,9289^{a/c}} \quad , \quad r_{28} = 0,9643$$

Na figura 28 abaixo estão três curvas provenientes da equação de regressão anterior, para a idade de 28 dias, onde foram fixados as relações a/c em 0,38 , 0,48 e 0,58. Pode-se perceber que existe uma maior taxa de variação da resistência do concreto com a variação da resistência do cimento para traços mais ricos, o que concorda com o apresentado por Helene (1987). Entretanto, no que se refere à relação f_{cj} / f_{ccj} , os valores encontrados foram bem maiores que os de Helene (1987).

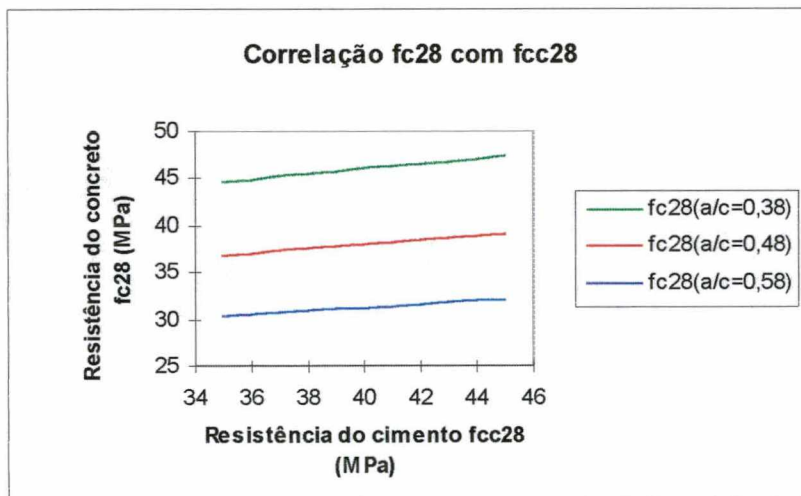


Figura 28 - Curvas de correlação entre a resistência do cimento e do concreto para a/c fixa

Para comparar a equação múltipla encontrada para a idade de 28 dias, com os valores fornecidos por outros autores (Helene, 1987; Helene & Terzian, 1992; Rodrigues, 1984, 1995), foram plotados três gráficos com Curvas de Abrams, cada um para uma diferente resistência do cimento. Essas curvas foram construídas por regressão aos mínimos quadrados a partir dos valores das relações a/c , resistências dos cimentos e resistências dos concretos, extraídos diretamente ou por interpolação, dos trabalhos dos autores citados. Somente a curva construída a partir do trabalho de Helene (1987) para o cimento CP-32 não considera diferenças na resistência do cimento, já que é uma curva média nacional construída a partir de ensaios com corpos-de-prova de argamassa.

As curvas denominadas nas legendas das figuras por Helene / IPT são baseadas no mesmo trabalho de Helene (1987), que utilizou de resultados de ensaios de três marcas de cimento denominadas A, B e C e concretos padronizados dosados com esses cimentos, que foram realizados no IPT durante vários anos seguidos. As curvas denominadas de ABCP/1983 foram obtidas a partir do trabalho de Rodrigues (1983) e as curvas denominadas ABCP/1995 obtidas do recente trabalho de Rodrigues (1995). Os três gráficos são apresentados nas figuras 29, 30 e 31.

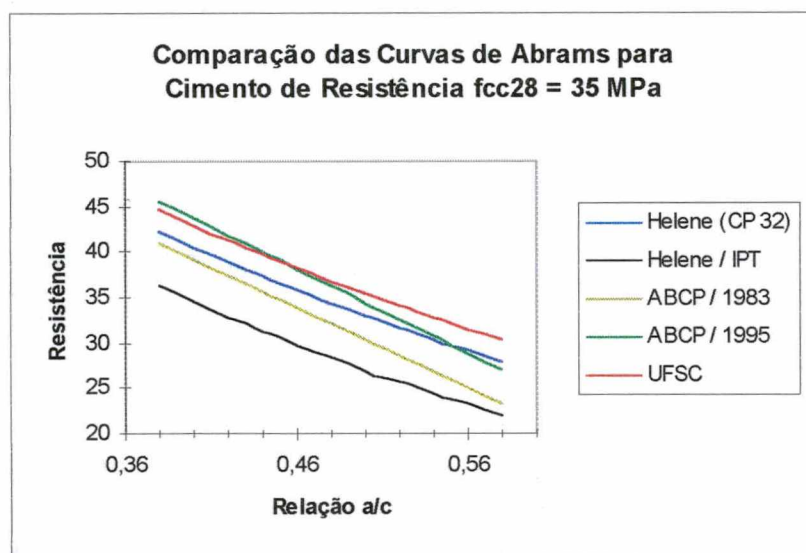


Figura 29 -

Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 35 MPa

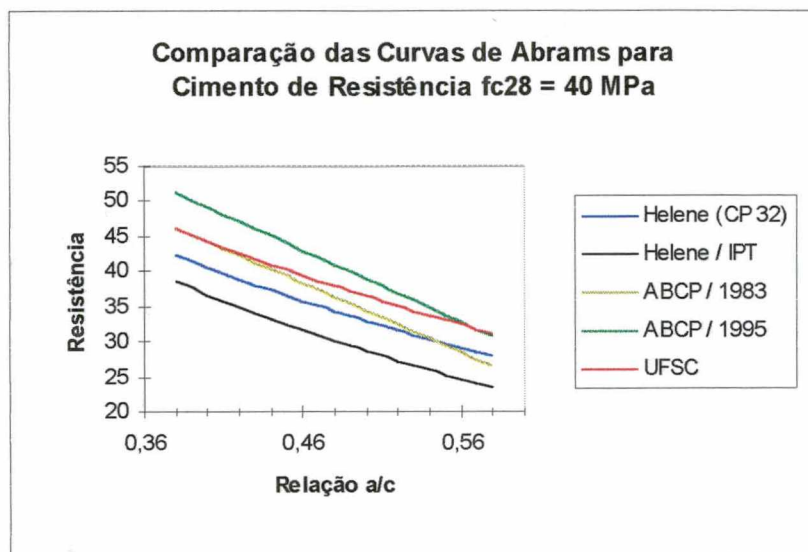


Figura 30 - Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 40 MPa

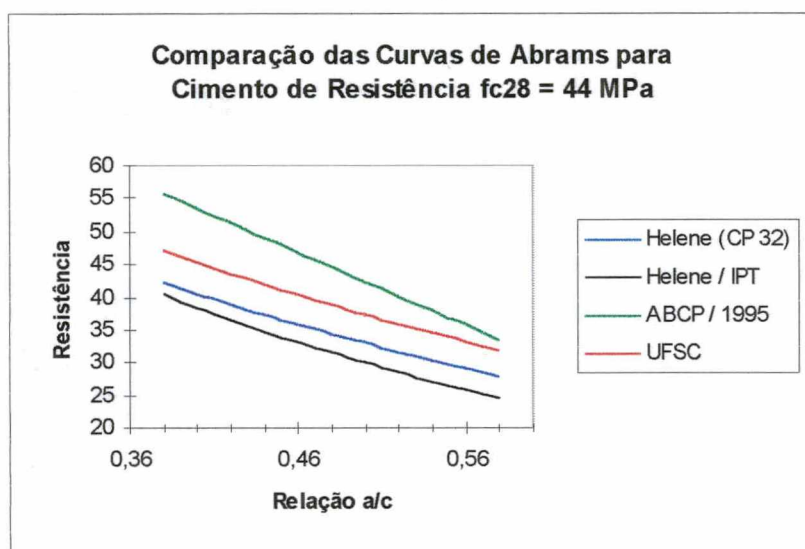


Figura 31 - Curvas de Abrams fornecidas por diferentes autores para concretos dosados com cimento de resistência de 44 MPa

Ao observar as curvas plotadas nas figuras acima, pode-se perceber com facilidade que os valores encontrados pelos vários autores são significativamente diferentes, apesar de todos terem encontrado boas correlações entre seus dados. A explicação para essa grande diferença pode estar nos diferentes materiais utilizados, cimento e agregados, pois a composição química do cimento e sua mineralogia, o tipo de superfície e dimensão máxima característica do agregado provavelmente afetam a região da zona de transição pasta/agregado. Apesar da relação água/cimento ser a variável mais importante de um concreto no que concerne à resistência à compressão, outras variáveis em diferentes combinações parecem também afetar fortemente seu comportamento.

4.3.3.2 A demanda de água do cimento e a lei de Lyse

É quase unânime a aceitação entre os pesquisadores da Lei de Lyse ou da constância da quantidade de água total a ser empregada com determinados materiais, para concretos normais, dada uma consistência do concreto, independente da proporção entre os materiais (Petrucci, 1993). Vários métodos de dosagem se utilizam dessa lei para estabelecer a equação que dá o traço em função da relação a/c. Por considerar a relação água / materiais secos constante para dada trabalhabilidade, a função obtida é uma reta, o que facilita os cálculos.

A lei de Lyse à primeira vista parece ir contra o senso comum de que o aumento na proporção de finos numa mistura aumenta a coesão do concreto e com isso deveria diminuir o abatimento. Mas é que a lei de Lyse é uma lei das compensações. O abatimento do concreto fresco é dependente principalmente de dois fatores, a coesão da pasta e o atrito entre os agregados. Quando aumenta-se a proporção de cimento numa mistura, diminuindo-se a mesma massa em agregados, em consequência da redução da relação água / cimento é aumentada a coesão do concreto, o que deveria diminuir o abatimento do mesmo. Entretanto isso geralmente não ocorre em traços usuais, porque em compensação ao aumento da coesão da mistura, há uma diminuição do atrito entre os grãos dos agregados, tanto pelo efeito lubrificante do aumento no teor de cimento, como pelo aumento na distância entre os grãos dos agregados.

Outro fator que também contribui para a validade da lei de Lyse, é que geralmente ela é considerada em termos de proporção em massa dos materiais, e não em volume específico. Como o cimento Portland comum tem massa específica em torno de $3,1 \text{ Mg/m}^3$ e os agregados na faixa de $2,5$ a $2,7 \text{ Mg/m}^3$, a substituição de agregado por uma mesma quantidade em massa de cimento, significa um menor volume específico de cimento em relação à porção de agregado substituído, o que vem a somar ao efeito de compensação citado no parágrafo anterior.

Para verificar a validade da lei de Lyse para cimentos com maiores demandas de água (efeito da finura e adições) e relações água/cimento mais baixas, foram plotados em um gráfico os valores de " m " em função da relação a/c (curvas de Lyse), para os traços feitos com as relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58, para os cinco tipos / marcas de cimento estudados.. Os pontos foram ligados por retas para facilitar a visualização da validade da lei de Lyse. Abaixo na figura 32 vemos o resultado final:

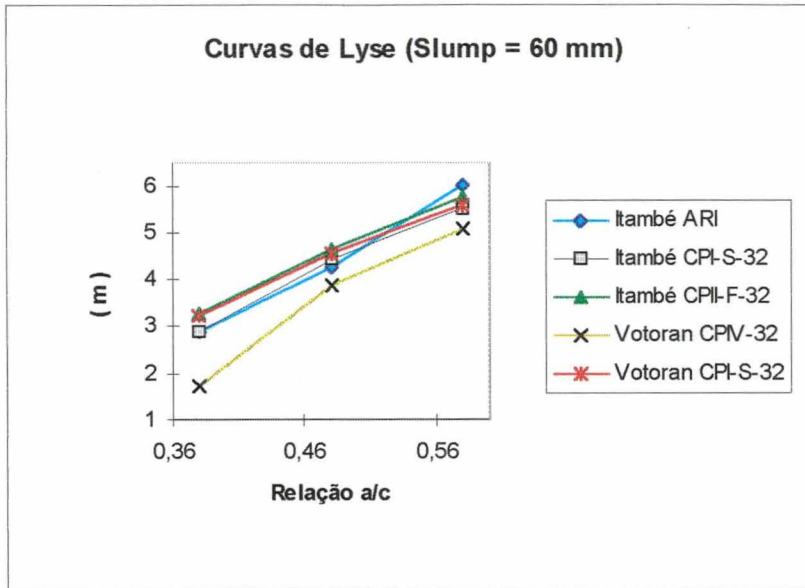


Figura 32 - Curvas de Lyse para os concretos feitos com os vários cimentos estudados

Verifica-se através do gráfico que nenhum concreto apresentou uma variação completamente linear de “m” em função de “a/c” para o intervalo de “a/c” estudado. Sem excluir a possibilidade de erros de medida, com exceção do cimento CPV (ARI), todos os cimentos apresentaram uma tendência de crescimento mais rápido que o previsto por uma reta, no consumo de cimento, à medida que diminui a relação “a/c”. No caso do cimento CPIV-32 isso é mais intenso e explicável em razão de sua elevada finura e maior teor de adições. A figura 33 reafirma essa maior necessidade de água dos concretos de baixa relação a/c feitos com cimentos de elevada demanda de água, mostrando a variação da relação água/materiais secos “H(%)” dos concretos em função da relação a/c:

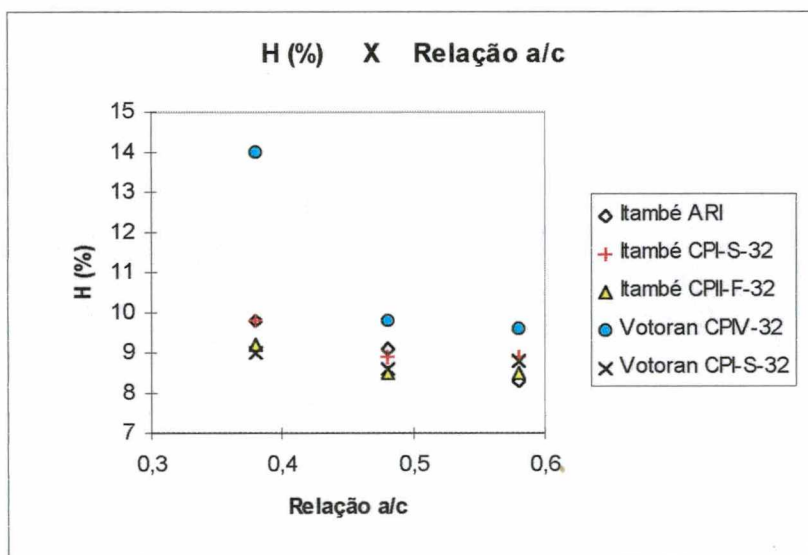


Figura 33 - Variação da relação água/materiais secos em função da relação a/c para diferentes cimentos

Conclui-se então que para baixas relações água/cimento, como os traços de $a/c = 0,38$ do presente estudo, e cimentos de elevada demanda de água, a variação do traço (m) em função da relação a/c pode ser melhor representada por uma curva interpolada no intervalo que pela equação da reta. Isso evitaria alguns erros no estabelecimento dos traços à partir de um diagrama de dosagem quando se deseja concretos de mais elevada resistência com cimentos muito finos e com elevados teores de adições.

4.3.3.3 - A influência da demanda de água do cimento no consumo de cimento pelo concreto

Uma das dificuldades que o tecnologista de concreto se depara frequentemente é a escolha do cimento e dos agregados a serem utilizados numa produção. Muitas vezes o produtor de concreto tem mais opções na escolha do cimento a ser usado do que a origem dos agregados. Entretanto, fazer um estudo de dosagem utilizando mais de um cimento pode se tornar muito dispendioso. É interessante portanto se buscar meios de correlacionar as características de um cimento que afetem o seu consumo e as resistências mecânicas alcançadas.

Para estudar o efeito da demanda de água do cimento no consumo de cimento por metro cúbico de concreto, e para procurar uma maneira de fazer isso com ensaios simples e confiáveis, as demandas de água dos cimentos foram medidas para este trabalho por dois métodos. Foram feitos para os cinco tipos/marcas de cimento os ensaios do índice de consistência da argamassa normal na mesa de consistência (NBR-7215, 1991) e da água da pasta de consistência normal (NBR-11580, 1991). As principais correlações foram feitas com base no resultado do ensaio da água da pasta de consistência normal por ser considerado um dos ensaios de cimento de melhor reprodutibilidade (Revista Ibracon, out./nov. 1996). Foi adotada a notação " I_c " para o índice de consistência da argamassa normal e " HN " para a água da pasta para consistência normal.

Primeiramente se buscou verificar a reprodutibilidade desses dois ensaios, traçando-se um gráfico correlacionando as duas variáveis HN e I_c , e calculando-se o coeficiente de correlação na regressão. Na figura 34 apresenta-se o gráfico com o coeficiente de correlação encontrado:

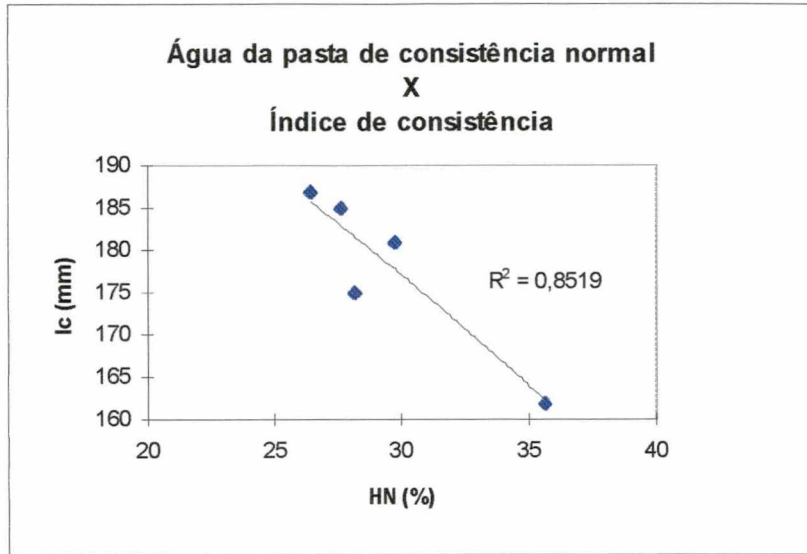


Figura 34 - Regressão entre os valores do ensaio da água da pasta de consistência normal com o índice de consistência para cinco tipos / marcas de cimento.

Verifica-se pelo gráfico e pelo coeficiente de determinação r^2 que há boa correlação na regressão entre os dois ensaios. Foram então calculados os coeficientes de correlação para a regressão linear entre o índice de consistência I_c (mm) e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto C (Kg/m³) e para a regressão linear entre o valor da água de pasta de consistência normal HN (%) e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto C (Kg/m³) para os concretos com os cinco cimentos do estudo nos traços de relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58. Os resultados estão colocados na tabela 19, para comparação e verificação do ensaio que dá melhor reprodutibilidade :

Tabela 19 - Coeficientes de correlação na regressão linear para $C \times I_c$ e para $C \times HN$

Relação a/c	Coeficiente de correlação na regressão linear " r " entre :	
	$C \times I_c$	$C \times HN$
0,38	- 0,92	0,95
0,48	- 0,66	0,89
0,58	- 0,59	0,61

A tabela mostra que a água da pasta de consistência normal possui melhores coeficientes de correlação linear na regressão com o consumo de cimento no concreto para todas as relações a/c estudadas e por isso deve realmente possuir melhor reprodutibilidade que o índice de consistência.

Em seguida foram construídos os gráficos dos valores do ensaio da água de pasta de consistência normal dos cinco cimentos estudados em função dos consumos verificados nos concretos dosados com as relações a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58 , apresentados nas figuras 35, 36 e 37 :

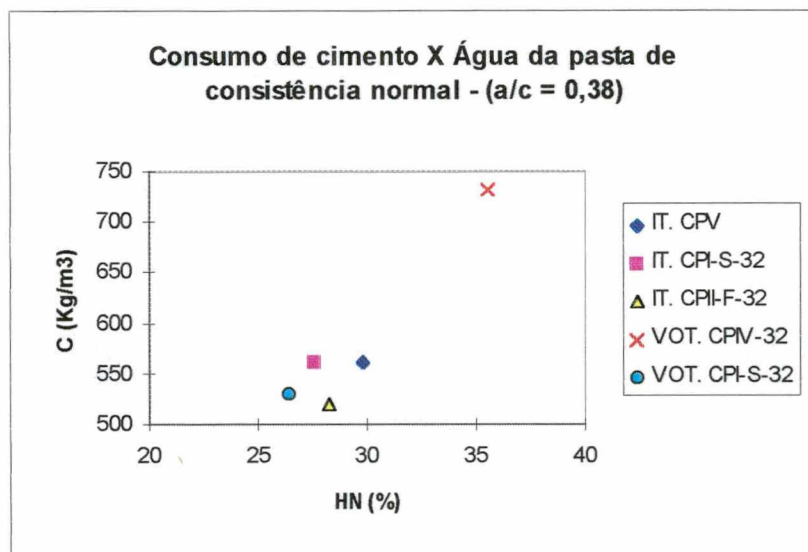


Figura 35 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação $a/c = 0,38$

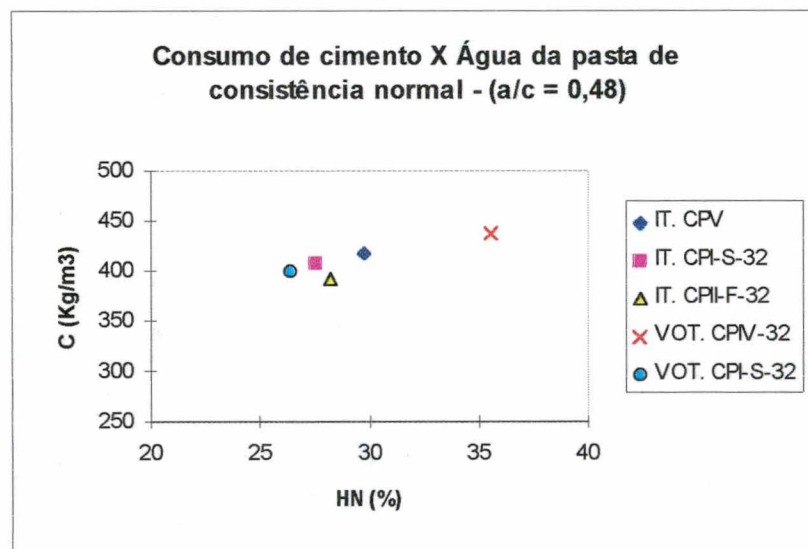


Figura 36 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação $a/c = 0,48$

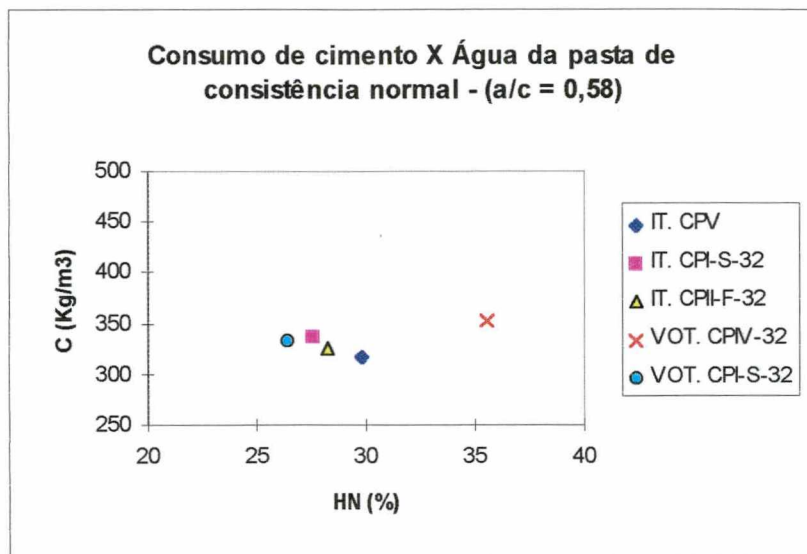


Figura 37 - Consumo de cimento em função do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal para relação $a/c = 0,58$

Interessante notar que, para a relação a/c mais baixa, $a/c = 0,38$ - figura 35, o consumo de cimento dá um grande salto quando o valor obtido no ensaio da água da pasta de consistência normal passa da faixa de 25-30 % para mais que 35 %, caso do cimento CPIV-32. Para a relação a/c média do estudo, $a/c = 0,48$ - figura 36, parece haver um aumento suave e linear do consumo de cimento com o aumento do HN. Já para os traços mais pobres, $a/c = 0,58$ - figura 37, não parece haver variação significativa no consumo de cimento pelo concreto em função do aumento da demanda de água do cimento.

A explicação para o fenômeno reside no fato de que, em traços com alto conteúdo de cimento, a influência deste é maior que a dos agregados nas propriedades do concreto fresco, e por isso, a demanda de água do concreto é proporcional à demanda de água do cimento utilizado. É importante destacar que, além da finura do cimento, a forma e textura das suas partículas mais finas (além de outros fatores ligados aos primeiros minutos da hidratação do cimento), também podem influenciar na sua demanda de água. E deve ser por isso que se verificou uma grande diferença entre o valor do ensaio da água da pasta de consistência normal "HN" para o cimento Itambé CPV e o Votoran CPIV, quando se sabe que em termos de finura medida pelo permeabilímetro de Blaine a diferença não é tão significativa.

No caso de concretos pobres, o atrito entre os agregados se manifesta mais fortemente que nos concretos mais ricos, pois os primeiros possuem menos pasta e a viscosidade dela é menor. Por isso, o aumento na viscosidade da pasta, provocado por uma finura mais elevada do cimento e de um maior teor de adições incorporadas, reduz o atrito entre os agregados, compensando o efeito de aumento no consumo de cimento devido ao aumento da coesão. Isto

explica a razão pela qual nos concretos mais pobres não se verificar aumento significativo no consumo de cimento em função do uso de um cimento de elevada demanda de água.

Como se verifica, o consumo de cimento pelo concreto depende da demanda de água do cimento utilizado, dado um determinado conjunto de agregados. Como se sabe que esse consumo também depende da relação água / cimento da mistura, foi realizada com os dados do estudo, uma correlação linear múltipla entre o consumo de cimento do concreto "C" (como variável dependente) e a relação água/cimento "a/c" e o valor da água da pasta de consistência normal "HN" (como variáveis independentes) para verificar se é possível utilizar uma equação com essas variáveis, para prever alterações no consumo de cimento, quando uma produção de concreto quiser ou tiver que alterar o tipo ou marca de cimento utilizada naquela produção. Essa previsão pode ser principalmente importante para o caso de se necessitar da elaboração de um orçamento de grande quantidade de concreto, quando não há tempo de se fazer um estudo de dosagem para verificar o consumo. O quadro-resumo da estatística realizada e a equação de regressão, para a idade de 28 dias, estão na figura 38 abaixo :

<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo	0,93561878					
R-Quadrado	0,8753825					
R-quadrado ajustado	0,85461291					
Erro padrão	44,7208501					
Observações	15					
ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>	
Regressão	2	168585,48	84292,74	42,1473302	3,7452E-06	
Resíduo	12	23999,4533	1999,95444			
Total	14	192584,933				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	744,34093	125,970813	5,90883643	7,1543E-05	469,874111	1018,80775
a/c	-1238	141,419745	-8,75408167	1,4779E-06	-1546,12715	-929,87285
HN	9,89043825	3,57339393	2,76779959	0,01703121	2,10468184	17,6761947
$C = 744,34 - 1238.a/c + 9,89.HN$						

Figura 38 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da relação a/c e da água da pasta de consistência normal, aos 28 dias.

Isso mostra que, para determinada composição granulométrica do concreto, desde que se tenha feito o estudo para encontrar a equação de regressão desses materiais com vários tipos / marcas de cimento diferentes, ela poderá ser utilizada para se prever o consumo de cimento em função da relação água/cimento e do valor do ensaio da água da pasta de consistência normal, independentemente do tipo ou marca do cimento que se queira utilizar. É claro que a previsão também vai depender de uma outra regressão, entre a relação água / cimento e a resistência do concreto, para se prever qual a relação a/c deverá ser necessária no caso de alteração do cimento.

Com o objetivo de encontrar uma única equação de regressão que pudesse correlacionar o consumo de cimento do concreto diretamente em função da resistência desejada e da demanda de água do cimento, foi realizada também uma regressão linear múltipla entre o consumo de cimento por metro cúbico de concreto "C" (como variável dependente) com a resistência do concreto f_{c28} , a resistência do cimento f_{cc28} e o valor da água da pasta de consistência normal do cimento HN (como variáveis independentes).

O que se fez foi usar a relação a/c como variável dependente da resistência do cimento f_{cc28} e da resistência do concreto f_{c28} . Apesar disso não ser estatisticamente verdadeiro, o tipo de curva de correlação entre essas variáveis nos permite sem problemas a alteração de dependência entre elas para que se encontre uma equação que dê a resposta desejada. Foram utilizados os dados dos cinco tipos / marcas de cimento e dos concretos correspondentes para a realização da regressão. O quadro-resumo da estatística realizada e a equação de regressão, para a idade de 28 dias, estão na figura 39.

Como o coeficiente de correlação na regressão linear encontrado na estatística não foi muito bom, $r = 0,8884$, foi realizada uma nova regressão linear múltipla, retirando-se dos cálculos os dados dos cimentos que possuem maior carga de adição mineral (CPII-F-32 e CPIV) e dos concretos correspondentes. Fez-se então novamente a regressão entre o consumo de cimento em função da resistência do cimento, da resistência do concreto e da água da pasta de consistência normal. O quadro-resumo da estatística realizada e a equação de regressão, para a idade de 28 dias, estão na figura 40.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,88641293
R-Quadrado	0,78572788
R-quadrado ajustado	0,72729003
Erro padrão	61,2488082
Observações	15

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	151319,352	50439,7839	13,4455302	0,0005338
Resíduo	11	41265,5816	3751,41651		
Total	14	192584,933			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-323,14097	286,701886	-1,12709747	0,28368752	-954,167885	307,885945
fc28	15,605004	2,59346261	6,01705379	8,7103E-05	9,89682843	21,3131796
fcc28	-4,35867209	5,1455214	-0,84708074	0,41499995	-15,6838941	6,96654987
HN	11,4538335	5,04229997	2,2715494	0,04418718	0,35580047	22,5518665

$$C = 15,60.f_{c28} - 4,36.f_{cc28} + 11,45.HN - 323,14$$

Figura 39 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da resistência do cimento f_{cc28} , da resistência do concreto f_{c28} e da água da pasta de consistência normal, para todos os cimento, aos 28 dias de idade.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,97641562
R-Quadrado	0,95338747
R-quadrado ajustado	0,92541996
Erro padrão	26,75054
Observações	9

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	73181,5986	24393,8662	34,0890997	0,00093957
Resíduo	5	3577,95694	715,591388		
Total	8	76759,5556			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-579,15626	286,883726	-2,01878395	0,09952455	-1316,61315	158,300629
fc28	13,5929491	1,34752454	10,0873481	0,00016396	10,1290327	17,0568655
fcc28	-27,0083672	13,8921875	-1,94414071	0,10948861	-62,7193137	8,70257921
HN	56,1663544	28,3565578	1,98071835	0,10448211	-16,7263788	129,059088

$$C = 13,59.f_{c28} - 27,01.f_{cc28} + 56,17.HN - 579,16$$

Figura 40 - Quadro-resumo da estatística de regressão e equação do consumo de cimento do concreto em função da resistência do cimento f_{cc28} , da resistência do concreto f_{c28} e da água da pasta de consistência normal, para os cimentos Itambé CPI-S-32, Itambé ARI e Votoran CPI-S-32, aos 28 dias de idade.

Nota-se que o coeficiente de correlação foi muito bom. A equação acima, que só serve para esse conjunto de materiais, pode ser útil para prever as alterações de consumo de cimento quando da necessidade de mudança na marca e tipo de cimento utilizado na produção de concreto.

Para mostrar que é grande a diferença no consumo para os vários cimentos estudados, foram plotados em um mesmo gráfico, os consumos de cimento dos concretos em função da

resistência à compressão aos 28 dias, para os 5 tipos / marcas de cimentos utilizados na pesquisa. Verifica-se que há uma tendência exponencial de crescimento do consumo de cimento com o aumento da resistência do concreto. A figura 41 abaixo mostra essa variação:

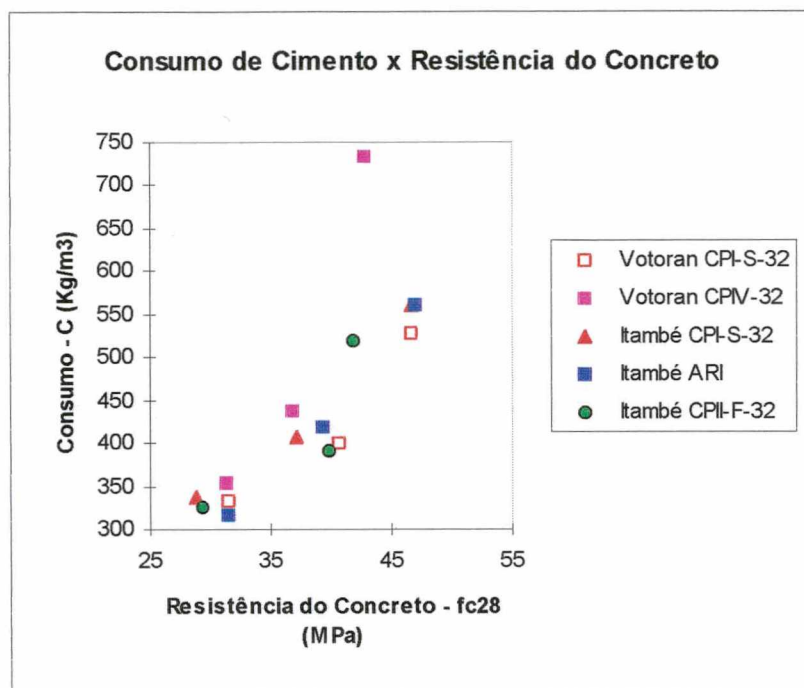


Figura 41 - Consumo de cimento em função da resistência de dosagem do concreto para os cinco cimentos utilizados no estudo

Podemos notar que devido à sua elevada finura, alto teor de adições, e baixa resistência, o cimento pozolânico CPIV-32 tem um consumo mais elevado no concreto, para os mesmos níveis de resistência, que os outros cimentos. Já o cimento de alta resistência inicial CPV, parece ter em geral um menor consumo que os outros cimentos, principalmente para os traços mais pobres. É provável que neste caso, a sua finura mais elevada contribua para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

4.3.3.4 Equação de Abrams, equação do traço "m" em função da relação a/c e equação de Molinari para os concretos estudados

Finalmente foram calculadas as equações de dosagem para todos os concretos estudados. As equações foram encontradas por meio de regressão aos mínimos quadrados, cada qual à equação representativa do fenômeno encontrado nos estudos feitos por esses pesquisadores. Abaixo, são mostradas as equações teóricas e o significado das constantes e

variáveis das equações. A equação de Lyse (ou equação da reta), que normalmente é utilizada para representar a variação de "m" em função da relação a/c, foi substituída no trabalho pelo polinômio do segundo grau, por ter representado melhor essa variação no presente estudo de caso.

- **Equação de Abrams :**
$$f_{cj} = \frac{A}{B^{a/c}}$$

onde :

f_{cj} = resistência do concreto a "j" dias de idade;

a/c = relação água / cimento do concreto;

A e B = são constantes que dependem dos materiais.

- **Equação do traço "m" em função da relação a/c :**
$$m = k_a \cdot a/c^2 + k_b \cdot a/c + k_c$$

onde :

m = relação agregados / cimento em kg/kg;

a/c = relação água / cimento;

k_a , k_b e k_c = constantes que dependem dos materiais e do abatimento.

- **Equação de Molinari :**
$$C = \frac{1000}{K_d + K_e \cdot m}$$

onde :

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto;

m = relação agregados / cimento em kg/kg;

k_d e k_e = constantes que dependem dos materiais e do abatimento do concreto.

Efetuada as regressões aos mínimos quadrados, obtendo-se as constantes das equações dos cimentos do estudo, estas são apresentadas a seguir :

a) Cimento CPV Itambé:

$$f_{c3} = \frac{76,13}{8,13^{a/c}}$$

$$f_{c7} = \frac{94,95}{10,11^{a/c}}$$

$$f_{c28} = \frac{101,33}{7,40^{a/c}}$$

$$m = 19,0. a/c^2 - 2,54.a/c + 1,1116$$

$$C = 1000 / (0,5175 + 0,4378 . m)$$

b) Cimento CPI-S-32 Itambé

$$f_{c3} = \frac{59,62}{5,95^{a/c}}$$

$$f_{c7} = \frac{74,73}{6,94^{a/c}}$$

$$f_{c28} = \frac{115,93}{10,90^{a/c}}$$

$$m = -21,5. a/c^2 + 33,79.a/c - 6,8456$$

$$C = 1000 / (0,4813 + 0,4478 . m)$$

c) Cimento CPII-F-32 Itambé

$$f_{c3} = \frac{50,09}{5,25^{a/c}}$$

$$f_{c7} = \frac{69,74}{6,33^{a/c}}$$

$$f_{c28} = \frac{85,73}{5,88^{a/c}}$$

$$m = -14,0. a/c^2 + 26,04.a/c - 4,6036$$

$$C = 1000 / (0,4365 + 0,4539 . m)$$

d) Cimento CPIV-32 Votoran

$$f_{c3} = \frac{59,67}{8,52^{a/c}}$$

$$f_{c7} = \frac{63,46}{6,44^{a/c}}$$

$$f_{c28} = \frac{77,19}{4,71^{a/c}}$$

$$m = -50,0. a/c^2 + 64,8.a/c - 15,694$$

$$C = 1000 / (0,6172 + 0,4331. m)$$

e) Cimento CPI-S-32 Votoran

$$f_{c3} = \frac{97,19}{14,26^{a/c}}$$

$$f_{c28} = \frac{100,57}{7,16^{a/c}}$$

$$m = -17,5. a/c^2 + 28,65.a/c - 5,14$$

$$C = 1000 / (0,3734 + 0,4680 . m)$$

4.3.3.5 Estudo da influência do abatimento do concreto, do teor de argamassa e da dimensão máxima característica do agregado, na resistência e no consumo de cimento

Alguns autores defendem a idéia de que o que importa realmente para a resistência do concreto é a resistência do cimento e a relação a/c (Bucher & Rodrigues, 1983; Helene, 1987). Outros defendem que a dimensão máxima característica do agregado ou o abatimento (Metha & Monteiro, 1994) têm influência significativa na resistência de um concreto de mesma relação a/c.

Para verificar a influência desses parâmetros na resistência do concreto, foram dosadas misturas com as mesmas relações água / cimento do estudo anterior, isto é, a/c iguais a 0,38 , 0,48 e 0,58 , para cada uma condição testada. A influência da dimensão máxima característica do agregado foi testada fazendo-se traços com o cimento Votoran CPIV-32. As influências do teor de argamassa e do abatimento foram feitas com o cimento Itambé CPI-S-32.

Todos os concretos seriam feitos com o cimento CPIV-32, sem nenhum motivo especial, mas durante os ensaios verificou-se que seria impossível fazer um traço de relação a/c = 0,38 e abatimento de 100 mm com esse cimento, devido à enorme demanda de água demonstrada durante a execução do traço de mesma relação a/c e abatimento de 60 mm. Por isso, durante a execução dos ensaios, decidiu-se mudar o tipo de cimento dessa fase do experimento para o tipo CPI-S-32.

Os primeiros ensaios efetuados nessa fase foram para o estudo de dosagem do concreto feito com brita 1, para ser comparado com o concreto dosado anteriormente com brita 1 e 2. Os dois conjuntos de misturas foram realizadas com teores de argamassa iguais a 50 % e abatimentos de 60 mm.

Foram construídos dois gráficos com os resultados dos ensaios. O primeiro compara as curvas de Abrams do concreto com brita 1 e 2 com o concreto só com brita 1 para verificar se existe alteração significativa na resistência à compressão para um mesma relação a/c. O segundo compara o consumo de cimento com a resistência à compressão. As figuras 42 e 43 mostram os dois gráficos citados.

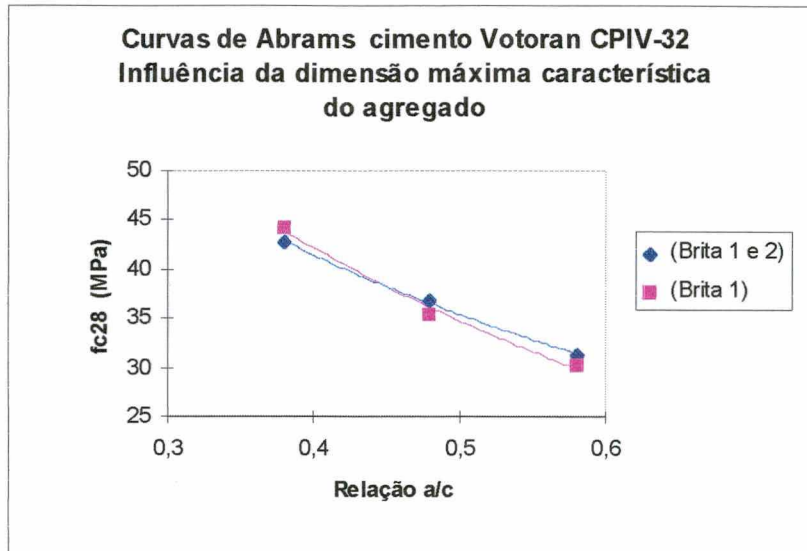


Figura 42 - Influência da dimensão máxima característica do agregado nas curvas de Abrams de concretos com mesmos teores de argamassa e abatimento.

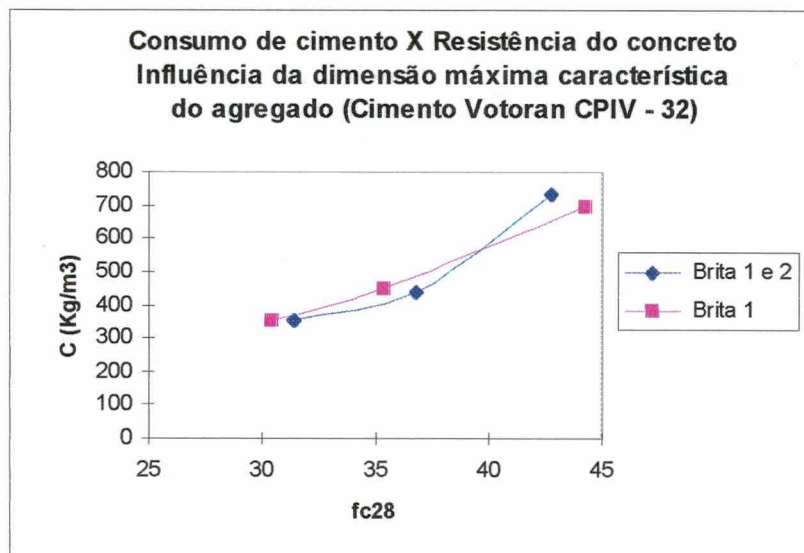


Figura 43 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto com brita 1 e 2 e o concreto só com brita 1.

Sem esquecer das variabilidades que ocorrem na dosagem e ensaio, é fácil notar que para os materiais utilizados praticamente não se verifica alteração nas propriedades mecânicas do concreto. Como os traços só com brita 1 têm um consumo maior de cimento de não mais que 5 % em relação aos traços de concreto de brita 1 e 2 de mesmas relações a/c, e as resistências mecânicas praticamente não se alteraram para uma mesma relação a/c, a variação do consumo de cimento em função da resistência entre os dois concretos também parece não ser significativa.

A seguir, nas figuras 44 e 45 têm-se os gráficos comparativos das curvas de Abrams e o gráfico de consumo de cimento em função de resistência à compressão do concreto, para a comparação entre as misturas com teores de argamassa de 50 % com a de 56 %. Todas as outras características dos concretos foram as mesmas para cada relação a/c :

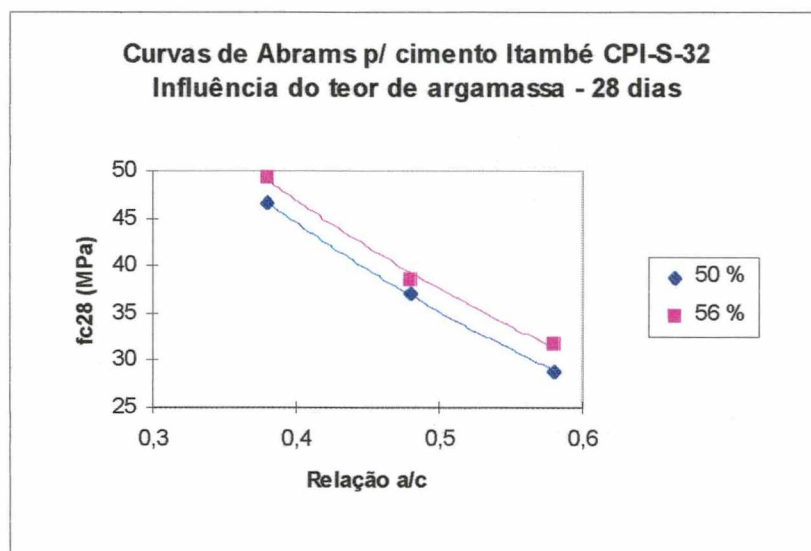


Figura 44 - Influência do teor de argamassa nas curvas de Abrams de concretos com mesmos agregados e abatimento.

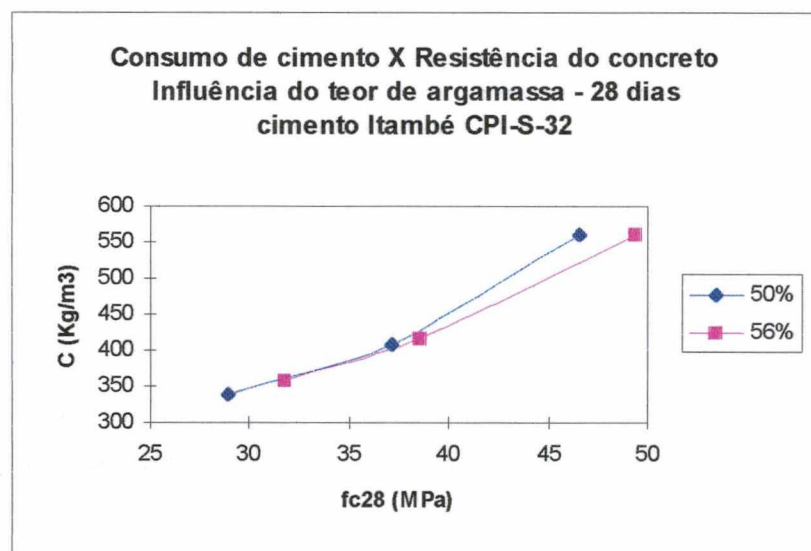


Figura 45 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto com teor de argamassa igual a 50 % e o concreto com teor de argamassa igual a 56 %.

Apesar de não ser muito grande, nota-se que houve um aumento na resistência do concreto com maior teor de argamassa ($\alpha = 56\%$), em relação aos concretos de menores

teores ($\alpha = 50\%$), para todas as relações a/c . Isso pode ter ocorrido por uma melhor capacidade de adensamento sob vibração, que não é notada através do ensaio do tronco de cone. Isto é, com uma melhor adensabilidade, o concreto após vibrado possui menor teor de ar incorporado, resultando em um material mais resistente pela menor porosidade.

No outro gráfico, figura 45, observa-se que para a relação a/c = 0,38 (dois pontos de maior resistência no gráfico), parece haver um melhor desempenho do concreto em termos de consumo de cimento em função da resistência. Pode-se especular que, com baixa relação a/c, o concreto possui uma pasta de cimento muito rica, com grande capacidade lubrificante, e sendo assim, o aumento no teor de argamassa é compensado pela redução do teor de cimento da mesma, permanecendo então praticamente constante o consumo de cimento do concreto. Sem aumento no consumo de cimento para essa relação a/c, o aumento de resistência significa aumento real no desempenho.

Já para os concretos de relações a/c mais altas, há aparente aumento na resistência à compressão para um mesma relação a/c, mas esse aumento é compensado pelo aumento no consumo de cimento do concreto. Assim, não há diferença de desempenho entre os dois concretos para relações a/c mais elevadas.

Finalmente foram dosados os concretos para comparação da alteração no comportamento do mesmo devido ao abatimento. As figuras 46 e 47 mostram a curva de Abrams e a curva de consumo de cimento em função da resistência à compressão:

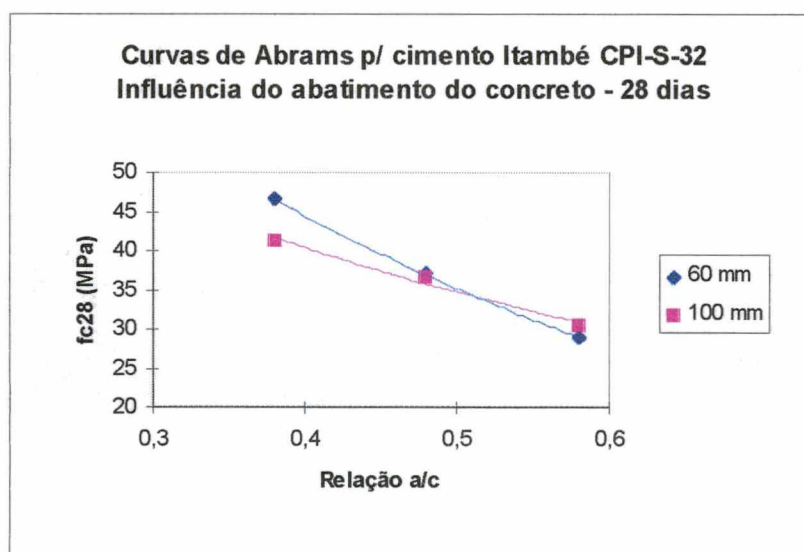


Figura 46 - Influência do abatimento nas curvas de Abrams de concretos com mesmos teores de argamassa e dimensão máxima característica do agregado.

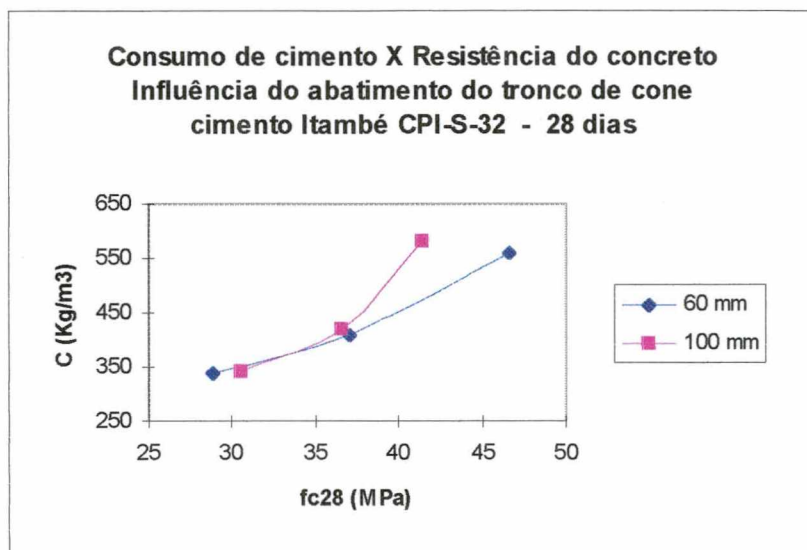


Figura 47 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão para o concreto de abatimento igual a 60 mm e o concreto de abatimento de 100 mm.

Analisando as curvas de Abrams, podemos ver que para a relação $a/c = 0,38$ há uma considerável diminuição na resistência do concreto pelo aumento do abatimento de 60 mm para 100 mm. Provavelmente a redução se deve ao aumento na microfissuração do concreto, pelo aumento no seu teor de pasta, e também pelo aumento da exsudação da mistura (Mehta & Monteiro, 1994). Sem descartarmos a possibilidade de erros de dosagem e ensaio, a observação do segundo gráfico mostra ainda que para resistências mais elevadas (relações a/c baixo), o aumento do abatimento pode levar a concretos menos econômicos. Daí a importância do uso de aditivos quando são necessárias maiores resistências mecânicas e abatimentos elevados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto de cimento Portland é um material de grande importância na engenharia. É com ele que são construídas a maioria das grandes obras de infra-estrutura tão necessárias ao desenvolvimento de países como o Brasil. O conhecimento mais apurado dos fatores que afetam as características de resistência e durabilidade desse material pode proporcionar grande economia de recursos financeiros, e contribuir para que esses possam ser aplicados em um maior número de empreendimentos.

O presente trabalho procurou mostrar alguns pontos importantes relacionados ao estudo de dosagem do concreto, e que podem contribuir para que o material possa ser produzido com um maior grau de confiança quanto à sua adequação às especificações de projeto e condições particulares de cada obra. Dentre outras coisas, o trabalho também procurou apontar para alguns caminhos que possam proporcionar economia de cimento na produção do concreto, e com isso diminuir-se seu custo unitário. Nos parágrafos seguintes são feitas algumas considerações específicas em face dos resultados obtidos no presente estudo:

A NBR 12655 (1996) suprimiu a utilização do coeficiente K_n , multiplicador do desvio-padrão da amostra S_c , usado anteriormente para obtenção do limite superior provável do desvio-padrão da população. Com a supressão, existe hoje um maior risco de rejeição do concreto dosado à partir do novo critério, quando do controle de aceitação. Talvez fosse mais interessante se a norma ao invés de tê-lo simplesmente suprimido, adotasse a proposta sugerida por Helene (1983), em deixar a escolha do risco de rejeição do concreto por conta do produtor, mas incluir na norma as curvas de eficiência do estimador, para que o produtor possa calcular o f_{ck} desejado da produção em função do f_{ck} de projeto, do desvio-padrão conhecido e do risco de rejeição que se deseja ter.

Os dados das pesquisas hoje existentes parecem ser insuficientes para concluir-se que os valores dos desvios-padrão de dosagem em função da condição de preparo do concreto previstos pela norma NBR 12655 (1996), sejam realmente muito altos. No entanto, algumas pesquisas têm demonstrado que é perfeitamente viável o preparo do concreto na obra com condições de controle pouco rígidas, e ainda assim obter baixos valores para os desvios-padrão da produção. Conclui-se que é necessária a realização de novos programas para obtenção de dados a nível nacional, de produções de concreto em obra e em central, e que leve em consideração períodos mais longos de produção (mínimo de 30 dias), para obter valores do desvio-padrão de amostras de concreto que sofram influências da alteração da partida de materiais, especialmente do cimento.

As variabilidades que ocorrem na dosagem, no ensaio de resistência à compressão do concreto, e no ensaio de resistência à compressão do cimento, são da mesma ordem de magnitude que as alterações nas propriedades dos materiais. Por isso, qualquer correlação entre a resistência do cimento e a resistência do concreto, realizada com dados de misturas de mesmo traço, variando as amostras de mesma proveniência, tende a possuir coeficiente de correlação relativamente baixo. A consequência disso é que não é confiável a utilização de curvas de correlação para corrigir o resultado de um estudo de dosagem, quando fôr obtido um resultado não esperado no ensaio do cimento, isto é, um valor muito diferente da resistência média conhecida desse cimento. O melhor mesmo é realizar o estudo de dosagem com 4 ou 5 misturas com diferentes relações a/c, se possível utilizando-se de amostras de partidas diferentes de um mesmo cimento, possibilitando assim a obtenção de uma curva mais próxima da média real que se irá trabalhar.

O fato de serem bastante diferentes entre si as curvas de Abrams divulgadas por diversos pesquisadores, demonstra que outros parâmetros além da resistência do cimento e da relação a/c, também são importantes com relação à resistência à compressão do concreto. Sendo assim, não parece ser confiável a dosagem de um concreto baseado somente na estimativa obtida por uma curva desse tipo. É necessário que se faça sempre a confirmação através do ensaio de compressão, antes de serem iniciadas as concretagens da obra. De qualquer forma, as curvas ainda são muito úteis como instrumento de previsão dos valores aproximados para a relação a/c, quando da realização do estudo de dosagem e de trabalhabilidade.

As especulações feitas neste trabalho à respeito do fator de eficiência de um cimento para o uso em concreto, indicam que podem existir fenômenos ainda não totalmente conhecidos, provavelmente ligados à zona de transição pasta-agregado, em função da composição química do cimento, e que afetam a resistência do concreto, sem contudo produzir necessariamente alteração na resistência do cimento. Se isto fôr verdadeiro, é um motivo a mais para não se confiar totalmente nos resultados obtidos através de curvas de correlação entre a resistência do cimento e do concreto.

A lei de Lyse, ou lei da constância da relação água / materiais secos para qualquer traço de mesmo abatimento e mesmos materiais, é hoje aceita quase que unanimemente entre os pesquisadores. Entretanto o presente estudo de caso obteve crescentes consumos de água, e consequentemente aumento da relação água / materiais secos, com a diminuição da relação a/c do concreto. Isso pôde mais facilmente ser detectado no caso do cimento CPIV-32 que possui finura bastante elevada e também alto teor de adições. Em função disso, pode ser uma boa recomendação a utilização de uma curva polinomial do 2º grau ao invés da equação da reta da

lei de Lyse, para construção da curva de variação do traço "m" em função da relação "a/c" do diagrama de dosagem. Com este procedimento evita-se que se force a utilização de teores de água inadequados ao concreto da obra, e conseqüentemente de uma trabalhabilidade inadequada, quando da obtenção de um traço interpolado do diagrama de dosagem.

A finura do cimento e o tipo e teor de adições minerais nele contidas também parecem ter influência significativa no seu consumo por metro cúbico de concreto. No caso de concretos de baixa relação a/c, é necessária atenção especial em relação ao cimento, pois pode haver grande aumento na demanda de água, e conseqüentemente no consumo de cimento pelo concreto, além de ocasionar outros problemas. De qualquer forma, a demanda de água do cimento deveria ser sempre levada em consideração no estudo de dosagem conjuntamente com a sua resistência à compressão, pois ela influi significativamente no consumo de cimento pelo concreto.

É possível utilizar-se de recursos simples e pouco dispendiosos, como o ensaio da água da pasta de consistência normal (NBR-11580, 1991), mais os ensaios de resistência à compressão do cimento (NBR-7215, 1991) e resistência à compressão do concreto (NBR-5739, 1974), para obter uma equação, através de regressão múltipla, que correlacione o consumo de cimento do concreto, para um dado conjunto de agregados utilizados por uma usina, em função da demanda de água do cimento utilizado, da resistência do cimento e da resistência de dosagem do concreto. Fazendo isso, a usina pode ter um instrumento útil para avaliação dos consumos prováveis que diferentes cimentos disponíveis para uma determinada região podem proporcionar.

No presente estudo de caso, a alteração da dimensão máxima característica do agregado, de 25 mm para 19 mm, não produziu alteração significativa nem na resistência à compressão do concreto nem no consumo de cimento. Isso deve ter ocorrido provavelmente porque a alteração na dimensão máxima característica foi relativamente pequena e as resistências estudadas foram pertencentes ao grupo dos concretos normais, ou seja, do grupo I da NBR-8953 (1992).

Verificou-se que o aumento no teor de argamassa dos concretos de 50 % para 56 % aumentou a resistência dos mesmos para as três diferentes relações a/c testadas. Provavelmente isso deveu-se à uma melhor adensabilidade da mistura fresca, resultando em um concreto de menor porosidade. Isso leva-nos a especular que os métodos de determinação dos teores ideais de argamassa de uma mistura seca deveriam levar também em consideração os resultados provenientes do concreto endurecido, já que, para relações a/c mais baixas (resistências mais

altas), o concreto de maior teor de argamassa resultou, para uma mesma resistência mecânica, em menor consumo de cimento.

Das três misturas feitas com abatimento de 100 mm para ser comparado às de 60 mm, com o objetivo de avaliar o efeito do abatimento no consumo de cimento e na resistência do concreto para uma mesma relação a/c , apenas a mistura de relação $a/c = 0,38$ apresentou diferença significativa. Mesmo considerando que essa diferença pode ter sido causada devido aos erros naturais de dosagem ou ensaio, o valor mais baixo da resistência do concreto de abatimento mais alto confirma a afirmação de Mehta (Mehta & Monteiro, 1994) de que há alteração na resistência do concreto e que ela é devida principalmente à maior exsudação que ocorre nesses concretos. Julga-se portanto que também deve haver especial atenção quando da dosagem de concretos feitos com cimentos de elevada finura, abatimentos altos e resistências elevadas, porque todos são fatores que acarretam em maior consumo de cimento, e todos em conjunto podem tornar o concreto antieconômico se não for usado um aditivo plastificante na mistura.

SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

No presente trabalho foi feito um estudo de vários fatores que afetam a trabalhabilidade do concreto e sua resistência à compressão. Entretanto, é um estudo de caso, e o número de dados colhidos são insuficientes para que sejam feitas afirmações conclusivas. Para que isso seja feito são necessários estudos mais aprofundados sobre cada tema, alguns dos quais são sugeridos a seguir.

Seria interessante que a norma NBR-12655 adotasse menores valores para o desvio-padrão de dosagem, em função do rigor da produção, quando essa ainda não dispuser de dados para o cálculo do desvio-padrão da própria produção, como foi sugerido por Helene (1987). No entanto, para que isso aconteça, é preciso que se façam mais estudos para obtenção de dados de produções de concreto de diversas regiões do país, e que levem em consideração, além dos rigores dessas produções de concreto, intervalos de tempo maiores para a formação das amostras.

Algumas correlações encontradas neste trabalho, entre o fator de eficiência do cimento e sua composição química, parecem confirmar a tese de vários pesquisadores sobre a influência da composição química do cimento na formação da zona de transição entre a pasta e o agregado. Esta é uma área do conhecimento bastante estudada atualmente, mas que ainda carece de muito trabalho para se poder explicar os inúmeros fenômenos ligados à microestrutura da pasta e da zona de transição. O conhecimento desses mecanismos podem ser muito úteis para a produção de cimentos mais eficientes para o uso em concretos.

Do mesmo modo com que hoje ainda inexistente um ensaio que meça a trabalhabilidade do concreto, num sentido mais amplo, ainda não está solucionado o problema da determinação do teor ideal de argamassa. Seria bastante interessante a realização de mais estudos sobre a influência da reologia da pasta e da argamassa, e do seu teor no concreto, na trabalhabilidade que proporciona à mistura fresca, e o que isso representa em termos de resistência à compressão, de módulo de deformação, e de consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Este pode ser um caminho na busca do desenvolvimento de um método mais científico para a determinação do teor ótimo de argamassa de um concreto.

ANEXO A

Modelo de formulário utilizado para auxiliar na dosagem de todos os traços de relações a/c fixas.

Obs.: O formulário exemplo foi utilizado para os traços de relação a/c = 0,48

Elaboração dos Traços

N. _____ - a/c = 0,48

Data da amostra ___ / ___ / ___ - Data do Ensaio ___ / ___ / ___

$$m = (100 \cdot a/c) / H - 1 = (100 \cdot 0,48) / 9,1 - 1 \quad \Rightarrow \quad m = 4,28$$

$$a = \alpha_{ideal} (1+m) / 100 - 1 = 50 \cdot (1+4,28) / 100 - 1 \quad \Rightarrow \quad a = 1,64$$

$$p = m - a = 4,28 - 1,64 \quad \Rightarrow \quad p = 2,64$$

$$b = \% \text{ brita } 1 \cdot p = 0,3 \cdot 2,64 \quad \Rightarrow \quad b = 0,79$$

$$B = \% \text{ brita } 2 \cdot p = 0,7 \cdot 2,64 \quad \Rightarrow \quad B = 1,85$$

2) Consumo de materiais para 37,5 litros de concreto

2.1) Cimento

$$C_{37,5} = 37,5 / ((1/d_c) + (a/d_a) + (b/d_b) + (B/d_B) + a/c)$$

$$C_{37,5} = 37,5 / ((1/3,15) + (1,64/2,58) + (0,79/2,69) + (1,85/2,79) + 0,48)$$

$$C_{37,5} = 15,69 \text{ Kg}$$

2.2) Água

$$A_{37,5} = a/c \cdot C_{37,5} = 0,48 \cdot 15,69 \quad \Rightarrow \quad A_{37,5} = 7,53 \text{ Kg}$$

2.3) Areia

$$AR_{37,5} = a \cdot C_{37,5} = 1,64 \cdot 15,69 \quad \Rightarrow \quad AR_{37,5} = 27,73 \text{ Kg}$$

2.4) Brita 1

$$b_{37,5} = b \cdot C_{37,5} = 0,79 \cdot 15,69 \quad \Rightarrow \quad b_{37,5} = 12,39 \text{ Kg}$$

2.5) Brita 2

$$B_{37,5} = B \cdot C_{37,5} = 1,85 \cdot 15,69 \quad \Rightarrow \quad B_{37,5} = 29,03 \text{ Kg}$$

3) Água dos agregados (91 % de m)

$$\text{Areia} \Rightarrow h_a = (1000 - \underline{\quad}) / \underline{\quad} \cdot \text{AR} \cdot 0,91 = \underline{\quad} \text{ Kg}$$

$$\text{Brita 1} \Rightarrow h_b = (\underline{\quad} - \underline{\quad}) / \underline{\quad} \cdot \text{Cb} \cdot 0,91 = \underline{\quad} \text{ Kg}$$

$$\text{Brita 2} \Rightarrow h_B = (\underline{\quad} - \underline{\quad}) / \underline{\quad} \cdot \text{CB} \cdot 0,91 = \underline{\quad} \text{ Kg}$$

$$\text{Água Total} = 7,53 \text{ Kg} \Rightarrow \text{Água Adicionada} = 7,53 - (\underline{\quad} + \underline{\quad} + \underline{\quad}) = \underline{\quad} \text{ Kg}$$

4) Tentativas experimentais :

Tentativa	% m	C _{37.5} Consumo de Cimento (Kg)	AR Areia Seca %m. AR37.5 (Kg)	Ar _h Areia Úmida (1+h) . AR (Kg)	Água Adicionada	Cb Brita 1 % m . b25 (Kg)	CB Brita 2 % m . B25 (Kg)	Slump (mm)	Obs.:
1	91	15,69	23,39*			11,27	26,42		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
2	94		24,17			11,65	27,29		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
3	97		24,95			12,03	28,16		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
4	100		25,73			12,41	29,03		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
5	103		26,51			12,79	29,90		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
6	106		27,29			13,17	30,77		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
7	109		28,07			13,55	31,64		
Acréscimo	3		0,78			0,38	0,87		
8	111		28,85			13,93	32,51		

* Areia Seca Equivalente obs.: A primeira tentativa é com areia úmida. Os acréscimos são feitos com areia seca.

5 - Massa específica do concreto :

$$\text{Massa Total} = \underline{\quad} \text{ Kg} * \text{Tara} = \underline{\quad} \text{ Kg} * \text{Volume} = \underline{\quad} \text{ dm}^3 \Rightarrow \gamma_c = \underline{\quad} \text{ Kg} / \text{ dm}^3$$

6 - Resistência aos 3 dias em $\underline{\quad} / \underline{\quad} / \underline{\quad}$:

$$\text{CP1} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ Mpa} \quad \& \quad \text{CP2} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ Mpa}$$

7 - Resistências aos 7 dias em $\underline{\quad} / \underline{\quad} / \underline{\quad}$:

$$\text{CP3} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ Mpa} \quad \& \quad \text{CP4} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ MPa}$$

8 - Resistências aos 28 dias em $\underline{\quad} / \underline{\quad} / \underline{\quad}$:

$$\text{CP5} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ Mpa} \quad \& \quad \text{CP6} = \underline{\quad} \text{ Kg} \Rightarrow \underline{\quad} \text{ MPa}$$

N. $\underline{\quad}$ - a/c = 0,48 - Data do Ensaio : $\underline{\quad} / \underline{\quad} / \underline{\quad}$

ANEXO B

Tabela B.1 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em MPa e relações a/c correspondentes das 4 misturas de concreto de traços 1:5 , 1:6 , 1:7 , e 1:8 , realizadas mensalmente no IPT com o cimento denominado A, e os valores calculados a partir desses dados para as constantes K_1 e K_2 da equação de Abrams e K_0 da equação obtida por Fusco para o cálculo do desvio-padrão.

Tabela B.2 - Resultados do ensaio mensal de resistência à compressão do cimento em MPa, para as idades de 3 e 28 dias, correspondente relação a/c do ensaio, para o cimento A, e os valores corrigidos da resistência do cimento para uma relação a/c = 0,48.

Tabela B.1

Mês/ano	A/C(a)	f _{c28(a)}	A/C(b)	f _{c28(b)}	A/C(c)	f _{c28(c)}	A/C(d)	f _{c28(d)}	K ₂	K ₁	K ₀
Jan/57	0,467	31,7	0,56	24,9	0,669	20,2	0,783	13,7	13,27	107,32	100,37
Fev/57	0,467	29,9	0,56	24	0,669	17,4	0,783	13,4	13,23	100,21	83,28
Mar/57	0,445	32,5	0,534	23,1	0,638	20,6	0,747	15,5	9,96	86,07	67,75
Abr/57	0,445	35,2	0,534	30,6	0,638	21,5	0,748	16,8	12,77	112,59	94,74
Mai/57	0,445	31,1	0,534	25	0,638	17,6	0,747	12,6	20,86	122,70	120,33
Jun/57	0,456	32,3	0,547	26,1	0,653	18,4	0,765	12,1	24,63	144,72	116,26
Jul/57	0,445	34,8	0,533	26,4	0,638	19,8	0,748	12,9	25,19	148,17	121,95
Ago/57	0,472	31,7	0,567	24,1	0,677	17,2	0,792	12,4	19,04	127,47	113,19
Set/57	0,467	25,9	0,56	19,5	0,669	14,3	0,783	10,1	19,41	103,29	111,42
Out/57	0,467	31,9	0,56	22,6	0,669	18,2	0,783	12,5	17,43	118,30	102,00
Nov/57	0,456	38,5	0,547	29,9	0,654	21,8	0,765	15,1	20,61	155,00	117,41
Dez/57	0,445	29,4	0,533	24	0,638	17,9	0,747	12,6	16,67	105,26	103,64
Jan/58	0,456	26,9	0,547	20,7	0,653	15,6	0,765	11,2	16,76	97,28	106,08
Fev/58	0,467	28,2	0,56	22,4	0,653	17,7	0,765	12,6	14,79	100,54	94,65
Mar/58	0,445	29,2	0,534	21,4	0,622	17,1	0,73	13,1	16,11	97,70	90,24
Abr/58	0,467	28,4	0,56	21,3	0,669	16,4	0,783	10,8	20,00	115,82	107,64
Mai/58	0,495	31,9	0,533	25	0,622	18,1	0,73	13,8	31,65	165,03	141,27
Jun/58	0,456	28,4	0,547	23,9	0,638	17,3	0,747	13,1	15,55	101,90	100,67
Jul/58	0,445	29,7	0,533	23,1	0,622	19	0,73	13,2	16,35	103,69	96,67
Ago/58	0,456	31,9	0,547	25,7	0,638	19,7	0,747	14,7	14,71	109,87	90,67
Set/58	0,463	30	0,518	24,9	0,685	20	0,729	13,9	11,41	91,68	85,74
Out/58	0,474	26,7	0,543	21,9	0,612	17,6	0,757	12,6	14,20	92,36	69,92
Nov/58											
Dez/58	0,474	23,5	0,543	16,9	0,639	12,9	0,757	8,6	31,51	116,13	136,40
Jan/59	0,474	25,7	0,543	21,1	0,639	15,7	0,772	10,8	18,58	102,60	112,30
Fev/59	0,479	25,8	0,562	20,1	0,664	15,2	0,818	10,4	14,41	91,06	80,88
Mar/59	0,456	28,6	0,549	21,4	0,65	15,5	0,759	12,4	16,33	99,92	90,88
Abr/59											
Mai/59	0,456	26,5	0,524	22,5	0,623	17,6	0,73	12,3	16,18	96,14	85,11
Jun/59	0,456	28,9	0,536	22	0,609	18,6	0,73	12,7	19,13	109,92	99,08
Jul/59	0,456	29,8	0,537	22,8	0,623	17,9	0,759	13,2	14,39	97,49	94,13
Ago/59	0,456	30,5	0,523	25,7	0,623	18,1	0,759	13,2	16,78	109,90	97,87
Set/59	0,478	31,7	0,562	27,7	0,65	20,1	0,789	14,2	14,56	117,65	103,91

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{c28} (a)	A/C(b)	f _{c28} (b)	A/C(c)	f _{c28} (c)	A/C(d)	f _{c28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Out/59	0,467	26,6	0,549	18,3	0,65	15,7	0,832	8,2	22,00	109,04	102,30
Nov/59	0,456	30,4	0,524	25,5	0,623	18,4	0,774	12,1	18,77	116,41	99,52
Dez/59	0,465	27	0,524	21,9	0,623	18,1	0,774	12,6	10,88	79,58	77,30
Jan/60	0,467	26,9	0,537	22,3	0,623	17,9	0,774	10,2	23,62	121,40	110,42
Fev/60	0,471	22,2	0,564	18,4	0,674	13,9	0,808	8,8	15,68	84,50	76,38
Mar/60	0,482	27,2	0,564	20,7	0,674	14	0,808	11,3	15,46	97,51	98,95
Abr/60	0,46	27	0,539	20,2	0,62	15,4	0,751	9,4	36,98	142,36	163,98
Mai/60	0,471	29,1	0,551	21,7	0,661	16,4	0,779	12	16,83	106,71	106,12
Jun/60	0,471	28,5	0,551	21,7	0,674	16,3	0,808	11,6	13,62	94,86	84,77
Jul/60	0,471	30,9	0,539	25,2	0,661	19,3	0,808	13,4	11,42	95,84	89,08
Ago/60	0,471	25,4	0,539	18,5	0,647	12,8	0,779	9,3	24,96	109,10	109,49
Set/60	0,472	28	0,551	22,4	0,674	15,6	0,793	11,7	15,48	101,22	111,43
Out/60	0,471	21,5	0,539	19,1	0,647	16,3	0,765	11,7	7,59	57,07	55,07
Nov/60	0,482	30,5	0,564	23,1	0,687	15,8	0,793	11,9	20,64	129,07	110,65
Dez/60	0,482	34,2	0,564	26,1	0,687	19,6	0,807	14	14,73	122,77	109,37
Jan/61	0,471	27,5	0,551	24	0,66	15,5	0,836	10,2	16,89	106,52	95,79
Fev/61	0,471	34	0,551	26,1	0,687	16,7	0,836	10,2	27,03	160,65	136,03
Mar/61	0,471	28,6	0,551	23	0,674	15,3	0,836	10	18,44	112,71	103,79
Abr/61	0,471	30,1	0,564	24,1	0,687	17,6	0,836	11,5	13,99	105,79	107,72
Mai/61	0,482	26,6	0,564	22	0,647	17,2	0,779	12,2	14,22	96,56	83,93
Jun/61	0,482	27,3	0,564	21,3	0,674	16,3	0,793	11,8	14,35	97,48	84,51
Jul/61	0,482	33,6	0,577	23,5	0,661	17,2	0,793	12,1	26,86	159,13	151,19
Ago/61	0,493	30,9	0,564	23,4	0,661	19	0,779	12,5	21,30	137,39	110,19
Set/61	0,482	28,4	0,564	23	0,674	18,2	0,808	12,1	13,21	99,52	96,39
Out/61	0,493	22,6	0,589	16	0,701	10,8	0,836	8,6	17,28	87,45	84,49
Nov/61	0,471	29,7	0,551	24	0,661	17,5	0,808	12,2	14,22	103,15	101,90
Dez/61	0,437	34,2	0,501	23,3	0,593	17,8	0,708	13,1	29,95	139,21	123,61
Jan/62	0,471	21	0,551	18,5	0,66	13,2	0,822	9,6	10,05	63,14	72,45
Fev/62	0,493	28,1	0,589	20,5	0,701	15,8	0,836	11	14,68	103,27	92,02
Mar/62	0,482	31,1	0,564	25	0,674	16,9	0,822	13,8	11,64	98,20	93,60
Abr/62	0,471	25,1	0,551	19,4	0,66	14,9	0,822	9,8	14,01	85,25	81,78
Mai/62	0,471	28,2	0,551	21,5	0,66	16,2	0,793	11,6	15,23	99,08	86,18
Jun/62											

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{e28} (a)	A/C(b)	f _{e28} (b)	A/C(c)	f _{e28} (c)	A/C(d)	f _{e28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Jul/62											
Ago/62	0,471	29	0,551	23,6	0,647	18,2	0,808	12,4	12,50	94,75	88,61
Set/62	0,471	30,5	0,551	25	0,647	19,7	0,793	12,4	16,33	115,90	106,72
Out/62	0,471	32,6	0,551	23,3	0,66	18,1	0,822	10,6	22,33	136,57	134,45
Nov/62	0,479	25,8	0,57	20,2	0,674	15,8	0,836	10,5	12,21	85,01	88,50
Dez/62	0,482	26	0,576	19,6	0,674	14	0,822	9,6	18,09	103,27	107,91
Jan/63	0,495	24,8	0,555	19,7	0,649	15,3	0,81	11,1	12,04	80,82	73,72
Fev/63	0,497	26,5	0,58	18,6	0,663	13,9	0,807	9,3	28,23	133,30	151,65
Mar/63	0,502	21,9	0,58	16,8	0,694	14,6	0,836	9,6	10,39	69,51	74,21
Abr/63	0,488	25,4	0,57	19,3	0,653	14,2	0,808	7,8	40,77	157,69	163,03
Mai/63	0,471	26	0,564	19,1	0,647	14,2	0,779	10,2	21,23	107,32	116,74
Jun/63	0,471	20,4	0,542	16,8	0,633	12,9	0,762	8,7	18,83	81,98	128,71
Jul/63	0,471	26	0,551	20,7	0,661	14,4	0,808	11,3	12,32	82,18	88,71
Ago/63	0,482	20,4	0,576	17,9	0,674	12,4	0,836	7,7	17,48	85,77	113,23
Set/63	0,493	23,3	0,589	18,5	0,701	13,8	0,864	9,2	12,37	80,81	93,09
Out/63	0,49	22,5	0,576	17,2	0,681	14,2	0,843	8,8	13,40	79,60	
Nov/63	0,471	26,1	0,576	18,2	0,674	13,9	0,808	9,6	18,95	101,93	118,86
Dez/63	0,505	21,1	0,589	17,5	0,687	12,9	0,836	8,2	18,12	93,57	111,84
Jan/64	0,481	22,1	0,576	16,2	0,687	10,4	0,85	5,7	40,77	133,65	172,52
Fev/64	0,496	24,2	0,59	19,2	0,694	13,9	0,892	8,7	13,55	87,82	90,13
Mar/64	0,482	25,1	0,564	18,5	0,661	15,2	0,836	9,5	14,38	87,62	91,21
Abr/64	0,505	20,1	0,589	16,2	0,687	11,8	0,85	7,5	17,96	87,10	101,50
Mai/64	0,497	22,2	0,589	15,7	0,701	9,9	0,836	7,3	27,99	112,00	128,91
Jun/64	0,482	25,2	0,564	18,3	0,674	14	0,822	8,8	20,45	105,07	100,80
Jul/64	0,471	15,1	0,551	12,7	0,66	10,8	0,793	7,3	9,04	43,29	50,86
Ago/64	0,471	18,3	0,564	14,8	0,674	9,2	0,807	7,4	17,03	69,32	104,45
Set/64	0,46	25,1	0,545	20	0,64	15,4	0,786	10,5	14,55	85,91	107,55
Out/64	0,46	24,4	0,564	17,9	0,66	13,3	0,808	8,7	19,49	95,38	125,36
Nov/64	0,46	31,4	0,545	22,3	0,66	15,9	0,779	10,9	26,11	137,00	158,42
Dez/64	0,448	27,5	0,539	21,4	0,647	15,1	0,794	8,8	27,37	124,67	136,94
Jan/65	0,46	29,1	0,545	24,4	0,66	17,4	0,808	11,3	15,79	106,43	95,07
Fev/65	0,471	32,9	0,557	25,7	0,654	17,4	0,794	10	42,08	198,24	169,32

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{e28} (a)	A/C(b)	f _{e28} (b)	A/C(c)	f _{e28} (c)	A/C(d)	f _{e28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Abr/65	0,465	28,8	0,551	23,2	0,654	16,9	0,8	11,6	15,56	103,60	86,58
Mai/65	0,454	28,7	0,532	23,4	0,626	18,3	0,794	11,4	15,14	99,19	90,77
Jun/65	0,471	31,6	0,557	23,6	0,66	17,7	0,814	10,1	26,93	149,92	141,92
Jun/65	0,454	30,5	0,539	21,7	0,647	14,9	0,8	9,6	27,68	132,97	101,17
Ago/65											
Set/65											
Out/65	0,452	29,2	0,532	25,5	0,64	21,6	0,779	13,9	9,40	83,56	73,38
Nov/65											
Dez/65											
Jan/66	0,482	30,5	0,557	25,7	0,66	19,8	0,814	13,5	11,79	100,80	81,22
Fev/66	0,46	30,5	0,545	25,5	0,66	18,1	0,822	11,8	14,41	106,03	99,79
Mar/66	0,49	21,9	0,589	17,5	0,681	15	0,836	9,7	10,24	69,56	65,06
Abr/66	0,477	26,7	0,551	19,4	0,66	14,9	0,808	8,9	24,99	120,61	109,74
Mai/66	0,46	29,2	0,545	23,3	0,654	16,8	0,808	9,8	23,34	127,66	132,45
Jun/66	0,471	31,6	0,557	26,9	0,667	19,5	0,822	12,1	16,18	121,97	117,71
Jul/66	0,471	26,1	0,557	19,6	0,66	12,9	0,822	9,3	19,61	101,87	98,04
Ago/66	0,471	27,2	0,551	22,7	0,66	16,5	0,822	10	17,96	108,58	97,88
Set/66	0,471	27,6	0,551	22,2	0,66	18,2	0,822	10,2	16,23	105,13	90,58
Out/66	0,46	25,1	0,545	20,3	0,66	14,2	0,836	8,9	16,25	91,04	86,22
Nov/66	0,471	24,3	0,551	18,1	0,66	12,2	0,822	8,8	18,09	90,30	92,89
Dez/66	0,471	23,9	0,551	18,3	0,66	10,9	0,822	8,5	20,56	94,18	103,07
Jan/67	0,46	20,5	0,545	16,5	0,647	12,1	0,836	7,6	14,25	69,33	69,41
Fev/67	0,477	22,1	0,57	16,7	0,681	12,4	0,85	8	15,01	79,27	76,50
Mar/67	0,471	21,1	0,557	17,4	0,674	12,3	0,842	7,3	18,09	84,95	81,87
Abr/67	0,482	23,8	0,578	18,3	0,682	14,3	0,85	8,5	16,13	91,92	84,25
Mai/67	0,46	23,1	0,545	17,6	0,647	14,4	0,808	8,7	15,59	81,34	76,30
Jun/67	0,46	27,5	0,551	20,3	0,66	14,1	0,822	9,5	18,93	103,38	100,58
Jul/67	0,443	29,6	0,52	23,7	0,634	16,9	0,751	11,2	23,20	120,89	106,46
Ago/67	0,437	31,4	0,52	26	0,613	18,6	0,772	12,9	15,09	103,07	91,24
Set/67	0,448	25,3	0,539	19,1	0,654	13	0,808	8,6	20,43	96,67	126,47
Out/67	0,412	35,9	0,523	27,6	0,627	21,2	0,8	14,5	10,43	93,80	92,97
Nov/67	0,412	34	0,514	26	0,623	18,1	0,793	12,2	15,26	103,65	109,35
Dez/67	0,415	34,3	0,52	25,9	0,634	17,4	0,8	10,2	24,25	131,69	167,89

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{ca} (a)	A/C(b)	f _{ca} (b)	A/C(c)	f _{ca} (c)	A/C(d)	f _{ca} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Jan/68	0,417	33,2	0,523	25,8	0,634	19,2	0,8	9,9	23,63	131,23	149,22
Fev/68	0,415	36,4	0,526	28,1	0,63	21,5	0,804	12,4	16,09	118,92	105,59
mar/68	0,414	35	0,516	27,6	0,626	18,4	0,796	14,9	10,05	88,09	88,78
Abr/68	0,418	32,5	0,526	23,4	0,633	16,3	0,8	11,3	16,22	101,33	103,31
Mai/68	0,423	24,3	0,526	17	0,633	10,7	0,8	7,3	25,45	92,11	146,59
Jun/68	0,397	32	0,501	25,6	0,619	18,4	0,764	10,6	20,47	111,82	129,51
Jul/68	0,398	29,5	0,494	23,4	0,586	17,7	0,758	10,5	18,15	95,68	112,48
Ago/68	0,409	25,2	0,504	19,4	0,596	14,3	0,768	8,7	19,80	85,93	110,30
Set/68	0,415	30,2	0,489	21,3	0,593	18,1	0,758	9,7	23,56	108,84	128,25
Out/68	0,426	31,4	0,507	26,7	0,6	20,1	0,765	13,5	12,64	93,82	98,67
Nov/68	0,44	27,7	0,517	20,5	0,61	12,9	0,765	7,6	56,02	160,59	228,90
Dez/68	0,431	29,8	0,517	24	0,62	17,8	0,782	12,2	12,98	89,49	110,82
Jan/69	0,42	30,7	0,514	24,7	0,613	19,5	0,744	12,9	14,40	96,28	123,81
Fev/69	0,429	30	0,523	23	0,617	18,1	0,765	11,8	15,85	98,26	101,92
MAR/69	0,426	28,8	0,523	23,3	0,627	16,8	0,765	11,6	15,33	93,97	96,48
Abr/69	0,426	29,1	0,526	21,6	0,627	15,7	0,758	9,8	26,50	119,66	110,32
Mai/69	0,409	30,8	0,539	23,8	0,647	15,6	0,751	11	21,65	114,32	119,17
Jun/69	0,437	30,6	0,529	21,4	0,64	14,6	0,772	10,5	24,36	118,79	151,45
Jul/69	0,431	30,3	0,532	22,3	0,64	16,7	0,761	11,8	17,10	102,27	118,72
Ago/69	0,431	28,4	0,538	17,2	0,646	12,2	0,764	9,2	28,62	112,48	118,55
Set/69	0,432	34,1	0,526	25,6	0,64	16,5	0,765	12,3	22,96	130,65	119,17
Out/69	0,426	36,4	0,526	26,5	0,633	17,7	0,758	11,9	30,12	156,01	149,90
Nov/69	0,426	31,4	0,526	25,4	0,627	19,5	0,758	13,4	13,20	96,47	104,66
Dez/69	0,432	31,1	0,533	23,7	0,633	16,7	0,758	13,2	14,78	98,10	124,06
Jan/70	0,42	29,6	0,52	23,1	0,64	17,6	0,772	11,9	12,97	87,76	102,17
Fev/70	0,415	32,1	0,533	23,3	0,627	18,1	0,751	11,7	19,75	113,06	129,45
Mar/70	0,429	24,1	0,523	18,6	0,633	14,4	0,751	10,3	13,58	73,67	97,81
Abr/70	0,409	29,9	0,517	19,8	0,633	13,7	0,786	9,1	23,02	103,64	134,64
Mai/70	0,418	29,1	0,521	23	0,645	17	0,753	12,4	12,61	85,21	90,00
Jun/70	0,396	28,3	0,492	21,2	0,631	14,1	0,753	11,2	13,87	78,13	92,32
Jul/70	0,407	31,4	0,486	24	0,604	17,1	0,739	13,5	12,68	84,49	89,59
Ago/70	0,422	31	0,506	21,3	0,618	17,6	0,743	11,6	18,19	100,79	148,80
Set/70	0,422	29	0,489	22,4	0,597	16,7	0,736	11,4	18,51	96,40	102,82

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{c28} (a)	A/C(b)	f _{c28} (b)	A/C(c)	f _{c28} (c)	A/C(d)	f _{c28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Out/70	0,417	25,1	0,473	18,9	0,586	13	0,723	9,3	23,91	88,62	108,80
Nov/70	0,405	29,2	0,48	23,3	0,593	16	0,731	9,9	27,95	114,01	125,59
Dez/70	0,417	28,5	0,499	22,4	0,631	15,9	0,753	12,2	12,47	80,03	101,81
Jan/71	0,432	24,9	0,52	19,7	0,642	13,2	0,784	9,4	16,67	83,66	115,94
Fev/71	0,418	27,9	0,5	19,7	0,625	12,9	0,776	8,1	30,53	112,36	165,96
Mar/71	0,409	29,5	0,493	23,2	0,6	15,7	0,746	9,5	30,00	120,89	156,37
Abr/71	0,415	26,3	0,506	21,3	0,607	12,4	0,769	7,9	34,53	117,00	174,45
Mai/71	0,424	27,4	0,502	20,7	0,625	14,3	0,746	8,3	38,05	130,19	214,63
Jun/71	0,42	28,8	0,497	24,6	0,62	17,2	0,741	11,6	17,52	99,02	103,47
Jul/71	0,382	29,7	0,467	25,5	0,606	16,8	0,736	11,1	16,96	91,39	91,86
Ago/71	0,401	38,3	0,493	27	0,625	18,9	0,736	15,2	15,45	109,26	118,35
Set/71	0,376	32,7	0,459	25	0,58	18,2	0,707	11,2	24,01	109,07	125,36
Out/71	0,4	37,1	0,491	27,5	0,596	19,2	0,737	12,3	26,71	137,64	137,00
Nov/71	0,392	28,7	0,494	21,1	0,572	16,9	0,707	9,9	28,97	110,33	131,10
Dez/71	0,38	31,8	0,459	27,2	0,58	19,8	0,722	13	14,01	89,25	102,89
Jan/72	0,386	31	0,463	24,2	0,57	20,2	0,686	13,9	13,03	82,73	89,76
Fev/72	0,389	29,3	0,476	23,5	0,569	16,7	0,698	10,6	28,25	110,89	138,70
Mar/72	0,381	32,5	0,452	24,6	0,576	17,2	0,723	12	17,65	93,09	114,07
Abr/72	0,384	33,9	0,487	26,9	0,599	19	0,708	12,7	20,95	113,50	117,45
Mai/72	0,358	36,1	0,473	27,1	0,599	21,1	0,742	12,9	13,79	94,42	108,15
Jun/72	0,373	32,8	0,457	28,8	0,569	20	0,708	12,9	17,57	100,55	100,91
Jul/72	0,365	29,6	0,457	22,6	0,571	17,2	0,693	12,4	13,77	76,29	80,14
Ago/72	0,358	34,8	0,476	29,1	0,585	19,3	0,723	11,9	20,58	110,93	119,13
Set/72	0,411	33	0,503	27,6	0,625	17,6	0,79	11,6	17,33	109,32	108,58
Out/72	0,429	29,5	0,52	22,3	0,634	16,8	0,809	10,4	15,10	93,36	88,26
Nov/72	0,403	30,8	0,499	22,4	0,625	15,1	0,78	9,9	20,26	101,62	105,05
Dez/72	0,396	35,4	0,478	29,1	0,598	22,3	0,752	13,1	15,94	109,18	104,43
Jan/73	0,395	31	0,475	24	0,596	17,1	0,739	9,9	26,61	114,97	139,15
Fev/73	0,422	34	0,526	24,9	0,65	17,3	0,796	10,6	22,31	127,30	128,51
Mar/73	0,395	33,7	0,49	27,6	0,594	19,2	0,715	12,9	21,35	117,44	119,74
Abr/73	0,421	32	0,504	24,6	0,632	15	0,772	9,6	32,40	139,03	140,42
Mai/73	0,426	31,3	0,517	23,5	0,628	19,6	0,729	15,3	9,71	80,09	80,30
Jun/73	0,399	34,4	0,479	28,9	0,605	18,2	0,763	10	31,95	144,27	158,39

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f ₆₂₈ (a)	A/C(b)	f ₆₂₈ (b)	A/C(c)	f ₆₂₈ (c)	A/C(d)	f ₆₂₈ (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Jul/73	0,407	27,5	0,496	22,8	0,628	13,1	0,772	8,2	31,01	116,35	150,37
Ago/73	0,385	32,4	0,473	25,6	0,587	18,1	0,745	10,8	21,48	107,58	145,24
Set/73	0,404	31,4	0,486	24,8	0,615	15,4	0,74	11	24,27	114,14	131,61
Out/73	0,416	28,8	0,522	23,2	0,64	16,2	0,74	10,6	21,64	109,31	111,03
Nov/73	0,385	32,2	0,474	25,7	0,599	22,3	0,772	12,5	10,60	81,72	78,51
Dez/73	0,42	33,3	0,491	29,4	0,599	22,1	0,738	13,8	16,51	113,01	98,76
Jan/74	0,408	30,8	0,5	24,1	0,599	18,8	0,733	14,8	9,57	75,50	80,65
Fev/74	0,412	27,7	0,496	23,9	0,604	19	0,713	16,6	5,71	56,35	52,17
Mar/74	0,405	31,3	0,493	26,4	0,601	19,2	0,74	12,9	14,78	96,03	83,83
Abr/74	0,401	32,3	0,48	22,3	0,583	15,4	0,726	9,6	39,80	135,75	143,97
Mai/74	0,398	28,9	0,497	20,4	0,601	15,8	0,745	9,7	21,96	97,88	110,84
Jun/74	0,409	26,9	0,48	23,2	0,592	14,7	0,736	10,6	19,40	91,35	122,68
Jul/74	0,432	34,9	0,497	25,8	0,625	17	0,755	12,7	21,98	125,00	130,21
Ago/74	0,401	30,7	0,488	21,5	0,611	14,6	0,711	10,2	33,00	122,31	140,24
Set/74	0,44	26,1	0,531	21	0,661	10,6	0,785	8,8	29,84	117,04	122,00
Out/74	0,417	32	0,514	27	0,648	18,2	0,745	13,4	14,81	102,57	81,92
Nov/74	0,417	27,7	0,501	22,2	0,601	16,6	0,755	12,9	9,74	69,50	54,23
Dez/74	0,404	31,4	0,482	24,1	0,595	19,3	0,727	13,8	11,80	82,73	72,20
Jan/75	0,418	32,1	0,527	25,4	0,633	18,8	0,741	13,8	13,95	98,81	76,86
Fev/75	0,413	31,5	0,503	23,8	0,617	18,8	0,764	11,4	16,93	101,63	90,49
Mar/75	0,413	30	0,495	23,2	0,622	15,3	0,749	11	20,32	102,89	102,07
Abr/75	0,417	30,1	0,52	22,1	0,649	14,1	0,785	9,9	21,46	107,46	97,39
Mai/75	0,413	31,8	0,52	26,1	0,667	18,1	0,818	10,8	14,44	100,80	94,46
Jun/75	0,425	30,1	0,512	23,7	0,703	16,9	0,823	9,6	14,66	96,38	97,67
Jul/75	0,402	30,9	0,474	25,5	0,622	16,3	0,766	10,5	19,71	103,59	88,73
Ago/75	0,376	31,3	0,447	25,4	0,514	19,2	0,599	11,8	80,33	172,12	162,31
Set/75	0,406	35,9	0,495	27,9	0,609	19,5	0,78	12	19,03	118,83	109,30
Out/75	0,41	35,1	0,495	28,5	0,627	20,6	0,761	11,4	23,37	134,07	129,53
Nov/75	0,43	28,4	0,51	23,7	0,6	17,4	0,751	11,3	18,65	101,90	96,53
Dez/75	0,402	30,8	0,47	27,3	0,595	20,9	0,713	12,9	15,74	98,00	102,01
Jan/76	0,417	32,9	0,503	27,3	0,618	19,3	0,732	13,6	17,11	110,41	120,33
Fev/76	0,432	28,1	0,524	20	0,64	12	0,818	8,3	24,46	105,92	120,33
Mar/76	0,413	27	0,495	21,8	0,631	13,8	0,761	8,4	29,28	112,65	131,51

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{c28} (a)	A/C(b)	f _{c28} (b)	A/C(c)	f _{c28} (c)	A/C(d)	f _{c28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Abr/76	0,436	22,4	0,519	23,1	0,632	14,2	0,768	10,6	12,28	73,12	79,75
Mai/76	0,388	30,1	0,458	25,5	0,586	21,2	0,675	14,3	11,24	78,57	73,84
Jun/76	0,396	37,4	0,456	29,3	0,567	19,8	0,705	12,2	36,59	153,41	156,34
Jul/76	0,394	36	0,467	29,1	0,567	22	0,688	13,1	30,18	142,16	126,93
Ago/76	0,423	30,2	0,506	24,7	0,577	20	0,755	11,3	20,02	110,24	90,39
Set/76	0,394	30,6	0,454	22,1	0,567	15,2	0,699	10,8	27,84	105,88	122,32
Out/76	0,388	29,1	0,462	23,8	0,56	18,2	0,689	11,7	20,49	96,58	89,04
Nov/76	0,396	34,8	0,451	24,4	0,561	18,2	0,681	14,5	18,33	99,39	93,14
Dez/76	0,373	30,1	0,444	26	0,384	18,2	0,72	14,8	4,32	43,28	40,60
Jan/77	0,387	30,8	0,481	23,6	0,582	16,6	0,722	12,9	14,10	83,57	87,90
Fev/77	0,362	24	0,475	20	0,602	13,8	0,742	9,7	11,55	60,45	61,76
Mar/77	0,402	31,4	0,479	24,6	0,588	18,5	0,733	11,8	18,64	101,41	102,25
Abr/77	0,428	33,2	0,496	25,4	0,63	19,1	0,73	14,1	15,05	102,68	93,97
Mai/77	0,431	33,2	0,535	25	0,693	16,2	0,877	9,8	15,44	108,03	105,15
Jun/77	0,405	27,9	0,497	23,8	0,615	15,9	0,736	10,1	22,94	105,53	112,14
Jul/77	0,405	31,5	0,497	24,9	0,606	19,7	0,736	13	13,94	92,84	98,31
Ago/77	0,388	31,9	0,47	25	0,595	17,6	0,7	12,9	17,97	97,67	98,26
Set/77	0,397	29,8	0,482	23,3	0,595	17,1	0,682	12,1	22,33	103,84	111,70
Out/77	0,409	35,7	0,489	25,8	0,597	20	0,737	12,8	20,83	119,95	105,88
Nov/77	0,41	32,6	0,486	27,9	0,609	18	0,744	12,3	20,21	114,84	111,24
Dez/77	0,411	26,3	0,528	21,6	0,585	15,7	0,744	12,2	10,94	70,50	60,34
Jan/78	0,418	32,2	0,501	24,7	0,598	20,6	0,708	15,4	11,82	88,54	67,91
Fev/78	0,397	32,6	0,479	24,9	0,571	18,9	0,675	14,2	19,76	105,20	108,09
Mar/78	0,389	33	0,479	25,7	0,604	17,6	0,718	13,2	16,66	98,28	99,90
Abr/78	0,398	33,9	0,484	29,1	0,6	19,6	0,728	11,7	26,64	133,74	142,09
Mai/78	0,4	35,4	0,471	30,4	0,591	21,8	0,746	14	15,04	196,88	104,53
Jun/78	0,404	31,9	0,491	25,2	0,582	19	0,733	10,5	29,86	130,70	126,62
Jul/78	0,401	33,2	0,472	25,6	0,597	17,5	0,719	13,5	16,89	99,43	88,00
Ago/78	0,408	35,3	0,47	28,4	0,603	22,1	0,719	16,1	11,23	92,41	75,67
Set/78	0,389	36,1	0,466	30,2	0,589	22,5	0,724	14,6	14,70	105,00	83,33
Out/78	0,401	36,5	0,468	30	0,599	23,1	0,75	15	12,03	98,60	104,42
Nov/78	0,42	30,4	0,49	25,5	0,608	20,7	0,744	12,9	13,17	91,66	105,82
Dez/78	0,403	31,7	0,477	27,6	0,57	20,4	0,709	15,5	11,12	84,17	81,03

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.1 (Continuação)

Mês/ano	A/C(a)	f _{e28} (a)	A/C(b)	f _{e28} (b)	A/C(c)	f _{e28} (c)	A/C(d)	f _{e28} (d)	K ₂	K ₁	K ₀
Jan/79	0,416	38,4	0,482	29,9	0,594	23,3	0,709	16,8	15,35	116,39	126,75
Fev/79	0,428	30,3	0,497	25,6	0,613	21	0,75	12,6	14,23	97,19	98,83
Mar/79	0,416	36	0,49	29,6	0,584	23,5	0,727	16,7	11,71	99,46	103,19
Abr/79	0,404	30,4	0,468	23,3	0,58	21,2	0,727	13,5	10,29	75,55	80,84
Mai/79	0,413	36,6	0,495	30,5	0,61	22,3	0,748	15,7	12,85	106,19	89,10
Jun/79	0,402	37,5	0,49	31	0,605	22,8	0,748	14	17,45	122,82	110,61
Jul/79	0,391	40,7	0,494	29,3	0,616	19,9	0,776	13,5	17,74	122,29	106,09
Ago/79	0,398	38	0,499	28,5	0,618	22	0,791	14,4	11,43	98,58	84,32
Set/79	0,421	38,6	0,512	30,2	0,632	21,8	0,776	15,6	12,94	112,27	90,02
Out/79	0,413	36,7	0,512	27,1	0,632	19	0,781	13,9	14,13	106,46	93,68
Nov/79	0,436	38,1	0,504	33,1	0,632	24,5	0,795	14,8	14,00	123,94	93,52

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.2 (Continuação)

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jan/57		0,494	13,5	31,9	14,13	32,84
Fev/57		0,494	13,5	35,9	14,13	36,95
Mar/57		0,494	15,3	37,9	16,01	39,01
Abr/57		0,488	13,1	35,9	13,45	36,50
Mai/57		0,488	11,5	30,8	11,80	31,31
Jun/57		0,488	11,5	37,6	11,80	38,23
Jul/57		0,488	17,5	36,7	17,96	37,31
Ago/57		0,494	12,6	33,6	13,19	34,59
Set/57		0,488	10,2	28	10,47	28,47
Out/57		0,494	11,8	34,6	12,35	35,62
Nov/57		0,5	16,5	38,9	17,61	40,54
Dez/57		0,494	11,1	30,3	11,62	31,19
Jan/58		0,488	9,9	27,7	10,16	28,16
Fev/58		0,5	11,8	31,3	12,59	32,62
Mar/58		0,494	12,6	32,3	13,19	33,25
Abr/58		0,494	11,6	32,1	12,14	33,04
Mai/58		0,481	12,3	35,8	12,34	35,87
Jun/58		0,494	12,6	30,2	13,19	31,09
Jul/58		0,494	12,4	32	12,98	32,94
Ago/58		0,488	13,5	36,6	13,86	37,21
Set/58		0,488	12,4	32,3	12,73	32,84
Out/58		0,488	17,9	39,9	18,37	40,57
Nov/58						
Dez/58		0,494	10,8	25,4	11,30	26,15
Jan/59		0,481	11	28	11,04	28,06
Fev/59		0,488	12,1	34,1	12,42	34,67
Mar/59		0,494	12,3	32,8	12,87	33,76
Abr/59						
Mai/59		0,494	12,3	33,7	12,87	34,69
Jun/59		0,494	12,6	33,1	13,19	34,07
Jul/59		0,494	12,7	30,9	13,29	31,81
Ago/59		0,494	11,9	33,5	12,45	34,48
Set/59		0,488	14,7	34,2	15,09	34,77
Out/59		0,494	12,9	31,8	13,50	32,73
Nov/59		0,494	14,9	34,9	15,59	35,92
Dez/59		0,507	13,7	29,9	14,96	31,62
Jan/60		0,494	12,2	32,8	12,77	33,76
Fev/60		0,5	10,2	32,6	10,89	33,98
Mar/60		0,494	10,9	29,4	11,41	30,26
Abr/60		0,494	12,8	25,9	13,40	26,66
Mai/60		0,494	10,7	30	11,20	30,88
Jun/60		0,488	10,5	33,8	10,78	34,36
Jul/60		0,494	9,9	32,1	10,36	33,04
Ago/60		0,488	10,6	30,1	10,88	30,60
Set/60		0,494	10,1	27,1	10,57	27,90
Out/60		0,488	10,5	31,3	10,78	31,82
Nov/60		0,494	13,5	34,8	14,13	35,82
Dez/60		0,513	10,6	32,2	11,80	34,47
Jan/61		0,513	12,4	31,9	13,81	34,15
Fev/61		0,507	16,3	34,3	17,80	36,27
Mar/61		0,488	12,9	32,8	13,24	33,35
Abr/61		0,494	15,3	29,3	16,01	30,16
Mai/61		0,5	10,2	33,9	10,89	35,33
Jun/61		0,497	12,4	34,2	13,11	35,42

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.2 (Continuação)
Mês/ano Blaine m²/Kg

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jul/61		0,494	11,3	31,4	11,83	32,32
Ago/61		0,494	16,5	37,2	17,27	38,29
Set/61		0,494	10,8	30,8	11,30	31,70
Out/61		0,5	11,6	30,5	12,38	31,79
Nov/61		0,494	10,5	30,2	10,99	31,09
Dez/61		0,494	13	33,6	13,61	34,59
Jan/62		0,494	11,5	26	12,04	26,76
Fev/62		0,488	14,1	33,9	14,47	34,47
Mar/62		0,494	15,8	31,3	16,54	32,22
Abr/62		0,494	12,8	31,1	13,40	32,01
Mai/62		0,494	13,1	34,3	13,71	35,31
Jun/62						
Jul/62						
Ago/62						
Set/62		0,494	13	31,9	13,61	32,84
Out/62		0,5	13,9	32	14,83	33,35
Nov/62		0,507	9,8	29,5	10,70	31,19
Dez/62		0,507	9,8	27,9	10,70	29,50
Jan/63		0,5	9,6	28,2	10,25	29,39
Fev/63		0,481	13,8	33,6	13,84	33,67
Mar/63		0,5	11,8	25,9	12,59	26,99
Abr/63		0,5	10,2	27,6	10,89	28,76
Mai/63		0,5	12	28,5	12,81	29,70
Jun/63		0,507	8,1	26,7	8,84	28,23
Jul/63		0,507	6,6	18,5	7,21	19,56
Ago/63		0,5	8,7	27,3	9,29	28,45
Set/63		0,507	6,9	22	7,53	23,26
Out/63		0,494	11	25,9	11,51	26,66
Nov/63						
Dez/63		0,513	9,7	24,6	10,80	26,34
Jan/64		0,507	9,1	24,3	9,94	25,69
Fev/64		0,507	8,3	22,5	9,06	23,79
Mar/64		0,507	10,3	28,3	11,25	29,92
Abr/64		0,507	9,1	27,9	9,94	29,50
Mai/64		0,494	9,7	25,6	10,15	26,35
Jun/64		0,5	9,2	25,6	9,82	26,68
Jul/64		0,494	12,1	31,1	12,66	32,01
Ago/64		0,468	9,3	26,8	8,94	26,14
Set/64		0,494	6	19,8	6,28	20,38
Out/64		0,507	8,7	23,2	9,50	24,53
Nov/64		0,494	8	22,7	8,37	23,37
Dez/64		0,494	9,2	25,8	9,63	26,56
Jan/65		0,488	9,3	27,5	9,55	27,96
Fev/65		0,494	15,1	33,4	15,80	34,38
Mar/65		0,5	10,9	34,5	11,63	35,96
Abr/65		0,494	15,3	35,7	16,01	36,75
Mai/65		0,494	12,9	32,6	13,50	33,56
Jun/65		0,526	13,7	29,5	15,91	32,44
Jun/65		0,488	14,3	39,7	14,68	40,36
Ago/65						
Set/65						
Out/65		0,481	13,6	34,9	13,64	34,97
Nov/65						
Dez/65						

Tabela B.2 (Continuação)

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jan/66		0,513	21,5	35,6	23,94	38,11
Fev/66		0,494	14,8	31,7	15,49	32,63
Mar/66		0,494	17,2	31,9	18,00	32,84
Abr/66		0,488	13,9	33,2	14,27	33,75
Mai/66		0,5	10,8	28,4	11,53	29,60
Jun/66		0,488	11,9	31,3	12,21	31,82
Jul/66		0,494	14,3	31	14,97	31,91
Ago/66		0,481	16,8	34	16,85	34,07
Set/66		0,5	16,5	34,2	17,61	35,64
Out/66		0,494	11,3	31,5	11,83	32,42
Nov/66		0,494	10,2	29	10,68	29,85
Dez/66		0,488	11,1	27,6	11,39	28,06
Jan/67		0,494	14,4	29,8	15,07	30,67
Fev/67		0,488	11,7	31,3	12,01	31,82
Mar/67		0,481	12,3	31,8	12,34	31,87
Abr/67		0,56	12,7	28,4	16,48	33,51
Mai/67		0,488	14,5	32,2	14,88	32,74
Jun/67		0,481	13,9	31,5	13,95	31,57
Jul/67		0,488	12	34,3	12,32	34,87
Ago/67		0,494	14,7	33,7	15,39	34,69
Set/67		0,507	7,9	22,2	8,63	23,47
Out/67		0,494	12,4	30,1	12,98	30,98
Nov/67		0,504	10,6	27,7	11,46	29,11
Dez/67		0,513	8,7	22,5	9,69	24,09
Jan/68		0,491	8,4	26,4	8,71	27,01
Fev/68		0,494	12,2	33,6	12,77	34,59
mar/68		0,494	11,3	29,6	11,83	30,47
Abr/68		0,5	10,5	28,9	11,21	30,12
Mai/68		0,503	6	18,4	6,47	19,30
Jun/68		0,497	10,2	25,6	10,78	26,52
Jul/68		0,513	7,7	24,4	8,57	26,12
Ago/68		0,497	6,3	23,1	6,66	23,93
Set/68		0,504	7,8	24,8	8,43	26,06
Out/68		0,485	11,1	28,9	11,28	29,20
Nov/68		0,516	6,4	20	7,20	21,54
Dez/68		0,504	7	23,6	7,57	24,80
Jan/69		0,494	8,6	23,2	9,00	23,88
Fev/69		0,507	10,8	28	11,79	29,61
Mar/69		0,5	8,7	28,7	9,29	29,91
Abr/69		0,507	11,4	31,5	12,45	33,31
Mai/69		0,491	9,5	28,8	9,85	29,46
Jun/69		0,494	8,4	23,4	8,79	24,09
Jul/69		0,494	8,8	25,7	9,21	26,45
Ago/69		0,474	10,3	29,5	10,10	29,14
Set/69		0,481	13,4	33,6	13,44	33,67
Out/69		0,484	13	31,7	13,17	31,96
Nov/69		0,487	8,5	27,9	8,70	28,31
Dez/69		0,5	7,3	23,3	7,79	24,28
Jan/70		0,487	11,6	26	11,87	26,38
Fev/70		0,484	9,7	26,6	9,83	26,82
Mar/70		0,487	9,5	22,8	9,72	23,13
Abr/70		0,487	8,3	23,3	8,49	23,64
Mai/70	297,0	0,5	10	27,9	10,67	29,08
Jun/70	284,0	0,493	9	25,3	9,39	25,99

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.2 (Continuação)

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jul/70	299,0	0,481	9,8	28,9	9,83	28,96
Ago/70	275,0	0,542	9,4	18,3	11,50	20,80
Set/70	299,0	0,497	10,7	27,8	11,31	28,79
Out/70	254,0	0,5	9,5	24	10,14	25,01
Nov/70	320,0	0,471	13,1	28,4	12,72	27,88
Dez/70	276,0	0,493	8,2	23,5	8,55	24,14
Jan/71	252,0	0,513	8,3	20,7	9,24	22,16
Fev/71	275,0	0,516	7,6	19,3	8,54	20,79
Mar/71	271,0	0,506	9,3	22,5	10,12	23,74
Abr/71	249,0	0,487	8,1	20,3	8,29	20,60
Mai/71	235,0	0,513	5,3	17,4	5,90	18,63
Jun/71	261,0	0,5	8,9	28,2	9,50	29,39
Jul/71	275,0	0,484	9,5	30,3	9,62	30,55
Ago/71	323,0	0,493	11,4	27,6	11,89	28,35
Set/71	294,0	0,484	10,4	26,5	10,54	26,72
Out/71	272,0	0,484	9,2	30,6	9,32	30,85
Nov/71	274,0	0,5	9,6	24,8	10,25	25,85
Dez/71	272,0	0,503	9,4	25,4	10,13	26,64
Jan/72	297,0	0,487	11	27,9	11,25	28,31
Fev/72	264,0	0,493	9	23,9	9,39	24,55
Mar/72	325,0	0,503	11	23,9	11,85	25,06
Abr/72	285,0	0,503	10	28,3	10,78	29,68
Mai/72	310,0	0,493	11,4	26,1	11,89	26,81
Jun/72	307,0	0,506	9,3	29	10,12	30,60
Jul/72	305,0	0,474	10,5	29,6	10,30	29,24
Ago/72	277,0	0,506	10,2	27,1	11,10	28,60
Set/72	333,0	0,493	14,1	30,1	14,71	30,92
Out/72	312,0	0,468	12,8	33,3	12,31	32,48
Nov/72	306,0	0,49	12,1	29,1	12,50	29,71
Dez/72	290,0	0,497	12,9	31	13,63	32,11
Jan/73	291,0	0,493	9,1	24,7	9,49	25,37
Fev/73	292,0	0,49	9,8	29,8	10,12	30,42
Mar/73	315,0	0,5	12,2	28,9	13,02	30,12
Abr/73	293,0	0,493	12,9	29,6	13,46	30,41
Mai/73	351,0	0,49	12,9	30	13,33	30,63
Jun/73	309,0	0,49	9,4	27,4	9,71	27,97
Jul/73	281,0	0,5	5,8	22,8	6,19	23,76
Ago/73	308,0	0,481	9,3	22,7	9,33	22,75
Set/73	296,0	0,461	11,1	27,7	10,43	26,63
Out/73	307,0	0,487	9,9	29,8	10,13	30,23
Nov/73	288,0	0,481	11,1	31,9	11,14	31,97
Dez/73	311,0	0,471	13,3	35,8	12,92	35,14
Jan/74	298,0	0,461	12,9	29,9	12,13	28,75
Fev/74	315,0	0,481	13,3	33,1	13,34	33,17
Mar/74	310,0	0,477	14,3	35,4	14,16	35,18
Abr/74	280,0	0,471	13,7	29,5	13,30	28,96
Mai/74	282,0	0,468	11,1	27,8	10,67	27,12
Jun/74	284,0	0,49	7,9	22,4	8,16	22,87
Jul/74	280,0	0,493	10,6	28,7	11,06	29,48
Ago/74	282,0	0,5	8,3	25,7	8,86	26,78
Set/74	278,0	0,481	9,5	29,4	9,53	29,46
Out/74	287,0	0,487	13,9	37,9	14,22	38,45
Nov/74	306,0	0,477	15,8	39,6	15,65	39,36
Dez/74	291,0	0,484	12,6	34,9	12,77	35,19

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.2 (Continuação)

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jan/75	315,0	0,481	17,6	39,4	17,66	39,48
Fev/75	313,0	0,497	12,2	33,3	12,89	34,49
Mar/75	292,0	0,484	12,1	30,7	12,26	30,95
Abr/75	293,0	0,487	11,5	33,4	11,76	33,89
Mai/75	310,0	0,493	14,2	31,9	14,81	32,77
Jun/75	259,0	0,493	9,5	29,5	9,91	30,30
Jul/75	273,0	0,5	11,1	34,4	11,85	35,85
Ago/75	303,0	0,481	13,7	32,5	13,74	32,57
Set/75	324,0	0,535	13	29,8	15,55	33,39
Out/75	312,0	0,5	12,8	30,5	13,66	31,79
Nov/75	299,0	0,497	15,4	31,3	16,28	32,42
Dez/75	326,0					
Jan/76	323,0	0,506	18,3	31,5	19,92	33,24
Fev/76	279,0	0,477	11,5	27,2	11,39	27,03
Mar/76	274,0	0,471	8,7	26,8	8,45	26,31
Abr/76	275,0	0,481	8,6	28,1	8,63	28,16
Mai/76	256,0	0,468	13,9	33,5	13,37	32,68
Jun/76	267,0	0,471	12,5	30,7	12,14	30,13
Jul/76	285,0	0,487	13,6	33,9	13,91	34,39
Ago/76	299,0	0,51	13,7	35,2	15,10	37,45
Set/76	277,0	0,487	7,9	26,2	8,08	26,58
Out/76	304,0	0,481	12,3	32,9	12,34	32,97
Nov/76	281,0	0,484	12,5	32,5	12,66	32,77
Dez/76	294,0	0,494	13,8	31,8	14,44	32,73
Jan/77	294,0	0,49	13,4	28,6	13,84	29,20
Fev/77	288,0	0,494	12,3	29,2	12,87	30,06
Mar/77	317,0	0,519	10,7	28,1	12,15	30,46
Abr/77	319,0	0,503	15,8	32	17,03	33,56
Mai/77	300,0	0,506	12,8	29,9	13,93	31,55
Jun/77	303,0	0,497	9,1	27,9	9,62	28,90
Jul/77	297,0	0,497	10,8	28	11,41	29,00
Ago/77	284,0	0,49	10,4	29,9	10,74	30,52
Set/77	289,0	0,516	13,6	26,5	15,29	28,55
Out/77	299,0	0,51	12,1	32,7	13,34	34,79
Nov/77	276,0	0,494	12,8	30,8	13,40	31,70
Dez/77	268,0	0,522	9,6	32,9	11,01	35,88
Jan/78	303,0	0,513	11,7	37,4	13,03	40,04
Fev/78	317,0	0,503	13	28,5	14,01	29,89
Mar/78	306,0	0,522	8,1	27,7	9,29	30,21
Abr/78	295,0	0,535	7,7	25,8	9,21	28,91
Mai/78	292,0	0,48	9,8	31,4	9,80	31,40
Jun/78	327,0	0,48	12,8	31,7	12,80	31,70
Jul/78	328,0	0,48	12,9	34,7	12,90	34,70
Ago/78	319,0	0,48	14,1	37,5	14,10	37,50
Set/78	355,0	0,48	16,4	38,7	16,40	38,70
Out/78	301,0	0,48	10,3	29	10,30	29,00
Nov/78	310,0	0,48	10,3	26,6	10,30	26,60
Dez/78	284,0	0,48	10	31,9	10,00	31,90
Jan/79	280,0	0,48	12,7	28,2	12,70	28,20
Fev/79	281,0	0,48	13,2	30,2	13,20	30,20
Mar/79	329,0	0,48	14,2	29,6	14,20	29,60
Abr/79	267,0	0,48	11,9	28,7	11,90	28,70
Mai/79	326,0	0,48	14,2	36,6	14,20	36,60
Jun/79	310,0	0,48	16,7	34,1	16,70	34,10

Obs.: Espaços vazios significam dados não encontrados

Tabela B.2 (Continuação)

Mês/ano	Blaine m ² /Kg	a/c	f _{cc3}	f _{cc28}	f _{cc3} a/c=0,48	f _{cc28} a/c=0,48
Jul/79	324,0	0,48	11,8	35,4	11,80	35,40
Ago/79	267,0	0,48	11,6	35,9	11,60	35,90
Set/79	293,0	0,48	16,1	38,3	16,10	38,30
Out/79	281,0	0,48	18,2	34,9	18,20	34,90
Nov/79	305,0	0,48	16,4	40,7	16,40	40,70

ANEXO C

- Tabela C.1 - Resistência à compressão em MPa na idade de 28 dias do cimento e do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, das amostras mensais do cimento A, o fator de eficiência do cimento, a finura Blaine e a composição química através da porcentagens dos óxidos.
- Tabela C.2 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em MPa e relações a/c correspondentes das 4 misturas de concreto de traços 1:5 , 1:6 , 1:7 , e 1:8 , realizadas mensalmente no IPT com o cimento denominado B, e os valores calculados a partir desses dados para as constantes K_1 e K_2 da equação de Abrams.
- Tabela C.3 - Resistência à compressão em MPa na idade de 28 dias do cimento e do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, das amostras mensais do cimento B, o fator de eficiência do cimento, a finura Blaine e a composição química através da porcentagens dos óxidos.
- Tabela C.4 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade em MPa e relações a/c correspondentes das 4 misturas de concreto de traços 1:5 , 1:6 , 1:7 , e 1:8 , realizadas mensalmente no IPT com o cimento denominado C, e os valores calculados a partir desses dados para as constantes K_1 e K_2 da equação de Abrams.
- Tabela C.5 - Resistência à compressão em MPa na idade de 28 dias do cimento e do concreto de relação a/c fixa e igual a 0,48, das amostras mensais do cimento C, o fator de eficiência do cimento, a finura Blaine e a composição química através da porcentagens dos óxidos.

Tabela C.1 - Cimento A
 Mês/ano f_{c28} $a/c=0,48$

Mês/ano	f_{c28}	f_{c28}/f_{c28}	Blaine m^2/Kg	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	CaO livre
Mai/78	29,0983849	0,92670016	2920	20,3	2,78	4,7	63	1,41	2,02
Jun/78	25,5993002	0,8075489	3270	20,9	2,4	4,68	62,4	1,44	1,83
Jul/78	25,6003299	0,73776167	3280	20,4	2,4	4,66	63,1	1,39	2,37
Ago/78	28,9462825	0,77190087	3190	20,1	2,76	4,92	62,8	1,61	1,97
Set/78	28,899302	0,74675199	3550	20	2,54	4,94	63,1	1,55	2,46
Out/78	29,8725681	1,03008856	3010	20,8	2,44	5,08	62,9	1,08	1,91
Nov/78	26,5903521	0,9996373	3100	19,5	2,5	4,94	62,8	1,51	4,45
Dez/78	26,4843383	0,83023004	2840	20	2,52	5,12	62,7	1,25	2,37
Jan/79	31,3690171	1,11237649	2800	20,4	2,78	5,26	62,2	1,64	1,51
Fev/79	27,1738619	0,89979675	2810	19,9	2,82	5,26	63,2	1,62	2,46
Mar/79	30,5277464	1,03134278	3290	19,3	2,7	4,6	63,2	1,63	3,64
Abr/79	24,6760215	0,85979169	2670	19,6	2,52	5,06	63,1	1,51	4,3
Mai/79	31,1818626	0,85196346	3260	20,5	2,42	5,12	62,2	1,72	2,02
Set/79	32,8522697	0,85776161	2930	19,6	3,08	5,23	64,1	1,35	4,31
Nov/79	34,9231517	0,8580627	3050	20,5	2,95	5,24	61,1	1,46	0,97

Tabela C.2 - Cimento B

Mês/ano	A/C(a)	f _{e28} (a)	A/C(b)	f _{e28} (b)	A/C(c)	f _{e28} (c)	A/C(d)	f _{e28} (d)	K ₂	K ₁
Mai/78	0,411	34	0,501	27,9	0,65	23,1	0,727	16,5	8,11	81,25
Jun/78	0,396	31,9	0,484	28,2	0,603	19,4	0,738	12,9	15,32	99,12
Jul/78	0,401	33,8	0,489	27,6	0,604	19,1	0,72	15,4	12,70	93,46
Ago/78	0,412	33	0,477	29,2	0,585	24,2	0,726	18,5	6,26	70,29
Set/78	0,408	33,6	0,473	29	0,575	20,6	0,699	17,4	10,43	85,97
Nov/78	0,397	31,6	0,473	24,7	0,57	19,3	0,699	13,5	16,14	93,96
Dez/78	0,412	30	0,481	26,2	0,596	19,1	0,709	16,1	8,74	72,97
Jan/79	0,418	36	0,49	28,3	0,57	23,2	0,714	15,8	15,51	111,03
Fev/79	0,424	34,3	0,49	31,4	0,618	25,7	0,76	18,2	6,55	78,18
Mar/79	0,42	37,4	0,49	32,1	0,587	27	0,72	20	7,87	89,04
Abr/79	0,428	35,1	0,492	31,1	0,589	23,9	0,709	18,8	9,70	93,27
Mai/79	0,413	33	0,497	25,5	0,618	17,7	0,762	12,3	17,02	104,81
Jun/79	0,413	35,3	0,495	30,3	0,612	21,4	0,796	13,7	12,50	102,12
Jul/79	0,403	35,7	0,488	29,5	0,632	22	0,776	15,5	9,17	87,50
Set/79	0,427	39	0,518	29,3	0,648	24,1	0,791	17,2	8,62	94,72
Out/79	0,432	35,6	0,518	27,2	0,641	21,6	0,81	14,3	10,46	95,72
Nov/79	0,428	36,3	0,518	32,8	0,641	24	0,741	19,7	7,65	89,51
Dez/79	0,426	32,1	0,512	25,4	0,632	18,1	0,776	11,8	17,49	109,41
Jan/80	0,398	35,6	0,52	27,6	0,639	19,6	0,788	13,4	12,70	100,01
Fev/80	0,451	33,9	0,508	26,3	0,632	19,3	0,781	13,6	14,56	107,67
Mar/80	0,451	31,8	0,525	25,8	0,632	19,5	0,786	12,5	16,05	111,37
Abr/80	0,436	33	0,51	28,6	0,64	21,2	0,804	13,7	11,05	96,13
Mai/80	0,422	35,9	0,516	29,7	0,638	21,2	0,788	13,3	15,51	118,33
Jun/80	0,426	38,1	0,504	29,6	0,644	21,6	0,786	13,5	16,56	125,47
Jul/80	0,42	39,8	0,516	30,8	0,629	23,2	0,756	15,4	16,47	130,74
Ago/80	0,417	38,8	0,513	33,5	0,626	22,7	0,736	17,2	14,23	122,23
Set/80	0,41	35,9	0,526	22,9	0,606	20,1	0,785	10,2	26,71	136,99
Out/80	0,434	34,8	0,509	28,3	0,612	22,2	0,747	15,1	14,05	109,69
Nov/80	0,42	37,6	0,509	29,4	0,611	20,7	0,747	14,5	19,20	129,99
Dez/80	0,413	38,2	0,497	31,4	0,594	25,2	0,72	18,5	10,55	101,35
Jan/81	0,409	35,5	0,497	28,8	0,587	21,6	0,696	11,5	49,47	189,86
Fev/81	0,425	39,3	0,511	31,2	0,63	21,6	0,752	14,5	21,38	146,84

Tabela C.3 - Cimento B
 f_{c28} $a/c=0,48$

Mês/ano	f_{c28}	f_{c28}/f_{c28}	Blaine m^2/Kg	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SO_3	CaO livre
Mai/78	29,75	0,79	331,0	20	3,08	6,7	59,9	2,13	1,35
Jun/78	26,75	0,74	372,0	20,2	3,4	6,28	60	1,66	0,91
Jul/78	27,59	0,71	374,0	20,8	3,35	6,3	60,4	2,07	1,26
Ago/78	29,14	0,80	338,0	21,6	3,22	6,3	60,8	2,16	0,88
Set/78	27,90	0,72	351,0	20,8	3,3	6,82	60	2,02	1,26
Nov/78	24,73	0,88	336,0	21,4	2,8	6,72	59,8	1,5	1,57
Dez/78	25,78	0,81	341,0	21	2,68	6,62	59,8	1,9	1,36
Jan/79	29,79	0,89	350,0	21,3	2,84	6,94	59,6	1,59	1,23
Fev/79	31,73	0,92	363,0	20,8	2,98	6,98	59,5	2,09	2,24
Mar/79	33,07	0,96	372,0	21	2,94	6,74	59,9	1,66	1,92
Abr/79	31,34	0,90	376,0	21	2,75	6,25	59,3	2,16	2,81
Mai/79	26,89	0,80	359,0	21	2,94	6,38	59,4	2,2	1,74
Jun/79	30,20	0,83	327,0	21,3	3,16	6,64	58,8	2,12	1,74
Jul/79	31,01	0,83	428,0	21,5	2,99	6,95	58,4	2,48	1,96
Ago/79	33,71	0,86	365,0	20,6	2,88	6,76	60,4	1,73	1,96
Set/79	27,71	0,85	333,0	21,1	2,96	6,91	58,2	2,22	2,69
Out/79	29,53	0,77	366,0	21,1	3,2	6,7	58,9	2,07	1,93
Nov/79	29,77	0,77	409,0	20,8	3,12	7,12	59,1	2,1	1,91
Dez/79	29,38	0,83	404,0	22	3	6,66	57,6	2,15	1,55
Jan/80	30,34	0,78	304,0	20,6	3,03	6,39	58,7	2,37	1,64
Fev/80	31,74	0,84	354,0	21,5	2,97	6,98	58,4	2,06	0,51
Mar/80	32,61	0,86	362,0	22,5	3,2	6,56	59,3	1,65	1,19
Abr/80	34,07	0,78	430,0	21,6	3,4	6,88	59,9	2,31	1,53
Mai/80	34,17	0,81	376,0	20,8	3,47	6,43	59,7	1,96	0,93
Jun/80	28,30	0,83	364,0	21	3,2	6,26	59	1,81	1,46
Jul/80	30,85	0,92	383,0	20,5	3,14	6,55	57,6	1,94	1,28
Ago/80	31,47	0,91	388,0	20,2	3,11	6,34	58,4	1,88	1,69
Set/80	32,71	0,99	352,0	20,6	2,96	6,43	59,7	1,77	1,81
Out/80	29,18	0,87	381,0	20	2,83	6,22	59,7	1,85	1,44
Nov/80	33,76	1,04	359,0	22,1	3,08	6,62	59,1	2,07	1,59
Dez/80	29,10	0,79	365,0	21,5	3,12	6,55	58,7	2,09	2,34
Jan/81	32,68	1,05	362,0	21,4	3,11	6,56	59,2	2	1,38
Fev/81	35,20	0,91	374,0	21,2	3,19	6,75	59,5	1,87	1,43

Tabela C.4 - Cimento C

Mês/ano	A/C(a)	f ₂₈ (a)	A/C(b)	f ₂₈ (b)	A/C(c)	f ₂₈ (c)	A/C(d)	f ₂₈ (d)	K ₂	K ₁
Mai/78	0,404	33	0,467	27,5	0,582	22,4	0,737	15,5	9,13	79,49
Jun/78	0,408	31,2	0,476	25,6	0,582	19	0,742	13,8	11,45	82,17
Jul/78	0,404	33,3	0,469	28,4	0,566	22,6	0,7	15,7	12,59	93,26
Ago/78	0,408	31,4	0,464	25,5	0,594	20,2	0,729	13,4	12,58	86,59
Set/78	0,389	28,2	0,454	24,1	0,551	18,3	0,743	14	7,19	58,59
Out/78	0,389	30,2	0,461	25,4	0,57	20,5	0,719	13,7	10,68	76,44
Nov/78	0,408	29,5	0,477	26,2	0,574	16,1	0,709	13,7	15,41	89,49
Dez/78	0,404	32,1	0,468	27,5	0,555	22,4	0,653	17,9	10,43	82,54
Jan/78	0,381	35,7	0,438	30,1	0,601	26,4	0,725	18,5	5,61	67,85
Fev/78	0,404	36,4	0,478	32,6	0,58	25,3	0,707	19	8,99	90,39
Mar/78	0,389	32,4	0,461	28,9	0,55	23,7	0,685	21,6	4,07	54,72
Abr/78	0,408	35,5	0,477	30,9	0,589	23,9	0,704	18,9	8,58	85,52
Mai/78	0,407	36,3	0,479	28,7	0,6	25,8	0,738	15,9	10,27	93,35
Jun/78	0,406	32,6	0,478	26,7	0,587	29,2	0,724	14,5	12,67	90,53
Jul/78	0,402	31,8	0,504	25,9	0,632	18,4	0,777	13,7	9,86	80,28
Ago/78	0,402	32,8	0,491	25,7	0,603	20,3	0,748	13	13,91	95,09

Tabela C.5 - Cimento C
 f_{c28} a/c=0,48

Mês/ano	f_{c28}	f_{c28}/f_{cc28}	Blaine m^2/Kg	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	CaO livre
Mai/78	27,5057146	0,75982637	423,0	22,1	2,18	5,42	60,1	1,66	2,11
Jun/78	25,4969687	0,69097476	394,0	21,4	2,28	5,04	60,1	1,51	0,37
Jul/78	27,648527	0,73338268	412,0	21,3	2,4	6	61,1	1,46	1,92
Ago/78	25,6797217	0,79014528	349,0	22	2,4	5,78	59,8	1,47	1,26
Set/78	22,7342561	0,68476675	344,0	20,8	2,14	5,92	60,8	1,51	0,97
Out/78	24,5267659	0,79891746	365,0	22,3	2,28	5,42	59,3	1,43	1,26
Nov/78	24,0750797	0,77661547	300,0	21,6	2,34	5,44	60,8	1,49	0,93
Dez/78	26,7893399	0,76106079	364,0	21,4	2,5	5,12	61,1	1,54	1,09
Jan/78	29,6567159	0,89059207	367,0	21,5	2,58	5,52	60,1	1,73	0,95
Fev/78	31,5071366	0,92126131	368,0	21	2,58	5,56	60,4	2,26	2,09
Mar/78	27,8821944	0,7921078	350,0	21,4	2,52	5,72	60,2	1,86	2,72
Abr/78	30,4770568	0,84658491	425,0	21,4	2,38	5,81	58,4	2,56	2,39
Mai/78	30,5194187	0,80739203	404,0	21,8	2,2	5,32	59,6	2,3	1,63

ANEXO D

Tabela D.1 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 3 dias

Tabela D.2 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 7 dias

Tabela D.3 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 28 dias

Tabela D.1 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 3 dias

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,94409753
R-Quadrado	0,89132014
R-quadrado ajustado	0,87320683
Erro padrão	0,03250382
Observações	15

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,10397638	0,05198819	49,2080206	1,6478E-06
Resíduo	12	0,01267798	0,0010565		
Total	14	0,11665435			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	1,16175782	0,14947143	7,77244068	5,0459E-06	0,83608755	1,48742808
log fcc3	0,46415657	0,09871501	4,70198557	0,00051256	0,24907504	0,67923811
a/c	-0,89787864	0,1027861	-8,73540914	1,5114E-06	-1,12183031	-0,67392697

Tabela D.2 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 7 dias

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,98504912
R-Quadrado	0,97032177
R-quadrado ajustado	0,96438612
Erro padrão	0,01461451
Observações	13

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,0698307	0,03491535	163,473653	2,3024E-08
Resíduo	10	0,00213584	0,00021358		
Total	12	0,07196654			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	1,29553745	0,08789775	14,7391418	4,1378E-08	1,09968902	1,49138589
log fcc7	0,38939034	0,05658573	6,8814231	4,2905E-05	0,26330946	0,51547122
a/c	-0,86397807	0,0516701	-16,7210443	1,226E-08	-0,97910625	-0,74884989

Tabela D.3 - Estatística de regressão múltipla entre a resistência do concreto f_{cj} , a resistência do cimento f_{ccj} , e a relação água/cimento do concreto, na idade de 28 dias

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,96425166
R-Quadrado	0,92978126
R-quadrado ajustado	0,91807814
Erro padrão	0,02123287
Observações	15

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,07163521	0,03581761	79,4472812	1,1987E-07
Resíduo	12	0,00541002	0,00045083		
Total	14	0,07704523			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	1,61248283	0,25252845	6,38535118	3,4771E-05	1,06227061	2,16269504
log fcc28	0,23127018	0,15816871	1,46217399	0,16938403	-0,11334984	0,5758902
a/c	-0,84066252	0,06714424	-12,520248	3,0096E-08	-0,98695724	-0,69436779

BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, D.A. **Desing of concrete mixtures**. Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute Bulletin, n.1. Chicago, 1918, 20p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio**, NBR-5739. Rio de Janeiro, 1980, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**, NBR-6118. Rio de Janeiro, 1978, 76p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de concreto dosado em central**. NBR-7212. Rio de Janeiro, 1984, 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. NBR-7215. Rio de Janeiro, 1991, 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone**. NBR-7223. Rio de Janeiro, 1982, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto**. NBR-7211. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **Agregado - Determinação da composição granulométrica**. NBR-7217. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado compactado e seco - Determinação da massa unitária**. NBR-7810. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência**. NBR-8953. Rio de Janeiro, 1992, 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. NBR-9776. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da água da pasta de consistência normal**. NBR-11580. Rio de Janeiro, 1991, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Preparo, controle e recebimento**. NBR-12655. Rio de Janeiro, 1992, 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Preparo, controle e recebimento**. NBR-12655. Rio de Janeiro, 1996, 7p.

BASÍLIO, F.A.. **Influência do acabamento dos corpos-de-prova de concreto nos resultados obtidos em ensaios de compressão**. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ABCP. São Paulo, 1954, 4p.

BASÍLIO, F.A.. **Influência das betoneiras**. In: VII REUNIÃO PLENÁRIA NA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL. ABCP. São Paulo, 1958, 6p.

BUCHER, Hans R. E. & Rodrigues, Públio P.F.. **Correlações entre as resistências mecânicas do concreto**. In: Seminário sobre controle da resistência do concreto. São Paulo, jun/julho, 1983. Anais...Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, São Paulo, jun/julho 1983, 23p.

CAMARGO, W. M. **Fixação na dosagem das propriedades finais dos concretos: correlação entre as propriedades de composição do concreto fresco e as propriedades tecnológicas do concreto endurecido**. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, São Paulo, 1977. Anais. São Paulo, IBRACON, 1977, p. 15-45.

CARNEIRO, F. L.L. **Dosagem dos concretos plásticos**. Rio de Janeiro, INT, 1937, 50p.

CARNEIRO, F.L.L.B.. **As normas brasileiras de projeto de estruturas de concreto: História e evolução**. In: III SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, São Paulo, 1993, 10p.

COUTINHO, A.S.. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa, LNEC, 1993, V. II, 590p.

DIAZ, V.A.O.. **Métodos para dosificar mezclas de hormigón**. EDITORIAL CIENTÍFICO - TÉCNICA. Ciudad de La Havana, 1990, 100p.

ESPER, M.W.; SILVA, I.L.. **Fatores que influem na determinação da resistência mecânica da argamassa normal de cimento Portland**. In: SEMINÁRIOSOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO. IBRACON. São Paulo, 1983, 25p.

FUSCO, P. B.. **A influência da variabilidade da resistência do cimento na variabilidade da resistência do concreto**. In: SEMINÁRIO SOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO, São Paulo, 1979. Anais. São Paulo, IBRACON, 1979, 7p.

FUSCO, P.B. **Conceitos estatísticos associados à segurança das estruturas. estruturas de concreto**. Volume 2. Grêmio Politécnico. DPL. São Paulo, 1975, 235p.

HELENE, P.R.L.. **Propostas para calibragem dos capítulos 8, 15 e 16 da NBR 6118: dosagem e controle da resistência do concreto; aceitação da estrutura**. In: SEMINÁRIO SOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO. São Paulo, 1983. Anais. São Paulo, IBRACON, 1983, 28p.

- HELENE, P.R.L.. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros de dosagem e controle dos concretos de cimento Portland.** São Paulo, 1987, 173p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.R.L. , TERZIAN, P.. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.**Pini/SENAI, 1992, 313p.
- IPT. ESPAÇO IPT. **O ensaio mais reprodutível.** REVISTA IBRACON. São Paulo. Out./nov. , 1996, p. 39.
- LYSE, I. **Tests on consistency and strength of concrete having constant water content.** American Society for Testing and Materials, Proc., v. 32, part 2, p. 629-36, dec., 1932.
- MCINTOSH, J.D.. **Basic principles of concrete mix desing.** In: ANDREW, R.P., ed. Mix Design and Quality Control of Concrete: Proceedings of a Symposium. London, CCA, 1954, p. 3-27.
- MCINTOSH, J.D.. **Concrete and statistics.** London, Cr books, 1963, 139p.
- MEHTA, P.K. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais /** P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro - São Paulo: Pinni, 1994, 573p.
- NEVILLE, A.M.. **Propriedades do concreto.** Trad. Salvador Eugênio Giammusso. São Paulo, Pini, 1988.
- NEWTON JR., H.. ed. **A selection of historical american papers on concrete: 1876-1926.** Detroit, ACI, 1976.
- MACEDO, P.H.S.; FERREIRA JR., S.; ANDRADE F.,S.A.; GROSSI, L.C.; BALTHAZAR, M.A.B.. **Estudo de correlações entre as resistências do concreto à compressão axial, compressão diametral e flexão, em função do tipo de textura superficial do agregado graúdo.** In: 23 REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Florianópolis, 1988, p. 1029-1048.
- MUNHOZ, M.D.. **Compactação mecânica de corpos-de-prova de argamassa - NBR 7115.** In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, Pedro Leopoldo 1991, p. 459-474.
- PETRUCCI, E.G.R.. **Concreto de cimento Portland.** 12a ed.. São Paulo : Globo, 1993, 295p.
- PICCOLI, G.M.. **Influência de parâmetros do canteiro na resistência do concreto.** In: SEMINÁRIO SOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO. IBRACON, São Paulo, 1983, 20p.
- POWERS, C. **The properties of fresh concrete.** New York, Wiley, 1968, 664p.

- PRISZKULNIK, S. . **Aspectos reológicos do concreto fresco e sua dosagem.** in: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO. IBRACON. São paulo, maio 1977, 64p.
- PRISZKULNIK, S.. **O cimento e as variações volumétricas da pasta.** In: COLÓQUIO SOBRE "RETRAÇÃO E DEFORMAÇÃO LENTA DO CONCRETO"IBRACON, São Paulo, 1978, 84p.
- PRUDÊNCIO JR., L.R.; GAVA, G.P. & LENGLER, L.M.. **Estudo da variabilidade da resistência à compressão de concretos estruturais produzidos em canteiros de obra.** In: ENTAC 95 - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Volume II. Rio de janeiro, 1995, p. 769-778.
- RODRIGUES, P.F.. **Parâmetros da dosagem racional do concreto.** São Paulo, ABCP, 1984, 27p.
- RODRIGUES, P.F.. **Parâmetros de dosagem do concreto.** São Paulo, ABCP, 1995, 23p.
- SANTOS, L.M.. **Cálculo de concreto armado segundo a NB-1/76 e o CB/72.** Ed. Edgard Blucher, 1977.
- SOBRAL, H.S.. **Propriedades do concreto fresco.** ABCP. São Paulo, 1971, 14p.
- SOBRAL, H.S.. **Reologia e trabalhabilidade dos concretos.** 2a edição. Rev Atual. ABCP. São Paulo, 1990, 84p.
- SOBRAL, H. S. A.. **A generalização das técnicas de dosagem: método de Powers.** In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, São Paulo, 1977. Anais. São Paulo, IBRACON, 1977, p.21.
- TANGO, C.E.S.. **Contribuição ao estudo da resistência à compressão de cimentos e concretos.** São Paulo, 1983, 149p.. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- URIARTT, A.. **Notas sobre controle da resistência e condições de aceitação do concreto conforme a NB-1/78.** Engenharia 2.v.6, n. 18, p. 15-56, 1982.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA :

- ALVES, J.D.. **Manual de tecnologia do concreto.** 2a ed.. Goiânia : UFG, 1993, 194p.
- ANDRIOLO, F.R., SGARBOSA, B.C.. **Inspeção e controle de qualidade do concreto.** São Paulo : Newswork, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cálculo e execução de obras de concreto armado.** NB 1. Rio de Janeiro, 1960, 76p.

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete**, ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1990.v.1.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Controle estatístico do concreto**. ACI 214. Trad. Eduardo Santos Basílio. São Paulo, ABCP, 1978.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recomended practice for evaluation of compression test results of field concrete**. ACI 214. In: Manual of concrete practice. Detroit, 1986. v.1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO. **Regulamento para as construções em concreto armado**. *Cimento Armado*.v.3, b.13,p.7-21,jul.,1931.
- ANDREW, R.P., ed.. **Mix desing and quality control of concrete**. Proceedings of a symposium. London, CCA, 1954, p.548.
- BASÍLIO, F. A. **Influência do coeficiente de variação na dosagem dos concretos**. São Paulo, ABCP, 1954.(ET-3), 5p.
- BASÍLIO, F.A. **Controle de qualidade do concreto em obras correntes**. In: COLÓQUIO SOBRE CONTROLE DA QUALIDADE DO CONCRETO ESTRUTURAL. São Paulo, 1993. Anais. São Paulo, IBRACON, 1973, 27p.
- CAQUOT, A. **Le rôle des matériaux inertes dans le béton**. Mem. Soc. Ing. Civiles de France, v. 90, n. 4, p. 562, juil./oct., 1937.
- CARNEIRO, F.L.L.. **Os coeficientes de segurança e as tensões admissíveis em peças de concreto armado**. In: Symposium de Estruturas, Rio de Janeiro, 1944. Anais. Rio de janeiro, INT,1944,v.2, p.82-126.
- CORDON, W.A.. **History of proportioning**. In: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Proportioning Concrete Mixes. Detroit, 1974, p. 167-76. (SP,46).
- DRAFFIN, J.O. **A brief history of lime, cement and reinforced concrete**. Journal of the Western Society of Engineers, v. 48, n.1, p. 14-47, mar., 1943.
- FAURY, J.. **Le béton**, 3. ed Paris, Dunod, 1958.
- HELENE, P.R.L.. **Controle de qualidade do concreto**. São Paulo, 1981, 121p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.R.L.. **O ensaio e controle na maior economia do cimento**. A Construção São Paulo. São Paulo. v. 34, n. 1729, p. 8-14, mar., 1981.
- HELENE, P.R.L.. **Dosagem do concreto : proposta para calibragem da seção 8.3 da NBR 6118**. In: SEMINÁRIO SOBRE SUGESTÕES PARA REVISÃO DA NBR 6118, São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, IBRACON, 1986, 23p.

- HELENE, P.R.L., CARMONA FILHO A. **Proposta para calibragem dos capítulos 15 e 16 da NBR 6118.** In: SEMINÁRIO SOBRE SUGESTÕES PARA REVISÃO DA NBR 6118. Anais São Paulo, IBRACON, 1986, 25p.
- JOISEL, A. **Composition des bétons hydrauliques.** Annales de l'ITBTP, v.50,n.58,p.991-1065, oct.,1952.
- L'HERMITE, R. TOURNON, G. **La vibration du béton frais.** Paris, Cerilh, 1948. (Pub.; tech.,2), 75p.
- MURDOCK,L.J. **The workability of concrete.** Magazine of Concrete Research. v.12, n.36, p.233-44, nov.,1960.
- OLIVEIRA, A.P. **O controle de concreto numa construção.** Rio de Janeiro, INT, 1939, 21p.
- SÁ, P. **Os números representativos das características de um material.** Rio de Janeiro, INT, 1936, 29p.
- SCANDIUZZI, L. , ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus materiais : propriedades e ensaios.** São Paulo, Pini, 1986, 18p.
- SILVA JN.,J.F. **Contribuição para o estudo da dosagem dos concretos.** Revista Politécnica, n. 144, p.213-17, maio, 1944.
- SPARKES, K.N. **The control of concrete quality; a review of the present position.** In: ANDREW, R.P., ed. Mix design and quality control of concrete: proceedings of a symposium. London, CCA, 1954, p. 211-27.
- TORRES, A. F. **Dosagem dos concretos.** São Paulo, Escola Polytechnica, 1927.(Boletim EPUSP, 1.), 63p.
- VALLETTE, R. **Manuel de composition des bétons : méthode experimentale Vallette.** Paris, Eyrolles, 1964, 157p.
- VASCONCELOS, A.C. **Concreto no Brasil: recordes, realizações, história.** São Paulo, Copiare, 1985,p.47-55.
- WALKER, S. **Application of theory of probability to design of concrete for strength specifications.** Rock products. v. 47, n. 3, p.70-4, mar., 1944.