

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

Aldo J. Boggio

Porto Alegre
Dezembro 2000

ALDO J. BOGGIO

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

“Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da universidade federal do rio grande do sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia na modalidade acadêmico.”

Porto Alegre
Dezembro 2000

Boggio, Aldo J.

B674e Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos
de cimento Portland. / Aldo J. Boggio. – Porto Alegre : UFRGS, 2007.

Orientadora: Profª. Denise Carpena Coitinho Dal Molin.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Concreto – Dosagem. 2. Cimento Portland. I. Dal Molin, Denise Carpena
Coitinho. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de
Engenharia. III. Título.

CDU 691.32(043)

ALDO J. BOGGIO

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2000.

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dr.^a pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Francisco de Paula S. Lopes Gastal
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando A. Piazza Recena (CIEN TEC)
M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Hélio Adão Greven (UFRGS)
Dr. pela Universidade de Hannover

Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Vladimir Antônio Paulon (UNICAMP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Com todo meu amor e gratidão, dedico este trabalho, para meus pais, Franco (In memoriam) e Ada, para minha esposa Elenice e para meus filhos, Bruno e André.

*Não devemos esperar pela inspiração para começar qualquer coisa.
A ação sempre gera inspiração. A inspiração quase nunca gera ação.*

Frank Tibolt

AGRADECIMENTOS

É um dever e um prazer do ser humano reconhecer e agradecer, explicitamente, pelo incentivo, pela ajuda e pelo apoio, recebidos durante sua existência. Este agradecimento resulta imprescindível, quando se trata de momentos especiais ou de etapas marcantes da vida.

Quando o momento do agradecimento chega, corre-se o risco de esquecer os nomes de alguns daqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que as metas e os objetivos propostos fossem atingidos. Portanto, para não cometer injustiças, quero agradecer, primeiro e de forma geral, pela ajuda de todos os que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho. Assim feito, acho importante dar um destaque especial para minha família, para algumas pessoas mais próximas e, também, para as instituições e empresas que possibilitaram e viabilizaram a conclusão desta pesquisa. Então, para eles, meu reconhecimento:

Aos meus pais, Franco e Ada, que, com seu carinho e exemplo, serviram de modelo para definir minha personalidade e possibilitaram, através do seu esforço e dedicação, a minha educação básica e a minha formação profissional, no Uruguai.

À minha esposa, Elenice, que, com seu amor e compreensão, me apoiou sempre e, especialmente, me incentivou nos momentos difíceis.

Ao Estado brasileiro e às suas instituições de aperfeiçoamento profissional e pesquisa, CAPES e CNPq, que possibilitaram minha participação no curso de mestrado e financiaram a bolsa de estudos.

Ao Prof. Jarbas Milititsky, que, como Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, viabilizou minha incorporação ao Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (Convênio MRE/DCT-MEC/CAPES-MCT/CNPq).

Ao professor Paulo R. do Lago Helene, por despertar o interesse na área da tecnologia do concreto, pela definição do assunto da pesquisa e pela sua orientação inicial.

À professora e grande amiga Denise C. C. Dal Molin, pelos ensinamentos, pela competente e dedicada orientação, brindada durante as fases mais árduas e complexas do trabalho de dissertação e, especialmente, pela amizade e pelo permanente apoio e estímulo profissional.

À “minha irmã brasileira”, professora Ângela Borges Masuero, pela incondicional amizade, pelo afeto e pela ajuda dispensada durante todos estes anos.

Ao professor Fernando A. P. Recena, pela sua valiosa contribuição na minha formação profissional, pela visão prática quanto à aplicabilidade técnica do conhecimento acadêmico e, especialmente, pelas importantes contribuições e orientações dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do NORIE, que participaram decisivamente da minha formação acadêmica e fizeram contribuições importantes durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos laboratoristas do LEME: Fontes, André e “Teixerinha”, que ajudaram na preparação dos materiais e dos equipamentos e participaram ativamente da execução dos ensaios do programa experimental.

Aos colegas da turma do curso de Pós-Graduação: Ana Luiza Raabe, Ângela Borges, Sérgio B. Cassal, Renato Solano e Joca Petrucci, pelo afeto dispensado na oportunidade da minha incorporação ao grupo e pelo companheirismo manifestado durante o curso.

À Agda, Daniel, Edna, Patrícia, Héctor, Marco e demais colegas do NORIE, pela ajuda, pelo companheirismo e pela troca de conhecimentos e experiências.

À Camargo Corrêa Industrial, que doou o cimento necessário para os experimentos.

Só existe uma coisa melhor do que fazer novos amigos: conservar os velhos.

Elmer Letterman

RESUMO

BOGGIO, A. J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

O presente trabalho tem como objetivo fundamental realizar um estudo comparativo de cinco métodos de dosagem de concretos de cimento Portland, alguns deles, de grande divulgação e uso no Brasil. Os cinco métodos estudados, designados como ABCP/ACI, EPUSP/IPT, INT/Lobo Carneiro, ITERS/Petrucci e SNCF/Vallette, são apresentados inicialmente através dos seus respectivos fluxogramas de atividades. Posteriormente, cada um dos métodos é apresentado, em detalhe, através de um breve histórico e da consideração das variáveis e parâmetros envolvidos em cada uma das etapas, que estruturam seu desenvolvimento. Para a realização do estudo comparativo são discutidas, do ponto de vista macroscópico, as principais características e propriedades do concreto, no estado fresco e endurecido, focalizando-se a atenção nos aspectos ligados à trabalhabilidade e às formas de avaliá-la. A resistência à compressão é adotada como a principal, e mais representativa propriedade do concreto endurecido. O trabalho de comparação é objetivado através da definição e da adoção de parâmetros e variáveis, cujos valores são quantificados e tabelados para cada um dos métodos. O trabalho experimental está direcionado com o objetivo de entender o funcionamento dos métodos e verificar suas respostas, a partir da utilização dos mesmos materiais componentes. Nesta situação, comprova-se que, embora existam diferenças significativas entre os consumos de cimento dos concretos obtidos, todos os procedimentos de dosagem são aptos para fornecer misturas com consistências prefixadas e com trabalhabilidade adequada às necessidades de lançamento e adensamento por métodos convencionais. As misturas procuradas, com relações água/cimento prefixadas entre 0,45 e 0,75, atingiram valores de resistência compreendidos entre 20 e 45 MPa, na idade de 28 dias. A obtenção, pelos diferentes métodos, de traços com similares características de trabalhabilidade e resistência, leva à procura e ao estabelecimento de critérios e aspectos alternativos, alguns de avaliação subjetiva, que possibilitam a comparação e a seleção de métodos de dosagem. Os critérios e aspectos de comparação sugeridos podem ser instrumentos úteis quando se trata de selecionar, dentre vários métodos, com as mesmas potencialidades de resposta, aqueles mais adaptados a realidades e/ou necessidades específicas de aplicação.

Palavras-chave: concreto, métodos de dosagem, proporcionamento, trabalhabilidade.

ABSTRACT

BOGGIO, A. J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

Comparative study of mix-proportioning methods of Portland cement concrete

The present work has the main purpose of comparing five mix-proportioning methods of Portland cement concrete, some of them, with great divulgation and intensive use in Brazil. The five methods studied, known as ABCP/ACI, EPUSP/IPT, INT/Lobo Carneiro, ITERS/ Petrucci e SNCF/Valette, are initially introduced through a flow chart of activities. Afterwards, each method is fully described, including a brief history of its origins and considering the parameters and variables involved in each stage of the whole process. In order to develop the comparative study between methods, a discussion about the most important macroscopic characteristics and properties of fresh and hardened concrete, is established. Special attention is given to certain aspects related to workability and to the procedures for its measurement. The compressive strength is adopted as the main and most representative property of hardened concrete. The comparative work is objectified through the definition and the adoption of variables and parameters, whose values, are quantified for each method and organized in tables. The experimental work is managed with the goal of understanding the working principles of each method and to test the quality of its solutions, considering the same materials. As a result of the experimental work it's possible to conclude that, notwithstanding significant differences related to concrete cement content, all the proportioning procedures tested, are able to achieve mixtures, with prefixed consistency and workability suitable for placing and compacting through customary procedures. The mixtures obtained, with water/cement ratio prefixed between 0,45 and 0,75, reached resistance values between 20 and 45 MPa, at the age of 28 days. The attainment, trough different methods, of mix proportions, with similar characteristics, in terms of workability and resistance, leads to the establishment of criterions and alternative aspects, some of them of subjective assessment, useful to compare and to select mix-proportioning methods. The criterions and aspects suggested could be useful tools when it's necessary to choose, from a group, a certain method, considering it's adaptability to specific necessities and/or situations.

Key-words: concrete, mix-proportioning methods, proportioning, workability.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	16
1.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	18
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	19
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE DOSAGEM DE CONCRETOS E DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE PESQUISA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE DOSAGEM.....	22
2.2 METODOLOGIA DE ESTUDO DA DOSAGEM.....	30
2.2.1 Exigências de projeto	30
2.2.2 Condições de exposição e operação.....	30
2.2.3 Tipo de agregado disponível economicamente	31
2.2.4 Técnicas de execução.....	31
2.2.5 Custo mínimo	31
2.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO FRESCO, A SEREM CONSIDERADAS NO PROCESSO DE DOSAGEM	33
2.4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ENDURECIDO, QUE PODEM SER CONSIDERADAS NO PROCESSO DE DOSAGEM.....	40
3 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE DOSAGEM EMPREGADOS NO ESTUDO COMPARATIVO.....	46
3.1 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS ABCP/ACI	48
3.1.1 Histórico do método	48
3.1.2 Descrição do método.....	48
3.1.3 Desenvolvimento do método.....	49
3.2 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS EPUSP/IPT	57
3.2.1 Histórico do método	57
3.2.2 Fórmulas e parâmetros fundamentais considerados no método.....	57
3.2.3 Fórmulas complementares	60
3.2.4 Premissas e informações básicas para a aplicação do método de dosagem.....	60

3.2.5	Cálculo da relação água/cimento (x).....	61
3.2.6	Parte experimental do método.....	62
3.2.7	Confecção dos traços auxiliares (mais pobre e mais rico que 1:m).....	69
3.2.8	Execução das misturas experimentais dos traços “rico” e “pobre”.....	70
3.2.9	Execução das misturas experimentais dos traços “muito rico” e “muito pobre”.....	71
3.3	MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS INT/LOBO CARNEIRO.....	71
3.3.1	Histórico do método.....	71
3.3.2	Descrição do método.....	72
3.3.3	Desenvolvimento do método.....	74
3.4	MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS ITERS/ELÁDIO PETRUCCI.....	87
3.4.1	Histórico do método.....	87
3.4.2	Descrição do método.....	89
3.4.3	Desenvolvimento do método.....	91
3.5	MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS SNCF/ ROGER VALLETTE.....	95
3.5.1	Histórico do método.....	95
3.5.2	Descrição do método.....	97
3.5.3	Desenvolvimento do método.....	99
4	ATIVIDADES E ASPECTOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM E PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO.....	107
4.1	ATIVIDADES E PARÂMETROS CONSIDERADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE DOSAGEM.....	107
4.2	INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DOS AGREGADOS NAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	108
4.2.1	Seleção de parâmetros para avaliação das misturas de concreto.....	111
4.2.2	Características e parâmetros para avaliação do concreto endurecido.....	115
4.3	“DIAGRAMAS DE DOSAGEM” PARA CADA “FAMÍLIA” DE CONCRETOS... ..	117
4.4	CARACTERÍSTICAS E ASPECTOS QUALITATIVOS SELECIONADOS PARA AVALIAR OS DIFERENTES MÉTODOS EM ESTUDO.....	118
5	DESENVOLVIMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL.....	122
5.1	MATERIAIS EMPREGADOS NOS ENSAIOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM.....	122
5.1.1	Agregado graúdo.....	122
5.1.2	Agregado miúdo.....	123
5.1.3	Cimento.....	124
5.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS SEGUIDOS NO DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS.....	125
5.3	DESENVOLVIMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL DOS MÉTODOS.....	126

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	129
6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS DADOS EXPERIMENTAIS	129
6.2 CRITÉRIOS E ASPECTOS QUALITATIVOS QUE PODEM AUXILIAR NA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DOSAGEM	148
6.3 CONSIDERAÇÕES PARTICULARES SOBRE CADA UM DOS DIFERENTES MÉTODOS ESTUDADOS	150
6.3.1 Considerações sobre o método da ABCP.....	150
6.3.2 Considerações sobre o método EPUSP/IPT.....	153
6.3.3 Considerações sobre o método do INT (desenvolvido pelo Prof. Lobo Carneiro)...	156
6.3.4 Considerações sobre o método do ITERS (desenvolvido pelo Prof. Petrucci).....	158
6.3.5 Considerações sobre o método da SCNF (desenvolvido por Roger Vallette)	162
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	165
7.2 RECOMENDAÇÕES PARA A ESCOLHA DE MÉTODOS DE DOSAGEM EM FUNÇÃO DE SITUAÇÕES PARTICULARES OU DE UM CONTEXTO ESPECÍFICO	168
7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	170
REFERÊNCIAS.....	171
APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: fatores e parâmetros básicos intervenientes no processo de dosagem	24
Figura 2: correlação entre índices de consistência de concreto, para diferentes equipamentos e sistemas de ensaio	37
(fonte: PRIZSKULNIK, 1977).....	37
Figura 3: principais fatores que influem sobre a trabalhabilidade dos concretos.....	38
(fonte: GIAMMUSO, 1995)	38
Figura 4: fluxograma simplificado do método de dosagem da ABCP	49
Figura 5: gráfico para a determinação da relação x em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias	53
Figura 6: fluxograma simplificado do método de dosagem EPUSP/IPT	59
Figura 7: parâmetros e fatores que influenciam a consistência do concreto (fonte: TANGO, 1993)	60
Figura 8: fluxograma simplificado do método de dosagem do INT desenvolvido pelo Prof. F. L. Lobo Carneiro	73
Figura 9: curvas de Abrams para as idades de 7 e 28 dias para cimento Portland comum, marca Mauá, do Rio de Janeiro	75
Figura 10: curvas de Abrams para 3, 7 e 28 dias - Cimento ARATU	76
Figura 11: volume total de água em relação ao total de materiais secos para concretos com mesma consistência e com diferentes relações agregado/cimento (m).....	78
Figura 12: relação entre m e x para diferentes relações H e consumos C	80
Figura 13: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 75$ mm.....	82
Figura 14: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 50$ mm.....	82
Figura 15: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 38$ mm.....	83
Figura 16: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 25$ mm.....	83
Figura 17: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 19$ mm.....	84
Figura 18: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 9,5$ mm.....	84
Figura 19: fluxograma simplificado do método de dosagem do ITERS desenvolvido pelo Prof. Eládio Petrucci	90
Figura 20: curvas de trabalhabilidade traçadas a partir dos índices de remoldagem obtidos para traços de concretos, com igual m e diferentes relações a/m	93
Figura 21: fluxograma simplificado do método de dosagem do SNCF desenvolvido pelo Eng. Roger Vallette	98
Figura 22: atividades e parâmetros que devem ser considerados em estudos de dosagem de concretos para obras correntes	108
Figura 23: diagrama de dosagem para uma família de concretos com mesmo abatimento e mesmo teor de argamassa	118

Figura 24: comparação das resistências obtidas experimentalmente pelos diversos métodos, para a idade de 7 dias.....	135
Figura 25: comparação das resistências obtidas experimentalmente pelos diversos métodos, para a idade de 28 dias.....	135
Figura 26: comparação das resistências obtidas pelas equações de regressão correspondentes aos diversos métodos, para a idade de 7 dias.....	140
Figura 27: comparação das resistências obtidas pelas equações de regressão correspondentes aos diversos métodos, para a idade de 28 dias.....	141
Figura 28: comparação dos consumos de cimento para concretos obtidos pelos diferentes métodos, para resistências à compressão prefixadas, na idade de 28 dias	143
Figura 29: diagrama de dosagem, construído para os cinco métodos em conjunto, com as curvas de Abrams correspondentes às idades de 7 dias	144
Figura 30: diagrama de dosagem, construído para os cinco métodos em conjunto, com as curvas de Abrams correspondentes às idades de 28 dias	145
Figura 31: gráfico da ANOVA para a resistência à compressão aos 7 dias	179
Figura 32: gráfico da ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias	180
Figura 33: gráfico da ANOVA para o consumo de cimento	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores de abatimentos recomendados em função do tipo de obra (ACI 211.1-81)	50
Tabela 2: quantidade de água de amassamento do concreto em função do abatimento e da Dimensão máxima característica do agregado	51
Tabela 3: quantidade de água da mistura de concreto, com e sem ar incorporado, em função do abatimento e da Dimensão máxima característica do agregado (ACI 211.1-81)	52
Tabela 4: relação água/cimento x em função do tipo de estrutura e das condições de exposição (ACI 211.1-81).....	54
Tabela 5: volume compactado seco (V_{CS}) de agregado graúdo por m^3 de concreto, função do Módulo de finura da areia e da Dimensão máx. car. (D_{mc}) do agregado graúdo.....	55
Tabela 6: estimativa da relação água/cimento para diferentes tipos e classes de cimentos	62
Tabela 7: estimativa do teor agregado/cimento (m) em função da D_{mc} do agregado e da relação água/cimento (x)	63
Tabela 8: quantidades de cimento e areia que devem ser adicionadas para misturas com teores de argamassa α crescentes, para 30 kg de brita.....	67
Tabela 9: características do concreto	67
Tabela 10: abatimento	67
Tabela 11: quantidade de agregado graúdo na mistura.....	68
Tabela 12: consumo de água e de cimento.....	68
Tabela 13: traços dos concretos: pobre, normal e rico com diferentes teores de argamassa	70
Tabela 14: relações água/cimento recomendadas (em litros/kg e em litros/saco de 42 kg de cimento) em função das condições de exposição e da natureza da obra.....	77
Tabela 15: valores de H (%) em função da Dimensão máxima característica do agregado (D_{mc}) e do tipo de adensamento adotado (manual ou vibratório)	79
Tabela 16: valores de H (%) em função da D_{mc} e do tipo de adensamento	79
Tabela 17: valores numéricos que possibilitam a construção das curvas granulométricas ótimas para diferentes dimensões máximas características de agregados, considerando dois tipos de adensamento	81
Tabela 18: Valores iniciais das porcentagens de cada tamanho de agregado, para misturas com uma dada Dimensão máxima característica (D_{mc})	85
Tabela 19: relações H (%) em função do tipo de adensamento e do tipo de agregado graúdo.....	88
Tabela 20: relações a/m em função do tipo de areia e do tipo de agregado graúdo.....	92
Tabela 21: massas específicas e massas unitárias dos materiais componentes do concreto.....	100
Tabela 22: águas de molhagem (em massa e em volume) para os diferentes materiais.....	101
Tabela 23: compacidades, seca e molhada, dos materiais componentes do concreto	101
Tabela 24: parâmetros para caracterização das misturas de concreto.....	115
Tabela 25: critérios e aspectos para comparar métodos de dosagem	121

Tabela 26: características físicas das britas de graduação 1 e 2	123
Tabela 27: composições granulométricas das britas de graduação 1 e 2	123
Tabela 28: características físicas da areia natural do “Rio Guaíba”	124
Tabela 29: composição granulométrica da areia natural do “Rio Guaíba”	124
Tabela 30: características físicas do cimento Portland CP II E - 32	124
Tabela 31: características químicas do cimento Portland CP II E - 32	125
Tabela 32: traços obtidos experimentalmente, pelos cinco métodos de dosagem, para cada relação água/cimento (x), com seus respectivos parâmetros de caracterização	130
Tabela 33: resistências à compressão aos 7 e 28 dias, correspondentes aos traços obtidos, por cada um dos métodos, a partir das relações (x) ordenadas por valores crescentes	133
Tabela 34: resistências dos exemplares, aos 7 e 28 dias, e valores dos crescimentos entre as idades de 7 e 28 dias, para cada relação x	134
Tabela 35: coeficientes das regressões de Abrams, expressas na forma exponencial, para as idades de 7 e 28 dias, determinados a partir das resistências máximas, obtidas pelos quatro traços dosados, por cada um dos cinco métodos estudados	137
Tabela 36: coeficientes das equações, obtidas para cada um dos métodos, que possibilitam a determinação das relações água/cimento a partir das regressões de Abrams, expressas na forma logarítmica	138
Tabela 37: coeficientes de Lyse	138
Tabela 38: coeficientes de Molinari	138
Tabela 39: valores das resistências f_c , dos consumos C e das relações m , obtidas a partir dos ensaios em laboratório e através das regressões determinadas estatisticamente	139
Tabela 40: valores das resistências, dos desvios-padrão, dos coeficientes de variação e das diferenças relativas entre as resistências máximas e mínimas, calculadas, a partir das equações de regressão, dos cinco métodos em estudo	140
Tabela 41: consumos de cimento, correspondentes aos traços dosados, através dos cinco métodos estudados, para resistências prefixadas aos 28 dias	141
Tabela 42: consumos de cimento, ordenados em forma decrescente, correspondentes aos traços dosados, através dos cinco métodos estudados, para resistências prefixadas aos 28 dias	142
Tabela 43: diferenças absolutas (kg/m^3) e relativas (%) entre os consumos de cimento, correspondentes aos traços com resistências prefixadas, adotando como valores de referência os consumos de cimento obtidos pelo método do SNCF	142
Tabela 44: fatores de eficiência, f_{c28}/C (MPa/kg) e C/f_{c28} (kg/MPa), calculados para os concretos dosados pelos cinco métodos, com resistências prefixadas entre 20 e 40 MPa	147
Tabela 45: critérios e aspectos usados para comparar os métodos de dosagem	149
Tabela 46: análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias	179
Tabela 47: análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias	179
Tabela 48: análise de variância dos resultados do consumo de cimento	180

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O desenvolvimento histórico da tecnologia do Concreto mostra que, nos últimos duzentos anos, um significativo número de pesquisadores e técnicos de diversos países têm dedicado sua inteligência e investido seu tempo e grande quantidade de recursos materiais no estudo e desenvolvimento dos produtos constituintes do concreto, no aprimoramento das técnicas de produção e no entendimento da composição e da estrutura resultante das pastas, argamassas e misturas de cimentos e agregados (HELENE, 1987). Os enormes volumes de concreto produzidos, com materiais, equipamentos e procedimentos de controle diversos, têm sido aplicados nos mais variados tipos de obras ao redor do mundo e evidenciam a importância mundial deste produto, considerado hoje em dia como um dos materiais tradicionais da construção civil. O consenso, quanto a sua viabilidade econômica e sua capacidade de utilização técnica, para os mais diversos fins, justifica o permanente interesse no seu estudo e incentiva o investimento em pesquisas que possibilitam sua evolução, através da melhoria de suas propriedades quanto à trabalhabilidade, resistência e durabilidade. Normalmente, pode-se considerar, o concreto, um material fácil de obter e de baixo custo, pois sua tecnologia de produção é bastante simples e seus principais constituintes, o cimento Portland e os agregados, são relativamente baratos e comumente disponíveis em quase todas as regiões do mundo. Em termos de conservação de energia e recursos naturais, a produção do concreto, comparada com a maioria dos outros materiais de engenharia, é bastante vantajosa, permitindo também, a reciclagem de grande quantidade de resíduos industriais em substituição parcial do material cimentante e dos agregados (MALHOTRA, 1987; MEHTA, 1999; MOURA et al., 1999; RODRIGUEZ; DAL MOLIN, 1999).

A obtenção de bons desempenhos, nas propriedades exigíveis ao concreto, dependerá tanto dos materiais componentes como das proporções entre eles e da tecnologia e recursos humanos disponíveis para o preparo e o controle do material. A evolução do concreto, como material, poderá desenvolver-se, também, através da incorporação de produtos metálicos, sintéticos ou minerais em forma de agregados, fibras ou adições ou, ainda, pelo emprego mais intenso de diversos aditivos químicos para fins específicos. Como destaca Cormon (1979), a produção de concretos está cada vez mais generalizada, podendo-se adotar diferentes classificações em função

de seus usos e aplicações (estruturais, massa, de enchimento, resistentes ao fogo, de proteção contra radiações), em função de suas propriedades e características reológicas, para serem manuseados, transportados e colocados em obra (através de lançamento convencional, bombeamento, projeção e injeção) e em função de propriedades específicas procuradas no concreto endurecido (baixa permeabilidade, elevado módulo de deformação, elevada energia de fratura).

A necessidade econômica de reduzir custos na produção, na execução e na manutenção das obras de concreto (diminuição do consumo de cimento e da demanda total de energia) levam a otimizar o processo produtivo de maneira global com o intuito de obter um produto de características e propriedades uniformes, com desempenho e durabilidade acordes com as especificações do projeto e da obra e com custo adequado, às possibilidades do mercado consumidor.

Uma das etapas básicas do processo produtivo do concreto, que procura satisfazer seletivamente algumas das necessidades anteriormente descritas, é, sem dúvida, a escolha e o proporcionamento dos seus materiais constituintes. Os métodos de dosagem, entendidos como os estudos desenvolvidos para selecionar e fixar as proporções relativas dos materiais componentes dos concretos, surgem, portanto, como ferramentas básicas imprescindíveis para conseguir melhores desempenhos físico-mecânicos e maior durabilidade, possibilitando níveis superiores de qualidade, com custos significativamente menores.

A importância da abordagem de um estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos, para fins estruturais, fundamenta-se no fato de que, embora exista extensa bibliografia nacional (Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 1965; SILVA et al. 1988; ESPER; ESSAROS, 1988; NASCIMENTO et al, 1988; RODRIGUEZ FILHO et al., 1988; RAABE; CASSAL, 1989; BOGGIO; BORGES, 1989; FIGUEIREDO, 1990; MEKBEKIAN et al., 1990) e internacional (NEVILLE; BROOKS, 1987; ALAEJOS; CÁNOVAS, 1992; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, 1994a; NEVILLE, 1997) com a descrição detalhada de um número grande de métodos e procedimentos de proporcionamento de concretos, existem poucos estudos teóricos e/ou experimentais que estabeleçam comparações entre as propostas de dosagem apresentadas e que mostrem, através de exemplos práticos, as características e propriedades das misturas obtidas por cada um dos diferentes métodos, quando são empregados os mesmos materiais disponíveis numa determinada região. O enquadramento do estudo comparativo de métodos de dosagem dentro da realidade brasileira surge como uma opção lógica e necessária quando se reflete sobre a observação de Helene (1987) que aponta que “a fragmentação dos

métodos nacionais de dosagem impediram, até o presente, que os aspectos comuns pudessem ser aprofundados e uniformizados”. Esta consideração torna-se um importante fator motivador para a realização desta pesquisa que pretende, entre outros objetivos, evidenciar alguns dos aspectos e características comuns dos principais métodos de dosagem empregados no Brasil.

1.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para desenvolver o trabalho de pesquisa parte-se da seleção de cinco procedimentos de proporcionamento aplicados no Brasil que estão sustentados em diversas filosofias e princípios de funcionamento. Os cinco métodos de dosagem, desenvolvidos originalmente visando, principalmente, a obtenção de concretos destinados para usos em obras de estruturas correntes, foram escolhidos levando em conta tanto sua divulgação quanto suas possibilidades de utilização dentro do território nacional e eles são conhecidos pelos nomes de seus criadores e/ou pelos nomes das instituições nas quais os pesquisadores desenvolveram suas atividades. Os cinco métodos estudados são: método da ABCP/ACI (desenvolvido pelo American Concrete Institute e adaptado para à realidade nacional na Associação Brasileira de Cimento Portland pelo engenheiro Públio Penna Firme Rodriguez); método do INT (desenvolvido a partir de 1937 no Instituto Nacional de Tecnologia do Rio de Janeiro pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro); método IPT/EPUSP (desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e posteriormente adaptado e divulgado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo); método do ITERS (desenvolvido a partir de 1951 no Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul pelo Prof. Eládio Petrucci); método da SNCF (desenvolvido a partir de 1948 na Société Nationale des Chemins de Fer Français pelo engenheiro Roger Vallette e aplicado no Brasil, pelo Eng. João Gaspar Djanikian, na dosagem do concreto do Sifão do Rio Pinheiros, em São Paulo).

A partir do estudo teórico de cada um dos métodos abordados, apresentam-se de forma detalhada suas etapas de trabalho, seus princípios de funcionamento, e os procedimentos e equipamentos usados nas atividades experimentais. A análise teórica dos métodos possibilita, também, a determinação das principais variáveis e parâmetros envolvidos no processo.

No desenvolvimento da parte experimental do trabalho são realizados ensaios de proporcionamento de concretos, produzidos com cimento Portland Composto do tipo CPII E - 32 (NBR 11578 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1991a)), agregados graúdos britados de peso normal (de natureza basáltica) e areias naturais de rio (de natureza quartzosa). Na dosagem dos concretos não são incorporadas nem adições nem aditivos.

As aplicações experimentais resultam em misturas de consistência plástica, com abatimentos no ensaio do tronco de cone (NBR 7223 (ABNT, 1982a)) variando entre 60 e 80 mm e com resistências à compressão, aos 28 dias, compreendidas entre 15 e 45 MPa (grupo I de resistência da NBR 8953 (ABNT, 1992)), o que as classifica nas categorias de resistências baixas e moderadas (ALAEJOS; CÁNOVAS, 1992; CEB, 1990; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Como primeiro objetivo geral do trabalho de dissertação busca-se apresentar e explicar, de maneira padronizada e didática, os princípios teóricos e as atividades envolvidas em cada um dos métodos de dosagem abordados. A partir da descrição detalhada de cada um dos procedimentos de proporcionamento procura-se, como segundo objetivo geral, desenvolver uma fase experimental que possibilite compreender plenamente os aspectos funcionais e operacionais e que permita verificar e comparar as respostas dos respectivos métodos, materializadas através de misturas de concreto, avaliadas nos estados fresco e endurecido.

Na análise da parte experimental do trabalho procura-se, como um dos objetivos específicos, a verificação da adequação dos métodos escolhidos, para se obter, com os materiais disponíveis na região de Porto Alegre, traços de concreto de consistência plástica e trabalhabilidade adequada às necessidades de lançamento e adensamento, por métodos convencionais.

Outros objetivos perseguidos são verificar, através da análise teórica e prática dos métodos, as possibilidades de incorporar outros componentes como aditivos e adições e avaliar sua capacidade de adaptação às variações dos materiais empregados no proporcionamento. Na aplicação experimental, dos procedimentos estabelecidos pelos métodos, procura-se verificar a maior ou menor influência do tecnologista na determinação dos traços finais.

Como encerramento do estudo da problemática geral do proporcionamento de concretos, pretende-se apresentar uma série de critérios e aspectos qualitativos que possibilitem comparar diferentes procedimentos de dosagem e que permitam, aos tecnologistas e engenheiros, escolher dentre diversos métodos, àqueles que mais se adaptem às situações e/ou necessidades específicas.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Considerando os dois níveis de tratamento teórico dos problemas relativos à dosagem de concretos, definidos por Camargo (1977), pode-se dizer que a abordagem desta dissertação

enquadra-se basicamente no primeiro nível, onde são tratadas as dificuldades inerentes ao proporcionamento dos componentes do concreto, buscando obter misturas frescas trabalháveis, com características que permitam seu correto lançamento e adensamento nas fôrmas e visando atender basicamente, no estado endurecido, as exigências de resistência à compressão e de durabilidade condicionadas pela fixação da relação água/cimento. Portanto não será abordado o segundo nível de tratamento da dosagem, que objetiva a fixação das propriedades desejáveis no concreto endurecido (módulo de deformação, energia de fratura, profundidade de carbonatação) (MONTEIRO et al., 1993). O concreto endurecido será estudado apenas em nível macroscópico, considerando-o como um material bifásico no qual os agregados (miúdos e graúdos) estão dispersos numa matriz de cimento (constituída pelo conjunto da pasta e espaços cheios de ar). Nada será falado sobre as complexidades da estrutura do concreto que aparecem em nível microscópico nem sobre os aspectos singulares das três fases possíveis de serem consideradas no material endurecido (fase constituída pela matriz de pasta de cimento, fase dos agregados e interface pasta de cimento-agregado, denominada de "Zona de Transição") (PAULON; MONTEIRO, 1995).

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para abordar os fundamentos do assunto da dosagem de concretos, e na tentativa de ordenar idéias e sistematizar as informações e dados coletados durante o estudo, estruturou-se o trabalho escrito da dissertação da forma apresentada a seguir:

No capítulo 2, são realizadas considerações gerais sobre dosagem, incluindo conceitos, definições e fatores tecnológicos, econômicos e culturais que influenciam o desenvolvimento e o uso dos diferentes métodos de proporcionamento. Para poder delimitar o campo de trabalho da dissertação define-se o nível de tratamento teórico dos problemas de dosagem abordados e os tipos e usos dos concretos a serem estudados. São apresentados, também, os parâmetros e os equipamentos que podem ser considerados no processo de proporcionamento e as características e propriedades finais, procuradas nas misturas de concreto, nos estados fresco e endurecido.

Definido o escopo do trabalho e seguindo as linhas de ação indicadas no capítulo 2, realizam-se, no capítulo 3, considerações que justificam a seleção dos métodos a serem estudados e explicam-se detalhadamente, as etapas e procedimentos de cada um dos métodos escolhidos. O entendimento da proposta de trabalho de cada método, a compreensão das suas particularidades e a percepção das suas limitações de uso alertam, pelo menos de uma forma subjetiva, quanto às

possibilidades de utilização, condicionadas aos prazos e materiais disponíveis, aos equipamentos empregados, ao tipo de obra a ser executada e aos recursos humanos envolvidos.

No capítulo 4, são estudadas as atividades consideradas no desenvolvimento dos métodos de dosagem e são avaliados e selecionados os parâmetros utilizados para caracterizar as misturas de concreto, no estado fresco e endurecido. Posteriormente são apresentados os “diagramas de dosagem” para cada “família” de concretos, produzidos com os mesmos materiais, o mesmo teor de argamassa α (%) e a mesma consistência.

Neste capítulo são estruturadas duas tabelas, uma, contendo parâmetros usados para a caracterização das misturas de concreto e, a outra, contendo critérios e aspectos qualitativos de comparação dos métodos de proporcionamento.

No capítulo 5 são caracterizados os materiais empregados nos ensaios de proporcionamento e são descritos os equipamentos utilizados na execução das dosagens. A parte experimental consta de duas etapas durante as quais são desenvolvidos ensaios de proporcionamento através dos cinco métodos apresentados no capítulo 3.

No capítulo 6, os dados experimentais são apresentados através de diversas tabelas e figuras que facilitam a realização de comentários e observações, de caráter particular e geral, sobre diversos aspectos relacionados com os parâmetros de caracterização dos traços determinados pelos cinco métodos. São introduzidas também as ferramentas matemáticas e os programas estatísticos utilizados na análise dos resultados das resistências à compressão, obtidas nas idades de 7 e 28 dias. Na impossibilidade de evidenciar diferenças quantitativas entre os parâmetros e as características mecânicas, correspondentes aos traços fornecidos pelos diferentes métodos, aplica-se, como procedimento alternativo de comparação, o conjunto de critérios e aspectos qualitativos apresentados na parte final do capítulo 4.

Por último, no capítulo 7 são apresentadas, em primeiro lugar, algumas considerações gerais sobre o problema da dosagem e sobre o desempenho dos cinco métodos de proporcionamento considerados. Também são efetuadas algumas recomendações para a escolha de métodos de dosagem, em função de situações particulares ou de um contexto específico. No encerramento, do capítulo e da dissertação, são apresentadas sugestões para futuras pesquisas dentro da área específica de dosagem.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE DOSAGEM DE CONCRETOS E DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE PESQUISA DA DISSERTAÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE DOSAGEM

Dentro do contexto amplo designado por **Tecnologia do concreto**, Neville (1997) apresenta a expressão **Dosagem** com três possíveis significados:

a) No sentido mais abrangente seria o estudo direcionado para a escolha dos materiais constituintes e a fixação de suas proporções ou quantidades relativas nas misturas de concreto para assegurar um determinado desempenho (*mix design*, na língua inglesa).

b) Num conceito menos amplo, a dosagem do concreto, seria o procedimento destinado a fixar as proporções dos materiais que deverão ser misturados no preparo do concreto (*mix proportioning*, conforme denominação norte-americana, ou *mix selection*, conforme denominação adotada por Giannusso na tradução do livro de Neville (1997)).

c) Como definição mais restrita a dosagem do concreto poderia ser entendida apenas como “a quantificação dos materiais componentes” durante a produção da mistura do concreto ou seja, a aplicação do “traço de concreto” (*mix proportions*).

Para Mehta e Monteiro (1994):

O objetivo amplo do proporcionamento do concreto pode expressar-se resumidamente como a escolha dos materiais adequados entre aqueles disponíveis e a determinação da combinação mais econômica destes que produza um concreto que atenda características de desempenho mínimo estabelecidas.

Priszkulnik (1977) estabelece que:

O objetivo da dosagem do concreto é a recomendação da proporção adequada de aglomerante, agregados miúdo e graúdo, água, e, eventualmente, aditivos, visando a obtenção de um concreto que atenda as seguintes condições:

- a) no estado fresco: seja trabalhável e mantenha sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento;
- b) no estado endurecido: apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural (resistências mecânicas, retração, deformação lenta) acordadas com as especificações de cálculo e a aparência exigida no projeto arquitetônico;
- c) seja durável, mantendo 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.

Sem esquecer a importância do fator econômico, a visão de Priszkulnik, sobre os objetivos de um processo de dosagem, poderia ser resumida através das palavras de Verçoza (1986) que diz que: “um concreto bem dosado deverá ter a resistência necessária na idade determinada, trabalhabilidade adequada no momento de colocação em obra e durabilidade no meio onde ficará.”

Vasconcellos (1977) considera que dosar um concreto:

É, no sentido mais lato da palavra, quantificar seus componentes de forma que após sua correta execução (medição; mistura; transporte; lançamento; adensamento e cura) e das reações de hidratação da pasta de cimento e água, resulte um material pétreo que apresente propriedades (resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade) que o capacitem a constituir-se em parte integrante e útil de uma peça isolada ou de uma estrutura.

O processo de dosagem deve ser abordado no sentido mais amplo quando se trata do desenvolvimento da tecnologia do concreto, considerando-se um vasto campo de trabalho que envolve o estudo e a seleção dos materiais e o conhecimento das etapas de produção e controle com as quais interage de forma intensa. O processo de execução, especialmente nas atividades de transporte, lançamento e adensamento, constitui-se numa informação fundamental para a atividade de dosagem, já que problemas, observados durante a produção, podem, muitas vezes, resolver-se por ajustes do traço de concreto. A atividade de dosagem possui grande importância pois não somente estabelece as proporções dos materiais constituintes do concreto como também determina as características necessárias para que seja alcançado um desempenho satisfatório do produto final, em termos de qualidade e de economia. A qualidade do concreto considerado como produto resultante não pode ser dissociada da qualidade dos seus componentes básicos (cimento, agregados, água e opcionalmente adições e aditivos) assim como a questões inerentes à obra a ser executada. Neste aspecto devem ser considerados diversos fatores, entre os que podem ser citados: os tipos e as dimensões das fôrmas das peças a serem moldadas, sua taxa de armadura, o diâmetro e a posição das barras e as condições e os equipamentos de transporte, lançamento, adensamento e cura. Devido ao grande número de variáveis intervenientes nas atividades de dosagem, torna-se difícil resolver, de maneira genérica, as questões do proporcionamento dos concretos. Este fato obriga a fixar uma parte das variáveis e parâmetros envolvidos com o objetivo de conseguir soluções, de caráter restrito, que forneçam respostas viáveis ao problema proposto.

Na Figura 1 são apresentados os fatores e parâmetros básicos que devem ser considerados no processo de dosagem.

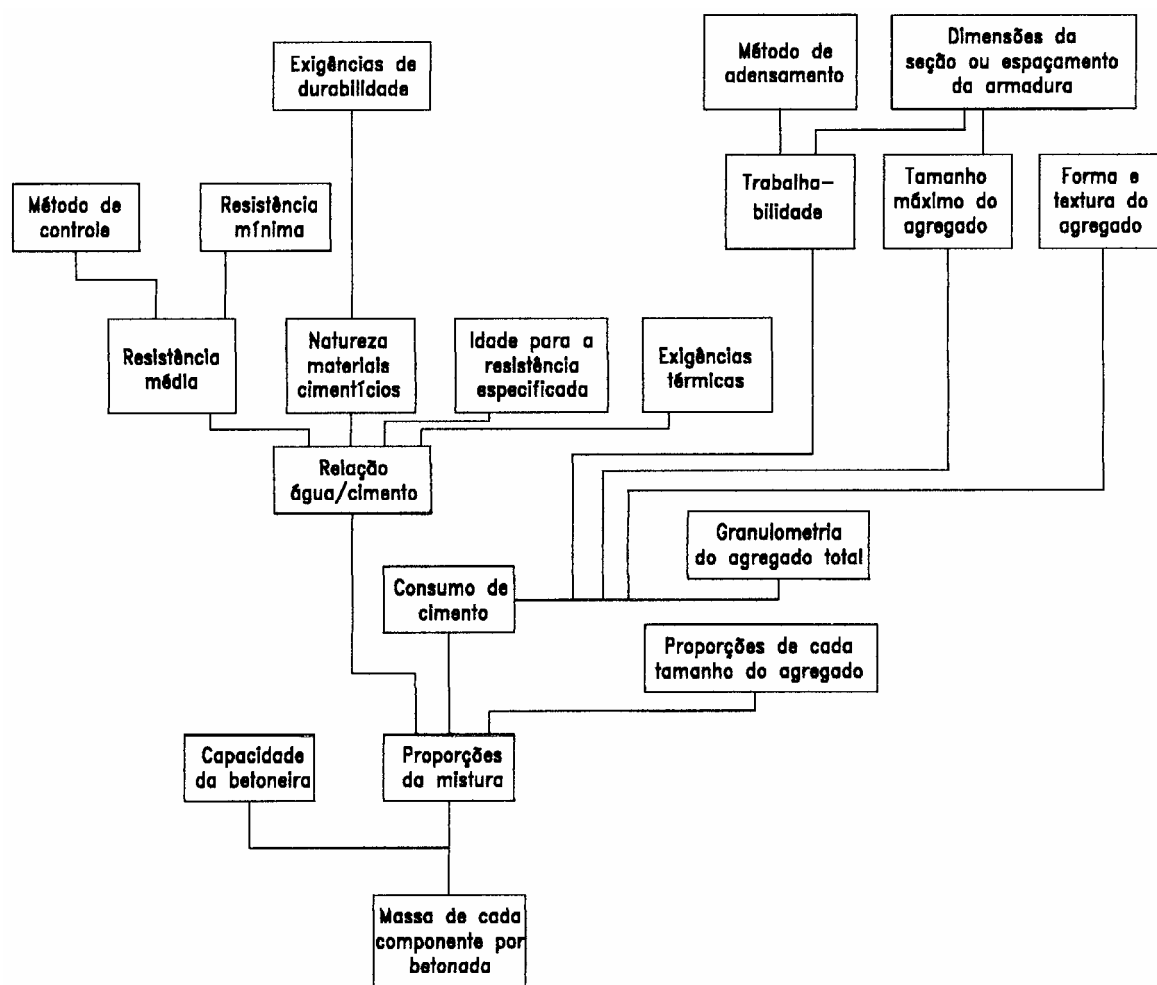


Figura 1: fatores e parâmetros básicos intervenientes no processo de dosagem
(fonte: NEVILLE, 1997)

O processo de dosagem dificilmente poderá ser completamente transformado numa rotina ou desenvolvido de forma automática. Entretanto, quanto mais completos sejam o conhecimento e o domínio das variáveis e fatores envolvidos, e quanto mais ampla a experiência com os materiais e equipamentos empregados, maiores serão as chances de conseguir concretos que satisfaçam as necessidades existentes no vasto campo da engenharia civil.

A partir das considerações realizadas acima parece oportuno referenciar a Basílio (1977) que define a dosagem de concreto como: “a técnica e a arte de fixar as quantidades dos seus elementos componentes de modo a garantir-lhe as características exigidas na fase plástica e na fase após endurecimento”. Esta visão sobre o proporcionamento dos materiais do concreto, que mistura arte, técnica e ciência, é compartilhada por Mehta (1994), quem afirma que o entendimento dos princípios básicos, junto com alguma prática, possibilita o exercício da “arte de dosar”, que consiste na habilidade de contrabalançar características e/ou propriedades que tendem a ser

afetadas em sentidos opostos pelas mudanças de determinadas variáveis. Neste sentido, exemplifica-se que o aumento da quantidade de água de mistura para um determinado consumo de cimento pode aumentar, por um lado, a fluidez da massa de concreto, melhorando sua trabalhabilidade, sendo que por outro, tende a diminuir a resistência do material endurecido. Características como durabilidade e economia também devem ser ponderadas para obter uma solução equilibrada do proporcionamento do concreto. O entendimento do conceito básico da interdependência das variáveis e parâmetros envolvidos na dosagem e a enorme dificuldade de equacionar numericamente as relações existentes alertam, ao profissional encarregado da atividade de dosar, sobre a importância de uma atitude responsável e criteriosa na abordagem de uma tarefa que pode, em certos casos, atingir um alto grau de complexidade.

Durante muitos anos a dosagem de concreto foi considerada como uma técnica bastante simples que visava atender, como requisitos mais importantes, uma trabalhabilidade adequada do concreto fresco e uma resistência à compressão do concreto endurecido que, fixada com maior ou menor precisão, devia atingir valores mínimos a uma idade determinada. A dosagem chamada de **“empírica”** (fundamentada em experiências anteriores ou na tradição, sem ter necessariamente embasamento científico) inicialmente atendia aqueles objetivos, mas ela foi sendo substituída gradualmente pelos métodos de dosagem chamados de **“racionais”** ou **“experimentais”**, baseados em regras e procedimentos práticos deduzidos de leis científicas e fundamentados em ensaios experimentais. O termo **“racional”** que se usa para designar os métodos, parte do entendimento que os conhecimentos aplicados na dosagem, baseados em princípios e/ou leis deduzidas pelo método científico, são estruturados logicamente de forma a estabelecer uma seqüência de atividades que possibilitam atingir o objetivo de proporcionamento proposto. Verçozza (1986) propõe como denominação mais correta a expressão **“dosagem tecnológica”** no sentido que “ela se baseia em experiência, ensaios e conhecimentos científicos”.

Vasconcellos (1977) estabelece que um estudo de dosagem racional deve-se basear nos três itens fundamentais apresentados a seguir:

- a) Fixação de medidas que assegurem, com uma margem de erro previamente fixada, as propriedades do concreto após seu endurecimento, satisfazendo suas especificações de qualidade;
- b) fixação de medidas que assegurem a trabalhabilidade indispensável à perfeita e fácil moldagem das peças, garantindo a máxima homogeneidade do concreto, ao término das operações;
- c) fixação de medidas que permitam, sem prejuízo das anteriores, a maior economia, na produção do concreto.

O termo “**experimental**” refere-se à necessidade de confirmar e aumentar, através de ensaios e tentativas, o conhecimento sobre o concreto, cujas proporções foram inicialmente determinadas, seguindo as leis e os princípios considerados. No desenvolvimento de uma dosagem experimental é freqüente a realização de ensaios prévios de qualificação dos materiais que serão utilizados e também o desenvolvimento de experiências de avaliação das diferentes alternativas de proporcionamento, visando verificar o atendimento das exigências de trabalhabilidade, resistência e durabilidade requeridas do concreto final a ser produzido.

Atualmente a aplicação de uma ou outra metodologia, “empírica” ou “experimental” depende da responsabilidade da obra e/ou do volume de concreto a ser produzido. Como recomenda Recena (1989), a adoção de um método de dosagem empírica pode efetuar-se, com restrições, quando se tenha um bom conhecimento dos materiais que serão empregados e desde que o concreto obtido seja submetido a verificações preliminares de suas características e propriedades mecânicas, antes de sua aplicação em obra. A norma NBR 12655 (ABNT, 1996a), item 6.4.1. exige a utilização da dosagem experimental para concretos de classe C 15 ou superior. No item 6.4.2 admite-se a dosagem empírica para concreto da classe C 10, com consumo mínimo de cimento de 300 kg/m^3 . Uriartt (1985) observa que laboratórios e grandes produtores de concreto locais dispõem de valores médios confiáveis, representativos das características médias, dos materiais de emprego freqüente na região e de correlações entre a relação água/cimento e as resistências obtidas nas diferentes idades. O conhecimento das práticas e equipamentos de concretagem empregados nas obras possibilita prefixar, com relativa segurança, parâmetros de dosagem tais como: percentagem de água em relação ao total de materiais secos da mistura e teor de argamassa. Obviamente quando a natureza e o tipo de materiais usados na dosagem diferem grandemente daqueles de comportamento conhecido surgem distorções grosseiras nas características e propriedades esperadas.

No sistema normativo nacional, a NBR 6118 (ABNT, 1980) - Projeto e Execução de obras de concreto armado - Procedimento -, no seu Capítulo 8, refere-se brevemente às Metodologias de dosagem dizendo que:

A dosagem experimental poderá ser feita por qualquer método baseado na correlação entre as características de resistência e durabilidade do concreto e a relação água/cimento, levando-se em conta que a fixação da relação a/c decorrerá:

- a) da obtenção de uma resistência de dosagem f_c aos 28 dias ou na idade prevista no plano da obra para que a resistência seja atingida;
- b) das peculiaridades da obra relativas à durabilidade tais como: impermeabilidade, resistência ao desgaste, à ação de líquidos e gases agressivos, a altas temperaturas e variações bruscas de temperatura e umidade;
- c) da prevenção contra uma retração exagerada.

A trabalhabilidade, expressa pela consistência, deverá ser compatível com as características dos materiais componentes, com os equipamentos utilizados nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento e com o tipo de peças e as eventuais dificuldades, enfrentadas no processo de execução das mesmas.

A resistência de dosagem f_{cj} , expressa em Megapascais, está definida no item 6.4.3 da NBR 12655/96 e deve ser calculada pela fórmula:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times s_d$$

onde:

f_{cj} = resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, especificada no projeto;

s_d = desvio padrão da dosagem.

Os primeiros tecnólogos de concreto, que desenvolveram métodos de dosagem experimentais, fundamentados em correlações, entre as características de resistência e durabilidade do concreto, com a relação água/cimento, preocuparam-se em definir e tentar produzir o concreto ideal, o que freqüentemente significava encontrar composições granulométricas ideais de agregados graúdos e miúdos, que condicionavam a escolha de materiais adequados, combinados em proporções definidas. O constante avanço da tecnologia do concreto, que ampliou o campo de aplicação do material e aumentou suas exigências de desempenho, obrigou também a adaptar-se a novas técnicas de produção e manuseio, levando a considerar um maior número de variáveis no problema do proporcionamento.

Além das exigências básicas de trabalhabilidade e resistência, outras características devem ser levadas em conta por ocasião de obras especiais. Estas características, que às vezes devem ser priorizadas num estudo de proporcionamento do concreto, podem ser estudadas no âmbito do que se denomina “**Tecnologia avançada do Concreto**” que compreende, entre outros, os seguintes tópicos:

- a) retração autógena e hidráulica;
- b) fluência;
- c) efeitos térmicos: dilatação e retração térmicas, condutibilidade, difusibilidade do concreto;
- d) permeabilidade: aos gases, às radiações atômicas e às elevadas pressões hidrostáticas.

Considerando então todos os fatores anteriormente citados, percebe-se a necessidade de aprofundamento no estudo dos chamados métodos de “dosagem racional ou experimental”, cujos principais objetivos são apresentados a seguir através da visão de diversos estudiosos da área.

Neville (1997) afirma que a dosagem experimental constitui-se apenas numa estimativa racional da combinação ótima entre os diversos componentes com base em relações de dependência estabelecidas. Ele alerta que para obter uma mistura satisfatória não é suficiente calcular ou estimar as proporções dos materiais disponíveis, mas também, devem ser feitas misturas experimentais em laboratório para ajustar as proporções entre os materiais de maneira a conseguir as características procuradas. Também deve-se ter presente que uma mistura de laboratório não é uma resposta definitiva ao problema do proporcionamento pois, em geral, as condições de produção das misturas de concreto no laboratório são sensivelmente diferentes das condições existentes na obra. Algumas das diferenças, que podem ser relacionadas como exemplo, seriam:

- a) os volumes produzidos em cada amassada experimental do laboratório são menores que os produzidos em cada amassada na obra;
- b) no laboratório, os equipamentos de produção são mais eficientes e os tempos de mistura são normalmente maiores do que aqueles empregados em obra;
- c) as condições ideais de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, existentes no laboratório, dificilmente serão encontradas no momento da produção do material em obra;
- d) no laboratório, quase sempre, se trabalha com agregados no estado seco.

Além das diferenças anteriormente citadas, o traço, a ser efetivamente usado em obra deve ser corrigido, para levar em conta efeitos diversos como, por exemplo, os provenientes do manuseio, transporte, tempo de lançamento e cura do concreto. Uma diferença importante que deve ser destacada é aquela relativa à quantidade de materiais finos, determinada na mistura de concreto elaborada no laboratório, e aquela quantidade de finos, requerida no concreto a ser efetivamente usado na estrutura. A quantidade de argamassa, necessária no concreto procurado, dependerá também da relação existente entre a área superficial e o volume das fôrmas a serem preenchidas e das perdas ocasionadas pelos equipamentos e processos de transporte e lançamento, empregados na obra. De forma complementar, Giammusso (1989) refere-se a um terceiro estágio no processo de dosagem, que consiste em observar o desempenho do concreto na obra e, se for o caso, fazer novos ajustes “pois a mistura vai como que pedindo as correções a serem feitas na sua própria linguagem”. Cabe lembrar, nesta etapa, o caráter essencialmente variável dos materiais constituintes do concreto, em especial dos agregados que, pela alteração de suas características de

forma, textura, granulometria e capacidade de reter umidade, podem ocasionar mudanças mais ou menos significativas nas características do concreto fresco.

A abordagem sobre a questão da dosagem, recomendada por Raina (1988) e Day (1995), leva ao reconhecimento de que:

- a) não existe um concreto ideal para todos os propósitos e, portanto, devem definir-se quais as propriedades e características exigíveis ao material para que seja adequado a um fim específico;
- b) as propriedades exigíveis ao concreto deverão ser procuradas usando os materiais economicamente disponíveis em lugar de procurar agregados ideais e cimentos de difícil obtenção;
- c) existirá concorrência baseada no preço, o que obrigará a procurar as propriedades exigidas ao concreto, através de uma mistura econômica e de maneira que possam ser atendidas as condições de trabalhabilidade requeridas, com os meios de produção e execução disponíveis na obra.

Por último, e após a análise de alguns dos principais fatores e das mais importantes variáveis técnicas, intervenientes no processo de dosagem, é preciso destacar a importância decisiva do homem, em todas as etapas envolvidas. A importância da qualidade da mão-de-obra, quanto a sua formação profissional, e seu grau de responsabilidade e treinamento, foram destacados por diversos autores como: Meseguer (1991), Silva (1994), Scardoelli et al. (1994), Foroni (1995), Souza et al. (1995), Boggio et al. (1994), entre outros. Em quase todo o campo da construção civil atual o fator humano fica, com frequência, relegado a um segundo plano, quando não completamente esquecido, em favor de um tecnicismo exagerado e devido, muitas vezes, a uma falta de percepção do processo produtivo como um todo. Pouco sentido teria o investimento na determinação cuidadosa de traços de concreto desenvolvidos em laboratório se não existisse pessoal treinado, capaz de produzir um material com qualidade, através do controle das variáveis envolvidas nos processos de mistura, lançamento, adensamento e cura (HELENE, 1989; TERZIAN, 1990).

Deve-se destacar que os quatro componentes do fator humano citados por Meseguer (1991): a formação, a informação, a comunicação e a motivação, influenciam grandemente na produtividade e na qualidade de qualquer processo construtivo. Como afirma Arredondo (1969): “nada se conseguirá aprimorando mais os métodos de dosagem, enquanto não seja melhorado paralelamente o controle”. O controle do processo de produção será tanto mais eficaz, quanto mais capacitados, eficientes e motivados sejam os recursos humanos envolvidos. Isto significa que os resultados obtidos, a partir dos métodos de dosagem, estarão inevitavelmente influenciados por variáveis e fatores culturais, regionais e locais, que intervirão no desenvolvimento global da produção.

2.2 METODOLOGIA DE ESTUDO DA DOSAGEM

O estudo geral do problema da dosagem de concretos, e especialmente a abordagem de uma análise comparativa de métodos, requer o estabelecimento ou a adoção de uma metodologia que forneça um marco de referência objetivo que possibilite considerar, de forma abrangente, os aspectos mais importantes dos processos e técnicas de proporcionamento e permita analisar, de maneira ordenada, todas as etapas envolvidas nos diferentes métodos. Neste sentido, Helene (1987) propõe uma metodologia racional de trabalho, para tratar os problemas da dosagem de concretos, que considera os seguintes aspectos e condições a serem atendidas.

2.2.1 Exigências de projeto

- a) Características mínimas de resistência (através da relação a/c);
- b) Características geométricas das peças (através do teor de argamassa α);
- c) Resistividade elétrica;
- d) Deformabilidade. (condicionada pelo volume da pasta);
- e) Acabamento superficial (vinculado à textura, à trabalhabilidade e ao teor α);
- f) Espaçamentos entre as armaduras e entre estas e as fôrmas (que condicionam, basicamente, a dimensão máxima característica da granulometria do agregado);
- g) Possibilidade de manutenção visando durabilidade.

2.2.2 Condições de exposição e operação

- a) Condições regionais: atmosfera rural, urbana, industrial, ou marinha.
- b) Condições locais:
 - b.1). Localização da peça estrutural: interna ou externa.
 - b.2) Tipo de proteção: peças revestidas e peças não revestidas.
 - b.3) Tipo de ambiente: agressivo ou não agressivo (agressividade da atmosfera, do solo, ou de eventuais produtos em contato com a estrutura).
 - b.4) Tipo de solicitação e de operação dos elementos estruturais (pressão e velocidade da água, abrasão, insolação e resfriamento brusco, ocorrência de condensação, nível de tensões).

2.2.3 Tipo de agregado disponível economicamente

Devem ser consideradas características tais como: tamanho máximo disponível, forma, textura, quantidade de pó aderido e reatividade com os compostos hidratados da pasta de cimento.

2.2.4 Técnicas de execução

Condicionadas pelos equipamentos de produção, de transporte, de lançamento e de adensamento, assim como de acabamento e cura. Prizskulnik (1977) salienta a importância do grau de educação técnica da equipe encarregada da produção do concreto e alerta sobre a necessidade de levar em consideração as características das fôrmas empregadas para a execução do concreto assim como os recursos e os equipamentos destinados às operações de mistura, transporte, lançamento, adensamento, acabamento e cura do concreto.

Consideração especial deverá ser dada às condições atmosféricas durante a produção do concreto, particularmente no que se refere à temperatura, à umidade e à velocidade do vento.

2.2.5 Custo mínimo

A primeira medida elementar, visando a redução do custo do concreto, consiste na escolha dos materiais tecnicamente aceitáveis, dentre os economicamente disponíveis. Em geral, para os concretos de uso corrente, o menor custo está condicionado ao emprego de agregados graúdos de maior dimensão possível e a mínimos consumos de cimento. Estas regras básicas, válidas na maioria das situações, podem ter suas exceções quando se trata de concretos de resistências mais elevadas em que a limitação da dimensão máxima característica dos agregados pode ser tecnicamente interessante ou quando condicionantes de disponibilidade regionais (por exemplo, em determinados Estados do norte e nordeste do Brasil), levam à necessidade de minimizar o consumo de agregados graúdos, de difícil obtenção, em detrimento de um maior consumo de cimento e de areia.

Recena (1990) observa que não se deve produzir concretos pensando somente em utilizar um consumo mínimo e suficiente de cimento para obter-se a resistência requerida, pois esta prática pode conduzir a um concreto pobre que, para ser trabalhado, exija um aumento do teor de finos do agregado miúdo que, por sua vez, eleve a demanda de água em relação à quantidade total de materiais secos, ocasionando um conseqüente aumento da relação água/cimento.

Day (1995) observa que o conteúdo de cimento não deve ser o único critério de custo, pois, dependendo das condições locais, pode existir uma ampla diferença de preços entre o agregado

miúdo e o agregado graúdo. A suposição de que é difícil definir uma composição granulométrica ideal dos agregados miúdos e graúdos permite assumir que, dentro de uma faixa razoavelmente ampla de proporções relativas entre os agregados, podem ser obtidos concretos com propriedades e características semelhantes. As proporções relativas entre os agregados serão alteradas dentro da referida faixa de acordo a considerações econômicas.

Neville (1997) destaca que o custo do concreto depende fundamentalmente do controle, tanto em supervisão como em equipamentos de produção, pois quanto maior a variabilidade da resistência do concreto produzido, mais custará atingir a resistência característica mínima exigida pelo projetista da estrutura. Ou seja, que o problema do custo do concreto também está fortemente ligado ao controle da qualidade da produção¹, que por sua vez tem um custo que deve ser previamente avaliado. A decisão sobre o controle de qualidade a ser adotado deverá partir de uma solução equilibrada que compatibilize os custos de produção e controle, com os volumes de material a serem produzidos, e as exigências específicas do tipo de obra.

Como consideração final, neste item de custo, deve ser lembrada a influência da mão-de-obra e dos equipamentos de transporte, lançamento e adensamento disponíveis, na fixação da trabalhabilidade mais adequada, para a produção do concreto na obra. O estabelecimento de condições de trabalhabilidade arbitrárias, sem levar em conta estes fatores, pode levar a uma elevação do consumo de mão-de-obra assim como a um aumento nos custos de aplicação do material e manutenção dos equipamentos. Mais ainda, alerta-se para o fato de que se as características do concreto não se apresentam adequadas às condições de colocação em obra pode acontecer que as tentativas de efetuar correções ou ajustes, por parte do pessoal encarregado da execução, acarretem significativas alterações do traço, que podem tornar-se grosseiras adulterações. Fatores de custo indiretos, decorrentes da má aplicação na estrutura de um concreto incorretamente lançado e adensado devem também ser avaliados na hora da dosagem.

¹ O controle de qualidade do produto pode ser definido (HELENE; TERZIAN, 1992) como uma técnica que, geralmente apoiada em recursos matemáticos da estatística, tenha por objetivo fornecer as informações essenciais para a manutenção do produto numa qualidade especificada, ao mínimo custo possível. O processo de controle adotado deve garantir a constância do padrão de qualidade do produto preestabelecido no projeto, independentemente de que esse padrão especificado tenha um nível alto, médio ou baixo.

2.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO FRESCO, A SEREM CONSIDERADAS NO PROCESSO DE DOSAGEM

Nas considerações gerais sobre dosagem foi observada a necessidade de que as misturas de concreto, obtidas através dos diversos métodos de proporcionamento, satisfaçam as exigências de trabalhabilidade requeridas nas etapas de transporte, lançamento e adensamento. Foi evidenciado, também, que a trabalhabilidade está condicionada, entre outros fatores, ao tipo e às características das peças a serem moldadas e ao tipo de equipamento e mão-de-obra envolvidos no processo de produção. Na realidade, o termo trabalhabilidade tem um significado amplo pois exprime um conceito complexo e um tanto subjetivo que abrange condicionantes e fatores externos ao material e um conjunto de características do concreto fresco que não apresentam uma única maneira de avaliação. Como destaca Mehta (1986), o fato de que este conceito não possa ser completamente definido e apresente uma difícil avaliação quantitativa, constitui uma das razões para considerar que o proporcionamento dos concretos, visando obter uma trabalhabilidade desejável, é mais uma arte do que uma ciência.

Petrucci (1965) define o conceito de **trabalhabilidade** como a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade, nos processos de transporte e colocação. Petrucci (1965) preocupa-se com as características de fluidez e consistência, condicionadas aos tipos de equipamentos a serem utilizados na execução da estrutura e visando a obtenção de uma massa de concreto compacta e uniforme.

A definição apresentada pela ASTM C 125 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993) é muito ampla e associa a trabalhabilidade (*workability*) à “propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém misturado com uma perda mínima de homogeneidade”. No ACI 116R-90 (ACI, 1994b) se estabelece que a trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade e a homogeneidade com que o concreto fresco pode ser misturado, lançado, compactado e acabado.

No ACI 309R-87 (ACI, 1994c) apresenta-se a trabalhabilidade como função das seguintes propriedades reológicas do concreto:

- a) estabilidade ou coesão;
- b) capacidade de compactação (facilidade para a remoção do ar);
- c) consistência.

A coesão, por sua vez, pode ser entendida como a propriedade que garante a integridade da massa do concreto de forma que ela se mantenha homogênea e sem separar-se durante o transporte (resistência à segregação e à exsudação) (LEA; DESCH, 1956; MEHTA; MONTEIRO, 1994). A coesão está ligada à área específica dos sólidos mais finos e, conseqüentemente, à pasta intersticial. Portanto, quanto maior seja o teor de finos e a continuidade dos diâmetros dos grãos, maior poderá ser a coesão da mistura. (BUCHER, 1989; GIAMMUSSO, 1989) salienta que um concreto terá um aspecto coeso se tiver um teor de argamassa suficiente para envolver os grãos do agregado graúdo e se a massa da mistura se mantiver sem desagregar. Quando se trata do concreto, os fatores que mais favorecem a tendência à segregação são:

- a) as diferenças de tamanho entre as partículas que compõem a mistura do concreto;
- b) as diferenças entre as massas específicas dos agregados miúdos e graúdos;
- c) vibração exagerada aplicada no processo de transporte e adensamento.

Sobral (1990) destaca que existem basicamente duas formas de segregação. Uma delas, que pode acontecer em alguns tipos de misturas pobres e secas, consiste na tendência à separação dos grãos maiores pelo efeito da gravidade quando o concreto é transportado por calhas ou quando ele é depositado nas fôrmas. Um concreto com insuficiência de argamassa pode-se apresentar sem coesão e, portanto, facilmente segregável, especialmente quando ele é lançado de certa altura. Esta situação pode ocasionar um aumento do número de vazios e o aparecimento de ninhos de concretagem. A outra forma de segregação, bastante comum em misturas muito plásticas com excesso de água, consiste na clara separação da pasta do restante do agregado. O aparecimento da segregação pode ser controlado por uma distribuição granulométrica adequada do agregado e pelos cuidados nas operações de transporte, lançamento e adensamento.

A **consistência** é “a relativa mobilidade ou facilidade do concreto de fluir durante o lançamento” (ACI 211.1-91 (ACI, 1994a)). Neville (1997) a define como “a resistência momentânea do concreto fresco à mudança de forma, ou a aptidão do concreto fresco de fluir”. A consistência traduz propriedades intrínsecas da mistura de concreto fresco, relacionadas com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, tendo em vista a uniformidade e a compactidade do concreto e o bom rendimento da execução (TORRES; ROSMAN, 1956). Alguns autores usam o termo consistência para traduzir o grau de umidade das misturas de concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997; TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990).

O principal parâmetro que determina a consistência do concreto fresco é **a relação água/materiais secos H (%)** (expressa em porcentagem da massa de água em relação à massa da

mistura de cimento e agregados) (NEVILLE, 1997; SOBRAL, 1988). A relação H estará condicionada pela forma e composição granulométrica do agregado graúdo, pela superfície específica do agregado miúdo, pelo tipo de cimento, pela quantidade de pasta contida na argamassa, pela quantidade de argamassa em relação ao agregado graúdo, e pelo tempo de amassamento da mistura. A consistência do concreto depende da quantidade e da consistência da argamassa que por sua vez está condicionada pela consistência e pela espessura da camada de pasta que envolve os agregados (LEGRAND, 1975). Como a consistência da pasta está influenciada, entre outros fatores, pela quantidade de água em relação à quantidade de aglomerante, fica evidenciada a influência indireta da relação água/cimento sobre a consistência da massa total do concreto. A consistência da pasta é afetada, também, pela quantidade de ar incorporado ou aprisionado, pelas características do material cimentante (forma e finura das partículas do cimento e das pozolanas) e pela incorporação de aditivos redutores de água. Neste aspecto, cabe salientar que o avanço da tecnologia permite dispor de uma grande variedade de aditivos (plastificantes, superplastificantes e incorporadores de ar, entre outros) que permitem alterar a consistência de concretos bem dosados e inclusive compensar algumas deficiências na mobilidade de concretos mais pobres e secos (MALTZ, 1955; PREVIATO, 1986).

Para a determinação da consistência pode usar-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998a)), que é um método prático, rápido e fácil de usar, tanto em laboratório como em obra. Este ensaio, quando aplicado no controle da produção de um mesmo tipo de concreto, informa em termos relativos sobre a relação água/materiais secos e permite determinar, de maneira indireta, a variação da relação água/cimento. Deve-se fazer a observação fundamental que a comparação de valores do ensaio de abatimento só tem sentido para concretos da mesma natureza, proporcionados com materiais de similares características e procedências. Partindo da suposição de que os concretos são produzidos com agregados de boa distribuição granulométrica e com um adequado consumo de cimento, que garantam um grau de coesão suficiente das misturas, o ensaio do tronco de cone permite avaliar, de forma simples e quantitativa, a facilidade com que o material poderá fluir durante o lançamento.

O ensaio de abatimento, apesar do seu largo emprego no controle tecnológico do concreto “como um grosseiro e único índice de trabalhabilidade”, (MEHTA; MONTEIRO, 1994) não é adequado para concretos muito fluidos e, também, não é indicado para concretos muito secos e pobres em agregados finos, pois a massa do material se desagrega ao ser erguida a fôrma (em lugar de se abater) (TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990). Hummel (1966) lembra que o ensaio do tronco de cone, além de ser usado para medir o abatimento, também deve ser aproveitado para avaliar a

maneira como ele acontece, ou seja, deve se verificar se o espalhamento do concreto acontece sem perda de coesão, com ou sem segregação do agregado graúdo. De forma complementar, podem ser observadas manifestações de exsudação na superfície e na base do tronco de cone de concreto formado.

O abatimento é afetado principalmente pelos seguintes fatores (CANNON, 1987):

- a) consistência da pasta;
- b) proporção entre pasta e agregado miúdo, que condiciona a fluidez da argamassa;
- c) proporção entre o agregado graúdo e a argamassa.

Como ensaio alternativo, para a medição da consistência, que apresenta possibilidades de aplicação, tanto no laboratório como no campo, tem-se o ensaio da Mesa de Espalhamento, ou Mesa de Graf (descrito na NBR NM 68 (ABNT, 1998b) que pode ter o mesmo campo de utilização que o ensaio de abatimento (para concretos que apresentam consistências plásticas ou fluídas), mas que pode ser adequado, também, para avaliar a consistência de concretos pouco plásticos, ricos e coesivos, com a vantagem relativa de ter, aparentemente, uma maior independência do operador (SOBRAL, 1988).

Outros ensaios que podem ser usados para medir a consistência, e que se apresentam mais aptos para a prática laboratorial do que para sua aplicação em obra, são o ensaio de Fluidez (*Flow Test*, descrito pela norma ASTM C-124-66) e o ensaio de Remoldagem (*Remolding Test*), proposto por Powers (1932), ambos adequados para concretos de consistências plásticas e fluídas. A diferença entre estes dois tipos de ensaios consiste em que o primeiro permite que o escorregamento do concreto aconteça sem limitações sobre uma Mesa de Fluidez enquanto que o segundo avalia a consistência da mistura de concreto fresco forçando a deformação e restringindo o escorregamento através da mudança de forma entre recipientes padronizados. Para avaliar o comportamento de concretos, de consistência mais seca, foram desenvolvidos ensaios de laboratório mais aperfeiçoados como o ensaio de remoldagem de Powers modificado por Wuerpel (usado por Petrucci como equipamento básico para o desenvolvimento do método do ITERS [1965]) e o ensaio Vebe desenvolvido por V. Bährner, na Suécia, e descrito na ACI 211.3-75 e na norma BS 1881: Part 2: 1970. Estes ensaios dinâmicos, que usam mesas vibratórias para efetuar a remoldagem do concreto, apresentam-se mais adequados para avaliar o comportamento do material que será adensado em obra, com o emprego de equipamentos de vibração.

Na Figura 2 (PRIZSKULNIK, 1977) são correlacionados índices de consistência do concreto, determinados a partir de diferentes equipamentos e sistemas de ensaio.


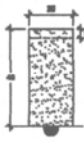
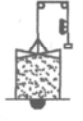

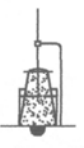




CORRELAÇÃO ENTRE ALGUNS ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA DO CONCRETO											
ESQUEMA DE ENSAIOS											
CONSISTÊNCIA	PROPRIEDADES		SLUMP (ABRAMS)	COMPACTAÇÃO (WALTZ)	COMPACTAÇÃO (FRITSCH)	FLUIDEZ (GRAF)	TEMPO VEBE (BAHRNER)	ESFORÇO DE REMOLDAGEM (POWERS)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (HUMM)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (GRAF)	TEMPO DE FLUIDEZ L.C.P.C. (LESAGE)
	ARGAMASSA FINA	CONCRETO AO SER LANÇADO	SLUMP (cm) APÓS REMOÇÃO DO MOLDE	GRAU DE COMPACTAÇÃO v-40/46-s (DIN 1048)	COMPACTAÇÃO EM PRINCÍPIO DE ADOBRO COM WALZ	DIÂMETRO (Ø)(cm) DO CONCRETO APÓS 15 GOLPES (DIN 1048)	TEMPO DE VIBRAÇÃO (s) ATÉ QUE O DISCO ESTEJA COMPLETAMENTE ADJACENTE AO CONCRETO (VEBE)	NÚMERO DE GOLPES ATÉ QUE O DISCO E O CONCRETO TENHAM A MESMA ALTURA	NÚMERO DE GOLPES ATÉ QUE SEJA QUEDA LIVRE A PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE 2,5 OU 10cm	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE UMA ALTURA DE 20cm (DIN 1048, EXCLUIDA)	TEMPO (s) NECESSÁRIO PARA O CONCRETO FLUIR ATÉ UMA MARCA HORIZONTAL GRAVADA NA EXTREMIDADE DO MOLDE
K1	CONCRETO REBIDO	MAS CIMA DO QUE TERRA BETA	0 - 2	1,45 - 1,28	1,45 - 1,28	-	40 - 8	50 - 27	SOLTO	2 - 6	60 - 30
		VIBRAÇÃO DO SOCAMENTO							30 - 14		
K2	CONCRETO PLASTICO	PLÁSTICA	2 - 8	1,25 - 1,11	1,25 - 1,11	28 - 40	10 - 3	27 - 10	5	8 - 14	30 - 5
		TERRAS DE AGUA ATÉ COERVO							20 - 8		
K3	CONCRETO FLUIDO	FLUIDA	8 - 14	1,10 - 1,04	1,10 - 1,04	38 - 50	3 - 1	11 - 3	2	14 - 23	5 - 1
		FLUIDO							7 - 2		

Figura 2: correlação entre índices de consistência de concreto, para diferentes equipamentos e sistemas de ensaio (fonte: PRIZSKULNIK, 1977)

Tartuce e Giovanetti (1990) observam que a trabalhabilidade não poderia ser considerada como uma característica inerente ao próprio concreto porque também está vinculada à natureza da obra e aos métodos e aos equipamentos de execução adotados, que devem apresentar bom rendimento, na sua produção e utilização. Portanto, um concreto, adequado para ser usado numa estrutura com peças robustas e com pouca armadura, pode não ter a trabalhabilidade suficiente, para moldar peças esbeltas e densamente armadas, que ficarão aparentes.

Adotando a classificação de Bauer (1988), em dois grandes grupos (intrínsecos e extrínsecos), e incluindo as considerações de Basílio (1977), podem ser listados alguns dos principais fatores que incidem na trabalhabilidade dos concretos.

Intrínsecos:

- proporção relativa entre os componentes da mistura: relação cimento/agregado e relação água/materiais secos;

- b) característica do agregado: granulometria, porosidade, forma e textura superficial dos grãos;
- c) características do cimento: finura e composição química;
- d) presença ou ausência de aditivos plastificantes, superplastificantes e incorporadores de ar.

Extrínsecos:

- a) tipos de equipamentos de mistura e seu estado de conservação;
- b) critérios e fatores subjetivos de avaliação (dependentes com frequência do encarregado da produção), sobre a adequação do concreto para um determinado uso. Neste aspecto cabe considerar: tamanho, forma e superfície dos moldes, assim como quantidade e espaçamento das armaduras das peças a serem concretadas.
- c) tempo decorrido desde a adição de água à mistura.

A Figura 3 (GIAMMUSO, 1995) mostra alguns dos principais fatores que influem sobre a trabalhabilidade dos concretos.

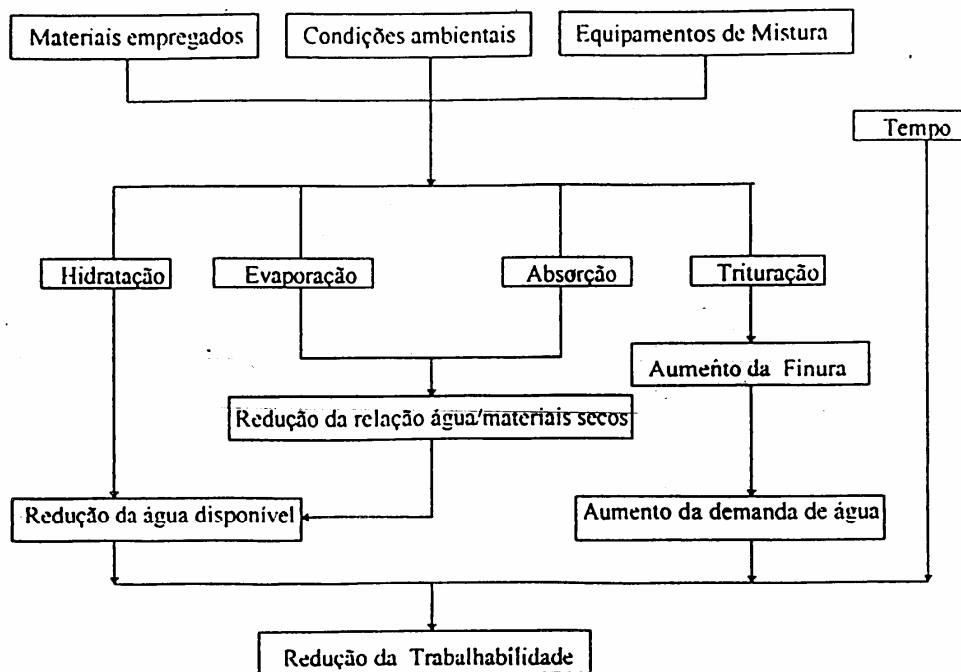


Figura 3: principais fatores que influem sobre a trabalhabilidade dos concretos
(fonte: GIAMMUSO, 1995)

Dado que a trabalhabilidade é uma propriedade fundamental do concreto fresco, a ser considerada no processo de dosagem, Mehta e Monteiro (1994) dão algumas orientações, que podem ser levadas em conta, a efeitos de compatibilizar as necessidades de uso e economia, com as exigências de resistência e durabilidade a serem atendidas:

- a) a fluidez da mistura fresca de concreto não deve ser superior à necessária para o lançamento, adensamento e acabamento do material;
- b) é preferível aumentar a coesão e a facilidade de acabamento do concreto através do aumento da quantidade de areia em relação à quantidade de agregado graúdo, em lugar de usar uma areia mais fina;
- c) para a dosagem de concretos, que requeiram elevada fluidez na hora da concretagem, poderá optar-se pelo uso de aditivos redutores de água, que evitem a incorporação de água adicional (não prevista no traço) no canteiro de obra.

A seguir são listados alguns dos itens, apresentados por Walz, citado por Sobral (1990), que poderiam ser verificados para avaliar a trabalhabilidade do concreto fresco:

- i) apresenta consistência e dimensão máxima do agregado, compatíveis com o tipo de obra;
- ii) mantém-se bem misturado e homogêneo no tempo usualmente utilizado para sua produção;
- iii) não segrega ou exsuda durante o transporte;
- iv) apresenta pouca ou nenhuma segregação durante o manuseio e o lançamento;
- v) pode ser compactado, de maneira fácil e adequada, com os equipamentos disponíveis, preservando a homogeneidade da mistura;
- vi) enche a fôrma completamente e envolve totalmente a armadura nela contida;
- vii) possibilita um acabamento superficial acorde com o especificado”.

Tentando independizar-se das circunstâncias de produção e do tipo de estrutura a ser concretada, Neville (1997) propõe abordar o conceito de trabalhabilidade como uma propriedade física intrínseca do concreto, relacionada com o trabalho utilizado para superar o atrito entre as partículas dos materiais constituintes e também entre o concreto e a superfície da fôrma e da armadura. Devido a que, apenas o atrito interno pode-se caracterizar como uma propriedade interna da mistura, Neville (1997) adota a definição de trabalhabilidade, dada por Glanville et al. (1954), como o “trabalho interno útil necessário para produzir o adensamento total.” A idéia de Neville, no sentido de eliminar o subjetivismo sobre a avaliação da trabalhabilidade e de poder medi-la, de maneira confiável, parece ser compartilhada por pesquisadores como Murata e Kikukawa (1973), Alexanderson (1973) e Dewar (1973) que, apoiados nos conceitos de Powers (1932 e 1968), apresentaram no Seminário da RILEM, em março de 1973, diversos trabalhos sobre considerações e medidas da trabalhabilidade. Basílio (1977) conclui que a medida da trabalhabilidade deve ser feita através de um ensaio (ou ensaios) cujos resultados sejam diversas constantes que definam univocamente um tipo de concreto. Os ensaios mais comumente usados para avaliar a trabalhabilidade, através de um único parâmetro (como por exemplo a consistência), têm-se demonstrado, em muitas situações,

como inadequados para caracterizar univocamente os concretos e tem levado a erros na estimativa da condições de trabalhabilidade.

Já em 1977, Basílio, apoiado nas pesquisas de Tattersall, que consideravam o modelo de Bingham, apresentava estudos da reologia² que propunham caracterizar a trabalhabilidade através de apenas dois parâmetros como a tensão crítica e a viscosidade (dependente da temperatura).

2.4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ENDURECIDO, QUE PODEM SER CONSIDERADAS NO PROCESSO DE DOSAGEM

Além de satisfazer alguns dos requisitos de trabalhabilidade vistos anteriormente, os procedimentos de dosagem devem atender certas exigências estruturais e de durabilidade estabelecidas pelo projeto. A busca e posterior obtenção de determinadas características e propriedades no concreto final passa pela compreensão do comportamento deste material, de natureza altamente heterogênea, constituído por diferentes tipos e quantidades de fases, vazios, poros e microfissuras. É necessário entender que o concreto endurecido não pode ser completamente caracterizado como um sólido e não é sempre possível considerar as peças de concreto como corpos rígidos. Como observa Sobral (1983), os fenômenos de equilíbrio termodinâmico do concreto com o ambiente levam à variação do estado físico da água nos poros da pasta, modificando a tensão superficial e acarretando alterações volumétricas análogas às de um gel³. Além das alterações volumétricas citadas, dependentes da situação da peça no ambiente, devem ser destacadas aquelas variações de volume que dependem da atividade química do processo de hidratação do cimento, desenvolvidas ao longo do tempo. A diferença de outros materiais, usados na engenharia, o concreto de uma estrutura está em permanente evolução, pois tanto a matriz da pasta de cimento como a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta, denominada *Zona de Transição*⁴, sofrem mudanças da sua microestrutura, que se refletem, no comportamento e nas propriedades do concreto endurecido, ao longo do tempo.

² Reologia: Ciência que estuda as deformações e fluidez dos materiais sob a influência de esforços externos. Através da reologia, é possível estudar materiais complexos, cujo comportamento não se enquadra na classificação de corpos ideais (BASÍLIO, 1977).

³ Solução coloidal de duas fases, uma constituída pela água e a outra por partículas menores a 1 µm em, concentração menor do que 10%.

⁴ A *Zona de Transição* entre o cerne da matriz de pasta e o agregado pode ser considerada como uma terceira fase da estrutura do concreto. Ela tem menor resistência que as outras duas fases e embora se apresente como uma camada de pequena espessura (tipicamente de 10 µm a 50 µm) parece exercer uma grande influência no comportamento mecânico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A partir do conhecimento dos fenômenos anteriores, percebe-se que, dependendo do fim para o qual o concreto seja destinado, os diferentes tipos de deformação mencionados devem ser analisados e avaliados conjuntamente com as especificações de cálculo (tensões e deformações máximas admissíveis) e pela agressividade do meio visando à durabilidade. Esta última deve ser considerada tanto no que diz respeito ao tipo de agente agressivo quanto à forma como esse agente pode atacar a estrutura (por condensação, por variação brusca da temperatura, por abrasão, entre outras). Estas considerações, sobre o comportamento mecânico, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto endurecido, podem ser priorizadas e avaliadas, com maior ou menor profundidade, de acordo a sua importância relativa, nos diferentes estudos que possam ser abordados.

Vasconcellos (1977) ressalta que as propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente da relação água/cimento, das reações de hidratação da pasta de cimento e água (condicionadas pela atividade química do cimento empregado, pela relação água/cimento e pelas condições de cura) e da compactidade máxima possível de ser obtida (condicionada pelos procedimentos e equipamentos de adensamento usados). Levando em conta todos esses fatores e com uma visão mais abrangente do problema de proporcionamento de concretos, Bucher (1984) coloca que:

A resistência mecânica e os parâmetros de durabilidade adotados para a dosagem devem levar em conta a resultante global das variações das características intrínsecas dos materiais, das flutuações, no modo e na eficiência de operação, dos equipamentos e das heterogeneidades dos procedimentos e condições durante o período de execução, de maneira que a qualidade final, que decorre da sobreposição destes efeitos, apresente um percentual defeituoso compatível com o cálculo estrutural para a solicitação prevista.

Considerando as diversas propriedades e características do concreto endurecido, que podem ser analisadas para avaliar sua qualidade, considera-se que um dos parâmetros mais valiosos de avaliação do material é a resistência. Ela permite estimar a aptidão da estrutura dos produtos resultantes da hidratação do cimento e do conjunto pasta-agregado para atender as exigências de desempenho requeridas.

A resistência de um material pode ser definida como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A resistência à compressão axial é considerada, tradicionalmente, como a propriedade fundamental do concreto, pois ela é relativamente simples e segura de determinar e fornece uma indicação geral da qualidade do material. (NEVILLE, 1997). Ela possibilita estimar, de forma indireta, outras características do material como as resistências à tração e à flexão e o módulo de deformação (SOBRAL, 1983; BUCHER; RODRIGUES, 1983)⁵.

⁵ As relações obtidas pela Portland Cement Association e citados por Price (SOBRAL, 1983) são as seguintes:

Escolhidos os materiais constituintes (tipo e classe de cimento e tipo e composição granulométrica dos agregados), a relação água/cimento (visando resistência e durabilidade) e consideradas as exigências de trabalhabilidade, a resistência à compressão do concreto é uma propriedade suficientemente sensível para detectar, através de sua variação, qualquer modificação na uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais constituintes (HELENE; TERZIAN, 1992). As diferentes classes de resistência do concreto dependem das resistências dos agregados, da resistência da matriz (constituída pela pasta de cimento e pelos espaços de ar em forma de bolhas e/ou espaços interligados) e da aderência entre a pasta e os agregados. Bucher e Rodriguez (1983) desenvolveram, na ABCP, ensaios para a determinação de correlações entre as resistências mecânicas do concreto, e como resultado de seu estudo destacam que, apesar da ampla variação dos parâmetros de dosagem, não foi possível (dentro das faixas de resistência nas que se trabalhou) identificar nenhum parâmetro, como consumo de cimento, dimensão máxima característica do agregado ou módulo de finura da areia, que afetasse com mais intensidade o valor da resistência à tração na flexão. No entanto, os valores obtidos para a resistência à tração na flexão apresentaram diferenças significativas para concretos com os mesmos valores de resistência à compressão, produzidos a partir de cimentos diferentes. Como conclusão, estes pesquisadores colocam que, embora as correlações entre as resistências do concreto não sejam de caráter geral, pois dependem dos materiais constituintes e das proporções do concreto, é possível obter relações específicas confiáveis, entre as resistências à compressão e à tração, quando os constituintes do concreto são mantidos constantes.

Por sua vez a resistência da matriz, condicionada pelas falhas existentes nos cristais e pelas numerosas discontinuidades (poros, vazios e fissuras) presentes no seu cerne, depende macroscopicamente do tipo de cimento, da relação água/cimento e do tempo e condições específicas de cura. Outro motivo

Tensão de tração axial/ tensão de compressão axial = 1/11 e tensão de tração por flexão/ tensão de compressão axial = 1/5.

Sobral (1983) relaciona o valor característico da resistência à tração axial com o valor característico da resistência à compressão:

$$f_{tk} = f_{ck} / 10 \text{ para } f_{ck} < 18 \text{ MPa e } f_{tk} = 0,06 * f_{ck} + 0,7 \text{ MPa para } f_{ck} > 18 \text{ MPa.}$$

A correlação obtida pela ABCP (Bucher e Rodrigues, 1983) entre a resistência à tração na flexão (28 dias) f_f e a resistência à compressão axial foi: $f_f = 0,56 f_c$ 0,60 ($r \approx 0,90$).

A correlação obtida pela ABCP entre a resistência à tração por compressão diametral f_t e a resistência à compressão axial foi:

$$f_f = 0,37 f_c \text{ 0,64 } (r \approx 0,95) \text{ sendo o desvio padrão da correlação } s = 0,2 \text{ MPa.}$$

A correlação obtida pela ABCP entre a resistência à tração por compressão diametral f_t e a resistência à tração na flexão f_f foi:

$$f_f = 0,37 + 1,19 f_t (r \approx 0,8)$$

Os materiais usados para os ensaios foram: agregado graúdo de granito britado com $D_{m\acute{a}x} = 32, 25$ e $9,5$ mm, areia de rio com MF entre 2,00 e 4,00 e cimentos diversos, todos, da classe 32. As relações água/cimento variaram entre 0,4 e 0,8 e os consumos de cimento oscilaram entre 200 a 400 kg/m^3 .

que justifica a tradição do uso da resistência à compressão como parâmetro representativo da qualidade do concreto, baseia-se no fato que os ensaios realizados em prensas de carga axial são verificações simples, rápidas, de baixo custo e fáceis de reproduzir. No Brasil, os testes de compressão, conduzidos de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 1994a), são efetuados, como em quase todo o mundo, sobre corpos-de-prova cilíndricos moldados e curados em condições específicas de temperatura e umidade e conservados nessa situação padronizada até a idade preestabelecida (NBR 5738 (ABNT, 1994b)). O valor da resistência potencial do concreto, obtido através das condições ideais de cura e das operações padronizadas de ensaio, constitui-se apenas num valor de referência para o dimensionamento da estrutura. Segundo Helene e Terzian (1992), a correspondência entre a resistência potencial do concreto à compressão, obtida através das operações de ensaio e controle, e a resistência real ou efetiva do concreto na estrutura, devem ser asseguradas através do controle tecnológico dos serviços envolvidos e é independente dos ensaios. A resistência potencial, obtida nos corpos-de-prova de concreto, geralmente deve ser minorada, pelo coeficiente $\gamma_c = 1,4$, para obter a resistência de cálculo à compressão do concreto da estrutura ($f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$). O coeficiente γ_c , composto por diversas parcelas, conforme especificado na NBR 8681/84 engloba, entre outras incertezas, e através do coeficiente γ_{mr} (CREMONINI, 1994), as variações de resistência devidas às diferenças da geometria das peças estruturais em relação à fôrma cilíndrica dos corpos-de-prova, e as diferenças quanto aos processos de cura e adensamento, aplicados em um e outro concreto.

Finalmente, no encerramento das considerações realizadas sobre o concreto endurecido, cabe apresentar algumas observações e colocações sobre a durabilidade do material.

De acordo com o comitê 201 do ACI (INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO - IMCYC, 1989), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Um concreto durável conservará suas características originais, qualidade e capacidade de utilização quando exposto aos agentes agressivos de seu meio (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Neville (1997) afirma que a diminuição da durabilidade pode dever-se a causas externas como: efeitos de temperatura, erosão, abrasão, ação eletrolítica e ataque de líquidos ou gases agressivos. Entre as causas internas que podem afetar a durabilidade são citadas: as reações álcali-agregado, as variações de volume devidas às diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e da matriz de cimento e, principalmente, a permeabilidade do concreto. Na prática, a deterioração do concreto raramente é

devida a uma causa única, podendo-se combinar causas físicas e químicas, reforçando-se mutuamente e acelerando o processo de degradação do material nos estágios mais avançados do fenômeno.

Paulon (1986) afirma que o concreto, para ser durável, deverá estar isento de fissuração e possuir elevada compacidade. Devido a que a permeabilidade e a capacidade de absorção do concreto são funções diretas da porosidade (condicionada pela existência de vazios⁶ e poros capilares⁷) o controle e a minimização destas características deve ser tentado através de algumas medidas práticas, entre as quais podem-se citar: a diminuição da quantidade de água de amassamento, o uso de agregados limpos e pouco porosos e a execução de uma mistura e um adensamento cuidadosos. Bucher (1984) indica como principais responsáveis pela qualidade intrínseca do concreto os seguintes fatores:

- a) a qualidade do cimento (tipo e classe de resistência);
- b) a qualidade do agregado graúdo (resistência mecânica, composição mineralógica, tamanho máximo, forma e textura superficial);
- c) a qualidade do agregado miúdo (componentes minerais e grau de contaminação);
- d) qualidade da pasta de cimento endurecida (grau de hidratação e nível de porosidade, função da relação água/cimento).

⁶ Entende-se por vazios aqueles de forma mais fechada, mais próxima da forma esférica, formados pela presença de ar que pode ficar aprisionado, durante a operação de mistura, na pasta fresca de cimento e/ou originados pelo ar intencionalmente incorporado através de aditivos. Enquanto os tamanhos dos primeiros podem chegar a superar os 3 mm, os últimos variam comumente de 50 a 200 μm . Estes vazios são maiores que os poros capilares e, dependendo de seu maior ou menor tamanho, sua distribuição e sua interligação, podem afetar negativamente a resistência e a impermeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

⁷ Df: Do grego póros, “passagem”, pelo latim poru, “canal”. Cada um dos pequenos orifícios ou interstícios em certas matérias sólidas (BUARQUE DE HOLANDA, 1986).

Os poros ou vazios capilares representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos (cimento anidro e produtos de hidratação) da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O volume e o tamanho dos poros capilares estão determinados pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento recém misturada (i.e., relação água/cimento) e o grau de hidratação do cimento. Os vazios capilares variam em tamanho e forma (que pode ser mais ou menos irregular), sendo que em pastas bem hidratadas, de baixa relação água/cimento, os poros podem variar entre 10 e 50 nm e em pastas de relação água/cimento elevada, nas primeiras idades de hidratação, eles podem atingir de 3 a 5 μm . Os poros capilares formam um sistema interconectado, distribuído aleatoriamente pela pasta de cimento e são os principais responsáveis pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida e pela sua vulnerabilidade ao congelamento (NEVILLE, 1997). Tem sido sugerido (MEHTA; MONTEIRO, 1994) que a distribuição de tamanhos dos poros, e não a porosidade capilar total, é o melhor critério para avaliação das características de vazios capilares maiores do que 50 nm de uma pasta (macroporos), enquanto vazios menores do que 50 nm (microporos) são admitidos como mais importantes para a retração por secagem e a fluência.

Para condições normais de exposição, a maioria dos métodos de dosagem não estabelece parâmetros de entrada relacionados, diretamente, com a durabilidade. No entanto existem situações especiais em que o concreto a ser dosado ficará exposto a um determinado ambiente agressivo ou a certo tipo de agente físico ou químico que pode reduzir a vida útil da estrutura. Nesses casos, dentro dos requisitos do projeto, deverão ser realizadas considerações específicas que permitam satisfazer, além das necessidades mínimas de resistência, as exigências de desempenho relativas à durabilidade. As considerações ou providências a serem adotadas podem incluir diferentes recursos como: a escolha de tipos especiais de cimento, a incorporação de aditivos e adições minerais e a redução da relação água/cimento a valores que possibilitem a obtenção de um concreto endurecido que apresente uma estrutura interna com maiores chances de resistir a condições de exposição mais severas.

3 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE DOSAGEM EMPREGADOS NO ESTUDO COMPARATIVO

O primeiro critério, aplicado na seleção dos procedimentos de proporcionamento, responde ao fato de que é interessante escolher aqueles métodos que apresentem uma aplicação intensa em algumas regiões urbanas, de significativa importância econômica do país. O método da **ABCP/ACI**, adaptado do método da ACI 211.1-81 (ACI, 1985) para a realidade nacional, pelo engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues (RODRIGUES, 1990), junto com o método do IPT/EPUSP, desenvolvido pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e posteriormente adaptado e divulgado pelos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (HELENE; TERZIAN, 1992), são métodos que, devido ao peso das instituições que os desenvolveram e divulgaram, tem apresentado uma grande difusão quanto ao seu conhecimento e uso. A própria aplicação dos métodos, em regiões urbanas com bom desenvolvimento tecnológico, contribuiu para incentivar sua utilização de forma generalizada, testando e ampliando seus limites de uso. Além disso, a tecnologia desenvolvida, experimentada e discutida pelos pesquisadores, engenheiros e técnicos, nos grandes centros urbanos, tende-se a espalhar para as regiões vizinhas, sendo gradativamente adotada por outros engenheiros e técnicos que dispõem assim de procedimentos aprimorados e já consagrados em termos da eficácia dos resultados obtidos.

Outro aspecto importante a ser considerado quando se parte para a escolha de métodos é a questão da diversidade em termos de filosofias e princípios de trabalho. Ou seja, que os procedimentos abordados devem apresentar um campo variado de alternativas de dosagem que considerem desde métodos com grande embasamento teórico e mínimo trabalho experimental até métodos apoiados em princípios teóricos simples mas que demandam uma significativa quantidade de ensaios experimentais, de laboratório e/ou de campo. Neste sentido, o estudo de métodos tão diferentes como o método da SNCF, desenvolvido a partir de 1948, na Société Nationale des Chemins de Fer Français, pelo engenheiro Roger Vallette (1948, 1949), e o método do ITERS, desenvolvido a partir de 1951, no Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul, pelo Prof. Eládio Petrucci (PETRUCCI, 1965), possibilitam contrapor essas diferenças.

Um terceiro fator a ser considerado é a adaptabilidade dos métodos aos materiais localmente disponíveis. Alguns métodos, como por exemplo o método da ABCP e o método do INT, desenvolvido a partir de 1937 no Instituto Nacional de Tecnologia do Rio de Janeiro, pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro (1937, 1943), têm surgido como resposta específica a demandas

regionais de proporcionamento, com materiais particulares, que não se adaptam às premissas de outros procedimentos de dosagem. Nessa situação, a busca de soluções específicas de proporcionamento passa muitas vezes pelo desenvolvimento de exaustivos programas experimentais de caracterização e pela combinação de materiais que conduzem à otimização de composições granulométricas, consideradas ideais, para o preparo de misturas de concreto destinadas a fins determinados.

Alguns procedimentos de dosagem, como por exemplo os métodos do ITERS e do IPT/EPUSP, predominantemente experimentais, foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar sua aplicação em qualquer região do país adaptando-se a materiais diversos. Ambos os métodos preocupam-se grandemente com a obtenção de misturas trabalháveis e com uma quantidade mínima de argamassa que permita o preenchimento dos vazios do agregado graúdo e a lubrificação dos seus grãos. Enquanto o método do ITERS fornece soluções mais otimizadas em termos do proporcionamento dos materiais disponíveis, às custas de um intenso trabalho experimental de laboratório, desenvolvido com equipamentos específicos, o método do IPT/EPUSP permite alcançar, com mínimos recursos de laboratório e de forma bem ágil, soluções suficientemente adequadas às necessidades de obra. Caso sejam detectadas, no canteiro, pequenas variações nas características dos agregados disponíveis, o método do IPT/EPUSP apresenta uma vantagem adicional que consiste na possibilidade de adaptar rapidamente, na própria obra, as misturas iniciais dosadas em laboratório.

Finalmente um outro argumento que justifica a escolha particular dos cinco métodos apresentados está baseado na razão de que eles têm uma origem muito diferente. Os métodos da ABCP/ACI e da SNCF têm origem estrangeira e foram aplicados no país sem grandes modificações sobre suas versões originais. O método do INT, fundamentado originalmente na idéia de curvas ideais de pesquisadores estrangeiros, foi especificamente desenvolvido, para a realidade nacional, pelo Prof. Lobo Carneiro visando, inclusive, uma aplicação regional para materiais com características determinadas. Os métodos desenvolvidos pelo ITERS e pelo IPT em colaboração com a EPUSP são resultado da criatividade de pesquisadores brasileiros que necessitam enfrentar uma realidade nacional com uma enorme diversidade de materiais regionais que devem ser empregados na produção de concretos, com exigências de trabalhabilidade, resistência e durabilidade muito variadas.

Uma vez discutidas algumas razões para a escolha particular dos cinco procedimentos de dosagem a serem estudados, parte-se, neste capítulo, para uma descrição teórica detalhada de cada um deles, apresentando suas respectivas etapas de trabalho, objetivando entender seus princípios de funcionamento e determinando as principais variáveis e parâmetros envolvidos nos processos. Através do

desenvolvimento de exemplos experimentais, podem ser avaliadas as particularidades e as dificuldades da aplicação dos princípios e procedimentos considerados por cada um dos métodos e as características e propriedades apresentadas pelas misturas de concreto fresco, resultantes nas diferentes dosagens.

3.1 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS ABCP/ACI

3.1.1 Histórico do método

O método da ABCP foi publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland como um Estudo Técnico titulado "Parâmetros de Dosagem do Concreto", da autoria do Eng. Públio Penna Firme Rodrigues (revisado em 1995).

Este método, baseado no texto da Norma ACI 211.1-81 (*Revised 85*) - *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, constitui-se numa adaptação prática do método americano às condições brasileiras e permite a utilização de agregados graúdos britados e areia de rio que se enquadram na norma NBR 7211 (ABNT, 1983^a) - Agregados para concreto. Desta forma o método, que considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais, constitui-se numa ferramenta de dosagem de concretos convencionais, adequada aos materiais mais utilizados em várias regiões do Brasil.

3.1.2 Descrição do método

O método da ABCP/ACI preocupa-se com a trabalhabilidade através de diversos fatores relativos aos materiais, às condições de execução e adensamento e às dimensões das peças. Um conceito fundamental abordado pelo método é aquele que vincula, para cada granulometria da areia e cada tamanho máximo de agregado graúdo, um valor máximo do volume de agregado compactado seco por m³ de concreto. Além disso, este procedimento de dosagem, desenvolvido para concretos de consistência plástica, fornece traços com baixos teores de areia, tentando obter misturas mais econômicas.

O método pode ser apresentado numa seqüência de etapas bem definidas, que incorporam um conjunto de tabelas, que facilitam a determinação dos parâmetros necessários para a obtenção do traço de partida.

As atividades, variáveis e dados de entrada do método estão apresentados no fluxograma simplificado representado na figura 4.

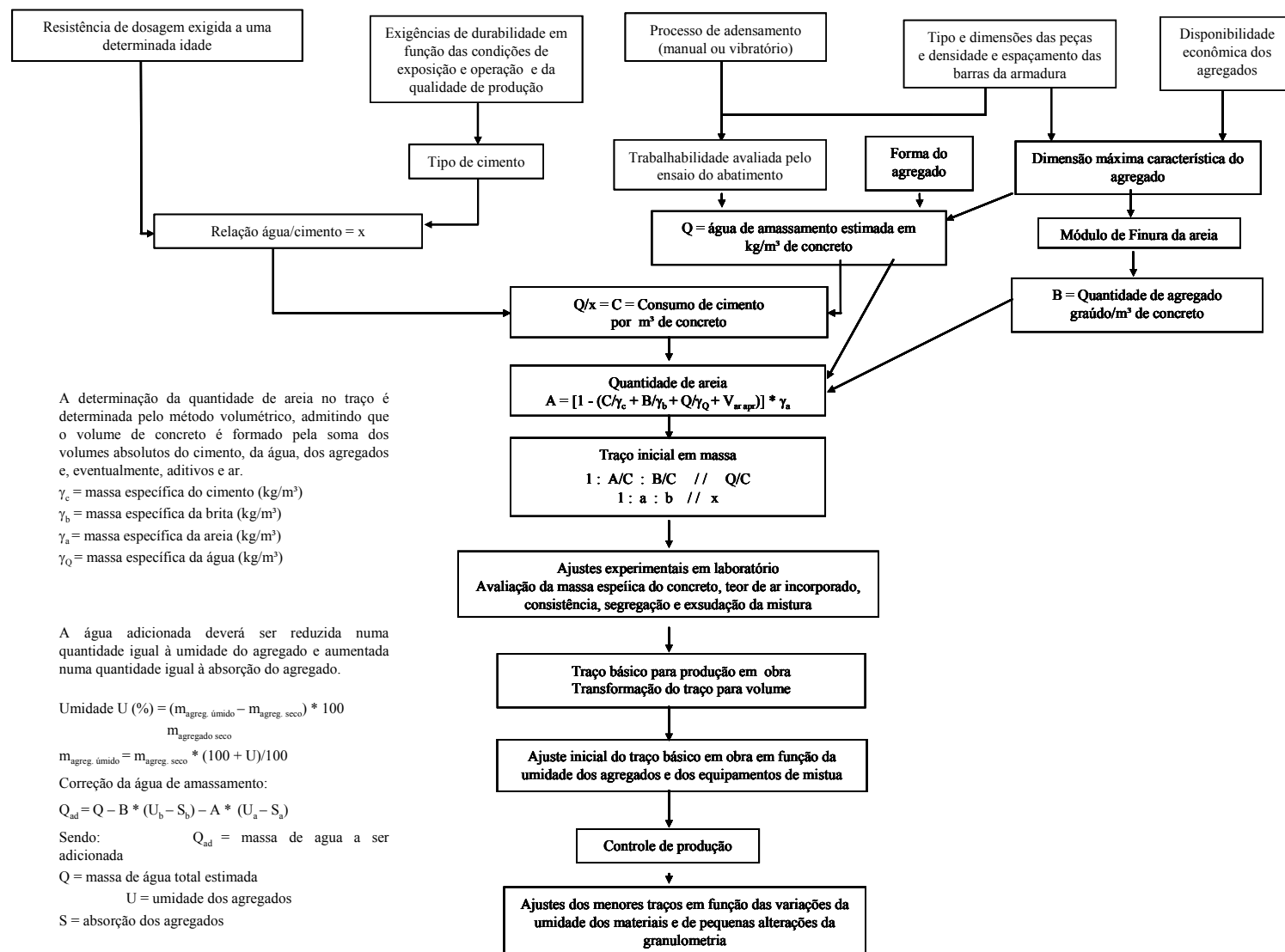


Figura 4: fluxograma simplificado do método de dosagem da ABCP

3.1.3 Desenvolvimento do método

a) A primeira etapa consiste na fixação de uma consistência adequada de trabalho para o concreto fresco, através do ensaio de abatimento do tronco de cone descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998a). Esta consistência fica condicionada, no método, ao tipo de peça estrutural a ser concretada e aos procedimentos de lançamento empregados. A norma ACI 211.1-81 apresenta a tabela 1, onde são recomendados diferentes valores de abatimentos em função dos diversos tipos de construção.

Tabela 1: valores de abatimentos recomendados em função do tipo de obra (ACI 211.1-81)

Tipos de obras	Abatimento (mm)	
	máximo	mínimo
Paredes de fundações e sapatas armadas	75	25
Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura	75	25
Vigas e paredes armadas	100	25
Pilares de edifícios	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Construções de concreto massa	50	25

Obs: Quando o método de adensamento não for vibratório, os valores dos abatimentos, apresentados na tabela, podem ser incrementados em 25 mm.

b) Considerando o tipo e as dimensões das peças estruturais e em função das distâncias entre as barras da armadura, seleciona-se, de acordo com as exigências da NBR 6118 (ABNT, 1980) - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - a Dimensão máxima característica do agregado graúdo, compatível com as características dos materiais economicamente disponíveis e a necessidade de menores índices de vazios.

c) Na terceira etapa, em função da Dimensão máxima característica dos agregados e do abatimento requerido (entre 40 e 100 mm), são fornecidas, na tabela 2, as quantidades de água de amassamento aproximadas para misturas preparadas com agregados graúdos britados de granito, agregados miúdos, constituídos por areias de rio não muito finas ($MF \geq 1.8$), e consumos de cimento em torno de 300 kg/m^3 de concreto.

As quantidades de água de amassamento (expressas em litros/m^3 de concreto produzido) são valores de referência iniciais que devem ser ajustados por experiências prévias ou através de tentativas com misturas nas quais se efetuaram ensaios de abatimento.

Tabela 2: quantidade de água de amassamento do concreto em função do abatimento e da Dimensão máxima característica do agregado

Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo D _{mc} (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220 kg/m ³	195 kg/m ³	190 kg/m ³	185 kg/m ³	180 kg/m ³
60 a 80	225 kg/m ³	200 kg/m ³	195 kg/m ³	190 kg/m ³	185 kg/m ³
80 a 100	230 kg/m ³	205 kg/m ³	200 kg/m ³	195 kg/m ³	190 kg/m ³

(fonte: RODRIGUES, 1990)

O método da ABCP recomenda a utilização de uma fórmula empírica que permite o ajuste da água de amassamento necessária, num processo iterativo, a partir da água adicionada inicialmente e dos abatimentos inicial e requerido. A fórmula em questão tem a seguinte expressão:

$$Q_{requerido} = Q_{inicial} \times \left(\frac{Abat.requerido}{Abat.inicial} \right)^{0,1}$$

onde:

Q = consumo de água da mistura;

Abat. = abatimento pelo ensaio do tronco de cone (NBR NM 67);

0,1 = valor do coeficiente exponencial, que depende dos materiais empregados.

O método fornece fatores de correção para a quantidade de água de amassamento empregada no caso de usar seixo rolado e/ou areias finas enquadradas na Zona 1 da NBR 7211 (ABNT, 1983a). Enquanto, o método original da ACI apresenta estimativas das quantidades de ar aprisionadas no concreto e prevê reduções das quantidades de água, quando se incorpora ar em forma proposital, o método da ABCP prescinde dessas considerações devido a que, no Brasil, não é usual a incorporação intencional de ar já que não são frequentes condições climáticas severas quanto a baixas temperaturas e situações de congelamento. A tabela 3, apresentada pela norma ACI 211, é mostrada seguir:

Tabela 3: quantidade de água da mistura de concreto, com e sem ar incorporado, em função do abatimento e da Dimensão máxima característica do agregado (ACI 211.1-81)

Abatimento do tronco de cone (mm)	Q = Quantidade aproximada de água de mistura (em kg/m ³) requerida para concretos com diferentes abatimentos e com agregados com distintas Dimensões máximas características							
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	38 mm	50 mm	76 mm	152 mm
	Concreto sem ar incorporado							
25 a 50	208	199	187	178	163	154	130	113
75 a 100	228	216	201	193	178	169	145	125
150 a 175	243	228	213	201	187	178	160	-
	Quantidade aproximada de ar aprisionada no concreto (%)							
	Concreto com ar incorporado							
25 a 50	181	175	166	160	148	142	122	107
75 a 100	202	193	181	175	163	157	133	119
150 a 175	216	205	193	184	172	166	154	-
	Quantidade média de ar a ser incorporada na mistura em função do nível de agressividade							
Exposição suave	4,50%	4,00%	3,50%	3,00%	2,50%	2,00%	1,50%	1,00%
Exposição moderada	6,00%	5,50%	5,00%	4,50%	4,50%	4,00%	3,50%	3,00%
Exposição extrema	7,50%	7,00%	6,00%	6,00%	5,50%	5,00%	4,50%	4,00%

d) Como próxima etapa, e em função das necessidades de resistência e das condições de exposição do concreto, ligadas com a natureza da obra, fixa-se a relação água/cimento (x). Tanto o método original do ACI como a versão da ABCP recomendam, como forma mais precisa de determinação da relação x , o emprego das curvas de Abrams, construídas com o cimento e os materiais a serem utilizados. Entretanto, quando não for possível dispor destas curvas ou de informações confiáveis sobre as resistências obtidas com o cimento e os materiais a serem efetivamente usados, pode-se proceder à determinação aproximada da relação x , em função da resistência, obtida através das curvas mostradas na Figura 5. As curvas da Figura 5, conhecidas como curvas de Walz, desenvolvidas no departamento de Cimento e Concreto (DECIM) da ABCP (BUCHER, 1989) foram determinadas por meio de traços experimentais de concretos, produzidos com cimentos de diferentes marcas, tipos e classes e com agregado graúdo britado de origem granítica e agregado miúdo constituído por areia de rio. A utilização das curvas de Walz baseia-se no conhecimento prévio da resistência do cimento. Conhecida a resistência normal do cimento ou conhecida sua resistência média, apresentada durante um determinado período de tempo, é possível a utilização direta das curvas. No caso de ser desconhecida a resistência normal ou a resistência média do cimento, o método recomenda considerar a resistência mínima

especificada pela norma, de acordo com a classe de cimento a ser usado. A prática de adotar esta resistência mínima somente é justificada para a produção de pequenos volumes de concreto que não justifiquem a execução de ensaios físicos do cimento ou a determinação das Curvas de Abrams.

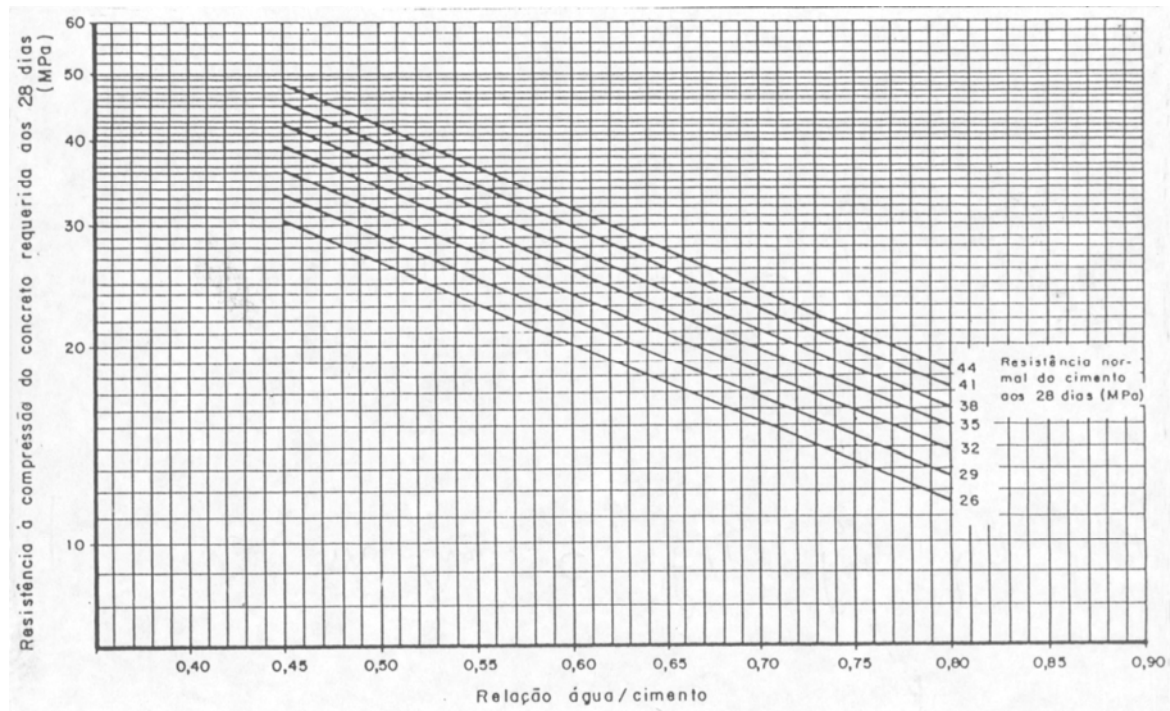


Figura 5: gráfico para a determinação da relação x em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias

(fonte: BUCHER, 1989)

A outra determinante da relação água/cimento é a questão da durabilidade, entendida como a capacidade do concreto de resistir aos ataques químicos e físicos ou qualquer outra ação de deterioração com o tempo. A vida útil do concreto pode ser aumentada através do uso de cimentos especiais, resistentes a determinados tipos de ataques químicos, junto com a adoção de baixas relações água/cimento, que diminuem a porosidade e a permeabilidade da pasta e contribuem para a obtenção de melhores desempenhos, quanto à durabilidade.

Em termos de durabilidade, o método da ABCP aconselha considerar as recomendações do Comitê ACI 201 que, resumidas através da tabela 4, limitam os valores máximos da relação água/cimento, em função das condições de exposição.

Tabela 4: relação água/cimento x em função do tipo de estrutura e das condições de exposição (ACI 211.1-81)

Tipo de Estrutura	Estrutura continuamente ou frequentemente úmida e exposta a congelamento e degelo*	Estrutura exposta à água de mar ou Sulfatos
Peças delgadas (parapeitos, guias, soleiras, abas e concreto ornamental)	0,45	0,40 **
Todas as outras estruturas	0,50	0,45 **

* O concreto submetido a ciclos de congelamento e degelo deve ter ar incorporado.

** Caso sejam utilizados cimentos resistentes aos sulfatos as relações água/cimento podem ser incrementadas em 0,05.

O valor da relação água/cimento x , a ser adotada no traço de concreto, será o menor dos dois valores requeridos para atender, simultaneamente, as exigências de resistência e durabilidade estabelecidas.

e) O consumo de cimento C do traço por m^3 de concreto fica determinado com base no consumo de água e na relação $x \Rightarrow C \text{ (kg/m}^3\text{)} = Q \text{ (kg/m}^3\text{)} \div x$

f) De acordo com a filosofia do método de conseguir uma trabalhabilidade compatível com o menor volume de vazios possível, realiza-se o proporcionamento entre agregado graúdo e agregado miúdo, adotando-se o conceito de colocar na mistura o máximo volume de agregado compactado seco por m^3 de concreto.

Através da tabela 5, (RODRIGUES, 1990) construída com base em ensaios realizados na ABCP, determinam-se resultados médios que permitem obter, a partir do Módulo de finura da areia e da Dimensão máxima característica do agregado total, o volume máximo de agregado graúdo compactado seco (V_{CS}) a ser colocado por m^3 de concreto.

A determinação da massa unitária do agregado em estado compactado seco realiza-se segundo a norma NBR 7810 (ABNT, 1983b) - Agregado em Estado Compactado e Seco. Determinação da Massa Unitária. O processo padronizado descrito na NBR 7810 (ABNT, 1983b) faz que o agregado graúdo se apresente com certo grau de compactação que tem associado um certo volume de vazios. O agregado graúdo no interior do concreto, misturado com a areia, o cimento e a água tem um grau de compactação menor, apresentando, portanto, um volume de vazios superior ao obtido no ensaio da norma. Tanto o método da ACI como o método da ABCP, através da observação de numerosas misturas experimentais, levam em conta de forma implícita, essa diferença dos graus de compactação e o conseqüente aumento do volume de vazios na massa de concreto. A tabela que fornece valores do volume ocupado pelo agregado graúdo contido em $1m^3$

de concreto compactado evidencia que quando a Dimensão máxima característica do agregado (D_{mc}) graúdo aumenta, deixando o restante das variáveis fixas, é necessário menor quantidade de argamassa para manter a mesma trabalhabilidade. Também fica evidente que fixando a Dimensão máxima característica (D_{mc}) do agregado graúdo quando aumenta o Módulo de finura da areia diminui o volume compactado de agregado graúdo por m^3 de concreto. Este último fato é devido a que, para manter a consistência de um concreto, é necessária mais argamassa para areias mais grossas com menor superfície específica.

Tabela 5: volume compactado seco (V_{CS}) de agregado graúdo por m^3 de concreto, função do Módulo de finura da areia e da Dimensão máx. car. (D_{mc}) do agregado graúdo

Módulo de Finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo D_{mc} (mm)				
	9,5	19	25	32	38
MF	Volume compactado seco (V_{CS}) de agregado graúdo por m^3 de concreto				
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2,0	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3,0	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Obs: Os volumes de agregado compactado seco referem-se à mistura de todos os tipos de brita que entram na composição do concreto.

(fonte: RODRIGUES, 1990)

O valor extraído da tabela 5, que corresponde ao volume compactado seco V_{CS} de agregado graúdo por m^3 de concreto, é multiplicado pela massa unitária do agregado compactado seco, determinando-se a massa do agregado graúdo a ser adicionado na mistura.

Experiências desenvolvidas na ABCP (RODRIGUES, 1990) mostram que, para os agregados classificados de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 1983a), o menor volume de vazios obtido na mistura de duas britas de graduação contínua é conseguido quando se mistura 50% de cada uma delas, com a exceção da mistura de brita 0 e da brita 1, cuja proporção fica 30% de brita 0 + 70% de brita 1.

g) A quantidade de areia (em kg) no traço é determinada pelo método volumétrico admitindo que o volume de concreto é composto pela soma dos volumes absolutos do cimento, da água, dos agregados e o volume do ar aprisionado. Também deveriam ser considerados os volumes de

aditivos e ar eventualmente incorporados para melhorar o desempenho das misturas. A fórmula para determinar a quantidade de areia é a seguinte:

$$A = \left[1 - \left(C / \gamma_c + B / \gamma_b + Q / \gamma_Q + V_{\text{apreisionado}} \right) \right] \times \gamma_a$$

onde:

A = Quantidade (kg) de agregado miúdo por m³ de concreto;

C = Quantidade (kg) de cimento por m³ de concreto;

B = Quantidade (kg) de brita por m³ de concreto;

Q = Quantidade (kg) de água por m³ de concreto;

V_{ar aprisionado} = Volume de ar aprisionado (m³);

γ_c = massa específica do cimento (kg/m³);

γ_b = massa específica da brita (kg/m³);

γ_Q = massa específica da água (kg/m³);

γ_a = massa específica da areia (kg/m³).

h) Finalmente a apresentação do traço em massa é feita em função das relações dos diversos componentes em relação à massa de cimento: 1: A/C : B/C // Q/C \Rightarrow 1: a: b // x

Uma vez determinado o traço teórico procede-se à mistura experimental, que permite realizar os acertos necessários para a obtenção dum concreto, adequado aos requerimentos de trabalhabilidade e desempenho exigidos. O concreto deverá ser avaliado quanto à sua massa específica e teor de ar, verificando a consistência de maneira que não exista segregação e que a exsudação não seja excessiva para produzir um bom acabamento.

O método alerta sobre a necessidade de cuidar que os equipamentos de produção empregados no laboratório apresentem similares características aos equipamentos da obra, de maneira a evitar diferenças significativas nas condições de trabalhabilidade das misturas obtidas em um e outro caso. Além disso, recomenda-se que a água de amassamento, estimada inicialmente, nunca seja colocada de uma única vez, e sim gradativamente, verificando a obtenção da consistência desejada através do ensaio de abatimento.

Quando a quantidade de água de mistura, prevista pelo método, for suficiente para alcançar o abatimento necessário, mas o traço se apresentar pouco argamassado, dever-se-á acrescentar mais areia à mistura, diminuindo-se a quantidade de brita, de forma a manter fixa a relação m. Desta

maneira, conservando-se m fixo e com a relação água/cimento inicial inalterada, não existirá variação da relação H e, teoricamente, não haverá alteração do abatimento necessário. Se por outro lado, a mistura se apresentar muito argamassada, deverá ser acrescentado agregado graúdo, em substituição da areia, para conservar o m fixo.

No caso que a quantidade de água de mistura for insuficiente para alcançar o abatimento, deverão ser aumentadas as quantidades de água e de cimento, de forma a conservar a mesma relação água/cimento e diminuir a relação m do traço. Quando a quantidade de água, prevista pelo traço, for maior que a necessária para atingir o abatimento buscado, caberá duas possibilidades. Uma primeira alternativa, sugerida pela ACI-211/81, seria manter as quantidades e proporções de cimento, areia e brita, de maneira a adotar uma relação água/cimento menor, às custas de um maior consumo de cimento. Uma segunda alternativa, mais econômica, consistiria em colocar toda a água do traço, e acrescentar na mistura, quantidades de areia e brita, de maneira a manter a relação água/cimento e o teor de argamassa do traço, inicialmente determinado pelo método. Para efetuar a necessária correção do abatimento, o método original do ACI recomenda aumentar ou diminuir a quantidade de água em 2 kg/m^3 para cada 10 mm de diferença no abatimento desejado. Quando se pretenda substituir parte da água de amassamento da mistura de concreto através da incorporação de ar, o ajuste do traço deverá ser feito aumentando ou diminuindo a água da mistura em 3 kg/m^3 de concreto para cada 1% de ar incorporado que se queira aumentar ou diminuir.

3.2 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS EPUSP/IPT

3.2.1 Histórico do método

O método denominado EPUSP/IPT, apresentado no Manual de Dosagem e Controle de Concreto (HELENE; TERZIAN, 1992), constitui-se numa atualização e generalização feita na Escola Politécnica da USP a partir do método desenvolvido inicialmente no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

3.2.2 Fórmulas e parâmetros fundamentais considerados no método

O método de dosagem EPUSP/IPT estabelece, como resultado final de sua aplicação, um diagrama de dosagem graficado sobre três quadrantes onde são representadas “leis de comportamento” expressas pelas correlações apresentadas a seguir:

$$i) f_{cj} = \frac{A}{B^x} \rightarrow \text{“Lei de Abrams”}$$

onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial em MPa, à idade j (dias);

x = relação água/cimento, em massa (kg/kg).

$$ii) m = K_3 + K_4 \times x \rightarrow \text{“Lei de Lyse”}$$

onde:

m = relação agregado/cimento, em massa (kg/kg).

$$iii) m = (a + b)$$

onde:

m = relação agregado/cimento, em massa (kg/kg);

a = relação agregado miúdo/cimento, em massa (kg/kg);

b = relação agregado graúdo/cimento, em massa (kg/kg).

$$iv) C = \frac{1000}{(K_5 + K_6 \times m)} \rightarrow \text{“Lei de Molinari”}$$

onde:

C = consumo de cimento/ m^3 de concreto .

$$v) \alpha(\%) = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \times 100 \rightarrow \text{“teor de argamassa seca”}$$

Observação: As constantes A , B e K_i dependem exclusivamente dos materiais empregados (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos, aditivos), ou seja, fixados certos materiais, os valores das constantes K_i ficam determinados.

As atividades, variáveis e dados de entrada do método estão apresentados no fluxograma simplificado representado na figura 6.

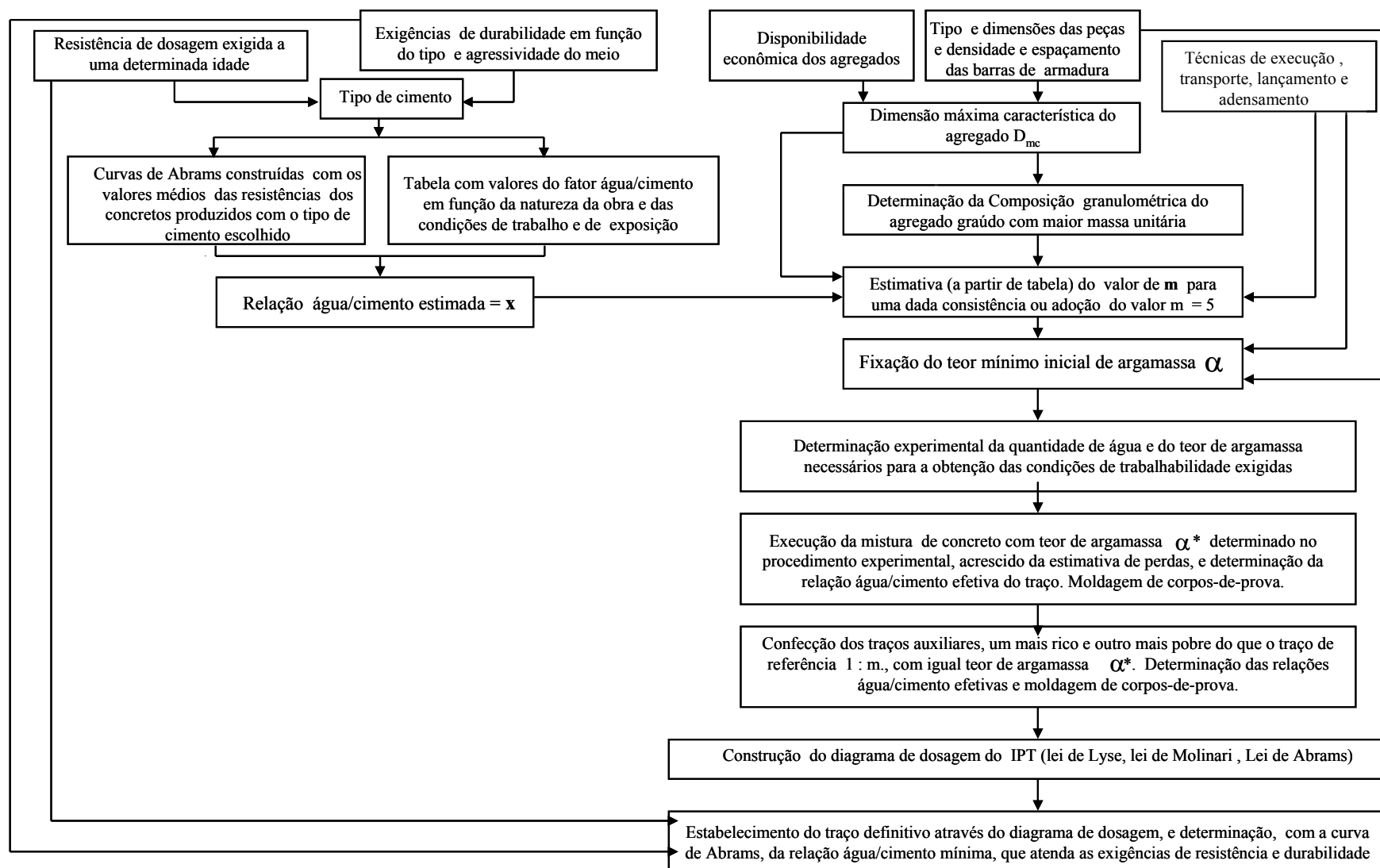


Figura 6: fluxograma simplificado do método de dosagem EPUSP/IPT

3.2.3 Fórmulas complementares

$$\text{vi) } C = \frac{1000}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x + ar_{\text{incorporado-e/ou-aprisionado}} \right)}$$

$$\text{vii) } Q = C \times x$$

onde:

Q = consumo de água/m³ de concreto.

Observação: γ_{concreto} , γ_a , γ_b , γ_c , são, respectivamente, as massas específicas do concreto, da areia, da pedra e do cimento expressas em kg/dm³. O ar incorporado e/ou aprisionado é o teor de ar incorporado intencionalmente ou aprisionado involuntariamente no processo de mistura por m³ de concreto e está expresso em dm³/m³.

3.2.4 Premissas e informações básicas para a aplicação do método de dosagem

A consistência do concreto fresco depende da forma e composição granulométrica do agregado graúdo, e da consistência da argamassa, que por sua vez está condicionada pela forma e granulometria do agregado miúdo e pela consistência da pasta, que depende da quantidade de água em relação à quantidade de cimento (x).

Na Figura 7 (TANGO, 1993) apresenta a influência dos fatores anteriormente citados.

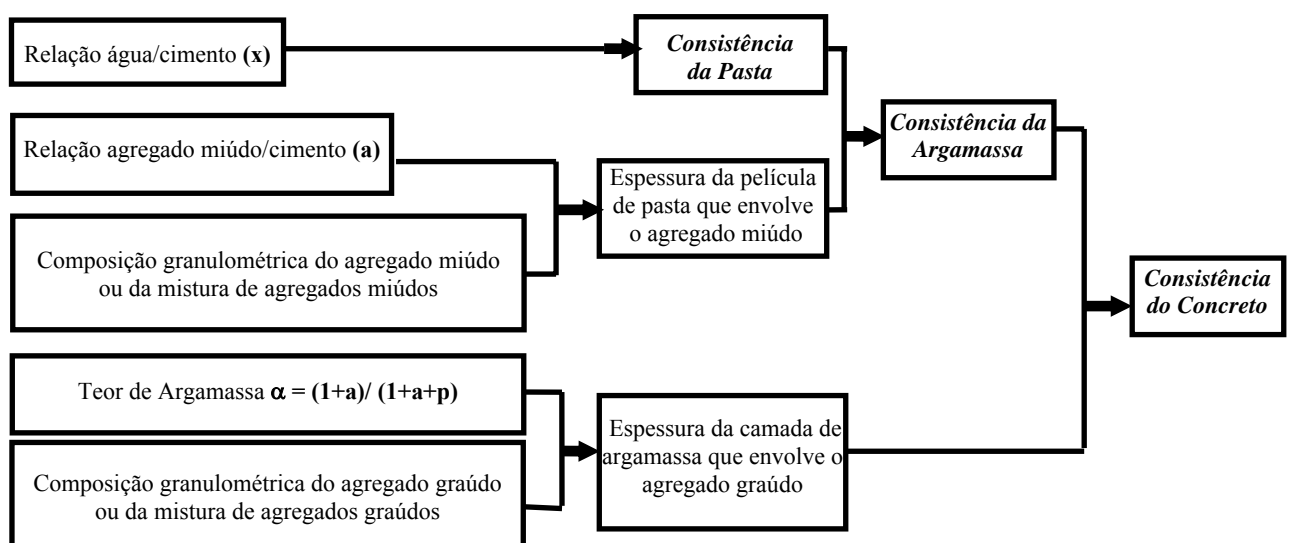


Figura 7: parâmetros e fatores que influenciam a consistência do concreto
(fonte: TANGO, 1993)

3.2.5 Cálculo da relação água/cimento (x)

Sabe-se que quando se trabalha com concretos plásticos adensados em condições adequadas de compactação (que minimizam a possibilidade de existência de vazios), a resistência à compressão está condicionada pela relação água/cimento (x) e pelo grau de hidratação, quando permanecem constantes os materiais constituintes e as condições de cura. A partir desta consideração, constatase que a determinação da correlação existente entre a resistência à compressão axial e a relação x constitui-se numa informação fundamental para o desenvolvimento do processo de dosagem.

Para resolver este problema, Helene e Terzian (1992) sugerem o emprego de correlações, para diferentes idades de referência, obtidas por Helene (1987). As correlações são fruto de um estudo desenvolvido a nível nacional (HELENE, 1987) sobre as resistências médias à compressão dos principais tipos de cimento usados no país e de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados, combinados em diversas proporções e com distintos relações água/aglomerante. Exemplos das fórmulas matemáticas das correlações obtidas para cimento do tipo CP I- 32 são apresentadas, na sua forma $f_c = A / B^x$, a seguir:

$$\begin{array}{lll}
 f_{c3} = 79,4 / 25,9^x & x = (\log 79,4 - \log f_{c3}) / \log 25,9 & x = 0,71 \log (79,4/f_{c3}) \\
 f_{c7} = 86,8 / 14,9^x & x = (\log 86,8 - \log f_{c7}) / \log 14,9 & x = 0,85 \log (86,8/f_{c7}) \\
 f_{c28} = 92,8 / 7,9^x & x = (\log 92,8 - \log f_{c28}) / \log 7,9 & x = 1,11 \log (92,8/f_{c28}) \\
 f_{c63} = 95,4 / 6,8^x & x = (\log 95,4 - \log f_{c63}) / \log 6,8 & x = 1,20 \log (95,4/f_{c63}) \\
 f_{c91} = 97,5 / 5,9^x & x = (\log 97,5 - \log f_{c91}) / \log 5,9 & x = 1,30 \log (97,5/f_{c91})
 \end{array}$$

Onde: f_{c3} , f_{c7} , f_{c28} , f_{c63} , f_{c91} são, respectivamente, as resistências de dosagem requeridas nas idades de referência de 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

A tabela 6 (TANGO, 1993) fornece estimativas das relações (x) para resistências de dosagem, aos 28 dias, para concretos proporcionados com diferentes tipos e classes de cimento.

Tabela 6: estimativa da relação água/cimento para diferentes tipos e classes de cimentos

Resistência f_c requerida aos j^* dias (MPa)	Relação água/cimento x , estimada para cimentos do tipo			
	CP III, CP IV			CPV- ARI
	classe 25	classe 32	classe 40	
10	0,79 •	0,89 •	0,96 •	0,89 •+
15	0,64 •	0,74 •	0,81 •	0,74 •+
20	0,53	0,63 •	0,71 •	0,63 •+
25	0,45	0,55	0,62 •	0,55
30	0,38 #	0,48	0,56	0,48
35	0,32 #	0,42	0,5	0,42
40	⊗ #	0,37 #	0,45	0,37 #
45	⊗ #	0,33 #	0,41	0,33 #
50	⊗ #	⊗ #	0,37 #	0,29 #
60	⊗ #	⊗ #	0,30 #	⊗ #
>70	⊗ #	⊗ #	⊗ #	⊗ #

Observações: * j = 28 dias para cimentos não ARI; * j = 7 dias para cimentos ARI;
 + vale a pena tentar fazer a dosagem a 7 dias com cimentos não-ARI;
 • relações água/cimento permitidas apenas para peças abrigadas, em atmosfera não agressiva;
 ⊗ use cimento de classe superior, ou adição ativa à idade j (Microsilica), com auxílio de engenheiro tecnologista de concreto.

(fonte: TANGO, 1993).

3.2.6 Parte experimental do método

A fase experimental é desenvolvida com vistas à montagem de um diagrama de dosagem que correlaciona, esquematicamente, a resistência à compressão (f_c), a relação água/cimento (x), o teor agregado/cimento (m) e o consumo de cimento/ m^3 de concreto (C).

a) Determinação do tipo, tamanho e composição granulométrica dos agregados a serem usados nas misturas experimentais.

Uma vez determinada a dimensão máxima característica do agregado gráudo em função das particularidades da estrutura e das exigências de trabalhabilidade, parte-se para a escolha de agregados gráudos ou da mistura deles levando em conta a disponibilidade local e considerando custos compatíveis com as possibilidades econômicas da obra. O princípio a ser seguido, é obter uma composição granulométrica do agregado gráudo que possibilite a obtenção de uma mistura com máxima massa unitária. Para tal fim, adota-se um procedimento prático e relativamente simples que baseia-se na utilização do método da NBR 7810 (ABNT, 1983b) – “Agregado em Estado Compactado Seco - Determinação da massa unitária”. Como sugere Tango (1993): mistura-se, os agregados em várias proporções tentativas e medem-se as respectivas massas

unitárias no estado compactado seco, escolhendo-se a composição mais compacta com a eventual ajuda de um gráfico que relacione as proporções entre os agregados da mistura e a Massa unitária obtida.

Observa-se que Helene (1992) destaca que: “quando o agregado graúdo for considerado de forma lamelar, a composição “ideal” deve ser confirmada em estudo prático de dosagem, pois o material pode induzir à necessidade de um alto teor de argamassa no concreto, tornando-o anti-econômico”.

Embora não seja freqüente a mistura de agregados miúdos, admite-se a validade dos princípios e práticas aplicadas para os agregados graúdos.

b) Determinação da relação $m = (\text{agregado total})/\text{cimento}$, para início do estudo experimental.

Helene e Terzian (1992) sugerem a fixação de um traço inicial 1: 5 (cimento: agregado seco total, em massa) que permitirá, ao ser misturado na betoneira, obter as informações necessárias (teor de argamassa adequado e demanda de água) para a confecção de dois traços complementares, um mais rico em cimento 1: 3,5 e outro mais pobre 1: 6,5, cujos dados servirão para a construção do diagrama de dosagem.

Tango (1993) recomenda o uso de uma tabela 7, de Torres e Rosman (ABCP, 1956), que permite uma primeira estimativa do valor de m , para uma consistência intermediária, em função da relação água/cimento (x) e em função da dimensão máxima característica do agregado D_{mc} (mm).

Tabela 7: estimativa do teor agregado/cimento (m) em função da D_{mc} do agregado e da relação água/cimento (x)

Relação água/cimento	Dimensão máxima característica do agregado D_{mc} (mm)				
	9,5	19	25	38	50
(x)					
0,30	-	-	-	-	-
0,35	2	3	3	3	4
0,40	3	3	3	4	4
0,45	3	4	4	4	5
0,50	4	4	5	5	5
0,55	4	5	5	6	6
0,60	4	5	6	6	7
0,65	5	6	6	7	7
0,70	5	6	7	7	8
0,75	6	7	7	8	9
0,80	6	7	8	9	9
0,85	7	8	8	9	10
0,90	7	8	9	10	-

c) Determinação do teor ideal de argamassa (α) no traço inicial de concreto 1 : **m**.

O objetivo desta etapa consiste em determinar experimentalmente a quantidade mínima de materiais finos (cimento e agregados miúdos) suficiente para atingir uma trabalhabilidade do concreto compatível com os processos de transporte, lançamento e adensamento a serem empregados e conseguir um acabamento superficial adequado às exigências das peças e ao tipo de estrutura.

Helene (1992) ressalta que a falta de argamassa pode resultar na ocorrência de vazios na estrutura do concreto assim como falhas de concretagem. Por outro lado, um excesso de materiais finos, favorável para a obtenção de uma boa aparência do concreto, pode resultar numa maior retração por secagem, num maior risco de fissuração por origem térmica e num maior custo por m^3 de concreto produzido.

A determinação experimental do teor ideal de argamassa deve ser realizada através da seguinte seqüência de atividades:

i) A partir do traço inicial 1: **m** (por exemplo 1: 5), fixa-se um teor de argamassa $\alpha_1 = (1+a_1)/(1+m)$ que possa ser considerado como mínimo possível.

Fixados **m** e α_1 , fica determinada a relação agregado miúdo / agregado total:

$a_1 = \alpha_1 * (1+m) - 1$ e conseqüentemente, a proporção de agregado graúdo / agregado total:
 $b_1 = m - a_1$

ii) Adota-se uma massa B de agregado graúdo de, por exemplo, 30 kg, suficiente para produzir numa betoneira pequena (capacidade nominal entre 90 e 100 litros), uma quantidade de concreto adequada para a realização de ensaios que possibilitem a comprovação das propriedades e características buscadas no traço.

Escolhida a massa B correspondente à proporção de brita b_1 , calcula-se a massa de cimento = B/b_1 e calcula-se a quantidade de agregado miúdo $A_1 = a_1 * (B/b_1)$. A estimativa inicial da quantidade de água total de mistura será determinada pela expressão $(B/b_1) * x$, resultante de multiplicar a quantidade, em massa, de cimento pela relação água/cimento estabelecida previamente para atender as condições de resistência e durabilidade esperadas.

iii) A seguir, procede-se à introdução na cuba da betoneira (com sua superfície interna previamente untada ou “imprimada” com argamassa de igual proporção que a calculada para o traço) as quantidades de materiais determinados a partir dos 30 kg de agregado graúdo. Adota-se como prática freqüente lançar em primeiro lugar aproximadamente 80 % da água total calculada

(considerando que se trabalha com os agregados em estado seco), para posteriormente introduzir os 30 kg de agregado graúdo e finalmente as quantidades de cimento e de areia. Uma vez introduzidos todos os materiais na cuba eles devem ser misturados durante cinco minutos, com uma parada intermediária para limpeza das pás do equipamento. Finalmente, para ajustar a consistência do concreto dentro dos limites requeridos, acrescenta-se o restante da água e eventualmente o aditivo (se estiver previsto seu uso).

iv) Para a definição do teor ideal de argamassa realizam-se, sobre o concreto bem misturado, uma série de verificações e observações práticas que são descritas a seguir:

- Com a betoneira desligada, retira-se todo o material aderido nas pás e na superfície interna.
- Com uma colher de pedreiro, deve-se trazer todo o material para a região inferior da cuba, introduzindo os agregados soltos no interior da mistura.

- Passar a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, introduzir dentro da massa e levantar no sentido vertical. Verificar se a superfície exposta está com vazios, indicando falta de argamassa de preenchimento.

- Passar a colher de pedreiro no concreto e retirar uma parte do mesmo levantando-o até a região superior da cuba da betoneira. Com o material nesta posição, verificar se há desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indica falta de argamassa da mistura. Após esta observação, soltar a porção de concreto que está sobre a colher e verificar se a mesma cai de modo compacto e homogêneo, o que indica teor de argamassa adequado.

- Quando a mistura verificada, seguindo os procedimentos descritos anteriormente, não tenha vazios na superfície, nem desprendimento de agregados e, a massa do material apresente uma queda de modo homogêneo e compacto, poder-se-á concluir que o concreto obtido possui um teor de argamassa adequado.

- Determina-se, então, o abatimento do concreto através do ensaio do tronco de cone (NBR NM 67 (ABNT, 1998a)) e caso não seja obtida a consistência dentro da faixa preestabelecida, deve-se acrescentar a quantidade de água e/ou de aditivo necessários para atingir tal objetivo.

- No ensaio de abatimento, deve ser observado se a superfície lateral do cone de concreto formado está compacta e sem vazios e se ao redor da base do tronco de cone aparece uma camada de água oriunda da mistura. Quando a superfície lateral se apresente áspera, com o agregado graúdo sem recobrimento e seja observada uma tendência à exsudação da água na base do cone,

estará sendo evidenciada uma carência do teor de finos da mistura que deverá ser corrigida com uma mudança na granulometria do agregado miúdo e/ou com o aumento do teor de argamassa.

Para finalizar os testes complementares do ensaio de abatimento deve-se bater suavemente, com auxílio da haste de adensamento, na lateral inferior do tronco de cone de concreto formado, com o objetivo de verificar sua queda. Se a mesma acontecer de modo homogêneo, sem desprendimento de porções, pode-se admitir que o concreto apresenta um teor de argamassa considerado bom.

Caso o teor de argamassa, adotado na primeira tentativa de proporcionamento dos agregados miúdos e graúdos do concreto, seja considerado como insuficiente, após efetuada a série de ensaios anteriormente apresentados, deve-se aumentar a quantidade de argamassa em função da experiência do profissional envolvido na dosagem, ou seguir as recomendações do método que sugere ir aumentando de 2 em 2% o teor de argamassa da mistura até que as comprovações anteriores permitam considerar as misturas como satisfatórias.

Observa-se que todas as correções necessárias para obter o teor de finos adequado na mistura, devem ser feitas incorporando à massa original de brita B = 30 kg, as quantidades de agregado miúdo e de cimento correspondentes a cada acréscimo de 2% do teor de argamassa. Como o número de iterações no processo de acréscimo pode ser grande pela falta de experiência do responsável pela dosagem, recomenda-se preparar as quantidades de cimento e de agregado miúdo correspondentes a cada incremento do teor de argamassa, de maneira a passar rapidamente de uma proporção a outra. Helene e Terzian (1992) apresentam um conjunto de 5 tabelas (8, 9, 10, 11 e 12) de apoio que facilitam o desenvolvimento do estudo de dosagem, fornecendo os valores numéricos para correção das quantidades de mistura.

Tabela 8: quantidades de cimento e areia que devem ser adicionadas para misturas com teores de argamassa α crescentes, para 30 kg de brita

Teor de agregados (%)	Traço Unitário (1: a: p)	Q ^{tdc} de Areia (kg)		Q ^{tdc} de Areia (kg)		Q ^{tdc} de Areia (kg)		Relação a/c final
		Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acrésc na mistura	Massa Total	Acrésc na mistura	
35	1:1,10:3,90	8,46	1,22	7,69	0,25			
37	1:1,22:3,78	9,68	1,31	7,94	0,26			
39	1:1,34:3,66	10,99	1,37	8,20	0,27			
41	1:1,46:3,54	12,36	1,50	8,47	0,30			
43	1:1,58:3,42	13,86	1,39	8,77	0,32			
45	1:1,70:3,30	15,45	1,72	9,09	0,34			
47	1:1,82:3,16	17,17	1,85	9,43	0,37			
49	1:1,94:3,06	19,02	2,00	9,80	0,40			
51	1:2,06:2,94	21,02	2,17	10,20	0,44			
53	1:2,16:2,82	23,19	2,36	10,64	0,47			
55	1:2,30:2,70	25,55	2,59	11,11	0,52			
57	1:2,42:2,58	28,14	2,84	11,63	0,57			
59	1:2,54:2,46	30,98	3,12	12,20	0,62			
61	1:2,66:2,34	34,1	3,47	12,82	0,69			
63	1:2,78:2,22	37,57	3,86	13,51	0,78			
65	1:2,90:2,10	41,43		14,29				

(fonte: HELENE; TERZIAN, 1992)

Tabela 9: características do concreto

Características do Concreto	
1. Teor de argamassa adotado (%)	
2. Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	
3. Teor de ar incorporado e/ou ar aprisionado (l/m ³)	
4. Abatimento obtido (mm)	

Tabela 10: abatimento

Abatimento
-----±-----

(fonte: HELENE; TERZIAN, 1992)

Tabela 11: quantidade de agregado graúdo na mistura

Quantidade de agregado graúdo na mistura		
Total : 30 kg		
Individual	Massa (kg)	%
Pedra britada N° 0		
Pedra britada N° 0		
Pedra britada N° 0		

Tabela 12: consumo de água e de cimento

Consumo por m ³ de concreto	
1. Cimento:	kg
2. Água:	litros

(fonte: HELENE; TERZIAN, 1992)

Os acréscimos (entre os teores de argamassa de 44 a 54 %, requeridos em concretos correntes produzidos com britas 1 e 2) podem estar preparados e claramente identificados com antecedência de forma de evitar trocas involuntárias e acelerar o processo de dosagem, minimizando-se a perda de água de amassamento por evaporação. Por este último motivo resulta difícil, no processo iterativo, calcular a quantidade de água requerida para atingir a consistência empregada. Esta última constatação, somada ao fato de que existem também perdas de água e de argamassa nas determinações dos abatimentos em cada etapa, impõem a necessidade de realizar uma nova mistura com o traço de concreto 1: **m** (1: 5) cuja proporção entre cimento e agregados será condicionada pela relação α_{final} determinada.

- Uma vez estabelecido, através dos ensaios de laboratório, o teor de argamassa que se apresenta como mais adequado para que o concreto atenda os requisitos apresentados nos itens anteriores, deve-se considerar ainda um fator externo que é a possibilidade de perda de argamassa no processo de transporte e lançamento. Em processos usuais de concretagem o valor das perdas pode estimar-se entre os limites de 2 e 4 %.

d) Execução da mistura de concreto com teor de argamassa α^* definido no procedimento experimental acrescido da estimativa de perdas.

Executa-se uma nova mistura de concreto de traço 1: **m** (1: 5) com teor de argamassa α^* e determinam-se as características do concreto fresco:

- Relação água/cimento, necessária para a consistência desejada (medida pelo abatimento);
- Consumo de cimento por m³ de concreto;
- Consumo de água por m³ de concreto;
- Massa específica do concreto fresco.

Observa-se que, somente através desta mistura final, será estabelecida a efetiva relação água/cimento do traço de referência 1: m e a avaliação do comportamento do concreto fresco fornecerá subsídios para uma decisão definitiva quanto à adequação do teor de argamassa α^* a ser adotado como parâmetro de dosagem definitivo. Com o concreto produzido, moldam-se e curam-se pares de corpos-de-prova cilíndricos de concreto (seguindo as diretrizes da norma NBR 5738 (ABNT, 1994b)). Os exemplares moldados são destinados ao ensaio de compressão (conforme NBR 5739 (ABNT, 1994a)) nas idades de referência, para os quais serão construídas as curvas de resistência do diagrama de dosagem.

3.2.7 Confeção dos traços auxiliares (mais pobre e mais rico que 1:m)

Esta etapa do método consiste em produzir dois traços auxiliares, para montar, junto com o traço de referência, o diagrama de dosagem do IPT. O traço médio será o traço de referência (também denominado traço normal) e os traços auxiliares escolhidos apresentarão uma diferença de uma unidade e meia para mais e para menos com respeito ao teor m de agregado total. Observa-se que Tango (1993) adota, para o traço mais rico e o mais pobre, uma diferença de apenas uma unidade com respeito ao valor de m . Ressalta-se a importância de que os novos traços a serem produzidos mantenham fixo o teor de argamassa $\alpha^* = (1 + a^*)/(1 + m)$ do traço normal assim como também apresentem o mesmo abatimento do tronco de cone.

i) Obtenção do traço mais rico 1: m_r (1: 3,5) com $\alpha_r = \alpha^* \Rightarrow a_r = \alpha^* (1+m_r) - 1 \Rightarrow$

$$b_r = m_r - a_r$$

ii) Obtenção do traço mais pobre 1: m_p (1: 6,5) com $\alpha_p = \alpha^* \Rightarrow a_p = \alpha^* (1+m_p) - 1 \Rightarrow$

$$b_p = m_p - a_p$$

Nesta etapa da dosagem, Helene e Terzian (1992) apresentam a tabela 13 para os concretos: normal, rico e pobre, que fornecem os traços unitários desdobrados de cada um deles para os diferentes teores de argamassa possíveis.

Tabela 13: traços dos concretos: pobre, normal e rico com diferentes teores de argamassa

Teor de argamassa	Traço 1: 3,5	Traço 1: 5,0	Traço 1: 6,5
α (%)	Traço unitário individual rico 1: a_r : p_r	Traço unitário individual normal 1: a_n : p_n	Traço unitário individual pobre 1: a_p : p_p
35	1: 0,58: 2,92	1: 1,10: 3,90	1: 1,63: 4,87
37	1: 0,67: 2,83	1: 1,22: 3,78	1: 1,78: 4,72
39	1: 0,76: 2,74	1: 1,34: 3,66	1: 1,93: 4,57
41	1: 0,85: 2,65	1: 1,46: 3,54	1: 2,08: 4,42
43	1: 0,94: 2,56	1: 1,58: 3,42	1: 2,23: 4,27
45	1: 1,03: 2,47	1: 1,70: 3,30	1: 2,38: 4,12
47	1: 1,12: 2,38	1: 1,82: 3,18	1: 2,53: 3,97
49	1: 1,21: 2,29	1: 1,94: 3,06	1: 2,68: 3,82
51	1: 1,30: 2,20	1: 2,06: 2,94	1: 2,83: 3,67
53	1: 1,39: 2,11	1: 2,18: 2,82	1: 2,98: 3,52
55	1: 1,48: 2,02	1: 2,30: 2,70	1: 3,13: 3,37
57	1: 1,57: 1,93	1: 2,42: 2,58	1: 3,28: 3,22
59	1: 1,66: 1,84	1: 2,54: 2,46	1: 3,43: 3,07
61	1: 1,75: 1,75	1: 2,66: 2,34	1: 3,58: 2,92
63	1: 1,84: 1,66	1: 2,78: 2,22	1: 3,73: 2,77
65	1: 1,93: 1,57	1: 2,90: 2,10	1: 3,88: 2,62

(fonte: HELENE; TERZIAN, 1992)

A única complementação que deveria ser feita, quando necessária, consistiria na determinação das proporções de mistura das parcelas constituintes do agregado graúdo.

3.2.8 Execução das misturas experimentais dos traços “rico” e “pobre”

Da mesma maneira como foram determinadas as características da mistura de concreto fresco do traço 1: m , devem ser determinadas as características e os parâmetros das misturas dos traços 1: m_r e 1: m_p . De forma complementar moldam-se exemplares para ensaios de compressão nas idades de referência, de maneira a possibilitar o traçado das curvas do diagrama de dosagem.

As relações água/cimento efetivas x_r e x_p correspondentes, respectivamente, aos traços “rico” e “pobre” devem ser estabelecidas experimentalmente visando a obtenção da consistência requerida quando se preparam os traços destinados à confecção de corpos-de-prova.

3.2.9 Execução das misturas experimentais dos traços “muito rico” e “muito pobre”

Quando a relação água/cimento necessária, determinada em função das condições de resistência e durabilidade, cai fora do intervalo, definido pelas relações água/cimento correspondentes aos traços avaliados, “rico” e “pobre”, há necessidade de estabelecer novos traços, um “muito rico” ou outro “muito pobre”, que permitam ampliar a validade das curvas determinadas no diagrama de dosagem.

Consideram-se como traços “muito ricos” e “muito pobres” aqueles que apresentem valores de $m\#$ que se afastem mais de 1,5 pontos do valor m do traço de referência.

No caso de ter que trabalhar com traços “muito ricos” o método recomenda proceder a um novo estudo do teor de finos, podendo-se adotar, de forma simplificada, um decréscimo de dois pontos percentuais com respeito ao teor ideal de argamassa para cada 0,5 de decréscimo do traço, abaixo de 1: 3,5. Quando se necessite trabalhar com traços “muito pobres”, deverá se proceder a um acréscimo do teor de argamassa de dois pontos percentuais a respeito do teor ideal de argamassa para cada 0,5 de acréscimo do traço, por cima de 1: 6,5.

3.3 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS INT/LOBO CARNEIRO

3.3.1 Histórico do método

No início de sua carreira, o engenheiro Fernando Lobo Carneiro trabalhou no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, junto ao engenheiro Ary Torres, dedicando-se ao estudo das questões relativas à dosagem de concretos. Ary Torres, por sua vez, confirmando os modelos propostos por R. Ferét e D.Abrams e enfatizando a importância do Módulo de finura do agregado total, destacado por Abrams, publicou, em 1927, no primeiro Boletim do IPT, um trabalho intitulado “Dosagem de Concretos” que esclarecia a correlação entre a resistência à compressão do concreto endurecido e sua compacidade no estado fresco.

De volta ao Rio de Janeiro, Lobo Carneiro passa a integrar a equipe técnica inicial do Instituto Nacional de Tecnologia -INT- criado em 1933, e tenta aplicar o método de dosagem do IPT desenvolvido pelo eng. Ary Torres. Na sua tentativa, depara-se com algumas dificuldades devidas às diferenças encontradas com os agregados graúdos britados e aos menores Módulos de finura das areias disponíveis no Rio com respeito aos pedregulhos e areias mais grossas usados em São

Paulo. O método do Módulo de finura, proposto na época pelo IPT, não indicava como corrigir os problemas decorrentes da granulometria da areia. Enfrentando os problemas anteriormente citados, Lobo Carneiro começou o desenvolvimento de um método de dosagem de concretos plásticos utilizando as idéias das curvas granulométricas propostas por Otto Graf e Bolomey. Considerado como um grande avanço para a época, por fazer do estudo de dosagem de concretos um procedimento mais fácil de entender, o método desenvolvido levou à obtenção de curvas granulométricas adimensionais para diferentes tamanhos de agregado. Sua primeira publicação, em 1937, com o título “Dosagem de Concretos Plásticos” (LOBO CARNEIRO, 1937), permitiu a Lobo Carneiro divulgar um método de grandes possibilidades práticas e que serviu de base para a execução de trabalhos experimentais e para o levantamento de informações de campo que levaram à publicação, em 1943, de um trabalho mais extenso intitulado “Dosagem dos Concretos” (LOBO CARNEIRO, 1943). Esta última versão, que abordava também o problema da dosagem de concretos de consistência seca, era apresentada de forma mais didática, tendo a preocupação de realizar um tratamento teórico da dosagem, complementado-o com orientações práticas que tornaram o método um valioso instrumento para o proporcionamento dos concretos. Embora Lobo Carneiro adotasse para o desenvolvimento de seu método a idéia das curvas dos pesquisadores europeus citados, ele alertava, no seu trabalho de 1943, que essas curvas eram experimentais e nada tinham de absoluto e elas “não são baseadas em considerações teóricas nem resultam de alguma difícil aplicação do cálculo das variações”. Lobo Carneiro enfatizava que “se encontrar o engenheiro algum tipo de agregado inteiramente diferente dos usuais, e, ao executar um concreto graduado segundo essas curvas, verificar que este tem mau aspecto, deverá ele ter sempre presente que, neste caso, *as curvas é que estarão erradas, e não o mau aspecto do concreto*” (LOBO CARNEIRO, 1943).

3.3.2 Descrição do método

As atividades, variáveis e informações de entrada do método estão apresentadas no fluxograma simplificado representado na figura 8.

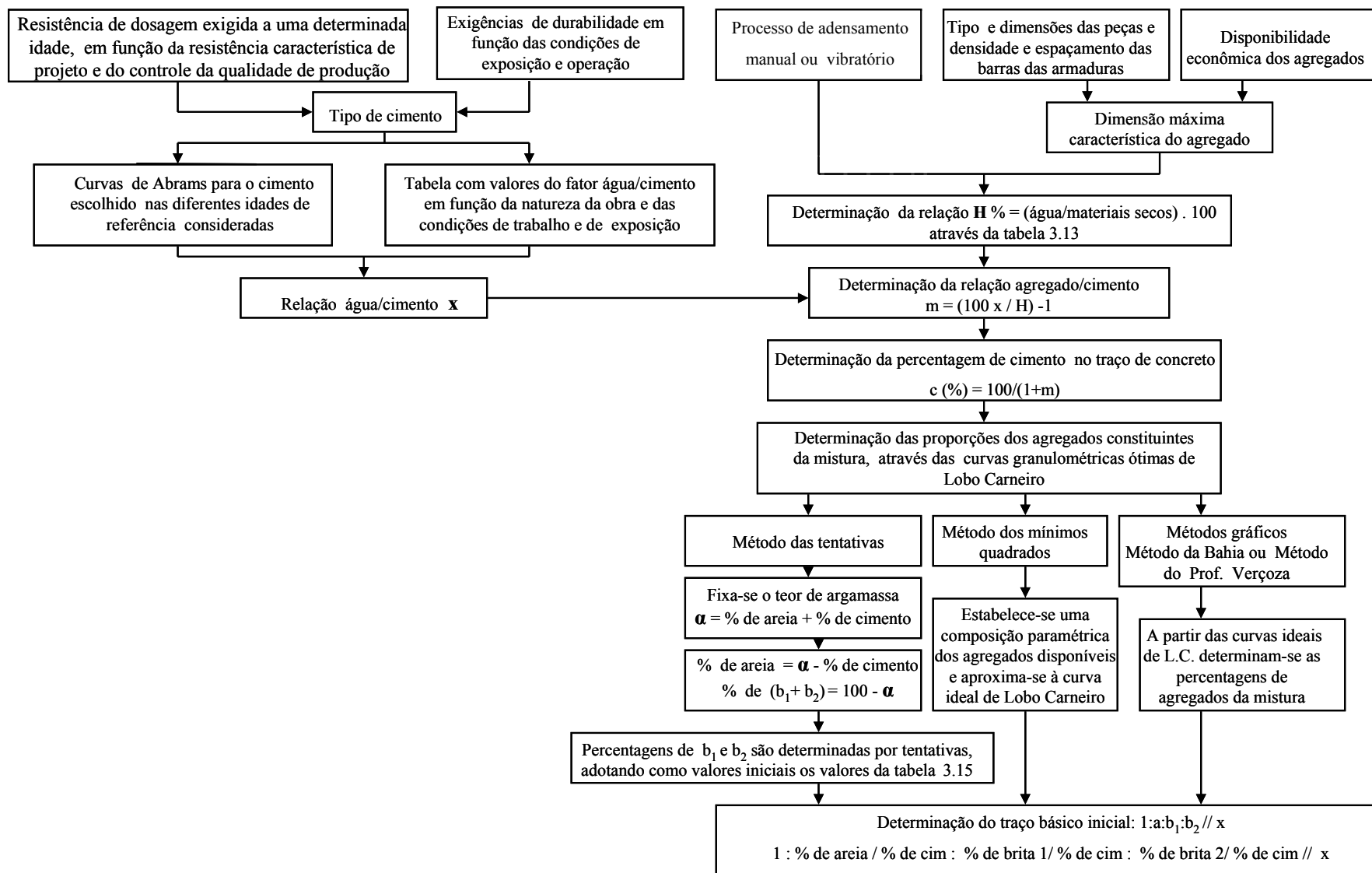


Figura 8: fluxograma simplificado do método de dosagem do INT, desenvolvido pelo Prof. F. L. Lobo Carneiro

A grande vantagem do método de Lobo Carneiro é a possibilidade de ser desenvolvido com o mínimo de ensaios de laboratório, sendo necessárias, basicamente, determinações das composições granulométricas dos agregados, as quais podem ser dispensadas quando se tem conhecimento das composições médias em uma dada localidade. O estabelecimento dos valores médios das granulometrias dos diferentes tipos de agregados de uma determinada região permite a determinação de composições granulométricas de dois ou mais agregados de maneira que estas se enquadrem dentro das faixas estabelecidas pelo Prof. Lobo Carneiro. O método do INT adota, da mesma maneira que Otto Graf, faixas de granulometrias “ótimas”, em lugar de curvas únicas que poderiam apresentar utilidade duvidosa ou ser simplesmente impraticáveis. As faixas de composições granulométricas contínuas ótimas sugeridas por Lobo Carneiro (LOBO CARNEIRO, 1943) estão associadas com diferentes Dimensões máximas características do agregado total (que vão entre 9,5 mm e 76 mm) e com três diferentes possibilidades de adensamento (que vão desde o adensamento manual até o adensamento vibratório intenso).

Lobo Carneiro define como granulometria ótima aquela que permite obter uma mistura de concreto de máxima compacidade (mínimo de vazios) e para a qual corresponde um consumo mínimo de cimento quando é fixada uma mesma consistência e uma mesma relação água/cimento. Fixados um consumo de cimento e uma determinada consistência, pode-se considerar que uma melhor distribuição granulométrica da mistura total de materiais secos, permite a obtenção de concretos mais trabalháveis e mais resistentes.

A maior resistência não é conseqüência direta da melhoria da granulometria, mas sim, de seus efeitos na diminuição da quantidade de água de amassamento (e a conseqüente redução da porosidade da pasta) e no decréscimo da quantidade de vazios e das possíveis imperfeições da massa de concreto quando lançado e adensado.

3.3.3 Desenvolvimento do método

a) O primeiro passo do método, uma vez determinado o tipo de cimento a ser usado, consiste em estimar a relação água/cimento necessária para atender as exigências de resistência mecânica e durabilidade requeridas pela estrutura para a qual o concreto está sendo dosado. Lobo Carneiro baseia-se nos ensaios desenvolvidos no INT, em corpos-de-prova moldados a partir de concretos produzidos com dois tipos diferentes de cimento Portland, que relacionam as diferentes relações água/cimento (x) com as resistências médias à compressão obtidas nas idades de referência (3, 7 e 28 dias). As figuras 9 e 10 mostram graficamente a vinculação entre as resistências à compressão

nas idades de 3, 7 e 28 dias e as relações água/cimento das misturas de concretos produzidos com dois tipos de cimento Portland comum.

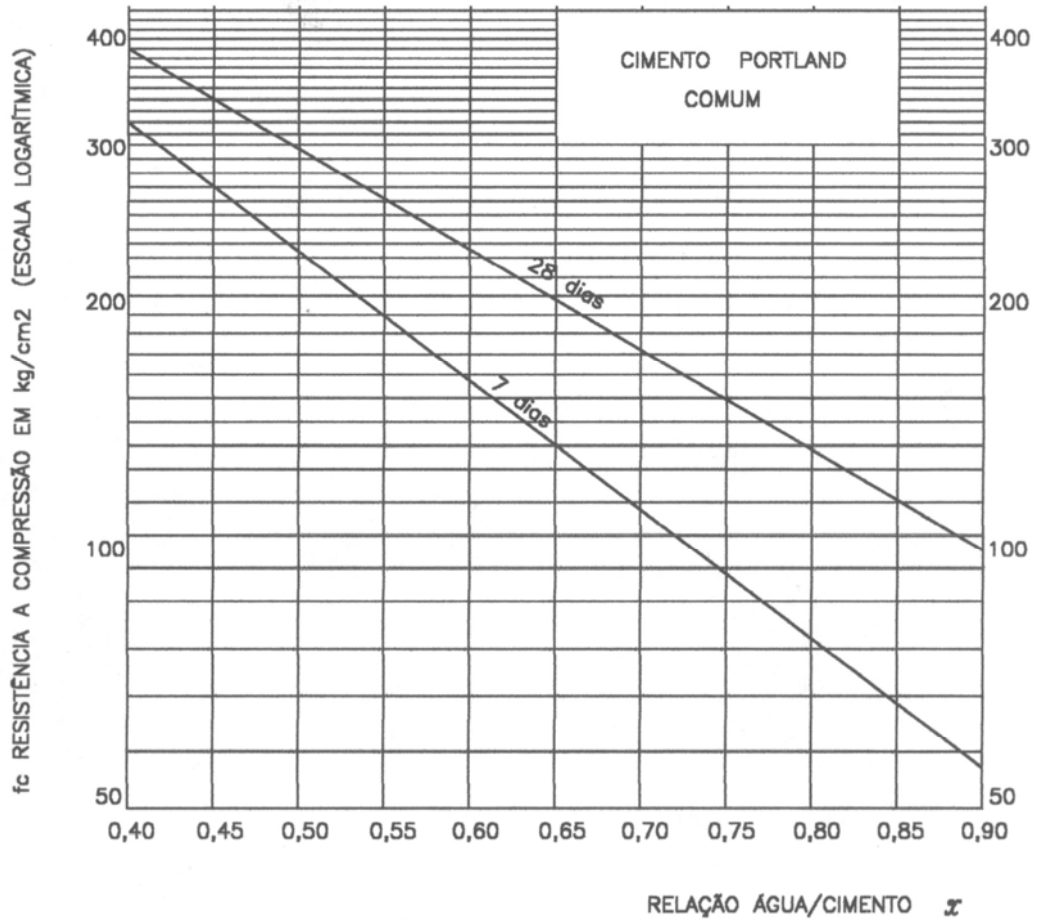


Figura 9: curvas de Abrams para as idades de 7 e 28 dias para cimento Portland comum, marca Mauá, do Rio de Janeiro

(fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

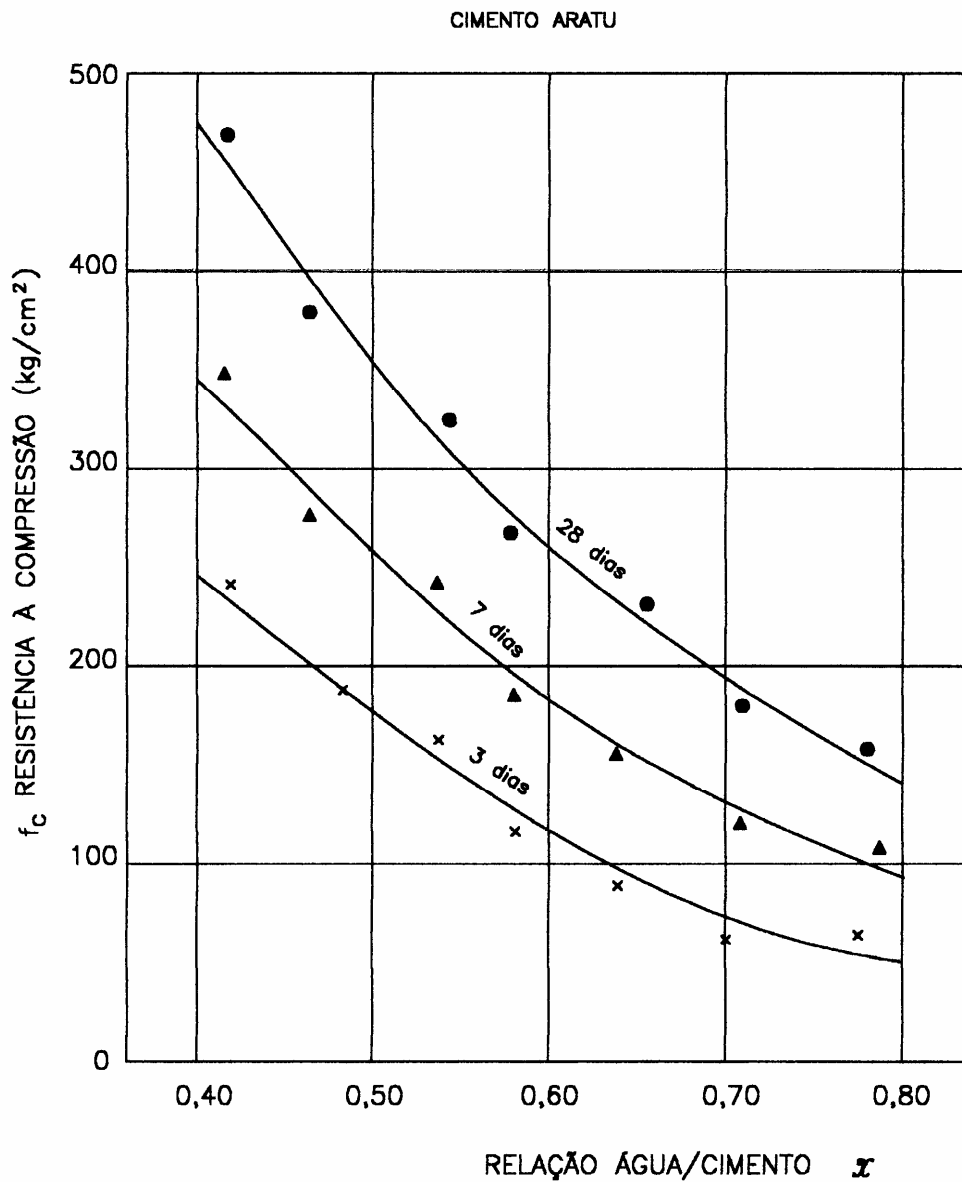


Figura 10: curvas de Abrams para 3, 7 e 28 dias - Cimento ARATU

(fonte: ABCP, 1965)

O método do INT, proposto originalmente em 1937 (LOBO CARNEIRO, 1937), não estabelecia condições de durabilidade para a escolha da relação água/cimento. Já em 1943 (LOBO CARNEIRO, 1943) limitava os valores da relação água/cimento em função das condições de exposição e da natureza da obra, segundo apresentado na tabela 14.

Tabela 14: relações água/cimento recomendadas (em litros/kg e em litros/saco de 42 kg de cimento) em função das condições de exposição e da natureza da obra

		EXTREMA	SEVERA	MODERADA
Condições de exposição		Concreto imerso em meio agressivo	Concreto em contato com água sob pressão Concreto alternadamente em contato com água e ar Concreto exposto às intempéries e ao desgaste	Concreto exposto às intempéries. Concreto permanentemente imerso em meio não agressivo
Natureza da obra	Peças delgadas	0,48 litros/kg ou 20,5 litros/saco	0,54 litros/kg ou 23,0 litros/saco	0,60 litros/kg ou 25,5 litros/saco
	Peças de grandes dimensões	0,54 litros/kg ou 23,0 litros/saco	0,60 litros/kg ou 25,5 litros/saco	0,65 litros/kg ou 0,65 litros/saco

(fonte: LOBO CARNEIRO, 1943)

b) A partir da fixação da relação água/cimento, procede-se à determinação aproximada da proporção cimento:agregado. Para resolver este problema considera-se a lei de Lyse que estabelece que usando os mesmos materiais e fixada uma determinada consistência (escolhida tendo em vista o processo de adensamento e as peças a serem executadas), a percentagem de água/materiais secos **H** (%) é praticamente independente da proporção cimento:agregado (1: **m**). Na Figura 11 (PETRUCCI, 1995) fica evidenciado que a quantidade de água total é praticamente a mesma para traços com diferentes proporções entre os agregados e o aglomerante.

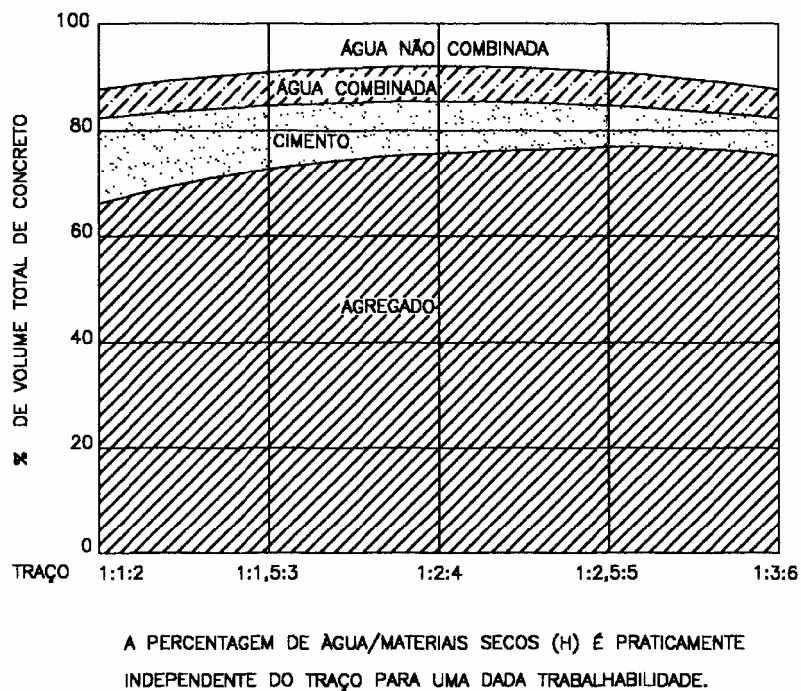


Figura 11: volume total de água em relação ao total de materiais secos para concretos com mesma consistência e com diferentes relações agregado/cimento (m) (fonte: PETRUCCI, 1995)

A relação **H** (%) expressa, em porcentagem, a relação entre a massa de água total (necessária para garantir as reações de hidratação do cimento e para conseguir as condições de trabalhabilidade procuradas) e a massa total da mistura seca cimento e agregado. Então pode-se considerar que para uma mistura de 1 kg de cimento e **m** kg de agregado ($m = \text{areia} + \text{brita}$), a massa de água incorporada expressa em kg será $(H/100) * (1+m)$. Por outro lado, fixando a relação água/cimento (**x**) dessa mistura em 1 kg de cimento, resulta que a quantidade de água será $x * (1 \text{ kg})$. Portanto, igualando as duas expressões que permitem calcular a quantidade de água da mistura para 1 kg de cimento, tem-se que: $x = (H/100) * (1+m)$.

Uma vez prefixados **x** e **H**, pode-se calcular $m = [(100 * x) / H] - 1$.

A porcentagem de cimento **1:m** é determinada através da fórmula: $c (\%) = 100/(1+m)$

O valor de **H** (%) necessário para calcular **m** está relacionado com a Dimensão máxima característica do agregado, com a consistência requerida para uma adequada trabalhabilidade e com as condições e os equipamentos de adensamento disponíveis.

O INT fornece a tabela 15 que permite obter, em primeira aproximação, os valores de **H** (%) adequados para os materiais empregados no Rio de Janeiro (areia fina quartzosa e brita de

gnaisse), e que podem ser utilizados, com algumas correções, para materiais de outras regiões do país.

Tabela 15: valores de **H** (%) em função da Dimensão máxima característica do agregado (D_{mc}) e do tipo de adensamento adotado (manual ou vibratório)

Dimensão máxima característica	Adensamento manual	Adensamento vibratório
9,5 mm	11,0	10,0
19 mm	10,0	9,0
25 mm	9,5	8,5
38 mm	9,0	8,0
50 mm	8,5	7,5

(fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

Hernani Sávio Sobral apresenta a tabela 16 (SOBRAL, 1990) onde são fornecidos valores de **H** (%) para misturas de concretos com diferentes Dimensões máximas características de agregados e com três possibilidades de adensamento.

Tabela 16: valores de **H** (%) em função da D_{mc} e do tipo de adensamento

Valores da relação H (%) (água/ mistura do total dos materiais secos)			
Dimensão máx. característica	Adensamento manual	Vibração moderada	Vibração enérgica
9,5 mm	11,0	10,0	9,0
19 mm	10,0	9,0	8,0
25 mm	9,5	8,5	7,5
38 mm	9,0	8,0	7,0
50 mm	8,5	7,5	6,5

(fonte: SOBRAL, 1971)

Ressalta-se que os valores de **H** (%) fornecidos nas tabelas 15 e 16 são aproximados, e portanto, devem ser verificados para os materiais disponíveis através da realização de ensaios de consistência, especialmente quando se trabalha com concretos que requerem vibração intensa.

Para facilitar o cálculo de **m** em função das relações **x** e **H** (%), Lobo Carneiro (1953) construiu um ábaco (Figura 12) onde fornece, além de **m**, o consumo de cimento por m^3 de concreto.

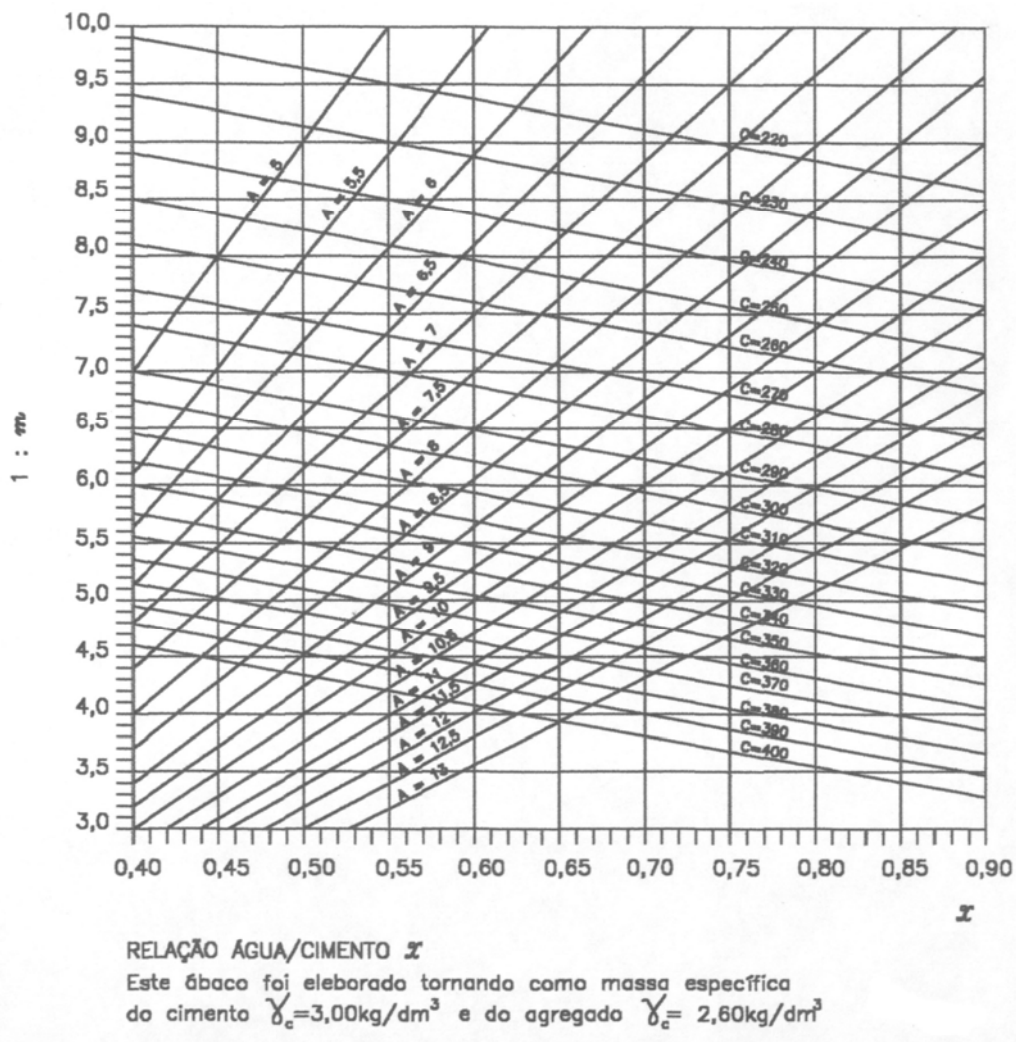


Figura 12: relação entre m e x para diferentes relações H e consumos C
(fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

O ábaco mostrado na figura 12 foi elaborado adotando como massa específica do cimento o valor $3,00 \text{ kg/dm}^3$ e como massa específica do agregado $2,60 \text{ kg/dm}^3$.

c) A determinação das proporções entre os agregados componentes da mistura será feita com o auxílio das diferentes curvas desenvolvidas no INT onde são representadas distribuições granulométricas ótimas para misturas cimento-agregado com diferentes Dimensões máximas características. Misturando os agregados nas proporções adequadas é possível ajustar suas composições granulométricas às curvas ótimas, para obter concretos compactos e com uma trabalhabilidade compatível com os diferentes tipos de adensamento.

As distribuições granulométricas ótimas para diferentes tamanhos máximos de agregados podem ser apresentadas de forma numérica através da tabela 17 (ARAÚJO; MARCIANO, 1988) mostrada a seguir.

Tabela 17: valores numéricos que possibilitam a construção das curvas granulométricas ótimas para diferentes dimensões máximas características de agregados, considerando dois tipos de adensamento

Peneiras (mm)	D _{máx} 9,5 mm			D _{máx} 19 mm			D _{máx} 25 mm			D _{máx} 38 mm			D _{máx} 50 mm			D _{máx} 78 mm			
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
76																			
50																	14	17	24
38													10	12	18	22	26	36	
25										14	17	24	22	26	36	32	38	48	
19							10	12	17	23	26	36	29	34	45	37	45	55	
9,5				23	26	36	29	35	45	37	45	55	42	51	61	49	58	67	
4,8	22	26	35	37	45	55	42	50	61	49	58	67	53	62	72	59	67	76	
2,4	37	44	55	49	58	67	53	62	72	59	67	76	62	70	79	66	74	82	
1,2	49	58	67	59	67	76	62	70	79	66	74	82	69	76	84	73	79	86	
0,6	59	67	76	66	74	82	69	76	84	74	79	86	74	80	87	77	82	88	
0,3	68	74	82	74	79	86	74	80	87	77	82	88	78	83	89	80	84	90	
0,15	74	79	86	77	82	88	76	83	89	80	84	90	82	86	90	84	86	91	

Observações:

--- entre as curvas I e II para adensamento manual

--- entre as curvas II e III para adensamento mecânico

De maneira alternativa, as composições granulométricas das misturas cimento-agregado, para diferentes Dimensões máximas características, podem ser apresentadas graficamente através das figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18 (LOBO CARNEIRO, 1953). Para cada dimensão máxima da mistura (D_{mc}) cimento-agregado são dadas três curvas, designadas respectivamente por I, II e III, que funcionam como referenciais, para delimitar zonas nas quais as composições granulométricas geram misturas de concreto, que podem ser adensadas manualmente (região compreendida entre as curvas I e II) ou mecanicamente (região entre as curvas II e III).

É de fundamental importância entender que as curvas “ótimas”, construídas por Lobo Carneiro no INT, nada têm de absoluto, pois são curvas experimentais, desenvolvidas para agregados com características determinadas, da região do Rio de Janeiro. Isto significa que, quando são usadas as curvas do INT para determinar as proporções de um traço de concreto, com agregados de características diferentes dos usados para construir as curvas, as misturas obtidas poderão não apresentar as propriedades ou características desejadas e, portanto, requererão ajustes mais ou menos importantes.

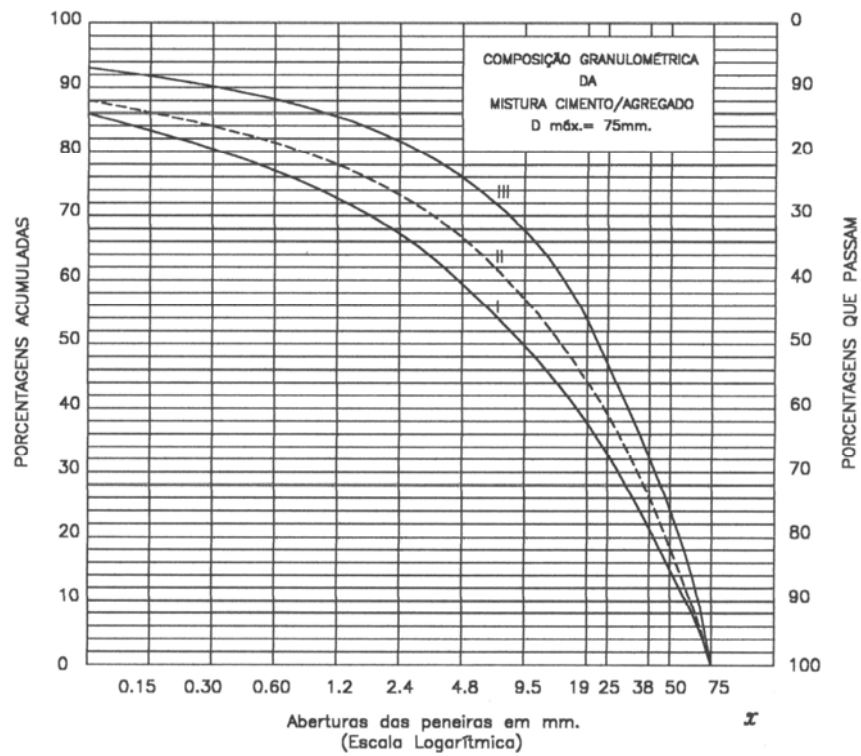


Figura 13: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 75$ mm (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

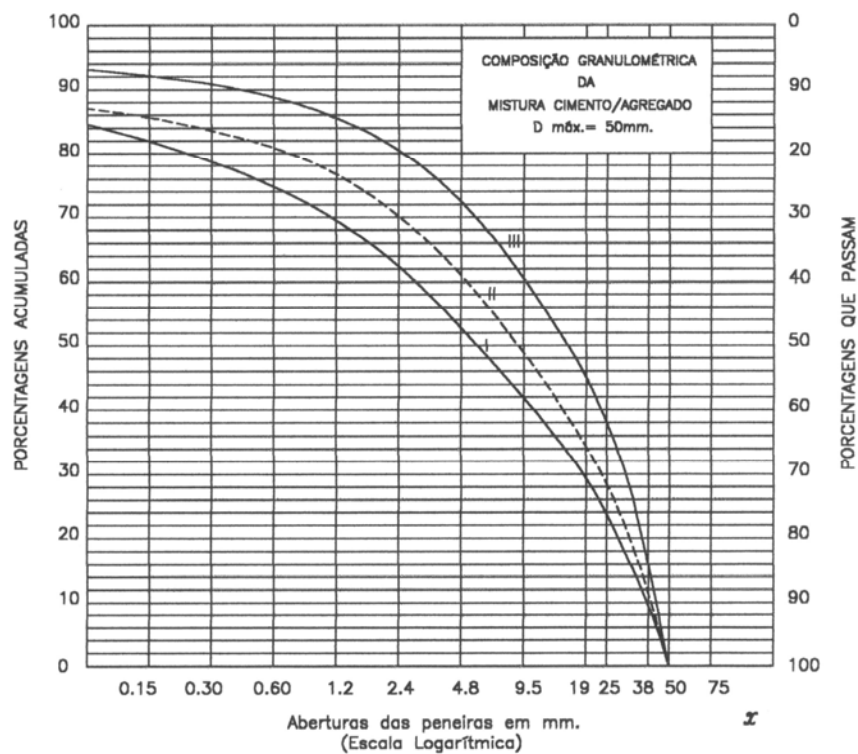


Figura 14: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 50$ mm (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

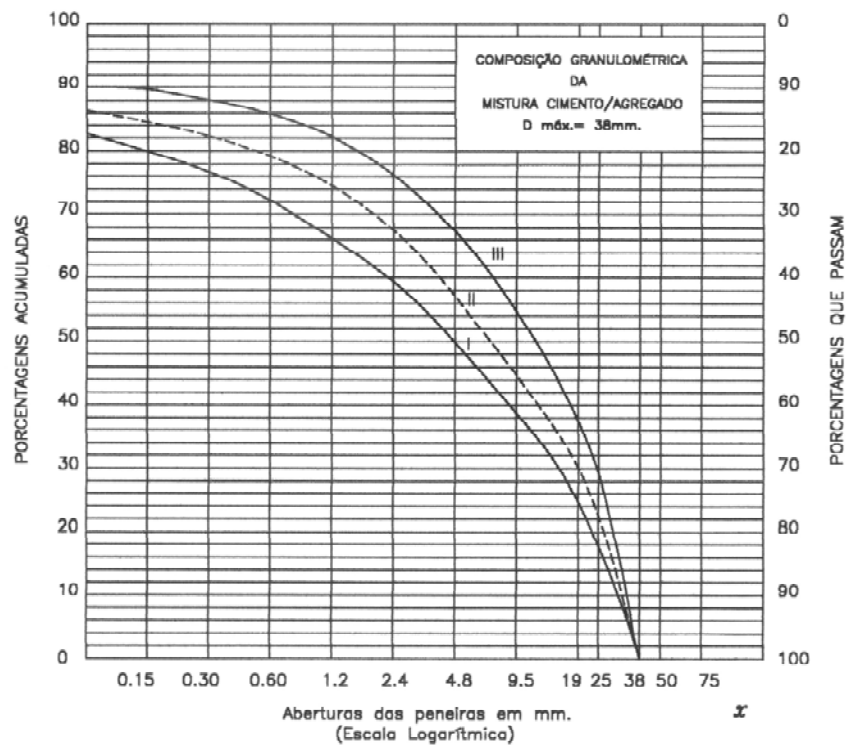


Figura 15: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 38\text{ mm}$ (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

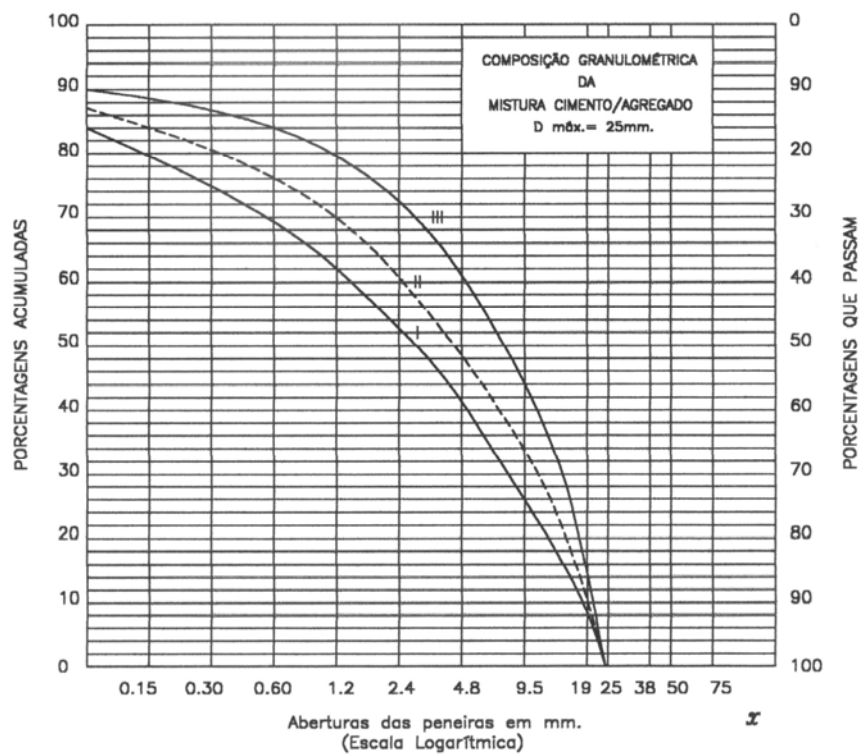


Figura 16: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{mc} = 25\text{ mm}$ (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

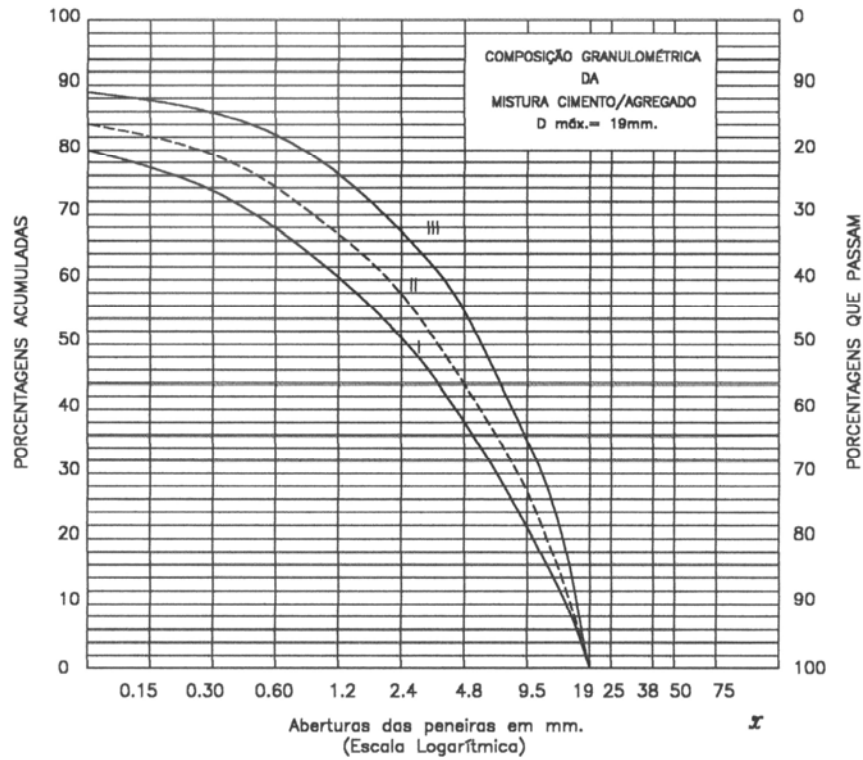


Figura 17: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{máx.} = 19\text{ mm}$ (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

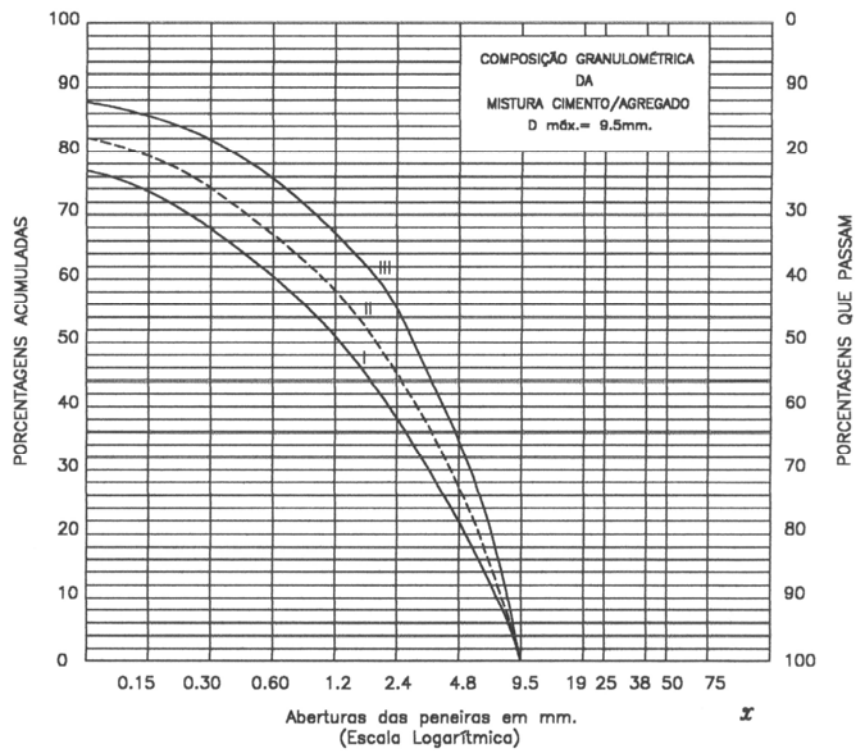


Figura 18: composição granulométrica da mistura cimento-agregado para $D_{máx.} = 9,5\text{ mm}$ (fonte: LOBO CARNEIRO, 1953)

A determinação das proporções entre os agregados, que foram selecionados para a elaboração da mistura de concreto, cuja composição granulométrica mais se aproxime às curvas ideais pode ser feita de três formas diferentes:

c.1) Método de tentativas:

A tabela 18, apresentada a seguir, fornece valores iniciais das porcentagens de cada tamanho de agregado, para misturas de materiais secos, com uma dada Dimensão máxima característica.

Tabela 18: Valores iniciais das porcentagens de cada tamanho de agregado, para misturas com uma dada Dimensão máxima característica (D_{mc})

	$D_{mc} = 50$ mm		$D_{mc} = 38$ mm		$D_{mc} = 25$ mm		$D_{mc} = 19$ mm		$D_{mc} = 9,5$ mm	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
brita 50 a 25	26%	36%	--	--	--	--	--	--	--	--
brita 38 a 19	--	--	28%	33%	--	--	--	--	--	--
brita 25 a 9,5	17%	17%	--	--	25%	30%	--	--	--	--
brita 19 a 4,8	17%	17%	28%	33%	25%	30%	35%	45%	--	--
brita 9,5 a 1,2	--	--	--	--	--	--	15%	15%	45%	55%
areia + cimento	40%	30%	44%	34%	50%	40%	50%	40%	55%	45%

(fonte: LOBO CARNEIRO, 1953).

A partir das porcentagens estimadas dos diversos agregados e do teor de argamassa estabelecido, parte-se para a determinação do traço, em massa, 1: a: b_1 : b_2 sabendo que:

α = teor de argamassa ou teor de materiais finos em relação ao total de materiais secos

α = % de a (areia) + % de c (cimento)

Se considerarmos para o traço uma unidade de massa de cimento:

$$(\% \text{ de c}) = 100 / (1+m) \Rightarrow (\% \text{ de a}) = \alpha - (\% \text{ de c}) \Rightarrow (\% \text{ de } [b_1 + b_2]) = 100 - \alpha.$$

As porcentagens de brita 1 e 2 são determinadas através da tabela 3.18 e os valores de b_1 e b_2 são calculados dividindo as respectivas porcentagens de brita pela percentagem de cimento da mistura adotada como referência:

$$1: (\% \text{ de a}) / (\% \text{ de c}): (\% \text{ de } b_1) / (\% \text{ de c}): (\% \text{ de } b_2) / (\% \text{ de c})$$

Uma vez determinado o traço tentativo inicial: 1: a: b_1 : b_2 com a relação água/cimento = x determinado, pelas exigências de resistência e durabilidade, procede-se ao preparo, em laboratório, de uma mistura experimental que permita a avaliação da trabalhabilidade adequada às condições e aos equipamentos de adensamento. Quando o traço não atenda as condições

requeridas, deverão ser feitos os ajustes necessários, nas proporções dos agregados, tentando manter constante a relação x .

c.2) Ajuste da curva granulométrica da mistura de agregados em relação às curvas ideais de Lobo Carneiro, usando o método dos “mínimos quadrados”.

A partir das distribuições granulométricas dos agregados, disponíveis para a execução do concreto, procede-se à determinação de uma composição paramétrica dos agregados, de maneira que a curva resultante se aproxime o mais possível de uma das curvas ideais de Lobo Carneiro. O método analítico de ajuste, entre a curva da composição granulométrica procurada e a curva ideal escolhida, é o método matemático dos mínimos quadrados, que pode ser desenvolvido e aplicado por métodos computacionais. Supondo que as características dos agregados disponíveis se aproximam daquelas dos agregados empregados por Lobo Carneiro para construir suas curvas, o método de aproximação, pelos mínimos quadrados, permitirá um menor número de iterações no processo de determinação das proporções mais adequadas da mistura procurada.

c.3) Método gráfico de determinação das proporções dos agregados constituintes da mistura.

O método gráfico, adotado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade da Bahia, referenciado por Sobral (ABCP, 1965) e descrito por Verçoza (1994), permite determinar as proporções em que devem ser misturados os agregados disponíveis, de maneira a conseguir que a mistura resultante se aproxime, o mais possível, da curva ideal de Lobo Carneiro (escolhida de acordo com a consistência desejada e com o tipo de adensamento empregado). Este método gráfico permite ajustar as percentagens da mistura de maneira proporcional à contribuição de cada agregado, na faixa em que os materiais possuem grãos do mesmo tamanho.

Uma vez determinadas as percentagens de cada tipo de agregado, pelo método dos mínimos quadrados ou pelo método gráfico, procede-se ao cálculo das proporções, em massa, de cada um dos materiais constituintes do traço. Tomando como referência a unidade de massa de cimento, o total de materiais secos do traço estará dado pela expressão $(1+m)$:

$$a = \% \text{ de areia} * (1+m) / 100; b_1 = \% \text{ de brita } 1 * (1+m) / 100; b_2 = \% \text{ de brita } 2 * (1+m) / 100$$

A partir das proporções em massa dos materiais constituintes do concreto deve-se executar um ensaio experimental adicionando-se, de forma gradual, na mistura seca, a água correspondente à relação água/cimento, estabelecida de maneira a conseguir a consistência desejada.

Caso a consistência requerida seja atingida com uma quantidade de água menor que a determinada pela relação água/cimento máxima admissível, apresentam-se duas alternativas:

i) Manter a quantidade de agregado e a quantidade de cimento de forma que a relação água/cimento seja menor que a estabelecida inicialmente. Neste caso ter-se-ão as vantagens decorrentes de uma menor relação água/cimento em detrimento de uma maior economia de cimento.

ii) Manter a relação água/cimento inicial e colocar o total de água prevista procedendo a aumentar a quantidade de agregado, nas proporções determinadas, até atingir a consistência desejada. Quando seja adotada esta alternativa será determinada uma nova relação **H** % que, junto com a relação água/cimento (x), servirá como novo parâmetro de iteração do método.

Caso a consistência requerida não seja atingida com a quantidade de água estabelecida pela relação água/cimento deverão ser diminuídas, na mesma proporção, as quantidades de areia e das diferentes britas em relação à quantidade de cimento. Esta prática levará a um aumento do consumo de aglomerante tornando o traço mais rico e, conseqüentemente, mais caro. Caso a diminuição da quantidade de agregado resulte importante pode ser recomendável determinar uma nova relação **H** % e reiniciar o método de dosagem.

Qualquer que seja a alternativa adotada para a determinação do traço inicial dever-se-á confirmar a resistência de dosagem através da moldagem e ruptura de corpos-de-prova, nas idades de referência especificadas.

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS ITERS/ELÁDIO PETRUCCI

3.4.1 Histórico do método

O método do ITERS (Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul, atual CIENTEC, Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul), de caráter eminentemente experimental, foi desenvolvido a partir de 1951 pelo Prof. Petrucci (PETRUCCI, 1951) e destinado à obtenção de concretos estruturais para obras correntes de engenharia. Este procedimento de dosagem surgiu em resposta às dificuldades e insucessos que se apresentaram no Rio Grande do Sul como resultado da aplicação dos métodos difundidos até então. Segundo escrevia na época Petrucci, (ABCP, 1965):

a existência de enorme variedade de marcas de cimento, bem como a utilização indiscriminada como agregado graúdo, de seixo rolado e de pedra britada, esta última quer de granito, quer de diabásio, aliada à variação granulométrica das areias existentes no Estado com módulos de finura variando entre 1,50 e 3,50, fizeram que não pudessem ser aplicados em sua totalidade, quer os métodos originais, quer as adaptações já feitas no Brasil em outros centros mais adiantados.

Os métodos introduzidos pelo Prof. Ary F. Torres (1927), do IPT de São Paulo e pelo Prof. Lobo Carneiro, do INT (1937 e 1947), do Rio de Janeiro, não se adequavam à utilização de diferentes tipos de agregados graúdos e areias existentes na região.

Durante seu trabalho na Seção de Aglomerantes e Concretos do ITERS (Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul), Petrucci observou que o concreto mais denso, após o lançamento e adensamento, podia não ser o bastante trabalhável quando fresco, e portanto, para produzir concretos mais resistentes, podiam ser requeridos procedimentos de adensamento muito enérgicos que demandassem maiores cuidados da mão-de-obra e maiores consumos de energia de compactação. Sob esta linha de raciocínio, seria preferível produzir concretos priorizando a trabalhabilidade, dentro de certos limites, de forma a garantir peças mais compactas sem a necessidade de um adensamento tão intenso. Para avaliar e medir a trabalhabilidade da maneira o mais objetiva possível, com independência do operador, e levando em consideração o efeito essencialmente dinâmico do processo de adensamento, Petrucci optou pelo uso do ensaio de remoldagem de Powers. Não dispondo de faixas ideais de granulometrias dos agregados da região, Petrucci partiu para a obtenção de composições de concreto por via inteiramente experimental e realizou diversos estudos com os dois tipos de agregados mais usados na região de Porto Alegre (seixo rolado e pedra britada) procurando manter, por exemplo, as mesmas condições de trabalhabilidade. Baseado na lei de Lyse (1932) e em função do tipo de adensamento (manual e vibratório), determinou, para diferentes tamanhos máximos, as correspondentes relações entre a quantidade de água total de amassamento necessária e o total de materiais secos da mistura de concreto:

$$H (\%) = 100 * (\text{massa total de água da mistura} / \text{massa total de [cimento + agregados]})$$

A tabela 19 resume os valores experimentais obtidos por Petrucci para agregados com diâmetros máximos de 25 mm.

Tabela 19: Relações **H** (%) em função do tipo de adensamento e do tipo de agregado graúdo

Agregado graúdo	Adensamento	
	Manual	Vibrado
Seixo Rolado	H = 8 %	H = 7 %
Pedra Britada	H = 9 %	H = 8 %

Obs: Para diâmetros máximos de 38 mm, deve-se subtrair 0,5% a todos os valores de **H** e para diâmetros de 19 mm deve-se somar 0,5% aos valores da tabela.

(fonte: PETRUCCI, 1995)

3.4.2 Descrição do método

As atividades, variáveis e informações de entrada do método estão apresentadas no fluxograma simplificado, representado na figura 19.

O primeiro passo do método de Petrucci consiste na determinação simultânea da proporção ótima de areia com respeito ao total de agregado (**a/m**) e da relação **H** entre a quantidade de água de mistura e a quantidade total de materiais secos. Observa-se que a relação:

$H (\%) = 100 * (\text{massa total de água da mistura} / \text{massa total de [cimento + agregados]})$ pode ser expressa em função da relação água/cimento (**x**) através da seguinte expressão:

$$H (\%) = [(x)/(1+m)] * 100.$$

Como dados de partida para esta primeira etapa, deve-se fixar uma trabalhabilidade adequada às condições de obra e uma relação **m** = massa total de agregado / massa de cimento, da mistura, que deve ser mais ou menos próxima da relação do traço procurado.

A trabalhabilidade requerida ao concreto fresco, adequada aos tipos de peças a serem concretadas e à tecnologia da obra, quanto aos meios de mistura, transporte, lançamento e adensamento, pode ser avaliada parcialmente através do ensaio de remoldagem de Powers, ou, com menor precisão, através do ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams.

O ensaio de Powers pode ser efetuado de duas formas, visando entender melhor o comportamento do concreto fresco em função do tipo de adensamento empregado. Caso na obra o adensamento do concreto seja realizado em forma manual, pode resultar adequado empregar a versão original do ensaio com o aparelho de Powers montado sobre uma mesa de consistência (idêntica à de *flow test*).

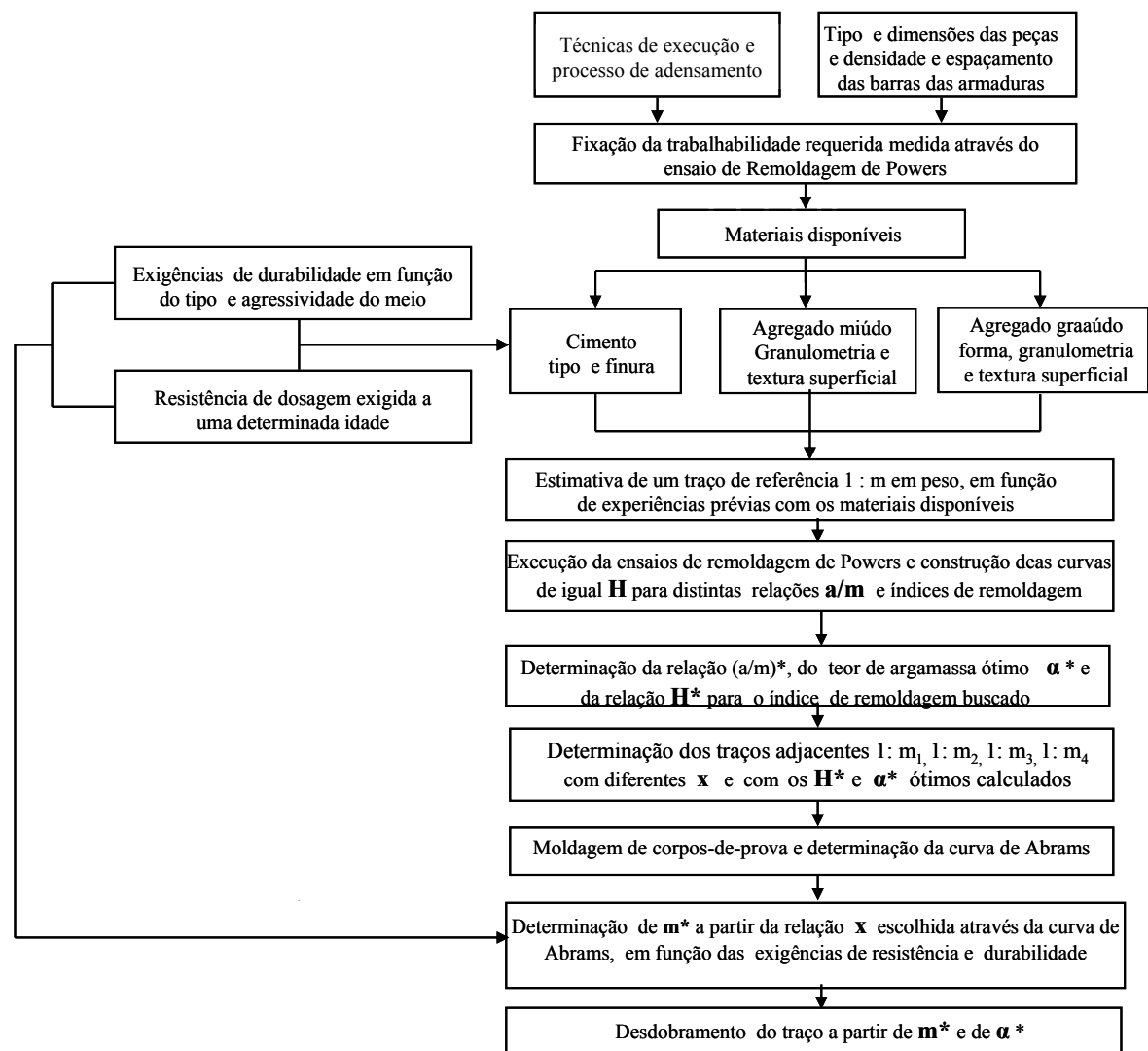


Figura 19: fluxograma simplificado do método de dosagem do ITERS, desenvolvido pelo Prof. Eládio Petrucci

O ensaio de remoldagem de Powers determina o índice de remoldagem expresso pelo número de golpes necessários para que o concreto passe da forma tronco-cônica do molde de Abrams à forma cilíndrica determinada pelo recipiente padronizado do aparelho (equipamento normalizado pela ASTM C 124-39) (PETRUCCI, 1995). Caso na obra o adensamento do concreto seja realizado através de vibração mecânica, a trabalhabilidade das misturas experimentais poderá ser avaliada com o aparelho de Powers montado sobre uma mesa vibratória elétrica (aparelho de remoldagem de Powers modificado por Wuerpel) (SOBRAL, 1990). Neste equipamento o índice de remoldagem será expresso através do tempo necessário (medido em segundos) para que o concreto passe da forma tronco-cônica à forma cilíndrica. Vale a pena salientar que as sugestões anteriores de uso de um ou de outro tipo de equipamento de remoldagem, não são em absoluto restritivas ao tipo de adensamento aplicado na obra, porque ambos equipamentos permitem o desenvolvimento de ensaios comparativos entre as diferentes misturas de concreto, na procura daquela com melhor teor de argamassa α (ou da quantidade de agregado miúdo em relação ao total de agregado), independentemente do tipo de adensamento que venha a ser empregado na obra.

No processo de determinação da proporção ótima areia/agregado graúdo (**a/m**) e do teor água/materiais secos (**H**), que permita conseguir a trabalhabilidade desejada, deve-se considerar a influência da granulometria dos agregados, da forma dos grãos e das condições superficiais. Petrucci sugere que quando não seja encontrado na região todo o material adequado do ponto de vista granulométrico, este pode ser corrigido pela mistura conveniente de 2 ou 3 materiais locais. Por isso, quando se tenham vários agregados deve ser feita primeiro uma mistura prévia dos materiais para reduzi-los a um graúdo e a um miúdo, tentando representar o melhor possível a combinação dos materiais que serão efetivamente empregados na obra.

3.4.3 Desenvolvimento do método

O procedimento para a determinação da porcentagem de areia no agregado total consiste nos seguintes passos:

a) Baseado nos conhecimentos de um tecnologista ou em estimativas de experiências prévias com os materiais disponíveis, determina-se um traço 1: **m** (em massa) que se supõe próximo do traço definitivo buscado. A estimativa inicial de **m** pode ser efetuada considerando a relação água/cimento (**x**) requerida para atender as exigências de resistência e durabilidade do projeto e considerando, através da relação **H** (%), as necessidades de trabalhabilidade da mistura fresca.

Fixada a relação x , ela pode ser substituída na relação H , obtida a partir da tabela 3.16, determinando-se assim a relação m do traço de partida.

Como exemplo, para concreto produzido com seixo rolado, areia bem graduada e adensamento vibratório, deverá começar-se com $H = 5\%$, aumentando-se esta relação de 1% em 1% de forma a obter misturas com $H = 6\%$, 7%, 8% e 9%.

b) Preparam-se 3 ou 4 misturas do mesmo traço 1: m , variando a percentagem de areia no agregado total de 5 em 5%. Para os agregados do Rio Grande do Sul, com Dimensão máxima característica entre 25 e 38 mm, e concretos adensados por vibração corrente, Petrucci fornece os valores indicativos apresentados na tabela 20 a seguir:

Tabela 20: relações a/m em função do tipo de areia e do tipo de agregado graúdo

Agregado graúdo	$(a/m) \% =$ percentagem de areia no total de agregado		
	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Seixo rolado	30	35	40
Pedra britada	35	40	45

(fonte: PETRUCCI, 1995)

Para um concreto com seixo rolado e areia média seriam estudadas as percentagens:

$$a/m = 30 \% - 35 \% - 40 \% - 45 \%$$

Para um concreto com pedra britada e areia grossa seriam estudadas as percentagens:

$$a/m = 35 \% - 40 \% - 45 \% - 50 \%$$

c) Fixado m , e para cada uma das relações a/m , preparam-se diversas misturas experimentais nas quais são adicionadas quantidades diferentes de água. Para cada uma das misturas secas com a/m dado, vai se aumentando de 1 em 1% a relação H (%) até atingir as condições de trabalhabilidade procuradas. Neste processo experimental de avaliação dos diversos traços, devem ser observadas as características de consistência e de resistência à segregação das misturas de concreto produzidas. Nesta etapa resultam importantes as interpretações e observações realizadas por tecnologistas experimentados que permitam tirar conclusões sobre a adequabilidade das misturas produzidas para os fins requeridos.

No processo de determinação das relações ótimas de a/m e de H , o laboratorista deve ensaiar, para cada relação a/m , as diferentes relações H . Ou seja, que se fossem estudadas quatro relações a/m e quatro relações H , deveriam se realizar dezesseis ensaios para determinar os respectivos

índices de remoldagem. É aqui que a experiência do tecnologista adquire fundamental importância pois ele pode determinar previamente ou durante o desenvolvimento do trabalho a quantidade de ensaios a serem realizados e quais as relações **a/m** e **H** que valem a pena testar. Cabe destacar que, uma vez fixado o valor inicial de **m**, existe uma correspondência biunívoca entre o teor de argamassa α e a relação **a/m**, dada pelas relações:

$$\alpha = [(1/m + a/m) / (1/m + 1)] * 100 \quad \text{ou} \quad a/m = [(\alpha/100) (1 + 1/m)] - 1/m$$

Com os resultados experimentais obtidos através dos ensaios realizados com as diferentes combinações de **H** e de **a/m** deverá ser construído um gráfico, similar ao mostrado na figura 20, que apresente em abscissas as diferentes relações **a/m** e em ordenadas os índices de remoldagem **I** (medidos em número de golpes na mesa manual ou em número de segundos na mesa vibratória) correspondentes às diferentes relações **H**.

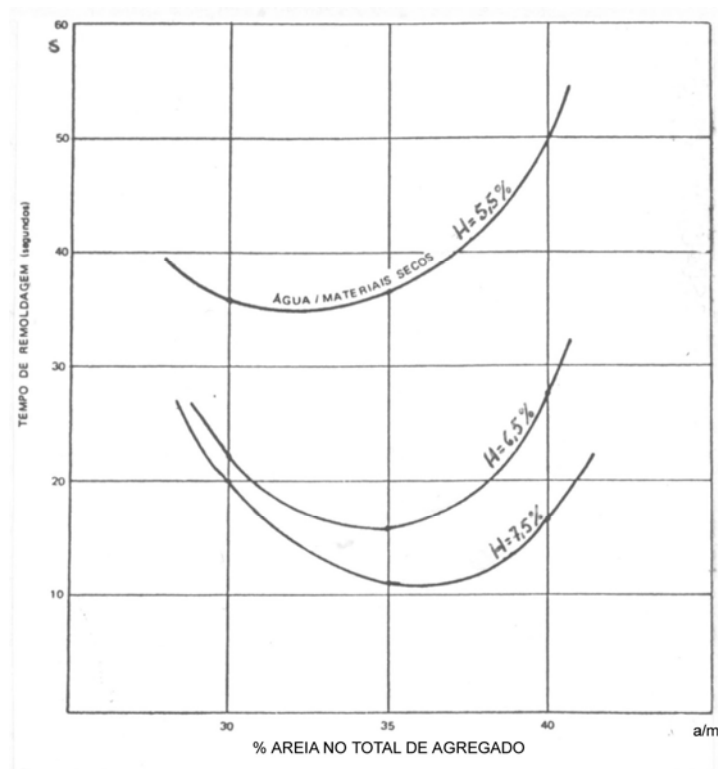


Figura 20: curvas de trabalhabilidade traçadas a partir dos índices de remoldagem obtidos para traços de concretos, com igual **m** e diferentes relações **a/m**

(fonte: ABCP, 1965)

Uma vez determinados todos os pontos dos respectivos ensaios procede-se ao traçado de curvas que unam os pontos de igual **H** das diferentes relações **a/m**. Os trechos das curvas, com relação água/materiais secos **H** = constante, que fiquem abaixo da horizontal, determinada pelo índice de remoldagem escolhido, possibilitarão obter misturas de concreto cujas características de

comportamento no estado fresco sejam compatíveis com as condições de trabalhabilidade requeridas na obra. Os possíveis pontos solução do problema do proporcionamento, além de satisfazer as condições de remoldagem prefixadas, serão determinados procurando obter teores de argamassa adequados às condições de execução (através da relação $\mathbf{a/m}$) e relações água/cimento (associados com as relações água/total de materiais secos) que garantam as mínimas exigências de resistência e durabilidade estabelecidas pelo projeto.

Para o desdobramento do traço de referência, deve-se considerar, em primeiro lugar, a relação água/cimento que garanta as características de resistência e durabilidade exigidas ao concreto. A partir da relação $\mathbf{a/c}$ e considerando o valor inicial de \mathbf{m} , determina-se a relação $\mathbf{H}^* = 100 * [(a/c) / (1+m)]$ correspondente. Sobre a curva traçada experimentalmente com $\mathbf{H}^* = \text{cte}$, e fixando o índice de remoldagem e a relação $(\mathbf{a/m})^*$ adequada às necessidades de trabalhabilidade e acabamento do concreto procurado, pode-se determinar um traço de partida.

A quantidade de agregado graúdo obter-se-á pela diferença $\mathbf{b} = (\mathbf{m} - \mathbf{a})$.

d) Uma vez adotado o traço básico escolhido 1:m, Petrucci, baseado na lei de Lyse, postula que traços com valores de \mathbf{m} próximos do experimentado e com as mesmas condições de trabalhabilidade apresentarão praticamente os mesmos valores da relação \mathbf{H} (%). Observa-se que quando \mathbf{m} varia deixa de existir a correspondência biunívoca entre $\mathbf{a/m}$ e α para os diferentes traços e, portanto, para se obter concretos com similares condições de trabalhabilidade, podem ser adotados dois critérios igualmente válidos que conduzem a concretos bem proporcionados.

Um critério seria manter constante a relação de agregado miúdo no agregado total $(\mathbf{a/m})^*$ e outro seria manter constante a percentagem de argamassa α^* da mistura. Pode-se adotar, então, o critério de variar \mathbf{m} e manter constante α^* e \mathbf{H}^* , deixando como segunda alternativa a possibilidade de variar \mathbf{m} e manter constante os valores α^* e $(\mathbf{a/m})^*$.

Portanto, poderão ser preparados, considerando diferentes relações água/cimento, 2 ou 3 traços 1:m₁; 1:m₂; 1:m₃, em torno do traço de referência 1:m, de maneira que esses traços auxiliares apresentem as mesmas relações ótimas α^* e \mathbf{H}^* determinadas experimentalmente. Do ponto de vista da economia, a composição granulométrica mais conveniente é aquela que conduz à trabalhabilidade desejada com o menor consumo possível de água, o que significa que, para uma determinada relação água/cimento, ter-se-á a menor quantidade de pasta por unidade de volume de concreto.

Então, adotando o teor de argamassa e a relação água/materiais secos ótima, molda-se, para cada um dos traços adjacentes ao traço de referência, corpos-de-prova que, ensaiados nas idades

prefixadas, permitem o traçado das curvas de Abrams que vincularão as resistências à compressão com as relações água/cimento (x) para traços de concreto de uma mesma “família”. Entende-se por “família de concretos” aqueles que apresentam igual trabalhabilidade (prefixada pela constância da relação H^*) e igual teor de argamassa α^* .

Prefixados α^* e H^* , o desdobramento do traço 1: m_1 realiza-se assim:

$$\alpha^* (\%) = [(1+a_1) / (1+m_1)] * 100 \Rightarrow a_1 = (\alpha^*/100) * (1+m_1) - 1 \Rightarrow b_1 = m_1 - a_1$$

$$H^* (\%) = [(x) / (1+m_1)] * 100 \Rightarrow (x)_1 = (H^*/100) * (1+m_1)$$

De maneira análoga ao desdobramento do traço realizado para 1: m_1 devem ser feitos os desdobramentos para os traços 1: m_2 , 1: m_3 . Com os 3 traços m_1 , m_2 , m_3 e suas respectivas relações x traçam-se as curvas de Abrams e determina-se a relação $(x)^*$ necessária para satisfazer as condições de resistência e durabilidade requeridas. Com a relação $(x)^*$ definitiva e com H^* calcula-se m^* e desdobra-se o traço que funcionará como traço inicial para verificação das características de trabalhabilidade procuradas:

$$m^* = [(x)^* / (H^*/100)] - 1 \Rightarrow a^* = \alpha^* (1+m^*) - 1 \Rightarrow b^* = m^* - a^*$$

O traço inicial em massa será 1 : a^* : b^* // $(x)^*$ e suas propriedades de trabalhabilidade deverão ser verificadas no laboratório antes de ser aplicado e ajustado às condições de obra.

3.5 MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETOS SNCF/ ROGER VALLETTE

3.5.1 Histórico do método

Roger Vallette, tecnologista francês, engenheiro civil de pontes e barragens da SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français), apresenta, em 1948, um método essencialmente experimental de dosagem que a partir do conhecimento das características intrínsecas dos materiais disponíveis leva em conta as condições específicas de aplicação do concreto na obra. (VALLETTE, 1948). Seus trabalhos desenvolvidos com grande intensidade no período compreendido entre 1930 e 1940 se apóiam nas conclusões de outros pesquisadores franceses que o antecederam como De Préaudeau, René Ferét e Leclerc du Sablon.

De Préaudeau, em 1881 (HELENE, 1987) apresenta formalmente um método de dosagem de argamassas e concretos, que a partir de um aprofundado estudo dos agregados, propõe como

postulados que o volume de pasta aglomerante deve ser 5 % superior ao volume de vazios da areia e o volume de argamassa deve ser 10% superior ao volume de vazios do agregado graúdo.

René Ferét, diretor, em 1892, do Laboratório de Boulogne-Sur-Mer, baseado em seus trabalhos experimentais, desenvolvidos entre 1890 e 1900 (NASCIMENTO et al, 1990), sobre a compactidade das areias e das misturas de cimento e areia, constata que argamassas plásticas confeccionadas com os mesmos materiais, e curadas em iguais condições durante o mesmo período de tempo, apresentam resistências à compressão que são função da relação entre o volume absoluto de (água + vazios) dividido pelo volume de cimento. O volume absoluto de água e o volume de vazios determinam a compactidade, a porosidade e a permeabilidade da matriz do concreto. A apresentação, em 1896, da lei fundamental de Ferét, que liga a resistência à compressão (f_c) com os volumes absolutos dos componentes, contribui decisivamente para assentar as bases do estudo da composição racional de argamassas e concretos (HELENE, 1987). A lei de Ferét é expressa formalmente pela expressão apresentada a seguir:

$$f = k \left\{ \frac{c}{1 - (f + g)} \right\}^2, \text{ sendo que: } c + f + g + a + v = 1$$

onde:

k = constante;

c = volume absoluto de cimento/m³ de concreto;

f = volume absoluto de agregado fino/m³ de concreto;

g = volume absoluto de agregado graúdo/m³ de concreto;

a = volume de água;

v = volume de vazios.

Os trabalhos de Leclerc du Sablon, feitos em 1927, por ocasião da execução das barragens de “Valléc d’Ossau”, constituem uma outra contribuição para o estudo sistemático do concreto (HELENE, 1987). Este tecnologista conclui, partindo dos inertes disponíveis num dado canteiro de obras, que quanto mais uniformes forem às dimensões do agregado graúdo, maior poderá ser a compactidade atingível do concreto obtido por mistura desse agregado com a argamassa. Para conseguir o máximo de compactidade das misturas de concreto, Leclerc du Sablon estabelece relações numéricas entre as dimensões máximas e mínimas dos agregados miúdos e graúdos constituintes, e fixa valores do volume de argamassa necessário com respeito ao volume de vazios existente no agregado.

O método proposto por Roger Vallette (1948), que pode ser aplicável tanto para agregados com granulometria contínua como para agregados com granulometria descontínua, procura uma trabalhabilidade adequada, verificada através da execução de misturas experimentais de materiais inertes constituídas por um mínimo de grãos finos e que apresentam um máximo na relação agregado graúdo/agregado miúdo. A procura de concretos com baixos conteúdos de partículas miúdas leva a um limite a partir do qual, se for reduzida a quantidade de areia, a mistura tornar-se-á menos trabalhável e mais porosa. Por outro lado, se essa quantidade de agregado miúdo for aumentada, existirá um aumento da demanda de água que poderá alterar a relação água/cimento. Raina (1988) destaca que a obtenção de traços de concreto “pobres” em agregados finos leva à procura de um ponto de equilíbrio em que se tenha uma trabalhabilidade adequada, que possibilite um correto adensamento com uma baixa demanda de água, que evite a tendência à segregação nos processos de transporte e lançamento.

3.5.2 Descrição do método

As atividades, variáveis e informações de entrada do método estão apresentadas no fluxograma simplificado representado na figura 21.

a) Para o desenvolvimento do traço básico do concreto, no laboratório, parte-se de uma determinada quantidade de areia úmida, cujos vazios devem ser preenchidos, completamente, por um volume de pasta de cimento, de forma a obter uma argamassa plástica e levemente exsudante, ou seja, uma argamassa que apresente um mínimo aparecimento de água na superfície. Esta argamassa, com trabalhabilidade adequada e obtida procurando o mínimo consumo de cimento, é o que Vallette chama de “argamassa plena”. Em função das condições impostas para sua execução ela deverá apresentar máxima compacidade e mínima retração.

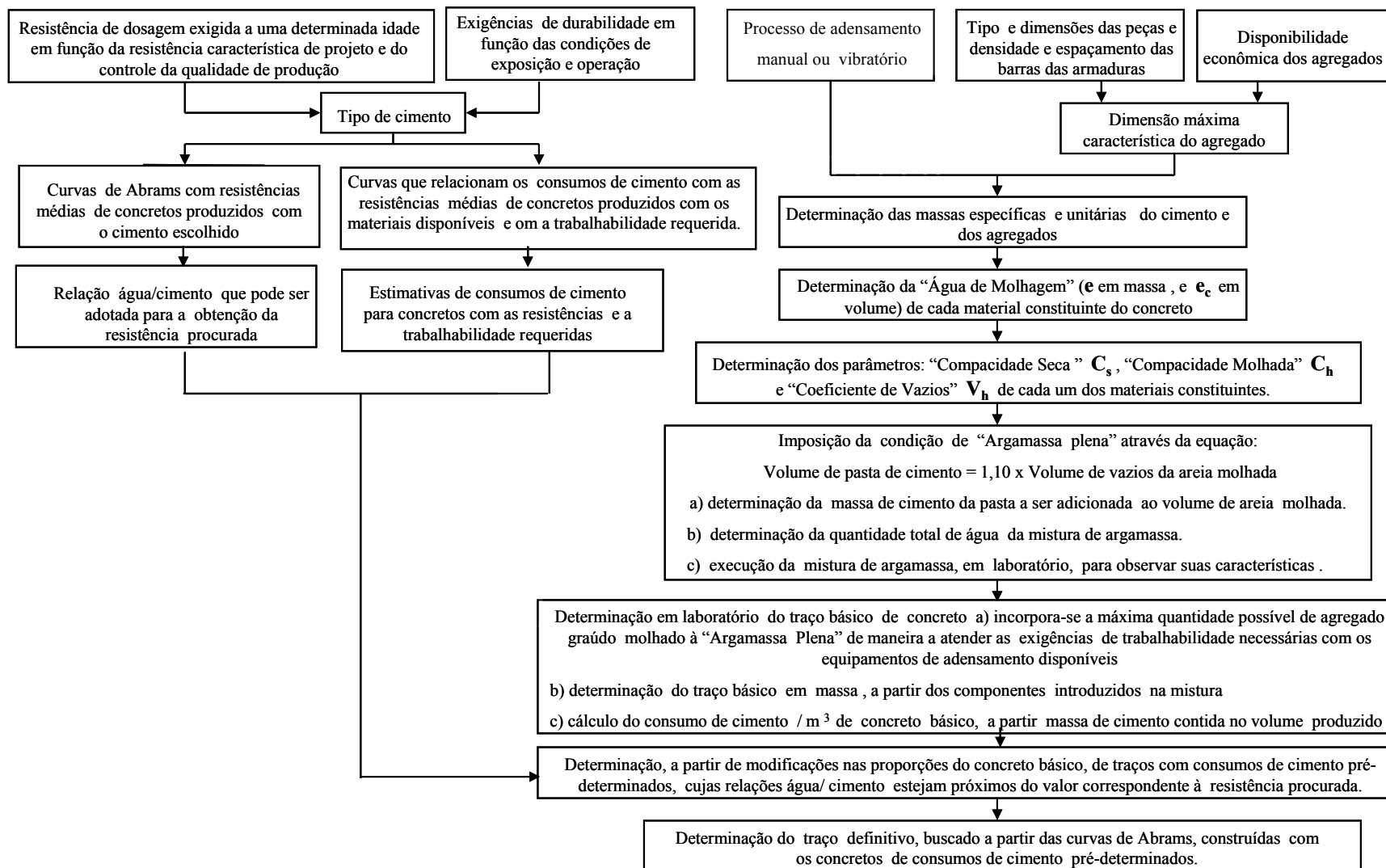


Figura 21: fluxograma simplificado do método de Dosagem do SNCF, desenvolvido pelo Eng. Roger Vallette

b) Junta-se à “argamassa plena” a maior quantidade possível de agregado graúdo, previamente molhado, de tal modo que o mesmo seja completamente envolvido pela argamassa. Obtém-se, assim, um concreto “pleno”, trabalhável, com mínimo conteúdo de areia e cimento. O volume de argamassa, existente na mistura de concreto resultante, deve ser o suficiente para preencher os vazios do agregado graúdo seco e compactado e deve atuar como um lubrificante que facilite a mobilidade relativa entre os grãos de forma a garantir a trabalhabilidade necessária e permitir o completo preenchimento das fôrmas, levando em conta o “efeito parede”.

c) Preparam-se, então, corpos-de-prova com dosagens mais ricas e mais pobres de cimento de forma a poder avaliar, nas idades de referência adotadas, as resistências à compressão obtidas em concretos com a mesma consistência e com distintas relações água/cimento. Para obter concretos com diferentes consumos de cimento ou relações água/cimento, corrige-se o traço inicial “pleno” substituindo-se um determinado volume de areia molhada por igual volume de pasta pura. A incorporação de pasta em substituição à areia molhada levará a um aumento do consumo de cimento, enquanto que a incorporação de areia em substituição da pasta causará efeitos contrários, tornando os concretos mais econômicos. Dado que as exigências de resistência e durabilidade dos concretos são atendidas, principalmente através da relação água/cimento, torna-se necessário, para conseguir o concreto desejado a partir do traço básico, a adoção de um processo rápido e efetivo de substituição que considere, para os materiais empregados, as relações entre os consumos de aglomerante e as resistências médias, nas idades consideradas.

3.5.3 Desenvolvimento do método

a) Determinação das características físicas dos materiais componentes

O método exige o conhecimento de algumas características físicas dos materiais que serão empregados na dosagem. Estas características são: as massas específicas γ e as massas unitárias δ . As letras **a**, **b**, **c**, **e** usadas como sub-índices correspondem, respectivamente, à areia, agregado graúdo, cimento e água.

Para ordenar os dados no trabalho prático constrói-se a tabela 21 com os valores desses parâmetros.

Tabela 21: massas específicas e massas unitárias dos materiais componentes do concreto

Material	γ (kg/dm ³)	δ (kg/dm ³)
Cimento	γ_c	δ_c
Agregado miúdo (areia)	γ_a	δ_a
Agregado graúdo (brita)	γ_b	δ_b

b) Determinação da “água de molhagem” para cada material

b1) Define-se “água de molhagem do agregado” como a quantidade de água necessária para envolver todas as partículas do material, sem que exista um excesso de líquido. A água de molhagem pode ser expressa em massa ou em volume tendo-se, portanto, as seguintes expressões alternativas:

Água de molhagem por unidade de massa:

e = massa de água necessária (kg) para “molhar” o agregado/massa de agregado seco (kg).

Água de molhagem por unidade de volume aparente de material:

e' = volume de água necessária (dm³) para “molhar” o agregado/volume aparente de agregado seco (dm³).

A forma prática de estabelecer a água de molhagem e_a de uma areia é determinar a quantidade de líquido que deve ser adicionado ao material seco para conseguir uma determinada coesão (similar à obtida com terra úmida) que permita fazer uma bola com as mãos. A água de molhagem de uma brita e_b pode ser determinada adicionando ao agregado seco uma quantidade de água que permita obter uma película brilhante sobre o mesmo.

b2) Define-se “água de molhagem do cimento” e_c como a quantidade de água/unidade de quantidade de aglomerante necessária para conseguir a consistência normal da pasta de cimento empregando o aparelho de Vicat (Método de ensaio de determinação da água da pasta de consistência normal segundo NBR 11580 (ABNT, 1991b)).

Novamente, para ordenar os dados no trabalho prático, estrutura-se a tabela 22 com os dados das águas de molhagem para cada material.

Tabela 22: águas de molhagem (em massa e em volume) para os diferentes materiais

Material	e (kg/kg)	e' = (δ/δ_c) e (dm ³ /dm ³)
Cimento	e _c	e' _c = (δ_c/δ_c) e _c
Agregado miúdo (areia)	e _a	e' _a = (δ_a/δ_c) e _a
Agregado graúdo (brita)	e _b	e' _b = (δ_b/δ_c) e _b

c) Fórmulas para a determinação do volume de vazios dos materiais:

A determinação do volume de vazios é feita através de dois parâmetros fundamentais que são a “compacidade seca” e a “compacidade molhada”.

c1) Define-se como “compacidade seca” o quociente entre o volume absoluto e o volume aparente do agregado. Também, pode-se definir “compacidade seca” como o quociente da massa unitária pela massa específica:

$$C_s = \text{volume absoluto/volume aparente} = (P/\gamma) / (P/\delta) = \delta/\gamma, \text{ (sendo } P = \text{ massa do material)}$$

c2) Define-se como “compacidade molhada” a soma da compacidade seca + água de molhagem por unidade de volume aparente do agregado $\Rightarrow C_h = C_s + e' = (\delta/\gamma) + e'$

c3) Define-se como “coeficiente de vazios” o complemento da compacidade: $V = 1 - C$.

c4) Define-se coeficiente de vazios do agregado seco como: $V_s = 1 - C_s$.

c5) Define-se coeficiente de vazios do agregado úmido como: $V_h = 1 - C_h$.

Monta-se a tabela 3.20 que resume os valores de compacidade seca, compacidade molhada e volume de vazios para cada material constituinte do concreto.

Tabela 23: compacidades, seca e molhada, dos materiais componentes do concreto

Material	C _s	C _h	V _h
Cimento	C _{sc} = δ_c/γ_c	C _{hc} = C _{sc} + e' _c	-
Agregado miúdo (areia)	C _{sa} = δ_a/γ_a	C _{ha} = C _{sa} + e' _a	V _{ha} = 1 - C _{ha}
Agregado graúdo (brita)	C _{sb} = δ_b/γ_b	C _{hb} = C _{sb} + e' _b	V _{hb} = 1 - C _{hb}

d) Determinação da argamassa plena.

d1) A partir de uma massa de A kg de areia seca determina-se o volume aparente de material: $V_{ap} = A/\delta_a$

d2) Procede-se ao umedecimento da areia e calcula-se o volume de vazios do agregado úmido com a água de molhagem correspondente:

Volume de vazios da areia úmida = $V_{ap} * V_{ha} = (A/\delta_a) * [1 - C_{ha}]$.

Valette considera que um volume de pasta de cimento 10% superior ao volume de vazios da areia molhada é o mínimo suficiente para preencher os vazios e conseguir um total recobrimento dos grãos do agregado. \Rightarrow Volume de pasta de cimento = volume absoluto de cimento + volume de água necessária para conseguir a consistência normal da pasta.

Designando-se com a letra C a massa de cimento da pasta $\Rightarrow V_{pasta} = V_{aparente\ de\ cimento} * C_{hc}$

$$V_{pasta} = C/\delta_c * C_{hc} = 1,10 * (V_{aparente\ da\ areia} * V_{ha}) = 1,10 * (A/\delta_a) * V_{ha}$$

A **massa de cimento da pasta** será: $C = 1,10 * (A/\delta_a) * V_{ha} * (\delta_c / C_{hc})$.

A **massa de água total contida na argamassa** (água da areia + água do cimento) será:

$$E = A * e_a + C * e_c$$

A **massa total de argamassa** será: $A * (1 + e_a) + C * (1 + e_c)$.

O **volume absoluto de argamassa** será: $V_{aparente\ da\ areia} * C_{ha} + V_{aparente\ do\ cim.} * C_{hc} =$

$$= (A/\delta_a) * C_{ha} + (C/\delta_c) * C_{hc}$$

e) Determinação do traço básico de concreto com mínimo consumo de argamassa.

Para determinar o traço básico, acrescenta-se na argamassa plena, a maior quantidade possível de agregado graúdo previamente umedecido com sua água de molhagem (e_b). A incorporação do agregado graúdo na argamassa deverá ser efetuada aos poucos de maneira a conseguir um concreto compacto, levemente exsudante, e com a consistência requerida para um correto adensamento e um bom acabamento nas fôrmas. A consistência adotada para alcançar a trabalhabilidade desejada poderá ser prefixada através de qualquer um dos métodos tradicionais. Os grãos do agregado graúdo devem ficar com um recobrimento adequado de argamassa para que a mistura de concreto resultante deslize com facilidade.

O processo de incorporação do agregado graúdo na argamassa plena pode ser feito num recipiente transparente graduado de maneira que seja possível observar a existência de vazios e o comportamento da mistura quanto a suas possibilidades de adensamento com os equipamentos previstos. O processo de adição do agregado graúdo deve continuar até que se perceba insuficiência de argamassa de recobrimento nas partículas e diminuição da trabalhabilidade da mistura fora dos limites estabelecidos.

Uma vez determinada a massa máxima B de agregado, possível de ser acrescida à argamassa plena, parte-se para o cálculo da quantidade de água total incorporada na mistura e para a definição do traço básico de concreto “pleno” em massa. Determina-se também o volume da mistura final resultante para calcular o consumo de cimento real por unidade de volume de concreto.

A massa total de água do concreto “pleno” será: $E_t = A * e_a + C * e_c + B * e_b$.

O traço básico, em massa, estará dado por 1: A/C: B/C // E_t / C .

f) Ajuste do traço básico para a obtenção do traço procurado com consumo de cimento preestabelecido.

Como o método de Vallette está direcionado para a obtenção de concretos com baixos teores de argamassa e mínimos consumos de cimento será uma situação freqüente de trabalho ter que efetuar alterações no traço básico, no sentido de aumentar o consumo de cimento (para diminuir a relação água/cimento dentro dos limites de consistência estabelecidos), substituindo-se parte do volume de areia úmida por igual volume de pasta pura.

Quando for necessário dosar concretos com resistências especificadas, os consumos de aglomerante dos traços procurados poderão ser estimados para os materiais empregados, por meio de relações entre os consumos de aglomerante e as resistências médias nas idades consideradas.

Seja C_1 o consumo de cimento buscado, e tal que $C_1 > C$ (consumo do traço básico) \Rightarrow

O volume de pasta de cimento a ser adicionado ao concreto básico será:

$$V_{\text{aparente do acréscimo de cimento}} * C_{hc} = [(C_1 - C) / \delta_c] * [\delta_c / \gamma_c + e'_c] = (C_1 - C) * [1 / \gamma_c + e_c].$$

Seja A_1 a massa de areia seca do traço buscado e A a massa de areia seca do traço básico de partida, então a incorporação do volume de pasta de cimento anteriormente calculado em substituição de igual volume de areia úmida obriga a que seja cumprida a seguinte equação:

$$V_{\text{aparente do acréscimo de cimento}} * C_{hc} = V_{\text{aparente do decréscimo de areia}} * C_{ha} \Rightarrow [(C_1 - C) / \delta_c] * C_{hc} =$$

$$V_{\text{aparente do acréscimo de cimento}} * C_{hc} = [(A - A_1) / \delta_a] * C_{ha}$$

A massa de areia $\Delta A = (A - A_1)$ a ser substituída pela massa de cimento $(C_1 - C)$ estará dada pela expressão:

$$\Delta A = A - A_1 = \delta_a [(C_1 - C) / \delta_c] * C_{hc} / C_{ha}.$$

Uma vez feito o ajuste das quantidades de areia e aglomerante necessárias para conseguir o consumo de cimento requerido, deve-se corrigir as quantidades de água de amassamento

correspondentes de maneira a determinar a massa de água total que possibilita calcular a relação água/cimento determinante da resistência e da durabilidade do concreto de traço procurado.

A variação na quantidade de água estará dada pela expressão:

$\Delta E_t =$ Água de molhagem do cimento adicionado - água de molhagem da areia retirada

$$\Delta E_t = (C_1 - C) e_c - (A - A_1) e_a$$

O traço de concreto, de consumo predefinido C_1 , modificado a partir do traço básico de consumo C , poderá ser calculado através das quantidades de materiais totais resultantes:

Massa de cimento do concreto modificado = C_1

Massa de areia do concreto modificado = $A_1 = A - \Delta A = A - \delta_a [(C_1 - C) / \delta_c] * C_{hc} / C_{ha}$

Massa de brita do concreto modificado = massa de brita do traço básico inicial = $B_1 = B$

Massa de água do concreto modificado = $E_1 = E_t + \Delta E_t = E + (C_1 - C) e_c - (A - A_1) e_a$

Traço do concreto modificado será: **1: A_1/C_1 : B_1/C_1 // E_1/C_1**

Obs: Calculada a relação água/cimento (E_1/C_1), poder-se-á estimar a resistência a ser atingida e serão determinadas as alterações que deverão ser feitas no consumo de cimento para obter concretos que apresentem resistências (e conseqüentemente relações água/cimento) próximas das exigidas nas diferentes idades.

g) Determinação de um traço definitivo.

O traço definitivo deve satisfazer as exigências de resistência e durabilidade de projeto, por meio da fixação da relação água/cimento. Esta relação será obtida através das curvas de Abrams, construídas para diferentes idades de referência, a partir de valores de resistências à compressão correspondentes aos concretos com diferentes consumos de cimento, modificados a partir do traço básico inicial, segundo os procedimentos anteriormente explicitados.

h) Alguns pesquisadores e tecnologistas de concreto, (NASCIMENTO et al., 1988; DJANIKIAN, 1980; SILVA, 1977) enfrentados ao problema da aplicação prática do método de Roger Vallette, propõem algumas fórmulas, valores de variáveis e procedimentos que podem ajudar na tarefa de determinar mais rapidamente os parâmetros considerados nas diferentes etapas do método, e conseqüentemente, facilitar e agilizar o desenvolvimento da dosagem no laboratório.

A seguir, são apresentadas algumas das “dicas” sugeridas :

h1) Considerando as pesquisas de René F eret, a partir dos estudos feitos com 58 tipos diferentes de areia poderia ser usada a seguinte f ormula para orientar a determinação da quantidade em massa de “ gua de molhagem da areia” (e_a) (NASCIMENTO et al., 1988) :

$$e_a = 0,03 g + 0,09 m + 0,23 f$$

As letras g, m e f representam a classificação dos grãos das areias em três categorias :

g = massa de grãos graudos compreendidos entre 2 e 5 mm,

m = massa de grãos médios compreendidos entre 0,5 a 2 mm,

f = massa de grãos finos menores que 0,5 mm.

h2) No trabalho realizado para a dosagem do concreto para o Sifão do Rio Pinheiros, em São Paulo, Djanikian (1980) determina as águas de molhagem do cimento e_c e da areia e_a preparando duas argamassas com massas distintas de cimento (C_1 e C_2) e areia (A_1 e A_2), adicionando quantidades de água x e y até uma trabalhabilidade desejada.

Para obter e_a e e_c (em massa) pode-se estabelecer o seguinte sistema de equações:

$$C_1 * e_c + A_1 * e_a = x$$

$$C_2 * e_c + A_2 * e_a = y$$

h3) Para a obtenção da “argamassa plena” e para a determinação da quantidade de pasta de cimento adicional, necessárias para envolver os gr os da areia (que pode variar entre 10 a 20% do volume de vazios da areia molhada), Silva (1977), da Universidade de São Carlos, recomenda a utilização de um recipiente transparente e graduado, onde possa ser medido o volume de argamassa obtido e possa ser observada a acomodação do material, em função do tipo de adensamento empregado. Este molde transparente também será utilizado na determinação da quantidade máxima de brita que pode ser adicionada à argamassa plena de forma a obter o “concreto pleno”. Verifica-se, neste caso, a não existência de possíveis vazios entre os gr os do agregado graudo, após o processo de adensamento da mistura de concreto.

h4) Para o cálculo da quantidade de brita que pode ser incorporada ao concreto, Djanikian (1980), propõe um artifício que consiste em admitir que o volume de argamassa plena obtida é menor do que o real, de maneira a calcular uma quantidade correspondente de brita menor que a teoricamente possível de ser adicionada na argamassa. O artifício proposto permite garantir sobre o agregado graudo um recobrimento de argamassa que ofereça ao concreto as características de

mobilidade procuradas. Na prática, o que se faz é multiplicar o volume de argamassa por um fator R menor que 1,0, de maneira que o volume de vazios da brita seja sempre menor que o volume da argamassa que se dispõe.

Dependendo da consistência do concreto procurado (TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990), Djanikian (1980) propõe os seguintes valores:

$R = 0,8$, para consistência rija e adensamento por vibração intensa (abatimento de 20 a 50 mm);

$0,6 < R < 0,8$, para consistência plástica e adensamento por vibração moderada (abatimento de 50 a 100 mm);

$0,5 < R \leq 0,6$, para maior consistência e adensamento por vibração moderada (abatimento maior que 100 mm).

A condição a ser imposta, segundo Djanikian (1980), será que o volume de vazios da brita molhada deverá ser preenchido pelo volume de argamassa reduzido pelo fator R .

Volume de vazios da brita molhada = $(B/\delta_b) * V_{hb}$

Volume de argamassa reduzido = $[(A/\delta_a) * C_{ha} + (C/\delta_c) * C_{hc}] * R$

Conseqüentemente, através da fórmula: $B = [(A/\delta_a) * C_{ha} + (C/\delta_c) * C_{hc}] * R * \delta_b / V_{hb}$, pode ser estimada teoricamente a quantidade, em massa, de brita que deve ser acrescentada na “argamassa plena” de forma de ter um “concreto pleno”.

O volume total de concreto “pleno” será:

Volume absoluto de argamassa + Volume absoluto de brita + Volume de água da brita

$$V_{\text{concreto}} = (A/\delta_a) * C_{ha} + (C/\delta_c) * C_{hc} + B/\gamma_b + (B/\delta_b) * e'_b$$

$$V_{\text{concreto}} = (A/\delta_a) * C_{ha} + (C/\delta_c) * C_{hc} + B (1/\gamma_b + e_b/\gamma_{\text{água}})$$

A massa total de água do concreto “pleno” será: $E_t = A * e_a + C * e_c + B * e_b$

O traço básico em massa estará dado por **1: A/C: B/C // E_t/C**.

4 ATIVIDADES E ASPECTOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM E PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO

O desenvolvimento do estudo comparativo entre os cinco métodos de dosagem, descritos e exemplificados no capítulo 3, deve-se estruturar sobre um conjunto ordenado de características, parâmetros e aspectos, selecionados a partir da análise das questões de dosagem. Dispõe-se, desta forma, de elementos quantitativos e qualitativos de avaliação que permitem julgar, de maneira rápida e eficiente, a adequação e as vantagens e/ou inconvenientes da aplicação, de determinados métodos de proporcionamento para fins específicos, em função da disponibilidade de tempo, dos recursos humanos e materiais existentes e das exigências e condições particulares de aplicação e uso.

4.1 ATIVIDADES E PARÂMETROS CONSIDERADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

Para poder determinar, de forma metódica, quais são as informações e atividades que são consideradas como necessárias por cada um dos métodos de dosagem e, posteriormente, possibilitar sua comparação, adotar-se-á como marco de referência a Metodologia geral de dosagem, apresentada por Helene (1987). As informações e os fatores que devem ser levados em conta, quando se aborda um estudo de dosagem de concretos estruturais destinados a obras correntes, podem ser visualizados de forma ordenada, na figura 22.

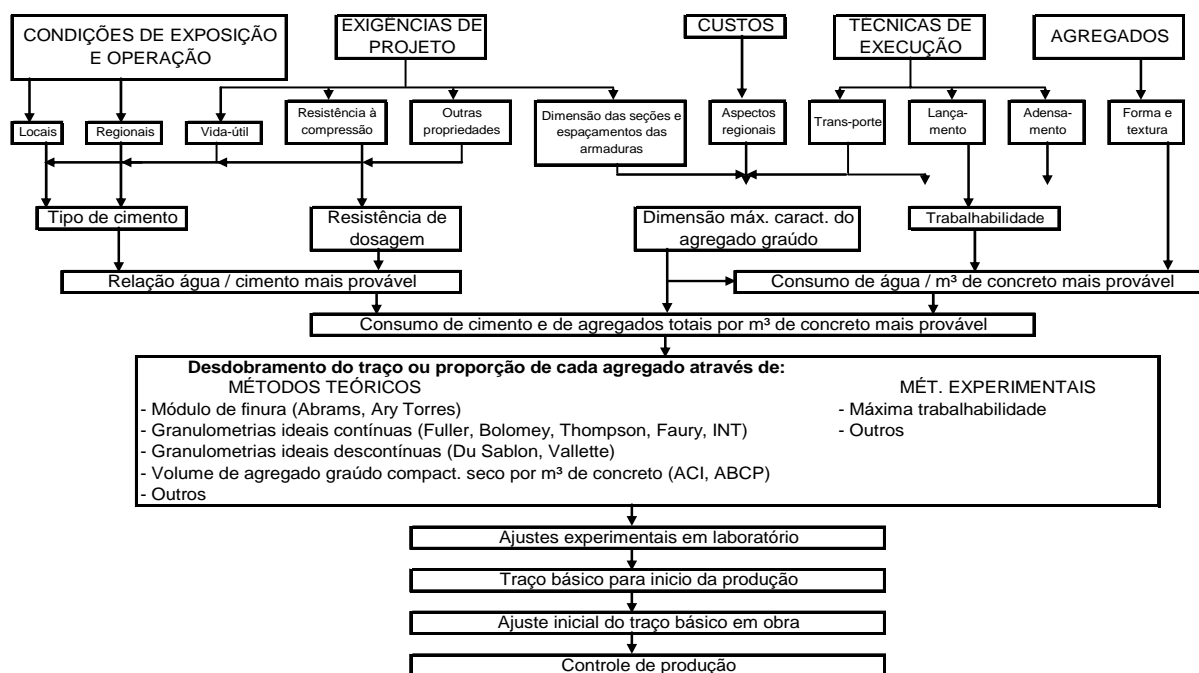


Figura 22: atividades e parâmetros que devem ser considerados em estudos de dosagem de concretos para obras correntes

(fonte: HELENE, 1987)

4.2 INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DOS AGREGADOS NAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO

Uma das características importantes no estudo da granulometria dos agregados é a **Dimensão máxima característica** do conjunto de grãos. O aumento da Dimensão máxima característica implica no aumento relativo das dimensões das partículas a serem aglomeradas por unidade de volume de concreto. O aumento da Dimensão máxima característica leva a uma diminuição da quantidade de aglomerante necessária por unidade de volume do concreto, o que traz vantagens econômicas, em termos da redução do consumo de aglomerante, e vantagens técnicas, decorrentes de um menor volume de pasta e da diminuição do calor de hidratação, gerado, nos processos de pega e endurecimento do cimento (HUMMEL, 1966; SAAD et al., 1983). A escolha da Dimensão máxima característica do agregado graúdo a ser usado na dosagem, será a maior possível compatível com as dimensões das fôrmas, à disposição das armaduras, as condições de acabamento das peças executadas. Quando o concreto é lançado por bombeamento o sistema de impulsão e a tubulação da bomba, condicionam o tamanho máximo do agregado.

Para os concretos compreendidos nas faixas de resistências baixas e médias, admite-se que o agregado graúdo de maiores dimensões contribuirá na obtenção de maiores resistências mecânicas

pois, devido à sua menor superfície específica, existirá uma menor demanda de água de amassamento (para uma dada consistência e relação agregado/cimento), o que levará à redução da relação água/cimento e um conseqüente aumento da resistência (KAPLAN, 1958). Entretanto, Sobral (1983) destaca que, para agregados graúdos com dimensão máxima acima de 38 mm, o aumento de resistência resultante da redução da água é prejudicado pelos efeitos negativos da redução da área de aderência, que ocasiona maiores tensões na interface agregado/pasta. Para concretos estruturais correntes (consumos de cimento acima de 280 kg/m^3 de concreto) a resistência à compressão parece não ser beneficiada com o aumento da dimensão máxima do agregado, acima de 38 mm (SOBRAL, 1983).

Uma questão intensamente debatida na escolha dos agregados é a relativa às vantagens e desvantagens das **granulometrias** contínuas e descontínuas. A princípio supunha-se que a granulometria ótima seria a correspondente a um mínimo de vazios do agregado, ou o máximo de compacidade. Foi nessa procura da compacidade máxima das composições granulométricas que Féret demonstrou, com seus primeiros estudos em 1892 (NASCIMENTO et al, 1988; SANTOS BASÍLIO, 1987), que o mínimo de vazios correspondia a uma distribuição descontínua⁸, composta apenas de grãos finos e grossos e desprovida de partículas médias. Entretanto as experiências realizadas por Fuller a partir de 1901 nos Estados Unidos (DRAFFIN, 1943), verificaram que as granulometrias contínuas⁹ conduziam a concretos mais trabalháveis, possibilitando a obtenção de misturas com elevados abatimentos e com menor propensão à segregação. Do ponto de vista prático e econômico, as vantagens do uso de agregados com distribuições granulométricas contínuas são indiscutíveis, pois os agregados geralmente disponíveis, naturais ou artificiais, estão constituídos por partículas cujos tamanhos se distribuem de forma mais ou menos contínua e apresentam, durante períodos extensos de produção e/ou fornecimento, uma maior ou menor variabilidade de suas dimensões.

As granulometrias descontínuas parecem apresentar desempenhos satisfatórios quando se procuram traços econômicos e resistências elevadas, em concretos elaborados com agregados de maior tamanho e de baixa consistência, destinados à moldagem de peças compactadas com vibração mecânica enérgica. No entanto, podem ser requeridos maiores cuidados nos processos de transporte, lançamento e adensamento e um maior consumo da energia de compactação. Além disso, concretos produzidos com agregados de granulometrias descontínuas são mais difíceis de

8 Granulometrias descontínuas são aquelas nas quais certas faixas granulométricas intermediárias faltam ou foram eliminadas artificialmente. Podem ser granulometrias deficitárias ou com soluções de continuidade. (HUMMEL, 1966)

9 Granulometrias contínuas são aquelas que contêm todos os tamanhos de grãos, desde o maior até o menor, dando uma curva de peneiração contínua. (HUMMEL, 1966)

transportar por bombeamento, especialmente quando se trata de misturas menos fluidas e com tendência à segregação (GIAMMUSSO, 1987).

Neville (1997) observa que, embora as aparentes vantagens teóricas das granulometrias descontínuas, possibilitariam a produção de concretos com uma estrutura mais compacta e resistente e com menores possibilidades de retração, diversas pesquisas têm mostrado que, em termos práticos, as vantagens esperadas não são evidenciadas de maneira significativa podendo-se obter resistências e índices de retração similares, considerando as mesmas relações agregado/cimento e usando granulometrias contínuas ou descontínuas. No que diz respeito à trabalhabilidade, um ajuste diferenciado na percentagem de areia em relação ao mesmo conteúdo total de agregado permitiria satisfazer as condições da obra com uma ou outra granulometria. De qualquer forma alguns tecnólogos constatam que, embora sempre possam ser realizados ajustes entre os agregados miúdos e graúdos disponíveis, quando aumenta o número de frações granulométricas¹⁰ ausentes ou suprimidas, as misturas de concreto vão se tornando mais ásperas e difíceis de misturar (HUMMEL, 1966).

Vários autores como Raina (1988), Day (1995) e Neville (1997) são claros em afirmar que é difícil, na prática, dispor de uma granulometria ideal, devendo-se procurar, entre os materiais disponíveis, uma composição granulométrica que possibilite o máximo adensamento com pouco consumo de energia e mínimo trabalho de compactação. Na maioria das situações, agregados miúdos ou graúdos, com granulometrias não muito adequadas, podem ser empregados na obtenção de concretos com desempenhos satisfatórios, através de um correto balanceamento das proporções de mistura e eventualmente com a incorporação de adições e/ou ar. No caso de granulometrias contínuas é importante verificar as frações granulométricas mais finas que podem vir acompanhadas de uma maior quantidade de pó, cuja presença poderá causar uma elevação do consumo de água.

Para a execução de concretos correntes ou de grandes volumes de produção, o aproveitamento de agregados disponíveis localmente, com uma composição granulométrica não muito adequada, pode ser uma alternativa de proporcionamento mais econômica que transportar, de longe, agregados com uma granulometria melhor, ainda que esse aproveitamento exija uma mistura com maior quantidade de pasta e conseqüentemente com maior consumo de cimento.

Day (1995) observa que durante muito tempo, a consideração da qualidade dos agregados, passava pela especificação de determinadas características que os definiam como “bons” agregados. Com este critério a aceitação ou rejeição do material para o uso dependia da sua

conformidade ou não com as características especificadas, o que dificultava, muitas vezes, sua obtenção ou tornava seu uso anti-econômico.

Na realidade o que interessa não é o agregado em si mesmo, mas sim o concreto resultante, com ele produzido. Portanto, pode-se considerar que um agregado será tecnicamente adequado quando permita a obtenção de um concreto satisfatório, cujas propriedades deverão ser perfeitamente definidas em termos de trabalhabilidade, visando uma consistência suficiente, mínima segregação e facilidade de compactação.

4.2.1 Seleção de parâmetros para avaliação das misturas de concreto

Alguns dos parâmetros de dosagem que podem ser escolhidos para caracterizar, controlar e comparar objetivamente as misturas de concreto obtidas pelos diferentes métodos, são listados a seguir:

a) Dimensão máxima característica do agregado D_{mc} . (definida na NBR 7217 (ABNT, 1987^a))

Para concretos estruturais, com resistências à compressão compreendidas entre 15 e 40 MPa, a Dimensão máxima característica ideal do agregado tem sido assumida como compreendida entre 19 e 38 mm, de acordo com o tamanho da seção da peça e o espaçamento das barras da armadura. Quando se procura trabalhar com menores relações água/cimento, ou se pretende diminuir a retração ou aumentar a resistência ao desgaste deve-se optar por agregados de maior dimensão.

b) Relação: $m = [\text{massa total de agregados} / \text{massa de cimento}]$

A participação dos agregados no concreto, compreendida geralmente entre 60 % e 80 % do volume total, é fundamental para a estabilidade volumétrica do conjunto e constitui um fator decisivo em termos de economia de produção.

c) Relação: $a/b = [\text{massa de agregado miúdo} / \text{massa de agregado graúdo}]$

d) Relação: $a/m = [\text{massa de agregado miúdo} / \text{massa total de agregado}]$

Observa-se que em condições normais a faixa de variação da quantidade de areia em relação ao total de agregados deve oscilar entre 25 % e 40 %. Para obter concretos com massa específica máxima e com consumos de cimento da ordem de 300 kg/m³ e abatimentos de 50 mm, Nugent (1980) desenvolveu no Brasil pesquisas que permitiram determinar no laboratório uma percentagem ótima de 43% de areia natural (com Módulo de finura próximo de 2,75) em relação ao total de agregado. Outros tecnólogos como Day (1995) e Murdock (1960) têm determinado

¹⁰ Frações granulométricas são constituídas por grãos do agregado cujos tamanhos estão compreendidos entre duas peneiras sucessivas da série considerada (Hummel, 1966)

misturas de concreto aplicáveis em casos especiais, com percentagens de areia que superaram 50% do total de agregados.

O importante, quando se trata de areias, não é o estabelecimento de limites exatos de uso pois, dentro de amplas margens, a granulometria não constitui um problema já que não altera significativamente nem a trabalhabilidade nem a resistência. O importante é a determinação, para cada caso em particular, da proporção e o tipo de areia a ser usada em relação a um determinado tipo de agregado graúdo. O conteúdo ideal de areia dependerá de sua granulometria, do conteúdo de cimento, do teor de ar incorporado, da forma das partículas, da granulometria do agregado graúdo e obviamente do uso para o qual se destine o concreto.

e) Relação: $a/(1+m) = [\text{massa de agregado miúdo} / \text{massa total de materiais secos}]$

f) Teor de argamassa α (em percentual): relação percentual entre a massa total de materiais finos (aglomerante + agregado miúdo) em relação à massa total de materiais secos do traço:

$$\alpha (\%) = 100 * [(1+a)/1+m]$$

De maneira mais prática, pode entender-se o teor de argamassa α (%) como a relação percentual entre a massa de cimento somada à massa agregado miúdo, em relação ao total de materiais secos constituintes da mistura de concreto:

$$\alpha (\%) = 100 * [\text{massa de (cimento + areia)}/\text{massa de (cimento + areia + brita)}]$$

A quantidade de argamassa deve ser a mínima suficiente para preencher os espaços existentes entre os grãos do agregado graúdo e permitir sua lubrificação, evitando a formação de vazios na estrutura interna do concreto e falhas no processo de lançamento e adensamento. O excesso de argamassa, embora possa melhorar a aparência do concreto, pode elevar seu custo e, caso a demanda de água for aumentada, pode aumentar os riscos de retração (HELENE; TERZIAN, 1992; SOBRAL, 1983).

g) Teor de pasta em relação ao total de agregado (m) $\Rightarrow p_m (\%) = 100 * (1+x)/m$

A quantidade de pasta na argamassa deve ser a suficiente para providenciar uma adequada lubrificação dos grãos de areia e evitar a exsudação. Quanto maior seja o Módulo de finura da areia utilizada na mistura de concreto, maior deverá ser a quantidade de pasta necessária para preencher os vazios intergranulares e possibilitar o envolvimento dos grãos. A permeabilidade da pasta e sua resistência mecânica condicionam a permeabilidade e a resistência do concreto.

A finura do cimento intervém também na permeabilidade da pasta que, por sua vez, se vincula aos fenômenos de sedimentação e exsudação. Assim, cimentos mais finos (de maior superfície específica) dão origem a pastas menos exsudantes (PRISZKULNIK, 1977).

h) Teor de pasta em relação aos materiais secos da mistura (1+m):

$$p_{(1+m)} (\%) = 100 * (1+x)/(1+m)$$

i) Teor de pasta em relação ao total de materiais da mistura (1+m+x):

$$p_t (\%) = 100 * (1+x)/(1+m+x)$$

j) Relação **H** (em percentual): relação percentual entre a massa total de água da mistura em relação à massa total de materiais secos do traço:

$$H (\%) = 100 * [(x)/(1+m)]$$

A relação H apresenta uma correlação direta com a consistência do concreto de forma que para uma mesma relação água/cimento **x** (mesma resistência) o aumento da relação água/materiais secos implica num aumento do abatimento. A lei de Lyse (1932) estabelece que, fixado o tipo de materiais constituintes do concreto, a quantidade de água necessária, para conseguir uma dada trabalhabilidade, é constante e independe da relação **m** (agregado /cimento).

k) Teor de ar incorporado ou relação percentual entre o volume de ar incorporado e/ou aprisionado e o volume total da mistura de concreto fresco resultante (medido pelo método pressométrico, conforme NBR 11686 (ABNT, 1990)):

$$\text{ar} (\%) = 100 * (\text{Volume de ar} / \text{Volume total de concreto})$$

A presença de vazios pode diminuir muito a resistência do concreto. Conforme Neville (1997) teores de vazios da ordem de 2% causam uma perda de resistência do concreto que pode aproximar-se de 10% da resistência potencial desse mesmo concreto, perfeitamente adensado. Para teores de ar próximos de 5% a resistência pode cair até 30% a respeito de seu máximo valor potencial.

l) Consumo de cimento por m³ de concreto:

$$C (\text{kg/m}^3) = 1000 / [(1/\gamma_c + a/\gamma_a + b/\gamma_b + x) * (100 + \text{ar}) / 100]$$

O cimento considerado, na grande maioria dos casos, como o material mais caro dentro dos componentes do concreto é geralmente o principal determinante de seu custo. Portanto, minimizar o consumo de aglomerante torna-se um objetivo fundamental no proporcionamento de concretos econômicos.

m) Quantidade de água por unidade de volume de concreto = Q (kg/m^3 ou l/m^3) = $C * x$

n) Módulo de Finura da composição granulométrica total da mistura de agregados (conforme NBR 7217 (ABNT, 1987a)): M_{Ftotal} .

Uma questão interessante é a de representar a granulometria dos agregados através de um único parâmetro que, embora não identifique univocamente a distribuição granulométrica, permita ter uma idéia de sua composição e possibilite controlar suas variações.

Um dos parâmetros mais amplamente usados, para comparar a granulometria de agregados de características similares ou para detectar, em materiais de uma mesma origem, variações da distribuição dos tamanhos das partículas, é o Módulo de finura, (conforme NBR 7217 (ABNT, 1987a)). Embora que dentro de certos limites este parâmetro oferece uma estimativa do comportamento provável de um concreto preparado com agregados de uma determinada granulometria. (POPOVICS, 1966), várias pesquisas (ROAD RESEARCH LABORATORY, 1963) têm demonstrado que o Módulo de finura da mistura de agregados não tem influência direta na resistência do concreto, mas sim indiretamente pelo efeito que exerce na trabalhabilidade e, conseqüentemente, na demanda de água do agregado. Tartuce e Giovannetti (1990) verificaram que para um traço determinado, todos os agregados com Módulos de finura idênticos exigem a mesma quantidade de água, para produzir concretos com a mesma consistência. Assim, os concretos resultantes apresentaram a mesma resistência. Ainda, foi verificado que largas variações da granulometria dos agregados não afetam a quantidade de água necessária, desde que o Módulo de finura continue o mesmo e a mistura seja plástica.

o) Massa específica da mistura de concreto fresco γ_{con} (conforme NBR 9833 (ABNT, 1987b))

p) Consistência da mistura do concreto, medida pelo ensaio de abatimento (NBR 7223 (ABNT, 1982a))

q) Consistência do concreto, medida pelo espalhamento do tronco de cone (NBR 9606 (ABNT, 1986))

Todos os parâmetros anteriormente considerados podem ser organizados numa tabela que facilite a comparação dos valores obtidos para cada um dos traços determinados pelos diferentes métodos. A tabela 24, assim estruturada, pode adotar a seguinte forma:

Tabela 24: Parâmetros para caracterização das misturas de concreto

Parâmetros do traço unitário de concreto em massa: 1 : a : b // x
Relação água/cimento em massa: (x)
Proporção de cimento em massa: (1)
Proporção de agregado miúdo em massa: (a)
Proporção de agregado graúdo em massa: (b)
Proporção de agregado total em massa: (m = a + b)
Relação (massa de agregado miúdo / massa de agregado graúdo): (a / b)
Relação (massa de agregado miúdo / massa de agregado total): (a / m)
Relação (agregado miúdo / massa total de cimento e agregados): [a / (1+m)]
Teor de pasta em relação à massa de agregado total : $p_m (\%) = 100 * [(1+x) / m]$
Teor de pasta em relação à massa de cimento e agregado total: $p_{(1+m)} (\%) = 100 * [(1+x) / (1+m)]$
Teor de pasta em relação à massa total de materiais do traço: $p_t (\%) = 100 * [(1+x) / (1+m + x)]$
Teor de argamassa (cimento e agregado miúdo em relação à massa total de agregado e cimento): $\alpha (\%) = 100 * [(1+a) / (1+m)]$
Teor de água em relação à massa total de agregado e cimento: $H (\%) = 100 * [x / (1+m)]$
Volume de ar aprisionado (%) medido pelo método pressométrico conforme a norma NBR 11686/90: ar (%)
Consumo de cimento por m ³ de concreto: $C (kg/m^3) = 1000 / [(1/\gamma_c + a/\gamma_a + b/\gamma_b + x) * \{100 + ar (\%)\} / 100]$
Consumo de água por m ³ de concreto: $Q (kg/m^3) = C * x$
Abatimento do tronco de cone (mm) medido no ensaio realizado conforme a norma NBR 7223/82: Abatimento
Massa específica conforme norma NBR 9833/87: $\gamma (kg/m^3)$

4.2.2 Características e parâmetros para avaliação do concreto endurecido

Nos concretos de baixa e média resistência, produzidos com agregados normais (limpos e são), pode-se afirmar que o desempenho resistente está condicionado pela quantidade de defeitos da matriz da argamassa (devidos a falhas na compactação) e pela porosidade da pasta, que depende do grau de hidratação e da relação entre os volumes absolutos de água, vazios de ar e cimento. Como o ar pode-se encontrar envolvido pela pasta, sob a forma de bolhas ou em espaços interligados, a predominância da primeira ou da segunda maneira da distribuição do ar, incidirão aumentando ou diminuindo, respectivamente, a plasticidade da mistura (SOBRAL, 1977). Num concreto plenamente adensado, com um certo tipo de agregado e um determinado grau de hidratação do cimento (condicionado pela idade e pelas condições de cura), a resistência da pasta e da ligação pasta/agregado podem ser consideradas como dependentes, predominantemente, da relação água/cimento.

A relação água/cimento condiciona decisivamente as principais propriedades mensuráveis do concreto endurecido como:

- Resistência à compressão axial do concreto em corpos-de-prova cilíndricos (conforme NBR 5739 (ABNT, 1994a));

- b) Resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos (conforme NBR 12142 (ABNT, 1991c));
- c) Coeficiente de permeabilidade do concreto endurecido submetido à água sob pressão, (conforme NBR 10786(ABNT, 1989a));
- d) Módulos de deformação: longitudinal, tangente e secante sob carregamento estático à compressão axial (conforme NBR 8522(ABNT, 1983c));
- e) Resistividade elétrica volumétrica (conforme NBR 9204(ABNT, 1985)).

A redução da quantidade de água, procurando diminuir a relação água/cimento, ocasiona um conseqüente decréscimo da trabalhabilidade, o que pode dificultar o adensamento e possibilitar o aparecimento de vazios e imperfeições que diminuam a resistência.

Destaca-se que a consideração da resistência como dependente apenas da relação água/cimento se justifica na prática, pois o volume de vazios de ar de um concreto endurecido, corretamente adensado, dificilmente supera 3% do volume total do material (SOBRAL,1983).

Embora a grande maioria dos pesquisadores e técnicos admitem a decisiva influência da variável água/cimento sobre a resistência do concreto, existe menor coincidência quanto à maneira de expressar essa relação. Dentre as diversas formas usadas para estabelecer uma ligação funcional, a mais universalmente aceita foi estabelecida por Abrams (1918). A “lei” de Abrams, válida para os concretos trabalháveis e com mínima presença de vazios de ar no material endurecido, pode ser representada pela expressão matemática mostrada a seguir:

$$f_{cj} = \frac{A}{B^x}$$

onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j , em MPa;

x = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

A e B são constantes que dependem do tipo de cimento e dos agregados usados.

Para permitir uma regressão linear, a equação anterior pode ser transformada através da aplicação da função logaritmo de modo que a “lei” de Abrams adote a seguinte expressão:

$$\log f_{cj} = \log A - x * \log B$$

Outra questão de fundamental importância a ser considerada no concreto endurecido está relacionada com a durabilidade, que pode ser considerada como a capacidade do material de

resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração (ACI COMMITTEE 210.2R, 1991). A durabilidade de qualquer material, depende das suas características intrínsecas e de um conjunto de condições ambientais e de serviço que interagem para modificar suas propriedades com o passar do tempo. Partindo do princípio que um material não permanece inalterado ao longo de sua vida útil, exige-se que ele mantenha suas propriedades e características de desempenho acima de limites mínimos necessários durante o período previsto para sua utilização. A partir destas considerações constata-se que a durabilidade pode ser bastante difícil de avaliar e de poder estimar com certeza. Esta situação pode ser entendida considerando que o comportamento de uma peça ou de uma estrutura de concreto, durante toda sua vida útil, será função de um grande número de fatores, entre os quais podem ser relacionados: o tipo e a qualidade dos materiais constituintes, a tecnologia de produção e o controle da mistura de concreto e a qualidade dos processos de execução da obra. A durabilidade dependerá, em grande parte, do tipo e da agressividade do meio no qual a obra estará inserida. Neste aspecto, cabe destacar que a previsão dos efeitos do meio agressivo externo sobre a estrutura de concreto pode resultar uma tarefa muito complexa, tanto pela diversidade de possíveis agentes agressivos quanto pela variação do tipo e da intensidade dos ataques com o decorrer do tempo de utilização da obra.

Por último, não se deve esquecer o aspecto estético em algumas utilizações do concreto, o que leva a considerar as características de uniformidade da coloração da massa e as possibilidades de acabamento e textura da superfície das peças.

4.3 “DIAGRAMAS DE DOSAGEM” PARA CADA “FAMÍLIA” DE CONCRETOS

Os concretos de cada “família” são produzidos com os mesmos materiais e devem apresentar aproximadamente um mesmo teor de argamassa α (%) e uma mesma consistência (medida, por exemplo, pelo ensaio de abatimento). Para cada uma das famílias de concretos, determinadas pelos diferentes métodos de dosagem, podem ser construídos “diagramas de dosagem” que possibilitam visualizar graficamente as curvas de regressão correspondentes às três leis fundamentais:

a) Lei de Abrams: $f_c = A/B^x$. Vincula resistência à compressão f_c para uma determinada idade com a relação água/cimento x . A e B são constantes que dependem dos materiais.

b) Lei de Lyse: $m = K_3 * x + K_4$. Vincula a relação água/cimento x com a proporção de agregado total m . K_3 e K_4 são constantes dependentes dos materiais.

c) Lei de Molinari: $C = 1000 / (K_5 + K_6 * m)$. Vincula a proporção de agregado total m com o consumo de cimento por m³ de concreto C (kg/m³). K_5 e K_6 são constantes dependentes dos materiais.

Os diagramas de dosagem são apresentados graficamente na figura 23 mostrada a seguir:

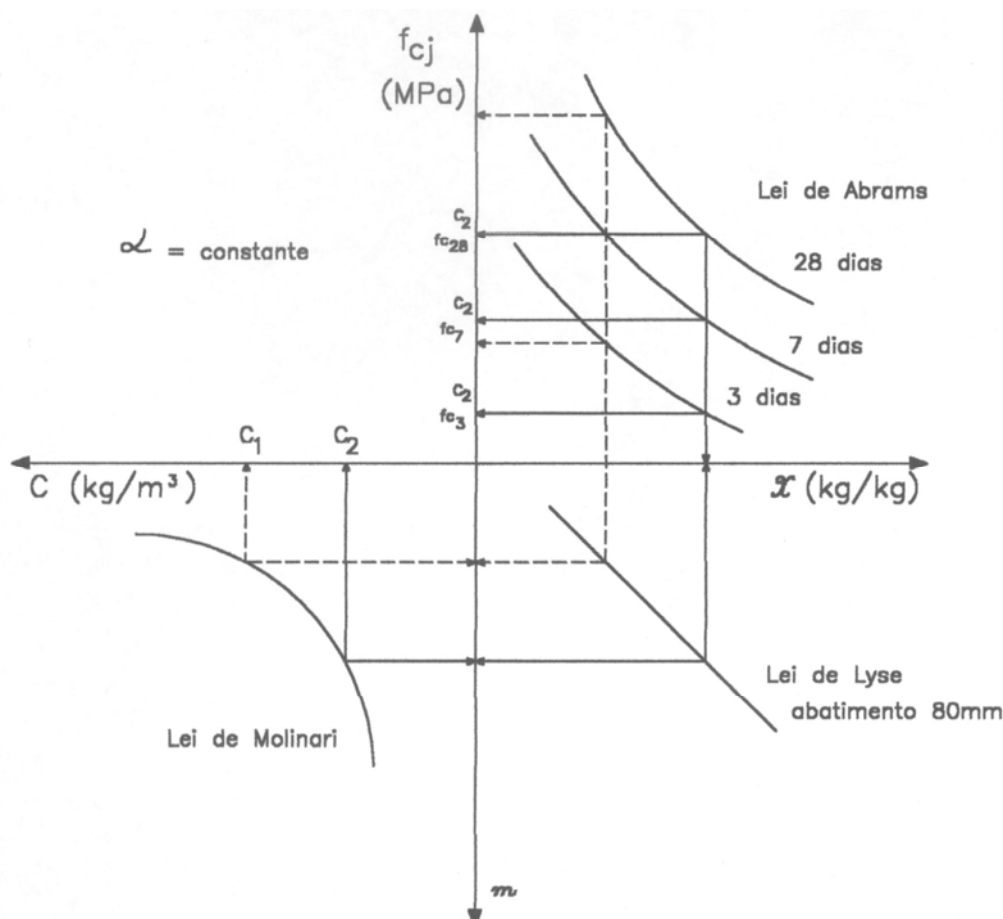


Figura 23: diagrama de dosagem para uma família de concretos com mesmo abatimento e mesmo teor de argamassa

(fonte: HELENE; TERZIAN, 1992)

4.4 CARACTERÍSTICAS E ASPECTOS QUALITATIVOS SELECIONADOS PARA AVALIAR OS DIFERENTES MÉTODOS EM ESTUDO

Uma vez apresentadas e discutidas as principais características e propriedades que identificam o concreto, nos estados fresco e endurecido, e já definidos os parâmetros que permitem avaliar quantitativamente as misturas, podem ser selecionados e estabelecidos alguns critérios e aspectos

qualitativos de comparação, que permitam evidenciar as peculiaridades dos métodos e sua adequabilidade às situações ou necessidades específicas.

A lista mostrada a seguir inclui alguns critérios elaborados e aspectos considerados como adequados para serem utilizados num estudo comparativo de métodos de dosagem:

- a) Simplicidade do método quanto aos princípios e conceitos teóricos abordados.
- b) Aplicabilidade dos princípios e conceitos teóricos considerados para o estabelecimento de uma seqüência lógica de procedimentos práticos que se apresentem fáceis de entender, sejam simples de executar e demandem menores espaços de tempo para o seu desenvolvimento.
- c) Abrangência do método quanto à consideração de todas as atividades relacionadas no quadro esquemático (figura 22) da metodologia de dosagem proposta por Helene (1987).
- d) Adaptabilidade do método aos materiais disponíveis localmente, sem necessidade de beneficiar os agregados ou de adequá-los, através de misturas, a composições granulométricas preestabelecidas.
- e) Quantidade e qualidade das informações requeridas pelo método, a respeito dos materiais constituintes, para dar início ao processo de dosagem:

Informações sobre os agregados: natureza mineralógica (que condiciona a absorção e a densidade), dimensão máxima característica, forma e textura dos grãos, composição granulométrica, módulo de finura, massas específicas, massas unitárias no estado solto e no estado compactado seco.

Informações sobre o cimento: tipo e classe de resistência, massa específica e quantidade de água necessária para a obtenção da pasta de consistência normal.

- f) Capacidade do método de modificar os traços obtidos conforme as possíveis variações das características dos materiais componentes (variação do Módulo de finura dos agregados, mudanças na forma e textura superficial dos grãos, alterações nas massas específicas, entre outras).
- g) Previsões do método quanto à possibilidade de uso de adições ou aditivos incorporadores de ar, plastificantes ou superplastificantes.
- h) Consideração do “efeito parede” na determinação do traço, quando as formas a serem moldadas apresentam uma relação elevada entre a área superficial e o volume.
- i) Priorização da trabalhabilidade para poder aumentar a produtividade nas etapas de lançamento e adensamento do concreto, minimizando os custos de mão-de-obra e os custos de operação e

manutenção dos equipamentos de vibração e compactação. Ressalta-se que a opção pela dosagem de misturas frescas mais trabalháveis contribui também para diminuir os riscos de falhas de concretagem e evita que o pessoal de obra envolvido fique tentado a acrescentar água no concreto para aumentar sua fluidez e facilitar o trabalho de lançamento, compactação e acabamento.

j) Priorização na economia de aglomerante que permite, em geral, uma diminuição do custo do concreto, menores riscos de retração e minimização dos efeitos térmicos no processo de hidratação do cimento.

k) Particularidades do método do ponto de vista prático visando:

- Facilidade de aplicação dos procedimentos indicados e rapidez para a determinação de um traço inicial, com um mínimo número de ensaios tentativos, que satisfaça as exigências de trabalhabilidade e economia procuradas (custo mínimo para determinação do traço);
- grau de influência do tecnologista na aplicação do método;
- mínimo requerimento e simplicidade de uso de equipamentos para o desenvolvimento da parte experimental de maneira a possibilitar sua aplicação em canteiros de obra por parte de pessoal não treinado em práticas laboratoriais;
- mínimo consumo de materiais no processo de execução dos ensaios experimentais;
- simplicidade e rapidez para realizar as correções necessárias no traço inicial, obtido experimentalmente de forma de ajustá-lo as exigências de trabalhabilidade requeridas;
- previsões do próprio método para a correção, “na boca da betoneira”, dos possíveis desvios e/ou alterações nas características e propriedades do concreto fresco, quando acontecem pequenas alterações nas características e/ou condições dos agregados;
- características de trabalhabilidade determinadas como: facilidade de adensamento, mínima tendência à segregação e à exsudação;
- parâmetros do concreto requeridos para a entrada no método de dosagem e parâmetros que ficam determinados durante sua aplicação.

A proposta da aplicação deste conjunto de itens de avaliação, alguns de inegável subjetividade, teria como finalidade principal auxiliar, ao tecnologista e ao engenheiro, num processo preliminar de seleção de métodos de dosagem, levando em consideração aspectos ou fatores ligados a certas necessidades específicas e a uma determinada realidade tecnológica, econômica e cultural.

Para facilitar e agilizar este processo de avaliação qualitativa, na tabela 25, são ordenados os critérios e os aspectos selecionados para comparar os diferentes métodos de dosagem.

Tabela 25: critérios e aspectos para comparar métodos de dosagem

Critérios e/ou aspectos de comparação	Método A	Método B
1) Método desenvolvido basicamente dentro do laboratório		
2) Simplicidade no entendimento dos princípios e conceitos aplicados		
3) Simplicidade na aplicação dos princípios e conceitos no roteiro teórico-experimental		
4) Detalhamento do roteiro experimental para determinar o traço básico inicial		
5) Possibilidade de determinar um traço básico, exclusivamente a partir do roteiro teórico		
6) Necessidade de informações sobre as características dos materiais a serem usados		
7) Condicionamento do método a determinado tipo de agregado		
8) Demanda de trabalho experimental e de ensaios em laboratório		
9) Quantidade de materiais consumidos na determinação do traço inicial		
10) Capacidade de adaptação para diferentes níveis de consumo de cimento		
11) Restrições na aplicação quanto à consistência dos concretos dosados		
12) Consideração explícita das perdas de argamassa		
13) Previsões do método quanto à possibilidade de incorporar ar		
14) Previsões do método quanto à possibilidade de uso de aditivos		
15) Prioriza economia de cimento		
16) Capacidade de adequar os traços às variações apresentadas pelos materiais usados		
17) Facilidade para realizar correções sobre o traço básico inicial		
18) Previsões para ajustar o traço inicial às exigências da obra		
19) Probabilidade de ter grandes diferenças entre o traço básico inicial e o final de obra		
20) Influência do tecnologista na aplicação do método		
21) Quantidade de materiais consumidos na determinação do traço inicial		
22) Consideração das atividades de dosagem:		
a) fixação de x , em função do tipo de peça e das condições de exposição e operação		
b) fixação da relação x , em função da resistência à compressão		
c) fixação do abatimento em função do tipo de peça a ser concretada		
d) fixação do abatimento em função do método de adensamento		
e) fixação da relação H (%) em função do D_{\max} e do tipo de adensamento		
f) fixação do α (%) está implicitamente condicionado pelo método		
g) estimativa da quantidade de ar aprisionada na mistura		
h) estimativa da quantidade de água mais provável por m ³ de concreto		
i) orientações para ajustar a quantidade de água da mistura		
j) consideração da dimensão máxima característica do agregado total		
k) consideração da forma e textura das partículas do agregado graúdo		
l) consideração explícita da finura da areia		
m) consideração do tipo de areia (natural de rio ou artificial de britamento)		
n) orientações para realizar a mistura de mais de um tipo de agregado graúdo		

Escala para avaliar simplicidade: **1 (simples); 2 (com médio grau de dificuldade); 3 (difícil)**. Escala para avaliar detalhamento, necessidade, adaptabilidade, demanda, capacidade, facilidade, probabilidade, influência e quantidade: **1 (pequena); 2 (média); 3 (grande)**. Escala para avaliar as restrições: **1 (sem); 2 (poucas); 3 (muitas)**. Resposta às questões específicas: **s: sim; n: não**.

* tabelas ligadas a tipos de agregados britados de granito e areias de rio com $MF \geq 1,8$.

** o tecnologista segue uma seqüência de etapas nas que se aplicam quadros e tabelas..

*** as curvas granulométricas usadas pelo método foram construídas a partir de ensaios experimentais realizados com areias de baixo Módulo de finura e grãos arredondados e com agregados graúdos constituídos por britas equidimensionais obtidas de gnaisses da região do Rio de Janeiro. Por este motivo a adequação do método, aos materiais disponíveis localmente, pode ser bastante relativa.

**** As restrições dos métodos, quanto à consistência dos concretos dosados, estão relacionadas com o equipamento de medição usado. No caso do ensaio de abatimento a faixa adequada de trabalho situa-se entre 30 mm e 150 mm

5 DESENVOLVIMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL

5.1 MATERIAIS EMPREGADOS NOS ENSAIOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

5.1.1 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi escolhido um material de natureza basáltica, britado, da cor cinza-escuro, com forma não muito lamelar e com pouco ou nenhum material pulverulento. As características físicas e composições granulométricas deste tipo de agregado, de uso freqüente na região de Porto Alegre, foram determinadas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), localizado no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O Índice de forma da brita, determinado conforme a norma NBR 7809 (ABNT, 1982b), apresentou um valor de 2,93 que, embora elevado, resultou menor que o valor 3 recomendado, pela NBR 7211 (ABNT, 1983a), para a produção de concretos estruturais. A absorção de água, determinada conforme NBR 9937 (ABNT, 1987b), foi de 0,52%.

Como o material britado não se enquadrava em nenhuma das graduações estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 1983a), decidiu-se produzir, por peneiramento dessa brita em laboratório, duas graduações de agregado graúdo que se enquadrassem dentro das faixas granulométricas das britas 1 e 2, com Dimensões máximas características respectivas de 19 mm e 25 mm. Desta maneira, as britas 1 e 2, artificialmente criadas, usadas posteriormente no proporcionamento dos concretos através dos diferentes métodos de dosagem, manteriam uma perfeita constância nas suas características e nas suas granulometrias. Além disso, a disponibilidade de duas britas padrão de graduação 1 e 2 possibilitariam a obtenção das composições granulométricas sugeridas por alguns dos métodos, como, por exemplo, o método do INT e o método da ABCP.

As características físicas e as distribuições granulométricas das britas são apresentadas nas tabelas 26 e 27.

Tabela 26: características físicas das britas de graduação 1 e 2

	Massa específica na condição saturada superfície seca (NBR 9776 (ABNT, 1987d)) γ (kg/dm ³)	Massa unitária em estado solto (NBR 7251 (ABNT, 1982c)) δ (kg/dm ³)	Massa unitária em estado compactado seco (NBR 7810 (ABNT, 1983b)) δ_{cs} (kg/dm ³)
Brita 1	$\gamma_{b1} = 2,80$	$\delta_{b1} = 1,44$	$\delta_{b1}^{cs} = 1,51$
Brita 2	$\gamma_{b2} = 2,80$	$\delta_{b1} = 1,38$	$\delta_{b1}^{cs} = 1,47$

Tabela 27: composições granulométricas das britas de graduação 1 e 2

Peneira (mm)	Brita 1		Brita 2	
	(%) de massa retida acumulada na peneira	(%) de massa retida acumulada na peneira	(%) de massa retida acumulada na peneira	(%) de massa retida acumulada na peneira
32	0	0	0	0
25	0	0	5	5
19	5	5	75	80
12,5	75	80	15	95
9,5	15	95	5	100
6,3	5	100	0	100
4,8	0	100	0	100
2,4	0	100	0	100
1,2	0	100	0	100
0,6	0	100	0	100
0,3	0	100	0	100
0,15	0	100	0	100
0,075	0	100	0	100
		MF _{b1} = 7,00		MF _{b2} = 7,80

5.1.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi selecionado uma areia natural muito limpa, sem torrões de argila nem materiais friáveis, proveniente do “Rio Guaíba”. Conforme informações levantadas com o fornecedor, a areia foi dragada do rio Jacuí. Esta informação pode ser confirmada pelas características do agregado miúdo que se enquadram nas características das areias do Jacuí, descritas no Relatório de pesquisa: “Qualificação de agregados para concretos e argamassas” (RAABE; BONIN, 1995). A dimensão máxima característica do agregado é 4,8 mm com 100% dos grãos passantes nesta peneira. A absorção de água (NBR 9777 (ABNT, 1987c)) foi de 0,4%.

As características físicas e a distribuição granulométrica da areia são apresentadas nas tabelas 28 e 29.

Tabela 28: características físicas da areia natural do “Rio Guaíba”

	Massa específica na condição saturada superfície seca (NBR 9776 (ABNT, 1987d))	Massa unitária em estado solto (NBR 7251 (ABNT, 1982c))
	γ (kg/dm ³)	δ (kg/dm ³)
Areia	$\gamma_{bl} = 2,63$	$\delta_{bl} = 1,61$

Tabela 29: composição granulométrica da areia natural do “Rio Guaíba”

Peneira (mm)	(%) de massa retida individual na peneira	(%) de massa retida acumulada na peneira
4,8	0	0
2,4	9	9
1,2	26	35
0,6	29	64
0,3	34	98
0,15	1	99
0,075	1	100
		MF _a = 3,05

5.1.3 Cimento

Por motivos de disponibilidade econômica (doação do fabricante para pesquisa) foi usado um Cimento Portland Composto tipo CP II - E classe 32 (NBR 11578 (ABNT, 1991a)).

Este cimento foi analisado nos laboratórios da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC), em Porto Alegre.

As características físicas e químicas do cimento são apresentadas na tabela 30 e 31.

Tabela 30: características físicas do cimento Portland CP II E - 32

Massa específica (NBR NM 23 (ABNT, 1998c))	Massa unitária em estado solto (em analogia com a NBR 7251 (ABNT, 1982c))
γ (kg/dm ³)	δ (kg/dm ³)
$\gamma_c = 3,16$	$\delta_c = 1,15$
Área específica “Blaine” (NBR NM 76 (ABNT, 1998d))	Expansibilidade a frio (NBR 7215 (ABNT, 1996))
A_{esp} (m ² /kg)	E_f (mm)
$A_{esp} = 331$	$E_f = 0,4$

Tabela 31: características químicas do cimento Portland CP II E - 32

Característica química	Percentual no ensaio da amostra
Perda ao fogo (NBR 5743 (ABNT, 1989b))	3,07 %
Resíduo Insolúvel (NBR 5744 (ABNT, 1989c))	0,53 %
Óxido de Silício Si O ₂ (NBR 5742 (ABNT, 1976))	18,60 %
Óxido de Alumínio AL ₂ O ₃ (NBR 5742 (ABNT, 1976))	4,6 %
Óxido Férrico Fe ₂ O ₃ (NBR 5742 (ABNT, 1976))	4,01 %
Óxido de Cálcio total CaO (NBR 5742 (ABNT, 1976))	60,9 %
Óxido de Magnésio MgO (NBR 5742 (ABNT, 1976))	1,9 %
Óxido de Enxofre SO ₃ (NBR 5746 (ABNT, 1989c))	2,22 %
Óxido de Sódio Na ₂ O (NBR 5747 (ABNT, 1989d)).	0,13 %
Óxido de Potássio K ₂ O (NBR 5747 (ABNT, 1989d))	0,72 %
Óxido de Cálcio livre CaO (NBR 7227 (ABNT, 1990))	0,46 %

Os ensaios de determinação da resistência à compressão para as idades de 7 e 28 dias foram realizados no LEME, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 7215 (ABNT, 1996). Os valores da resistência média à compressão, obtidos aos 7 e 28 dias, foram, respectivamente, 35,2 MPa e 46,7 MPa. Os coeficientes de variação dos resultados dos corpos-de-prova ensaiados para as idades de 7 e 28 dias foram 2,70% e 4,5%, respectivamente.

5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS SEGUIDOS NO DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS

O equipamento de mistura disponível no laboratório para a produção dos concretos dosados foi uma betoneira de eixo inclinado com capacidade do tambor igual a 320 litros e velocidade próxima a 26 rotações por minuto. O volume de concreto produzido por cada betonada ficou sempre próximo de 60 litros, o que representa em torno de 20% da capacidade nominal do tambor. O grande tamanho da betoneira em relação aos volumes de materiais misturados em cada amassada obrigou, no início de cada sessão de dosagem, à “imprimação” do tambor com uma argamassa de cimento e areia de igual proporção que a argamassa do primeiro traço de concreto a ser produzido.

A moldagem de corpos-de-prova foi realizada, conforme NBR 5738 (ABNT, 1994b), em fôrmas de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura com exemplares constituídos por três corpos-de-prova para cada idade de referência. A cura dos exemplares foi feita em câmara úmida, conforme NBR 5738 (ABNT, 1994b). A regularização dos topos dos corpos-de-prova foi feita sempre com uma mistura de enxofre, caulim e negro de fumo. Das várias tentativas realizadas para o

desenvolvimento da mistura de capeamento, aquela que apresentou um desempenho mais adequado em termos de trabalhabilidade e resistência estava constituída, em volume, por 70% de enxofre, 20% de caulim e 10% de negro de fumo. A mistura destes materiais era aquecida até uma temperatura de aproximadamente 140 °C para logo ser utilizada.

A velocidade média de carregamento dos corpos-de-prova no teste de compressão foi estabelecida próxima de 1 t/s (0,55 MPa/s), valor compreendido dentro dos limites (0,3 MPa/s e 0,8 MPa/s) estabelecidos no item 4.8 da NBR 5739 (ABNT, 1994a), que facilitava a operação manual da prensa durante o ensaio.

5.3 DESENVOLVIMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL PARA A APLICAÇÃO DOS CINCO MÉTODOS SELECIONADOS

A parte experimental do proporcionamento dos concretos estruturou-se sobre duas etapas, desenvolvidas totalmente em laboratório. Na primeira etapa, com duração aproximada de três meses, foram realizados ensaios de dosagem empregando os métodos da ABCP/ACI, da EPUSP/IPT, do INT, da SNCF e do ITERS. Esta primeira fase teve como objetivo pesquisar, de forma preliminar, a aplicabilidade de cada um dos métodos de dosagem e entender a fundo os passos estabelecidos nos diversos procedimentos. Além disso, a aplicação das rotinas de dosagem serviu de base para a avaliação dos teores de argamassa das misturas e ajudou na definição das faixas de variação das relações água/cimento. Foi possível também estimar os consumos de cimento e as resistências potenciais, atingidas nas idades de referência, que permitiram estruturar os diagramas de dosagem que facilitaram a definição dos traços da segunda etapa. Neste período também foram preparados e ajustados os equipamentos necessários para a aplicação dos procedimentos de proporcionamento, como, por exemplo, as mesas de remoldagem, manual e elétrica, usadas no procedimento do ITERS. As dosagens executadas pelos diferentes métodos, com os materiais previamente preparados, estocados e caracterizados, permitiram detectar falhas na aplicação de alguns procedimentos e evidenciaram a necessidade de aferir alguns equipamentos, como por exemplo, o medidor de ar aprisionado no concreto. Este período foi muito útil para familiarizar-se com os equipamentos e práticas laboratoriais e para efetuar o planejamento da etapa final do estudo experimental, que possibilitou um andamento eficiente e rápido, das subseqüentes fases do trabalho. A primeira etapa experimental teve como resultado a moldagem e o ensaio de um total de 60 corpos-de-prova que, em alguns casos, apresentaram grande variabilidade de resultados. Alguns coeficientes de variação das resistências, compreendidos entre 14% e 17%, foram atribuídos

às variações dos abatimentos dos concretos moldados, aos tempos de mistura muito diferenciados, aos problemas de capeamento e às diferenças nos equipamentos de ensaio empregados. Em outros casos os resultados de compressão obtidos na primeira etapa foram perfeitamente compatíveis, nos seus valores médios e na sua dispersão, com os valores obtidos nos ensaios dos exemplares moldados com os concretos produzidos na segunda etapa. Em função da variabilidade e das incertezas quanto à aplicação inicial de alguns procedimentos de dosagem, foi decidida a não inclusão dos resultados obtidos nesta primeira etapa experimental. Entretanto, alguns dos ensaios iniciais permitiram estabelecer certas faixas de referência que resultaram muito úteis para o desenvolvimento da segunda etapa de trabalho. As misturas de concreto estudadas, com consumos de cimento não muito baixos (próximos de 300 kg/m^3) e relações água/materiais secos próximas de 8%, apresentaram uma boa trabalhabilidade e possibilitaram uma excelente compactação, no processo de moldagem dos corpos-de-prova, conforme os procedimentos de adensamento manual padronizados pela NBR 5738 (ABNT, 1994b).

Para medir a consistência do concreto fresco, foi considerada a disponibilidade ou facilidade de obtenção dos equipamentos de medida, assim como, sua simplicidade de uso e possibilidade de aplicação e aceitação generalizada. Nesse contexto, tornou-se uma opção adequada a utilização do ensaio de abatimento, que se adaptava às características das misturas de concreto estudadas, que apresentavam, no ensaio, valores próximos de 70 mm.

A faixa de variação das relações água/cimento empregadas nas dosagens pelos diferentes métodos variava de 0,41 até 0,75, gerando concretos com resistências compreendidas entre 15,5 MPa e 39,0 MPa. A faixa de resistências obtidas enquadrava-se perfeitamente dentro da proposta inicial do trabalho de dosar concretos de resistências baixas e médias, compatíveis com as resistências usadas em Porto Alegre, para a produção da maioria das estruturas de concreto.

Levando em conta que a relação água/cimento é relativamente fácil de controlar, em ensaios de laboratório, e ela pode ser considerada como a variável mais importante na dosagem dos concretos, no estado endurecido, pareceu criterioso estudar famílias de traços que apresentassem a mesma consistência e variassem suas relações água/cimento de maneira limitada. A fixação de um determinado abatimento, para as misturas de concreto fresco, e o arbítrio de uma faixa de variação das relações água/cimento, entre os valores de 0,45 e 0,75 (com valores intermediários de 0,55 e 0,65), tornou-se uma decisão coerente com o objetivo de poder comparar misturas de concreto, com consumos de cimento e proporções de agregados variadas, obtidas pelos diferentes métodos a serem estudados.

Na segunda etapa do trabalho experimental, num período de oito semanas, procedeu-se à determinação dos traços definitivos para a realização do estudo comparativo. A aplicação dos cinco métodos de dosagem foi feita conforme as orientações e os procedimentos apresentados no capítulo 3, sendo fixado um abatimento de $70 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, como medida da consistência de todos os concretos produzidos. Os teores de ar aprisionado, nas respectivas misturas de concreto fresco, dosadas pelos cinco métodos estudados, para as quatro diferentes relações água/cimento, foram determinados pelo método pressométrico conforme as orientações da NBR NM 47 (ABNT, 1998e). A determinação das massas específicas foi realizada conforme procedimentos indicados na NBR 9833 (ABNT, 1987b). Com as informações coletadas na primeira fase experimental, e a partir dos ensaios finais, executados na segunda parte do trabalho em laboratório, foram determinados os teores de argamassa α (%) ideais para cada método, e as relações H (%) e m que permitiram obter traços de concreto com relações água/cimento 0,45, 0,55, 0,65 e 0,75.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS DADOS EXPERIMENTAIS

A tabela 32 apresenta as proporções em massa dos traços obtidos através dos cinco métodos de dosagem estudados, para cada relação água/cimento e com os respectivos parâmetros de caracterização. Para a determinação do consumo de cimento foram consideradas as percentagens de ar incorporado medidas e apresentadas na própria tabela 32 e foram empregadas, para efeitos do cálculo, as massas específicas dos materiais apresentadas nas tabelas 26, 28 e 30.

A fórmula adotada para o cálculo do consumo teórico de cimento é a seguinte:

$$C = 1000 / [(1/\gamma_{\text{cimento}}) + (a/\gamma_{\text{areia}}) + (b/\gamma_{\text{brita}}) + x] * [1 + ar (\%)/100]$$

As expressões $(1+x)/m$, $(1+x)/(1+m)$ e $(1+x)/(1+m+x)$ representam, respectivamente, as quantidades de pasta $(1+x)$ das misturas, em relação à quantidade de agregado (m) , em relação à quantidade de materiais secos $(1+m)$ e em relação à quantidade total de materiais $(1+x+m)$.

Os teores de argamassa de todos concretos, obtidos pelos diferentes métodos, variaram entre $\alpha = 51\%$ e $\alpha = 54\%$, correspondendo, esses limites, aos métodos da SNCF e da ABCP/ACI, respectivamente. Constata-se que o traço com $\alpha = 51\%$ apresenta um resultado coerente com a proposta do método da SNCF, que busca misturas com mínimo teor de pasta e mínimos teores de argamassa. Por outro lado, o traço com $\alpha = 54\%$ foi dosado através de um método que, no processo de ajuste de suas misturas, tende a produzir concretos com excesso de pasta e com consumos de cimento maiores.

Observa-se que os traços, obtidos pelos cinco métodos de dosagem, independentemente de pequenas variações nos teores de argamassa α e de pequenas variações nas relações H , apresentaram misturas com a mesma quantidade de pasta para cada relação água/cimento. O aumento da quantidade relativa de pasta, independentemente do método de dosagem usado para a determinação dos traços, chega a 50 %, quando se comparam as misturas com relações $x = 0,45$ e $x = 0,75$.

Tabela 32: traços obtidos experimentalmente, pelos cinco métodos de dosagem, para cada relação água/cimento (x), com seus respectivos parâmetros de caracterização

Parâmetro	Método																			
	ABCP/ACI				EPUSP/IPT				INT/L. CARNEIRO				ITERS/PETRUCCI				SNCF/R. VALLETTE			
água / cimento (x)	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75
cimento (c)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia (a)	1,95	2,62	3,30	4,03	1,86	2,56	3,28	4,01	1,89	2,58	3,28	3,97	1,93	2,58	3,36	4,03	1,83	2,46	3,29	3,92
brita (b)	2,51	3,07	3,63	4,29	2,64	3,29	3,96	4,62	2,67	3,30	3,95	4,58	2,59	3,17	3,87	4,46	2,72	3,33	4,04	4,63
$m = a+b$	4,46	5,69	6,93	8,32	4,50	5,85	7,24	8,63	4,56	5,88	7,23	8,55	4,52	5,75	7,23	8,49	4,55	5,79	7,33	8,55
a / b	0,78	0,85	0,91	0,94	0,70	0,78	0,83	0,87	0,71	0,78	0,83	0,87	0,75	0,81	0,87	0,90	0,67	0,74	0,81	0,85
a / m	0,44	0,46	0,48	0,48	0,41	0,44	0,45	0,46	0,41	0,44	0,45	0,46	0,43	0,45	0,46	0,47	0,40	0,42	0,45	0,46
$a / (1+m)$	0,36	0,39	0,42	0,43	0,34	0,37	0,40	0,42	0,34	0,38	0,40	0,42	0,35	0,38	0,41	0,42	0,33	0,36	0,40	0,41
$(1+x) / m$ (%)	32,5	27,2	23,8	21,0	32,2	26,5	22,8	20,3	31,8	26,4	22,8	20,5	32,1	27,0	22,8	20,6	31,9	26,8	22,5	20,5
$(1+x) / (1+m)$ (%)	26,6	23,2	20,8	18,8	26,4	22,6	20,0	18,2	26,1	22,5	20,0	18,3	26,3	23,0	20,0	18,4	26,1	22,8	19,8	18,3
$(1+x) / (1+m+x)$ (%)	24,5	21,4	19,2	17,4	24,4	20,9	18,6	16,9	24,1	20,9	18,6	17,0	24,3	21,2	18,6	17,1	24,2	21,1	18,4	17,0
α (%)	54	54	54	54	52	52	52	52	52	52	52	52	53	53	53	53	51	51	51	51
H (%)	8,24	8,22	8,20	8,05	8,18	8,03	7,89	7,79	8,09	7,99	7,90	7,85	8,15	8,15	7,90	7,90	8,11	8,10	7,80	7,85
ar (%)	2,2	2,7	2,8	3,5	2,0	2,8	2,7	3,2	2,9	2,6	3,2	3,5	2,0	2,5	3,3	3,5	2,5	3,0	3,4	3,4
Consumo C (kg/m ³)	407	329	277	234	406	323	268	230	399	322	267	229	404	327	267	231	401	325	264	230
Água total Q (kg/m ³)	183	181	180	175	183	178	175	173	179	177	174	172	182	180	174	173	180	179	172	172
abatimento (mm)	75	75	80	75	70	70	65	65	65	65	65	70	70	70	65	70	70	75	70	70
γ_{concreto} (kg/m ³)	2,41	2,39	2,37	2,36	2,41	2,39	2,39	2,40	2,40	2,40	2,38	2,36	2,42	2,40	2,37	2,36	2,41	2,38	2,37	2,37

Para todos os métodos de dosagem estudados, as quantidades de ar aprisionado nas misturas experimentais aumentam quando o valor de m tende a aumentar, e decrescem com a diminuição da relação água/cimento e com o conseqüente aumento relativo de pasta. Os teores de ar aprisionado variam entre um mínimo de 2,0 % para a relação $x = 0,45$ até um máximo de 3,5 % para a relação $x = 0,75$. Para o método do INT, o aumento relativo de ar aprisionado, entre os traços com relações água/cimento $x = 0,45$ e $x = 0,75$, chegou a 21%, e para o método do ITERS, esse aumento relativo atingiu um valor de 75 %.

As massas específicas γ_{concreto} (kg/m³) nas diferentes misturas de concreto fresco foram determinadas pelo método gravimétrico, conforme NBR 9833 (ABTN, 1987b). Os crescimentos dos valores das massas específicas das misturas de concreto fresco, quando decrescem os valores da relação água/cimento, são coerentes com o aumento da proporção relativa de cimento e com a diminuição do teor de ar aprisionado nas misturas produzidas. Os valores das massas específicas obtidas, para concretos com as mesmas relações água/cimento e dosados pelos diferentes métodos, não apresentam diferenças importantes e se enquadram, adequadamente, nos valores

obtidos, para concretos convencionais, produzidos com agregados de peso normal, como britas de origem basáltica e areias quartzosas de rio.

Ressalta-se que nos traços pobres, com maiores relações água/cimento e menores quantidades de pasta, a consistência está determinada, mais fortemente, por dois fatores com efeitos antagônicos. Por um lado, tem-se o efeito lubrificante decorrente de uma maior quantidade de minúsculas bolhas de ar aprisionado e, por outro lado, tem-se o efeito do travamento existente entre as partículas maiores do agregado. Ou seja, a tendência à segregação e à desagregação, observada nos traços pobres em pasta, é compensada pelas forças de atrito, devidas à interação entre os grãos da brita e da areia constituintes da mistura. Nos traços com menores relações água/cimento, o efeito lubrificante, da maior proporção de pasta, é compensado pelo aumento da coesão, devida à maior presença das partículas finas do cimento.

A partir da tabela 32, pode-se constatar, numa primeira instância, que, para os traços com abatimentos compreendidos na faixa de 70 ± 10 mm e para relações cimento: agregado variando entre 1: 4,5 e 1: 8,5, a quantidade total de água de mistura por m^3 de concreto, representada pela letra Q, mantém-se próxima de um valor médio de 177 l/m^3 , sem variações superiores a 3,5%. Como esta variação é pequena, para todas as famílias de traços, dosados com os mesmos materiais e com diferentes teores de argamassa, poderia ser confirmado o cumprimento da lei de Lyse, que postula que, independentemente da proporção **1: m**, a massa de água por unidade de volume de concreto é a principal determinante da consistência da mistura fresca. Observa-se que, quando a medida da consistência é feita através do abatimento, a menor sensibilidade deste ensaio pode não evidenciar a variação da relação água/materiais secos. Entretanto, quando se parte para a aplicação do método de Petrucci, mantendo fixos os parâmetros **H** e **α** , e pretende-se determinar uma família de traços com relações água/cimento muito diferentes (por exemplo: variações de **x** entre 0,40 e 0,80), começam a evidenciar-se variações importantes nos índices de remoldagem. Para os materiais usados no trabalho experimental foi observado que, para relações agregado/cimento variando entre **m** = 8,63 e **m** = 4,46 e relações água/cimento variando respectivamente entre **x** = 0,75 e **x** = 0,45, foi necessário corrigir a relação água/materiais secos **H**, fazendo que ela aumentasse entre os valores **H** = 7,79% e **H** = 8,24%. A necessidade de efetuar ajustes nas relações **H** confirma os resultados obtidos por Dafico (1997) e valida sua proposta no sentido de substituir o modelo retilíneo, como representação tradicional da lei de Lyse, por uma curva polinomial de 2º grau, do tipo: **m** = $k_1 x^2 + k_2 x + k_3$ (com constantes k_1 , k_2 e k_3 dependentes dos materiais e do abatimento).

A tabela 33 apresenta, para cada um dos cinco métodos de dosagem, e para cada traço, determinado a partir das relações água/cimento selecionadas, os consumos de cimento por m^3 de concreto produzido, e as resistências à compressão de cada um dos corpos-de-prova ensaiados, nas idades de 7 e 28 dias. São apresentadas, também, as resistências médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação dentro do ensaio de um mesmo exemplar. Observa-se que, os coeficientes de variação dentro do ensaio são relativamente elevados, fato que pode ser explicado por problemas decorrentes das operações de moldagem e, especialmente, por defeitos nas etapas de capeamento dos topos dos corpos-de-prova ensaiados. Neste aspecto, foi decisão consciente do autor, com pouca experiência laboratorial, assumir a responsabilidade e os riscos de participar ativamente de todas as etapas do trabalho experimental.

Na tabela 34, ordenadas pelas relações água/cimento crescentes e pelos consumos de cimento decrescentes, são apresentadas as resistências à compressão máximas, nas idades de 7 e 28 dias, dos exemplares, correspondentes a cada um dos traços, obtidos pelos diferentes métodos. Conforme a NBR 12655 (ABNT, 1996a), item 7.2.2, deve adotar-se, como resistência representativa do exemplar, o maior dos valores obtidos a partir dos ensaios dos dois corpos de prova constituintes do mesmo. As resistências à compressão obtidas pelos diferentes métodos, para cada idade e para cada relação água/cimento, são identificadas, respectivamente, de menor a maior, pelos símbolos f_1 , f_2 , f_3 , f_4 e f_5 . Na tabela 34 estão calculados, também, os crescimentos mínimos, médios e máximos das resistências obtidas entre as idades de 7 e 28 dias. De forma complementar, são apresentados, nas figuras 24 e 25, diagramas de barras que facilitam a comparação visual das resistências obtidas, nas idades de 7 e 28 dias, pelos diferentes métodos.

Tabela 33: resistências à compressão aos 7 e 28 dias, correspondentes aos traços obtidos, por cada um dos métodos, a partir das relações (x) ordenadas por valores crescentes

Método	Relação água/cimento (x) Consumo (C) (kg/m ³)	Abatimento (mm)	f _{cj 7dias} (MPa)	f _{cm7dias} (MPa) S _{d 7dias} (MPa) CV _{7dias} (%)	f _{cj 28dias} (MPa)	f _{cm28dias} (MPa) S _{d 28dias} (MPa) CV _{28dias} (%)
ABCP/ACI	x = 0,45 C= 407 kg/m ³	75	31,2 32,4 35,1	32,9 2 6,2	38,6 39,6 44,8	41 3,3 8,2
	x = 0,55 C= 329,1 kg/m ³	75	24,6 27,2 29,8	27,2 2,59 9,5	32 32,6 32,7	32,4 0,4 1,1
	x = 0,65 C= 276,5 kg/m ³	80	19 21,7 22,9	21,2 2 9,6	24,6 25,3 28	26 1,8 6,8
	x = 0,75 C= 233,9 kg/m ³	75	12,4 12,8 13,1	12,8 0,4 2,7	16,9 17,6 19,5	18 1,3 7,4
EPUSP/IPT	x = 0,45 C= 405,7 kg/m ³	70	31,9 32 34,8	32,9 1,6 5	38,3 38,9 45,1	40,8 3,8 9,3
	x = 0,55 C= 322,7 kg/m ³	70	24,1 26,9 27,2	26,1 1,7 6,6	28,6 30 31,4	29,9 1,5 5,1
	x = 0,65 C= 268,4 kg/m ³	65	19,8 23,3 23,3	22,1 2 9	23,8 26,4 27,2	25,8 1,8 6,9
	x = 0,75 C= 230,0 kg/m ³	65	11 11,8 12,4	11,7 0,7 6	14,6 16 17	15,9 1,2 7,6
INT	x = 0,45 C= 393,1 kg/m ³	65	30,5 31 33,9	31,8 1,9 5,8	37,4 39,3 42	39,5 2,3 5,8
	x = 0,55 C= 315,5 kg/m ³	65	23,6 25,8 27	25,4 1,7 6,7	28,1 30,5 30,8	29,8 1,5 5
	x = 0,65 C= 266,8 kg/m ³	65	18,6 21,5 22,2	20,8 1,9 9,3	24,5 25 26,7	25,4 1,2 4,6
	x = 0,75 C= 231,6 kg/m ³	70	11 11,4 12,8	11,7 0,9 7,8	16,4 16,4 18,6	17,1 1,3 7,3
ITERS	x = 0,45 C= 404,2 kg/m ³	70	29,1 33,2 33,9	32,1 2,6 8,1	38,4 38,8 44,4	40,5 3,4 8,4
	x = 0,55 C= 327,4 kg/m ³	70	26,5 29,1 29,8	28,5 1,7 6,1	31,1 34,5 35,1	33,6 2,1 6,4
	x = 0,65 C= 267 kg/m ³	65	20,8 21,9 24,3	22,3 1,8 7,9	24,3 26 28,6	26,3 2,2 8,2
	x = 0,75 C= 230,5 kg/m ³	70	14 15,2 15,7	14,9 0,9 6	18,7 19,3 22	20 1,8 8,9
SNCF	x = 0,45 C= 400,9 kg/m ³	70	31,2 33 35,7	33,3 2,2 6,7	40 40,1 42	40,7 1,2 2,8
	x = 0,55 C= 324,6 kg/m ³	75	23,1 23,8 26,7	24,5 1,9 7,8	29,3 30,8 33,3	31,2 2,1 6,6
	x = 0,65 C= 264,2 kg/m ³	70	20,2 20,2 21,7	20,7 0,9 4,3	23,9 23,8 25,5	24,1 1,2 5,1
	x = 0,75 C= 229,7 kg/m ³	70	15,9 16,5 17,2	16,5 0,7 4,1	19,1 21,2 21,7	20,7 1,4 6,6

Tabela 34: resistências dos exemplares, aos 7 e 28 dias, e valores dos crescimentos entre as idades de 7 e 28 dias, para cada relação x

Método	Relação (x) Consumo (C) (kg/m ³)	f _{c7dias} (MPa)	f _{c28 dias} (MPa)	Crescimento 7 a 28 dias (%)
ABCP/ACI	x = 0,45 C _{min} = 407 kg/m ³	f ₄ = 35,1	f ₄ = 44,8	27,5 %
EPUSP/IPT	x = 0,45 C = 405,7 kg/m ³	f ₃ = 34,8	f ₃ = 45,1	29,6 %
ITERS	x = 0,45 C = 404,2 kg/m ³	f ₂ = 33,9	f ₃ = 44,4	31,0 %
SNCF	x = 0,45 C _{max} = 400,9 kg/m ³	f ₃ = 35,7	f ₂ = 42,0	17,9 %
INT	x = 0,45 C = 393,1 kg/m ³	f ₁ = 33,9	f ₁ = 42,0	23,7 %
valor mínimo para x = 0,45		f _{min 7} = f ₁ = 33,9	f _{min 28} = f ₁ = 42,0	17,9 %
f _m , s _d , e CV para x = 0,45		f _{m7} = 34,7; s _d = 0,8; CV = 2,2	f _{m28} = 43,7; s _d = 1,5; CV = 3,5	25,9 %
valor máximo para x = 0,45		f _{max 7} = f ₅ = 35,7	f _{max 28} = f ₅ = 45,1	31,0 %
ABCP/ACI	x = 0,55 C _{min} = 329,1 kg/m ³	f ₅ = 29,8	f ₃ = 32,7	9,8 %
ITERS	x = 0,55 C = 327,4 kg/m ³	f ₄ = 29,8	f ₃ = 35,1	17,9 %
SNCF	x = 0,55 C = 324,6 kg/m ³	f ₁ = 26,7	f ₄ = 33,3	24,9 %
EPUSP/IPT	x = 0,55 C = 322,7 kg/m ³	f ₃ = 27,2	f ₂ = 31,4	15,2 %
INT	x = 0,55 C _{max} = 315,5 kg/m ³	f ₂ = 27,0	f ₁ = 30,8	14,4 %
valor mínimo para x = 0,55		f _{min 7} = f ₁ = 26,7	f _{min 28} = f ₁ = 30,8	9,8 %
f _m , s _d , e CV para x = 0,55		f _{m7} = 28,1; s _d = 1,6; CV = 5,6	f _{m28} = 32,7; s _d = 1,7; CV = 5,2	16,4 %
valor máximo para x = 0,55		f _{max 7} = f ₅ = 29,8	f _{max 28} = f ₅ = 35,1	24,9 %
ABCP/ACI	x = 0,65 C _{min} = 276,5 kg/m ³	f ₃ = 22,9	f ₄ = 28,0	22,1 %
EPUSP/IPT	x = 0,65 C = 268,4 kg/m ³	f ₄ = 23,3	f ₃ = 27,2	17,0 %
ITERS	x = 0,65 C = 267 kg/m ³	f ₅ = 24,3	f ₃ = 28,6	17,7 %
INT	x = 0,65 C = 266,8 kg/m ³	f ₂ = 22,2	f ₂ = 26,7	20,2 %
SNCF	x = 0,65 C _{max} = 264,2 kg/m ³	f ₁ = 21,7	f ₁ = 25,5	17,4 %
valor mínimo para x = 0,65		f _{min 7} = f ₁ = 21,7	f _{min 28} = f ₁ = 25,5	17,0 %
f _m , s _d , e CV para x = 0,65		f _{m7} = 22,9; s _d = 1,0; CV = 4,3	f _{m28} = 27,2; s _d = 1,2; CV = 4,4	18,9 %
valor máximo para x = 0,65		f _{max 7} = f ₅ = 24,3	f _{max 28} = f ₅ = 28,6	22,1 %
ABCP/ACI	x = 0,75 C _{min} = 233,9 kg/m ³	f ₃ = 13,1	f ₃ = 19,5	48,7 %
INT	x = 0,75 C = 231,6 kg/m ³	f ₂ = 12,8	f ₂ = 18,6	45,6 %
ITERS	x = 0,75 C = 230,5 kg/m ³	f ₄ = 15,7	f ₃ = 22,1	40,6 %
EPUSP/IPT	x = 0,75 C = 230,0 kg/m ³	f ₁ = 12,4	f ₁ = 17,1	37,5 %
SNCF	x = 0,75 C _{max} = 229,7 kg/m ³	f ₃ = 17,2	f ₄ = 21,7	26,0 %
valor mínimo para x = 0,75		f _{min 7} = f ₁ = 12,4	f _{min 28} = f ₁ = 17,1	26,0 %
f _m , s _d , e CV para x = 0,75		f _{m7} = 14,2; s _d = 2,1; CV = 14,9	f _{m28} = 19,8; s _d = 2,1; CV = 10,7	39,7 %
valor máximo para x = 0,75		f _{max 7} = f ₃ = 17,2	f _{max 28} = f ₃ = 22,1	48,7 %

Obs.: Os resultados estão organizados a partir do ordenamento decrescente dos consumos de cimento dos concretos, com iguais relações água/cimento, dosados pelos diferentes métodos em estudo.

Nas figuras 24 e 25 estão representadas, através dos diagramas de blocos, as resistências obtidas experimentalmente pelos diferentes métodos, para cada uma das relações água/cimento consideradas, e para as duas idades de referência adotadas.

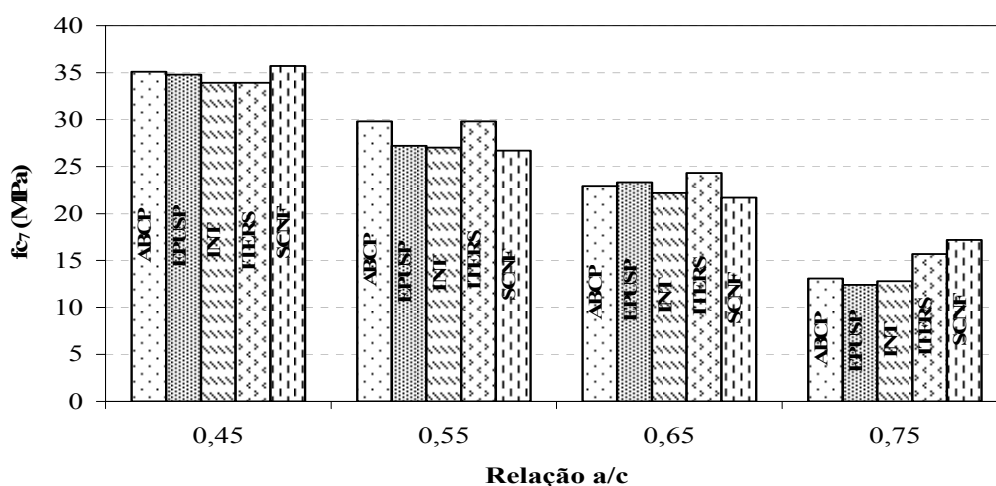


Figura 24: comparação das resistências obtidas experimentalmente pelos diversos métodos, para a idade de 7 dias

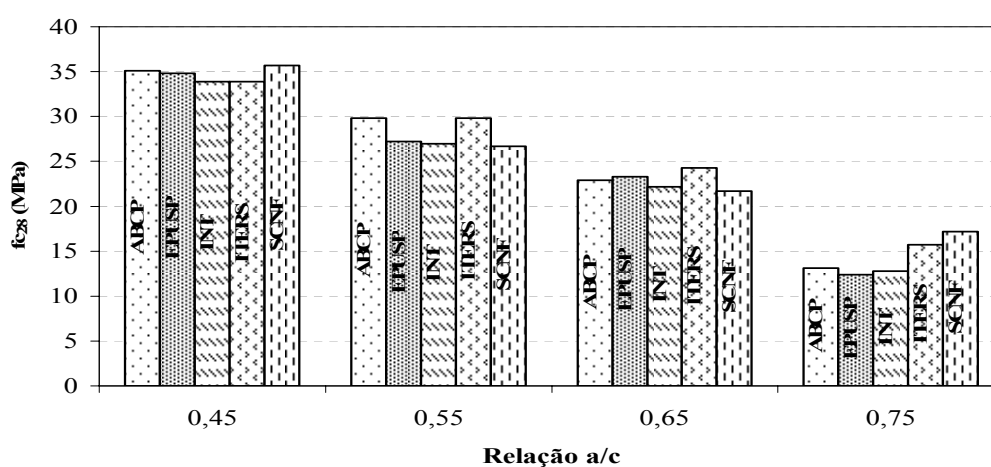


Figura 25: comparação das resistências obtidas experimentalmente pelos diversos métodos, para a idade de 28 dias

Na tabela 35 são apresentados os coeficientes A e B, das regressões de Abrams, determinados a partir das resistências máximas obtidas, pelos quatro traços dosados (com $x = 0,45$, $x = 0,55$, $x = 0,65$ e $x = 0,75$), por cada um dos cinco métodos estudados. Os elevados valores dos coeficientes de correlação, calculados nas determinações estatísticas, confirmam que as equações de regressão se ajustam satisfatoriamente aos valores das resistências obtidas experimentalmente para as relações água/cimento prefixadas. Quando são comparadas as curvas de Abrams, construídas como parte dos diagramas de dosagem apresentados nas figuras 29 e 30, é possível observar que,

também, não se verificam diferenças importantes entre elas. Ou seja, para os concretos convencionais estudados, mesmo alteradas as proporções entre os mesmos materiais componentes (através das variações dos teores de argamassa e dos consumos de cimento), o principal fator determinante da resistência continua a ser a relação água/cimento.

Outra questão interessante a ser comentada, refere-se ao crescimento relativo das resistências ao longo do tempo. Neste sentido observa-se que, com exceção do crescimento correspondente à relação $x = 0,45$, que apresenta um valor excessivamente elevado, os outros três crescimentos médios das resistências entre as idades de 7 e 28 dias aumentam quando aumentam as relações água/cimento. Este efeito da relação água/cimento sobre a evolução da resistência com a idade foi verificado por inúmeros pesquisadores, como Tango (1983), Helene e Terzian (1992), Dal Molin (1995), entre outros.

Os coeficientes das curvas de correlação, correspondentes respectivamente às curvas de Abrams, Lyse e Molinari, mostrados nas tabelas 34, 35, 37 e 38 foram determinados através das fórmulas (SPIEGEL, 1975). Na tabela 36 são apresentados os coeficientes das equações que possibilitam determinar as relações x a partir de resistências f_c prefixadas.

Tabela 35: coeficientes das regressões de Abrams, expressas na forma exponencial, para as idades de 7 e 28 dias, determinados a partir das resistências máximas, obtidas pelos quatro traços dosados, por cada um dos cinco métodos estudados

Método	Coeficientes A e B das regressões na forma exponencial $f_c = A/B^x$ Coeficiente de correlação r	
	Para os valores $f_{c7 \text{ dias}}$	Para os valores $f_{c28 \text{ dias}}$
ABCP/ACI	A = 190,290 B = 32,267 r = 0,963	A = 151,600 B = 14,959 r = 0,990
EPUSP/IPT	A = 195,562 B = 35,762 r = 0,953	A = 192,440 B = 24,200 r = 0,982
INT/Lobo Carneiro	A = 166,836 B = 28,023 r = 0,967	A = 138,753 B = 14,141 r = 0,988
ITERS/ Eládio Petrucci	A = 126,798 B = 15,056 r = 0,963	A = 126,314 B = 10,138 r = 0,999
SNCF/ Roger Vallette	A = 103,700 B = 11,134 r = 0,998	A = 115,643 B = 9,658 r = 0,996
Método	Coeficientes D e E das regressões na forma	
	Para os valores $f_{c7 \text{ dias}}$	Para os valores $f_{c28 \text{ dias}}$
ABCP/ACI	D = 2,279 E = 1,509	D = 2,181 E = 1,175
EPUSP/IPT	D = 2,291 E = 1,553	D = 2,284 E = 1,384
INT/Lobo Carneiro	D = 2,222 E = 1,448	D = 2,142 E = 1,150
ITERS/ Eládio Petrucci	D = 2,103 E = 1,177	D = 2,101 E = 1,006
SNCF/ Roger Vallette	D = 2,016 E = 1,047	D = 2,063 E = 0,985

Tabela 36: coeficientes das equações, obtidas para cada um dos métodos, que possibilitam a determinação das relações água/cimento a partir das regressões de Abrams, expressas na forma logarítmica

Método	Coeficientes F e G das regressões na forma logarítmica $x = F - G \log f_c$	
	Para os valores $f_{c7 \text{ dias}}$	Para os valores $f_{c28 \text{ dias}}$
ABCP/ACI	F = 1,511 G = 0,663	F = 1,856 G = 0,851
EPUSP/IPT	F = 1,475 G = 0,644	F = 1,651 G = 0,723
INT/Lobo Carneiro	F = 1,535 G = 0,691	F = 1,862 G = 0,869
ITERS/ Eládio Petrucci	F = 1,786 G = 0,849	F = 2,089 G = 0,994
SNCF/ Roger Vallette	F = 1,926 G = 0,955	F = 2,095 G = 0,985

Tabela 37: coeficientes de Lyse

Coeficientes K_3 e K_4 das regressões que definem as curvas de Lyse: $m = (K_3 * x + K_4)$

Coeficiente de correlação r

Método	
ABCP/ACI	$K_3 = 12,820$ $K_4 = -1,342$ $r = 1,000$
EPUSP/IPT	$K_3 = 13,780$ $K_4 = -1,713$ $r = 1,000$
INT/Lobo Carneiro	$K_3 = 13,320$ $K_4 = -1,437$ $r = 1,000$
ITERS/ Eládio Petrucci	$K_3 = 13,390$ $K_4 = -1,537$ $r = 0,999$
SNCF/ Roger Vallette	$K_3 = 13,540$ $K_4 = -1,569$ $r = 0,999$

Tabela 38: coeficientes de Molinari

Coeficientes K_5 e K_6 das regressões que definem as curvas de Molinari: $C = 1000/(K_5 + K_6 * m)$

Coeficiente de correlação r

Método	
ABCP/ACI	$K_5 = 0,358$ $K_6 = 0,471$ $r = 0,350$
EPUSP/IPT	$K_5 = 0,424$ $K_6 = 0,455$ $r = 0,352$
INT/Lobo Carneiro	$K_5 = 0,385$ $K_6 = 0,464$ $r = 0,347$
ITERS/ Eládio Petrucci	$K_5 = 0,354$ $K_6 = 0,469$ $r = 0,351$
SNCF/ Roger Vallette	$K_5 = 0,388$ $K_6 = 0,464$ $r = 0,348$

Na tabela 39 são apresentados e comparados os valores das resistências f_c , das relações m , e dos consumos de cimento C , obtidos para cada um dos traços dosados. São também apresentados na tabela os valores, correspondentes, obtidos pelas regressões mostradas nas tabelas 34, 37 e 38.

Tabela 39: valores das resistências f_c , dos consumos C e das relações m , obtidas a partir dos ensaios em laboratório e através das regressões determinadas estatisticamente

Método	Relação x		f_c 7 dias (MPa)	f_c 28 dias (MPa)	Consumo (kg/m ³)	m
ABCP/ACI <i>Regressões de Abrams</i> $f_{c,7 \text{ dias}} = 190,290 / (32,267)^x$ $f_{c,28 \text{ dias}} = 151,600 / (14,959)^x$ <i>Regressão de Molinari</i> $C = 1000 / (0,358 + 0,471 m)$ <i>Regressão de Lyse</i> $m = 12,820 x - 1,342$	0,45	Valor	35,1	44,8	407,0	4,46
		Valor regressão	Abrams	39,9	44,9	Molinari
	0,55	Valor	29,8	32,7	329,1	5,69
		Valor regressão	Abrams	28,2	34,2	Molinari
	0,65	Valor	22,9	28,0	276,5	6,93
		Valor regressão	Abrams	19,9	26,1	Molinari
	0,75	Valor	13,1	19,5	233,9	8,32
		Valor regressão	Abrams	14,1	19,9	Molinari
FPI/ISP/IPT <i>Regressões de Abrams</i> $f_{c,7 \text{ dias}} = 195,562 / (35,762)^x$ $f_{c,28 \text{ dias}} = 192,440 / (24,200)^x$ <i>Regressão de Molinari</i> $C = 1000 / (0,424 + 0,455 m)$ <i>Regressão de Lyse</i> $m = 13,780 x - 1,713$	0,45	Valor	34,8	45,1	405,9	4,50
		Valor regressão	Abrams	39,1	45,9	Molinari
	0,55	Valor	27,2	31,4	322,8	5,85
		Valor regressão	Abrams	27,3	33,4	Molinari
	0,65	Valor	23,3	27,2	268,2	7,24
		Valor regressão	Abrams	19,1	24,3	Molinari
	0,75	Valor	12,4	17,1	229,0	8,63
		Valor regressão	Abrams	13,7	17,6	Molinari
INT/Ilho Carneiro <i>Regressões de Abrams</i> $f_{c,7 \text{ dias}} = 166,836 / (28,023)^x$ $f_{c,28 \text{ dias}} = 138,753 / (14,141)^x$ <i>Regressão de Molinari</i> $C = 1000 / (0,385 + 0,464 m)$ <i>Regressão de Lyse</i> $m = 13,320 x - 1,437$	0,45	Valor	33,9	42,0	398,5	4,56
		Valor regressão	Abrams	37,2	42,1	Molinari
	0,55	Valor	27,0	30,8	322,1	5,88
		Valor regressão	Abrams	26,7	32,3	Molinari
	0,65	Valor	22,2	26,7	267,4	7,23
		Valor regressão	Abrams	19,1	24,8	Molinari
	0,75	Valor	12,8	18,6	229,4	8,55
		Valor regressão	Abrams	13,7	19,0	Molinari
ITFRS/ Flávio Petrucci <i>Regressões de Abrams</i> $f_{c,7 \text{ dias}} = 126,798 / (15,056)^x$ $f_{c,28 \text{ dias}} = 126,314 / (10,138)^x$ <i>Regressão de Molinari</i> $C = 1000 / (0,354 + 0,469 m)$ <i>Regressão de Lyse</i> $m = 13,390 x - 1,537$	0,45	Valor	33,9	44,4	404,2	4,52
		Valor regressão	Abrams	37,4	44,5	Molinari
	0,55	Valor	29,8	35,1	327,4	5,75
		Valor regressão	Abrams	28,5	35,3	Molinari
	0,65	Valor	24,3	28,6	267,0	7,23
		Valor regressão	Abrams	21,8	28,0	Molinari
	0,75	Valor	15,7	22,0	230,5	8,49
		Valor regressão	Abrams	16,6	22,2	Molinari
SNCF/ Roger Vallette <i>Regressões de Abrams</i> $f_{c,7 \text{ dias}} = 103,700 / (11,134)^x$ $f_{c,28 \text{ dias}} = 115,643 / (9,658)^x$ <i>Regressão de Molinari</i> $C = 1000 / (0,388 + 0,464 m)$ <i>Regressão de Lyse</i> $m = 13,540 x - 1,569$	0,45	Valor	35,7	42,0	400,9	4,55
		Valor regressão	Abrams	35,1	41,7	Molinari
	0,55	Valor	26,7	33,3	324,6	5,79
		Valor regressão	Abrams	27,5	33,2	Molinari
	0,65	Valor	21,70	25,47	264,2	7,33
		Valor regressão	Abrams	21,7	26,5	Molinari
	0,75	Valor	17,2	21,7	229,7	8,55
		Valor regressão	Abrams	17,0	21,1	Molinari

Na tabela 40 são apresentados, para cada idade de referência e para cada relação água/cimento x os valores das resistências: médias ($f_{cm\text{média}}$), mínimas ($f_{cm\text{mín}}$) e máximas ($f_{cm\text{máx}}$), calculadas a partir das equações de regressão correspondentes a cada um dos cinco métodos em estudo. Também são apresentados os valores calculados dos desvios-padrão, coeficientes de variação e das diferenças relativas entre as resistências máximas e mínimas, obtidas nas idades de 7 e 28 dias.

Tabela 40: valores das resistências, dos desvios-padrão, dos coeficientes de variação e das diferenças relativas entre as resistências máximas e mínimas, calculadas, a partir das equações de regressão, dos cinco métodos em estudo

Idade	Relação água/cimento x	f_{cm} dos 5 métodos (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Resist. máx $f_{cm\text{máx}}$ (MPa)	Resist. mín $f_{cm\text{mín}}$ (MPa)	$\frac{(f_{máx} - f_{mín}) \times 100}{f_{mín}}$ (%)
7 dias	0,45	37,7	1,9	5	39,9	35,1	13,7
	0,55	27,6	0,7	2,5	28,5	26,7	6,7
	0,65	20,3	1,3	6,4	21,8	19,1	14,1
	0,75	15	1,6	10,7	17	13,7	24,1
28 dias	0,45	43,8	1,8	4,1	45,9	41,7	10,1
	0,55	33,7	1,1	3,3	35,3	32,3	9,3
	0,65	25,9	1,5	5,8	28	24,3	15,2
	0,75	20	1,8	9	22,2	17,6	26,1

Nas figuras 26 e 27 estão representadas, através dos diagramas de blocos, as resistências obtidas pelas equações de regressão correspondentes aos diferentes métodos, para cada uma das relações água/cimento consideradas, e para as duas idades de referência adotadas.

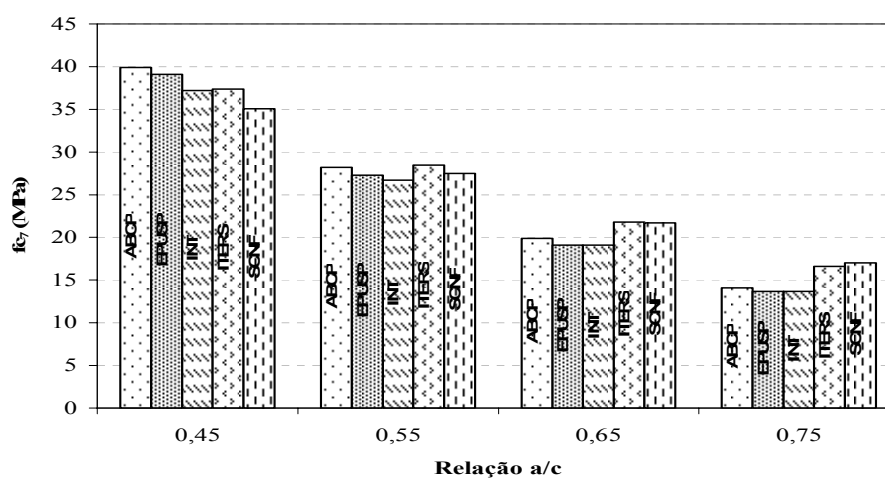


Figura 26: comparação das resistências obtidas pelas equações de regressão correspondentes aos diversos métodos, para a idade de 7 dias

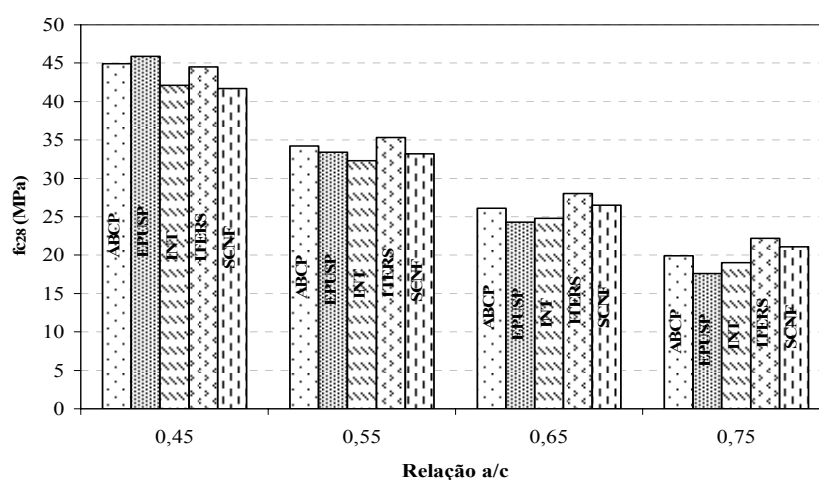


Figura 27: comparação das resistências obtidas pelas equações de regressão correspondentes aos diversos métodos, para a idade de 28 dias

As tabelas 41, 42 e 43 apresentam, de forma numérica os valores e as diferenças absolutas e relativas dos consumos de cimento correspondentes aos traços de concreto, dosados pelos diferentes métodos estudados, com resistências prefixadas na idade de 28 dias. Para a determinação dos consumos de cimento, parte-se das resistências: $f_c = 20$ MPa; $f_c = 25$ MPa; $f_c = 30$ MPa; $f_c = 35$ MPa; $f_c = 40$ MPa (adotadas dentro do campo de validade das curvas de regressão apresentadas nas tabelas 34, 35 e 36) e, a partir das equações da tabela 6.6 são determinadas as correspondentes relações água/cimento x . Com as relações x e a partir das equações de correlação de Lyse (tabela 37) são determinados os correspondentes valores de m . Finalmente, com os valores de m e utilizando as equações de correlação de Molinari (tabela 38), são determinados os valores dos consumos de cimento para os diferentes traços.

Tabela 41: consumos de cimento, correspondentes aos traços dosados, através dos cinco métodos estudados, para resistências prefixadas aos 28 dias

Consumo (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Método	Consumo (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Método	Consumo (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Método	Consumo (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Método	Consumo (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Método
235,4	20	ABCP	266,7	25	ABCP	299,2	30	ABCP	335,5	35	ABCP	370,3	40	ABCP
244,0	20	EPUSP	273,3	25	EPUSP	303,0	30	EPUSP	321,2	35	EPUSP	365,8	40	EPUSP
235,9	20	INT	268,9	25	INT	303,7	30	INT	340,9	35	INT	381,4	40	INT
216,0	20	ITERS	248,4	25	ITERS	283,2	30	ITERS	333,7	35	ITERS	363,4	40	ITERS
209,6	20	SNCF	239,7	25	SNCF	271,7	30	SNCF	306,1	35	SNCF	343,9	40	SNCF

Tabela 42: consumos de cimento, ordenados em forma decrescente, correspondentes aos traços dosados, através dos cinco métodos estudados, para resistências prefixadas aos 28 dias

$f_{c28} = 20 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 30 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 35 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 40 \text{ MPa}$	
Consumo (kg/m ³)	Método	Consumo (kg/m ³)	Método	Consumo (kg/m ³)	Método	Consumo (kg/m ³)	Método	Consumo (kg/m ³)	Método
244,0	EPUSP	273,3	EPUSP	303,7	INT	340,9	INT	381,4	INT
235,9	INT	268,9	INT	303,0	EPUSP	333,7	ITERS	370,3	ABCP
235,4	ABCP	266,7	ABCP	299,2	ABCP	333,5	ABCP	365,8	EPUSP
216,0	ITERS	248,4	ITERS	283,2	ITERS	321,2	EPUSP	363,4	ITERS
209,6	SNCF	239,7	SNCF	271,7	SNCF	306,1	SNCF	343,9	SNCF

Tabela 43: diferenças absolutas (kg/m³) e relativas (%) entre os consumos de cimento, correspondentes aos traços com resistências prefixadas, adotando como valores de referência os consumos de cimento obtidos pelo método do SNCF

$f_{c28} = 20 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 30 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 35 \text{ MPa}$		$f_{c28} = 40 \text{ MPa}$	
$\Delta_{\text{consumo}} // \Delta_{\text{relat}}$ (kg/m ³) // (%)	Método	$\Delta_{\text{consumo}} // \Delta_{\text{relat}}$ (kg/m ³) // (%)	Método	$\Delta_{\text{consumo}} // \Delta_{\text{relat}}$ (kg/m ³) // (%)	Método	$\Delta_{\text{consumo}} // \Delta_{\text{relat}}$ (kg/m ³) // (%)	Método	$\Delta_{\text{consumo}} // \Delta_{\text{relat}}$ (kg/m ³) // (%)	Método
34,4 // 16,4 %	EPUSP	33,6 // 14,0 %	EPUSP	32,0 // 11,8 %	INT	34,8 // 11,4 %	INT	37,5 // 10,9 %	INT
26,3 // 12,5 %	INT	29,2 // 12,2 %	INT	31,3 // 11,5 %	EPUSP	27,6 // 9,0 %	ITERS	26,4 // 7,7 %	ABCP
25,8 // 12,3 %	ABCP	27,0 // 11,3 %	ABCP	27,5 // 10,1 %	ABCP	27,4 // 8,9 %	ABCP	21,9 // 6,3 %	EPUSP
6,4 // 3,1 %	ITERS	8,7 // 3,6 %	ITERS	11,5 // 4,2 %	ITERS	15,1 // 4,9 %	EPUSP	19,5 // 5,7 %	ITERS
209,6	SNCF	239,7	SNCF	271,7	SNCF	306,1	SNCF	343,9	SNCF

Na figura 28 são comparados os consumos de cimento (kg/m³) dos concretos dosados pelos diferentes métodos para valores de resistências prefixadas, $f_c = 20 \text{ MPa}$; $f_c = 25 \text{ MPa}$; $f_c = 30 \text{ MPa}$; $f_c = 35 \text{ MPa}$; $f_c = 40 \text{ MPa}$, na idade de 28 dias.

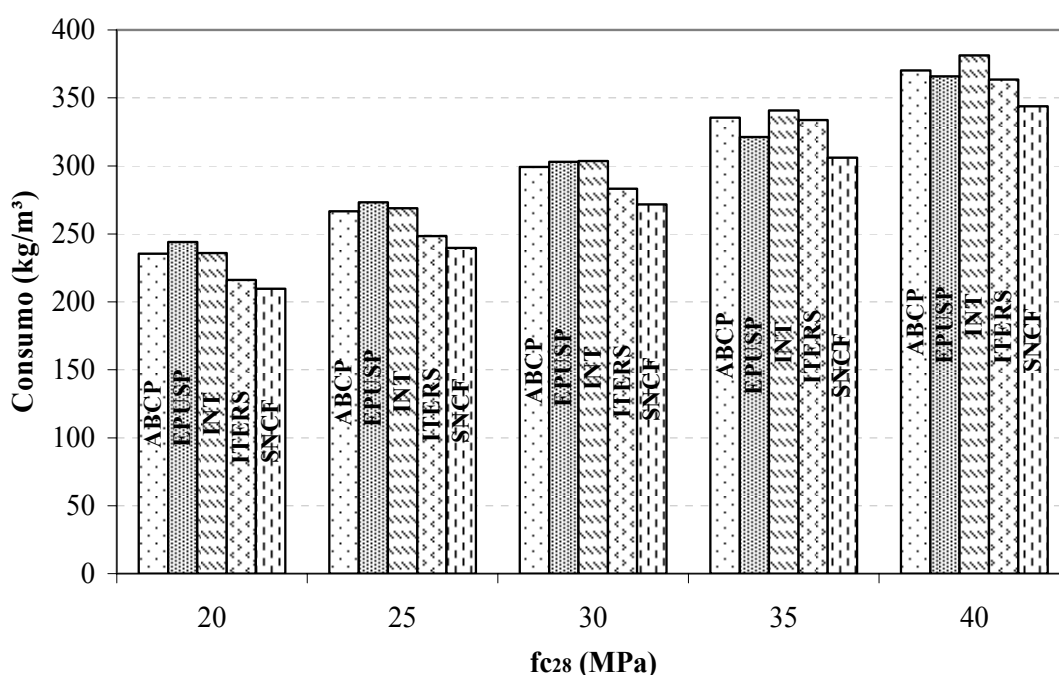


Figura 28: comparação dos consumos de cimento para concretos obtidos pelos diferentes métodos, para resistências à compressão prefixadas, na idade de 28 dias

Com os resultados das resistências, obtidos pelos diferentes métodos, para cada uma das relações água/cimento consideradas, procedeu-se à realização de uma análise estatística com o objeto de avaliar a influência dos métodos de dosagem, nos valores das resistências à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Também, procedeu-se à verificação da interação entre os diferentes métodos, as resistências à compressão e os consumos de cimento. Para tanto, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), obtida através de um *software* estatístico (Statística, versão 4.3), que permite comparar grupos de valores considerando a variabilidade das médias entre grupos e as variabilidades das observações dentro dos grupos, baseando-se na distribuição de Fischer (F), com um determinado nível de significância (que neste caso foi de 95 %), para verificar a significância das variáveis. Observa-se que a variável em estudo é considerada estatisticamente significativa quando o valor da função de Fischer calculado pelo *software* (F_{calc}) é menor que o valor de Fischer tabelado, para um grau de significância de 5% ($F_{0,05}$) (RIBEIRO, 1995). As análises constam no apêndice A.

Estatisticamente, não foram detectadas diferenças significativas entre as resistências obtidas, nas idades de 7 e de 28 dias, para as mesmas relações água/cimento, através dos diferentes métodos.

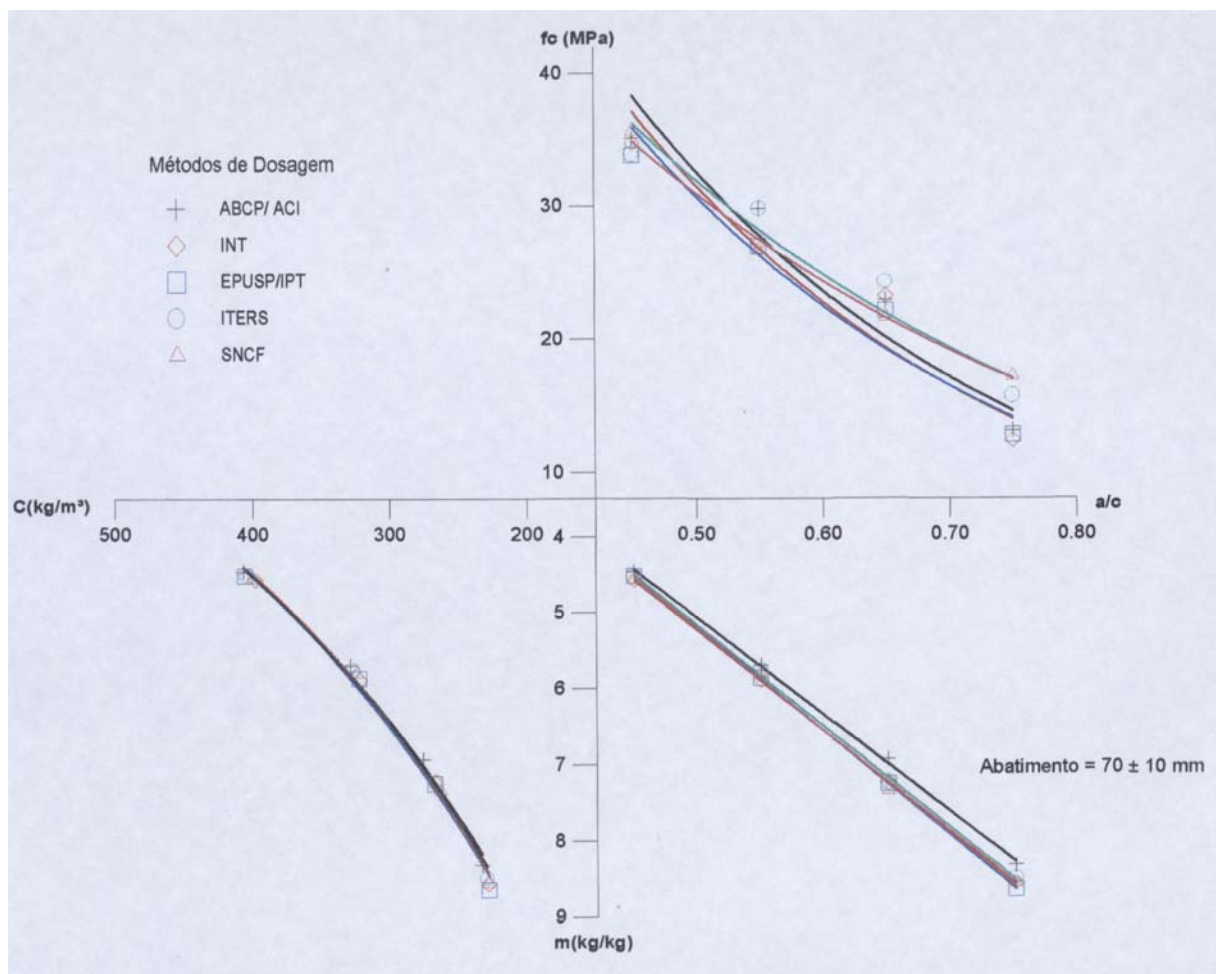


Figura 29: diagrama de dosagem, construído para os cinco métodos em conjunto, com as curvas de Abrams correspondentes às idades de 7 dias

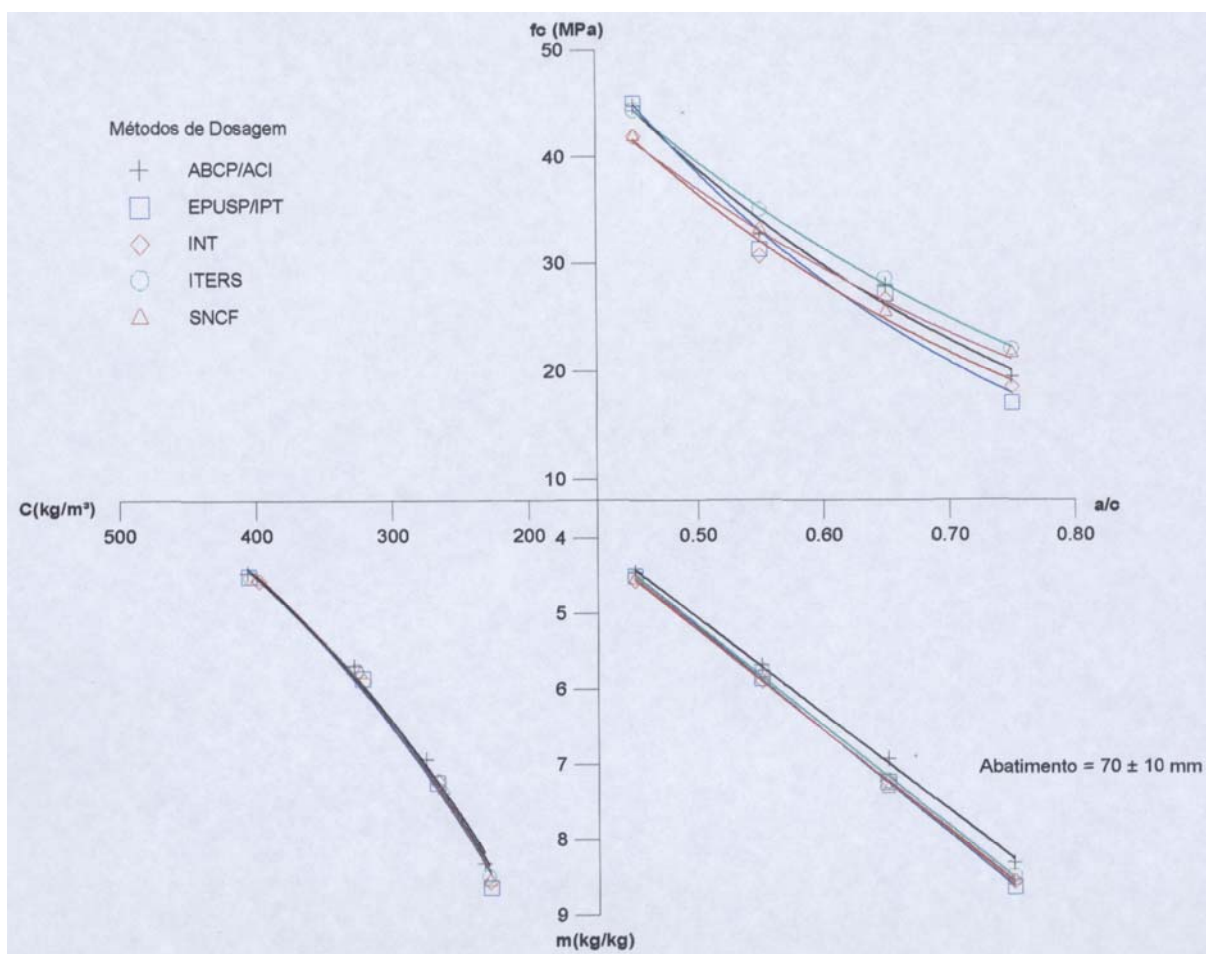


Figura 30: diagrama de dosagem, construído para os cinco métodos em conjunto, com as curvas de Abrams correspondentes às idades de 28 dias

Para a relação $x = 0,45$, as diferenças entre as resistências mínimas e máximas obtidas pelos diferentes métodos mantiveram-se dentro de uma faixa de variação de 5% para a idade de 7 dias e de 7% para a idade de 28 dias. Para as relações $x = 0,55$ e $x = 0,65$, essas diferenças mantiveram-se compreendidas entre 12% e 14%, respectivamente. Já para a maior relação água/cimento $x = 0,75$, as diferenças entre as resistências obtidas, pelos diferentes métodos, atingiram valores próximos de 40%, na idade de 7 dias, e apresentaram valores próximos de 30%, na idade de 28 dias. Estas maiores diferenças, constatadas entre as resistências dos traços com mínimos consumos de cimento, podem ser justificadas pelo fato que as misturas, com consumos menores, mostraram-se mais ásperas, levemente exsudantes e mais difíceis de adensar. É provável que eventuais dificuldades nas moldagens tenham causado variabilidade e imperfeições no adensamento dos corpos-de-prova, que resultaram no decréscimo das resistências obtidas.

Quanto ao estudo estatístico, realizado pela ANOVA, considerando o comportamento dos métodos em relação aos consumos de cimento, constatou-se que foram detectadas diferenças

significativas nos consumos de cimento dos concretos, dosados para atingir resistências prefixadas, através dos diferentes métodos. As maiores resistências foram obtidas pelo método ABCP/ACI enquanto que as menores resistências foram obtidas para o método INT/Lobo Carneiro. Os outros três métodos apresentaram aproximadamente as mesmas faixas de resposta em relação às resistências.

Além da análise estatística, realizada pela ferramenta ANOVA, e com o objetivo de comparar, a eficiência dos métodos, em relação aos ganhos de resistência, vinculados com os consumos de cimento ou, de maneira alternativa, comparar o aproveitamento do cimento para a obtenção de determinadas resistências, foram definidos os denominados “fatores de eficiência”. O “fator de eficiência I” f_c/C (MPa/kg) é calculado como o quociente entre a resistência obtida e o consumo de cimento do concreto, enquanto que o “fator de eficiência II” C/f_c (kg/MPa), inverso do “fator de eficiência I” é calculado como o quociente entre o consumo de cimento do concreto e a resistência obtida. A análise dos fatores de eficiência, apresentados na tabela 44 e calculados, para todos os métodos e para cinco níveis de resistência, obtidos na idade de 28 dias, mostram o “rendimento” de cada método, evidenciando seu desempenho relativo.

Considerando os valores resultantes dos fatores de eficiência, constata-se que o método do SNCF/Roger Vallette apresenta-se como o de maior rendimento para todos os níveis de resistência estudados. O segundo método, em termos de eficiência, resulta ser o método do ITERS/Eládio Petrucci. Já os métodos da ABCP/ACI, do INT/Lobo Carneiro e do IPT/EPUSP apresentam rendimentos similares e inferiores aos dois primeiros citados acima. Finalmente pode-se comentar que o método do IPT/EPUSP evidencia rendimentos inferiores aos métodos da ABCP/ACI e do INT/Lobo Carneiro para resistências de até 25 MPa, enquanto que o rendimento relativo apresenta-se maior àqueles métodos quando os níveis de resistência são superiores aos 30 MPa.

Tabela 44: fatores de eficiência, f_{c28}/C (MPa/kg) e C/f_{c28} (kg/MPa), calculados para os concretos dosados pelos cinco métodos, com resistências prefixadas entre 20 e 40 MPa

Resist. f_{c28} (MPa)	Método	“fator de eficiência I” f_{c28}/C (MPa/kg)	“fator de eficiência II” C/f_{c28} (kg/MPa)
20	ABCP/ACI	0,085	11,770
	EPUSP/IPT	0,082	12,200
	INT/ Lobo Carneiro	0,085	11,795
	ITERS/Eládio Petrucci	0,093	10,800
	SNCF/ Roger Vallette	0,095	10,480
25	ABCP/ACI	0,094	10,668
	EPUSP/IPT	0,091	10,932
	INT/ Lobo Carneiro	0,093	10,756
	ITERS/Eládio Petrucci	0,101	9,936
	SNCF/ Roger Vallette	0,104	9,588
30	ABCP/ACI	0,100	9,973
	EPUSP/IPT	0,099	10,100
	INT/ Lobo Carneiro	0,099	10,123
	ITERS/Eládio Petrucci	0,106	9,440
	SNCF/ Roger Vallette	0,110	9,057
35	ABCP/ACI	0,104	9,586
	EPUSP/IPT	0,109	9,177
	INT/ Lobo Carneiro	0,103	9,740
	ITERS/Eládio Petrucci	0,105	9,534
	SNCF/ Roger Vallette	0,114	8,746
40	ABCP/ACI	0,108	9,258
	EPUSP/IPT	0,109	9,145
	INT/ Lobo Carneiro	0,105	9,535
	ITERS/Eládio Petrucci	0,110	9,085
	SNCF/ Roger Vallette	0,116	8,600

Observa-se que a constatação experimental, comprovada de maneira estatística, sobre a existência de diferenças significativas nos consumos de cimento de concretos “convencionais” (com resistências entre 20 a 45 MPa), com similares características e propriedades, dosados por diferentes métodos, coincide com a constatação realizada por Alves (2000), sobre métodos de dosagem de concretos de alta resistência (CAR). Esta pesquisadora comprovou que, embora os métodos específicos para a dosagem de CAR (com resistências compreendidas entre 45 e 90 MPa) possibilitaram a obtenção de concretos com características similares de comportamento, existiram diferenças consideráveis entre os consumos de cimento dos concretos produzidos pelos diversos métodos estudados.

6.2 CRITÉRIOS E ASPECTOS QUALITATIVOS QUE PODEM AUXILIAR NA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DOSAGEM

Além das ferramentas estatísticas, que podem ser aplicadas aos dados obtidos através do trabalho experimental (por exemplo: a Análise de Variância - ANOVA), e de outras análises complementares, que possibilitem a obtenção de parâmetros e/ou resultados quantitativos (por exemplo: os fatores de eficiência) que deixem em evidência diferenças quantitativas, resultantes da aplicação de um ou de outro método de dosagem, torna-se interessante e relevante realizar tentativas no sentido de estabelecer, também, algumas diferenças qualitativas entre os cinco métodos estudados. Com este objetivo parte-se para a aplicação dos critérios e aspectos, introduzidos no capítulo 4, que destacam vantagens ou desvantagens relativas entre os métodos e possibilitam verificar restrições de aplicação, dentro de um determinado contexto cultural, tecnológico e econômico.

Na tabela 45 são apresentados e aplicados os critérios e aspectos usados para comparar os cinco métodos de dosagem estudados. As características e restrições abordadas são comparadas através de escalas de avaliação com índices numéricos relativos. Também são apresentadas, na tabela 45, respostas às questões específicas relacionadas com as atividades de dosagem envolvidas por cada método.

Tabela 45: Critérios e aspectos usados para comparar os métodos de dosagem

	Métodos de dosagem				
	ABCP	EPUSP	INT	ITERS	SNCF
1) Método desenvolvido basicamente dentro do laboratório	n	s	n	s	n
2) Simplicidade no entendimento dos princípios e conceitos aplicados	1	1	1	2	3
3) Simplicidade na aplicação dos princípios e conceitos no roteiro teórico-experim.	1	1	1	2	3
4) Detalhamento do roteiro experimental para determinar o traço básico inicial	3	3	2	3	3
5) Possibilidade de determinar o traço básico exclusivamente a partir do roteiro teor.	S	n	s	n	s
6) Necessidade de informações sobre as características dos materiais a serem usados	2	1	2	1	3
7) Condicionamento do método a determinado tipo de agregados	S*	n	s***	n	n
8) Demanda de trabalho experimental e de ensaios em laboratório	2	2	1	3	2
9) Exigências de equipamento adicional, além do cone de Abrams	N	n	n	s	n
10) Capacidade de adaptação para diferentes níveis de consumo de cimento	1	2	1	3	2
11) Restrições na aplicação quanto à consistência dos concretos dosados	s****	s****	s****	n	s
12) Consideração explícita das perdas de argamassa	N	s	n	n	n
13) Previsões do método quanto à possibilidade de incorporar ar	S	s	n	n	n
14) Previsões do método quanto à possibilidade de uso de aditivos	N	s	n	n	n
15) Prioriza economia de cimento	N	s	s	n	s
16) Capacidade de adequar os traços às variações dos materiais usados	1	2	1	3	2
17) Facilidade para realizar correções sobre o traço básico inicial	2	3	2	3	1
18) Previsões para ajustar o traço inicial às exigências da obra	S	s	s	s	s
19) Probabilidade de ter grandes diferenças entre o traço inicial e o final de obra	3	1	2	1	3
20) Influência do tecnologista na aplicação do método	1**	3	2	1	3
21) Quantidade de materiais consumidos na determinação do traço inicial	1	2	2	3	2
22) Consideração das atividades de dosagem:					
a) fixação de x, em função do tipo de peça e das condições de exposição e operação	S	s	s	s	s
b) fixação da relação x, em função da resistência à compressão	S	s	s	s	s
c) fixação do abatimento em função do tipo de peça a ser concretada	S	n	n	n	n
d) fixação do abatimento em função do método de adensamento	S	n	n	n	n
e) fixação da relação H (%) em função do D _{mc} e do tipo de adensamento	S	n	s	s	n
f) fixação do α (%) está implicitamente condicionado pelo método	S	n	s	n	s
g) estimativa da quantidade de ar aprisionado na mistura	S	n	n	n	n
h) estimativa da quantidade de água mais provável por m ³ de concreto	S	n	n	n	n
i) orientações para ajustar a quantidade de água da mistura	S	s	n	n	s
j) consideração da dimensão máxima característica do agregado total	S	s	s	n	n
k) consideração da forma e textura das partículas do agregado graúdo	S*	s	s***	s	s
l) consideração explícita da finura da areia	S*	n	n***	n	n
m) consideração do tipo de areia (natural de rio ou artificial de britamento)	S	n	s***	n	n
n) orientações para realizar a mistura de mais de um tipo de agregado graúdo	S	s	s	n	n

Escala para avaliar simplicidade: **1 (simples) ; 2 (com médio grau de dificuldade) ; 3 (difícil)**

Escala para avaliar: detalhamento, necessidade, demanda, capacidade, facilidade, probabilidade, influência, quantidade: **1 (pequena) ; 2 (média) ; 3 (grande)**

Escala para avaliar as restrições: **1 (sem) ; 2 (poucas) ; 3 (muitas)**

Resposta às questões específicas: **s: sim; n: não**

* tabelas ligadas a tipos de agregados britados de granito e areias de rio com MF ≥ 1,8.

** o tecnologista segue uma seqüência de etapas nas que se aplicam quadros e tabelas..

*** as curvas granulométricas usadas pelo método foram construídas com areias naturais de baixo Módulo de Finura e com agregados graúdos constituídos por britas equidimensionais obtidas de gnaisses da região do Rio de Janeiro. Por este motivo a adequação do método, aos materiais disponíveis localmente, pode ser bastante relativa.

**** As restrições dos métodos, quanto à consistência dos concretos dosados, estão relacionadas com o equipamento de medição usado. No caso do ensaio de abatimento do tronco de cone a faixa adequada de trabalho situa-se entre 30 mm e 150 mm.

6.3 CONSIDERAÇÕES PARTICULARES SOBRE CADA UM DOS DIFERENTES MÉTODOS ESTUDADOS

6.3.1 Considerações sobre o método da ABCP

a) O método da ABCP/ACI, que pode ser considerado com um método essencialmente empírico, está baseado em quadros e tabelas, de valores médios, que possibilitam o desenvolvimento de um roteiro simples e rápido de entender, com uma seqüência de passos, num único sentido, que evitam a entrada em processos iterativos ou tentativos. Além disso, os passos indicados podem ser seguidos facilmente por técnicos não muito experientes ou engenheiros de obra, pouco acostumados às práticas e ensaios de laboratório.

b) O método leva em conta, de forma clara e direta, os mais importantes fatores que condicionam as exigências e as características que devem satisfazer os concretos, para moldagem de estruturas *in loco*.

c) Teoricamente é possível fazer toda a dosagem, determinando um traço inicial, a partir de certas informações básicas de caracterização dos materiais componentes. Esses ensaios de caracterização dos agregados, como as composições granulométricas, os Módulos de finura e as Massas Unitárias e Específicas, são rápidos e simples de realizar, com um mínimo de equipamentos de laboratório. Opcionalmente, as características dos materiais podem ser obtidas a partir de dados regionais. Cabe destacar que, a faixa de valores dos Módulos de finura das areias, consideradas pelo método da ABCP, varia entre 1,8 e 3,6 e adapta-se aos limites das quatro zonas granulométricas estabelecidas pela NBR 7211/83, para os agregados miúdos, enquanto que a faixa dos Módulos de finura das areias, consideradas pelo método do ACI, varia entre 2,4 e 3,0 o que as enquadra, basicamente, na faixa de areias médias.

d) Embora o ensaio de abatimento, que determina uma medida relativa da consistência do concreto, seja um procedimento aproximado e incompleto para avaliar a trabalhabilidade, ele tem a virtude de ser aplicável, tanto em obra como em laboratório, sem necessitar de equipamentos sofisticados e de pessoal muito qualificado para sua execução. A grande praticidade do método reside em que os procedimentos de controle e ajuste sugeridos, nas diferentes etapas do processo de dosagem, adotam como parâmetro de referência da trabalhabilidade, o valor do abatimento.

e) O método fornece estimativas próprias para as quantidades de água de amassamento (dependentes apenas da Dimensão máxima característica do agregado total e da quantidade de ar incorporado) e valores médios de resistência para as diferentes relações água/cimento x . Observa-

se que, dada a grande variedade e variabilidade dos tipos de cimentos e dos agregados disponíveis nas diferentes regiões do Brasil, resulta muito difícil aceitar o uso indiscriminado das curvas de valores médios da resistência do concreto (função apenas das relações água/cimento) apresentadas pelo método. Em relação ao aglomerante pode-se observar que a variação, ao longo do tempo, da resistência de um tipo de cimento normalizado não se evidencia apenas para regiões e marcas diferentes, mas acontece também para cimentos produzidos dentro de uma mesma fábrica. Portanto, parece prudente seguir as recomendações do método no sentido de adotar os valores da água de amassamento e das resistências médias obtidos experimentalmente para os agregados e os tipos de cimentos a serem empregados efetivamente na dosagem.

f) Pode-se dizer que o método da ABCP/ACI fornece critérios bem definidos de ajuste das misturas experimentais obtidas a partir do traço básico inicial. Quanto ao ajuste das quantidades de água necessárias para o amassamento das misturas de concreto, o método fornece uma fórmula de ajuste do consumo de água em função dos abatimentos inicial e requerido.

g) A norma ACI 211.1-81, usada por Rodrigues (1990) para o estabelecimento do método da ABCP, prevê procedimentos de substituição em massa ou em volume de parte do cimento por pozolana e fornece as fórmulas e as equações para tais substituições. No método simplificado da ABCP, não são feitos comentários e também não são apresentadas orientações quanto à substituição parcial de parte da massa de cimento Portland por algum tipo de material pozolânico.

h) O método da ABCP/ACI considera a relação existente entre o volume de agregado graúdo compactado seco e o volume de concreto produzido com esse agregado. Através de uma tabela obtida experimentalmente são apresentados valores do volume total do agregado graúdo compactado seco, em função da Dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura da areia.

i) Observa-se que o método de dosagem da ABCP/ACI procura fornecer misturas plásticas com baixos teores de areia e menores consumos de pasta. Este princípio do método levaria à obtenção de traços iniciais mais econômicos e simplificaria seu ajuste, já que parece mais fácil reconhecer e corrigir misturas com menor quantidade de argamassa do que misturas argamassadas em excesso (RODRIGUES, 1990; VERÇOZA, 1986). Na aplicação prática do método, foi possível constatar que as proporções iniciais entre os materiais constituintes do concreto determinavam teores de argamassa não muito baixos se comparados com os obtidos inicialmente através dos outros quatro métodos de dosagem. Entretanto, as correções do traço, tentando aumentar a consistência, através do aumento da quantidade de água e conservando constante a relação água/cimento, leva

naturalmente a aumentos no consumo do aglomerante, o que produz um aumento do volume de pasta e do teor de argamassa e constitui um dos fatores de encarecimento do traço, que será “seguro”, mais levemente anti-econômico. Quando, no processo de ajuste da mistura inicial, opta-se por colocar toda a água, inicialmente prevista pelo traço, de forma a manter constante a relação água/cimento e a quantidade de brita de partida, torna-se necessário aumentar o conteúdo de areia o que pode ocasionar um aumento excessivo do teor de argamassa, muito acima do teor ideal necessário para o concreto. Esta observação pode ser confirmada através da aplicação do método, no qual constata-se que, uma vez fixadas as características dos materiais a serem usados no proporcionamento dos concretos, quanto maior seja a relação água/cimento imposta, maior será a proporção de areia acrescida e maiores serão os teores de argamassa resultantes.

j) Um dos inconvenientes mais importantes do método do ACI é a dependência de tabelas elaboradas a partir de valores médios de materiais, que muitas vezes podem não se adequar àqueles disponíveis localmente. Além disso, o uso desacomodado das tabelas pode levar a perder de vista os fundamentos e os conceitos básicos envolvidos assim como as restrições de uso e aplicação consideradas no método. Quando as características dos materiais efetivamente empregados para a execução da dosagem diferem daquelas médias dos materiais usados pelo método, pode acontecer que o traço, determinado teoricamente através das tabelas propostas, apresente no momento de ser executado pela primeira vez características muito diferentes das inicialmente procuradas. A conseqüente necessidade de efetuar os ajustes necessários pode levar a concretos um tanto inadequados e/ou anti-econômicos se comparados com os traços otimizados que são obtidos por outros métodos que envolvem ensaios prévios de trabalhabilidade sobre misturas experimentais, produzidas com os materiais que serão efetivamente usados.

k) As consistências de trabalho estabelecidas pelo método estão, em princípio, limitadas a variações do abatimento compreendidas entre 40 e 100 mm, e os consumos de cimento devem permanecer em torno de 325 kg/m³ de concreto. Entretanto, as quantidades de água de amassamento sugeridas permitem obter concretos com abatimentos compreendidos entre 25 e 175 mm. A restrição do abatimento dos concretos entre 40 e 100 mm justifica-se na medida que o ensaio de abatimento do tronco de cone apresenta uma boa confiabilidade, para consistências do concreto que variam de plásticas a fluídas, numa faixa de valores compreendida entre 25 mm e 150 mm. Observa-se também que para atingir um mesmo valor do abatimento, os consumos de água estimados pelo método da ABCP, em função da Dimensão máxima característica do agregado graúdo, apresentam-se um pouco maiores que os sugeridos pelo método da norma ACI 211.1 – 81.

l) Quando os agregados disponíveis são britas e areias naturais, como as disponíveis na região de Porto Alegre, o método possibilita a obtenção rápida e direta de traços com abatimentos e relações água/cimento prefixadas, que apresentam teores de argamassa adequados e consumos de cimento não muito elevados se comparados com outros métodos mais trabalhosos e demorados.

m) Por último, existem limitações do método quanto a sua adequação para o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes, pois a tabela da ABCP, que fornece as quantidades de água aproximadas para atingir o abatimento, em função da Dimensão máxima característica do agregado, está elaborada para concretos sem aditivos. Este fato evidencia a necessidade de atualizar ou complementar o método de maneira a considerar a possibilidade de uso de aditivos e ter referências de como agir nestes casos. De qualquer forma, a utilização de aditivos pode ser considerada, depois de realizada a determinação do traço básico no laboratório, ajustando-se a consistência, em função das necessidades de trabalhabilidade específicas da obra. Alguns aditivos, dependendo de seu tipo, qualidade e da proporção em que sejam incorporados, podem causar efeitos indesejados como exsudação ou segregação das misturas de concreto. Portanto a incorporação de aditivos pode requerer novos ajustes nas proporções dos traços básicos determinados pelo método.

6.3.2 Considerações sobre o método EPUSP/IPT

a) O método da EPUSP/IPT é um método essencialmente experimental que demanda inicialmente poucas informações quanto às características dos agregados e pode ser desenvolvido num laboratório de campo, montado com um mínimo de equipamentos especiais. Este procedimento de dosagem apresenta, nas sucessivas etapas de trabalho, uma série de orientações ou “dicas” práticas que possibilitam avaliar as misturas de concreto fresco sob diferentes aspectos da sua trabalhabilidade.

b) Para resolver, de forma ampla, o problema do proporcionamento de concretos com características de acabamento, trabalhabilidade e resistência preestabelecida, o método propõe a construção de um diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão (f_c), a relação água/cimento (x), a relação agregado/cimento (m) e o consumo de cimento/m³ de concreto (C).

c) O método procura a obtenção de traços com teores mínimos de argamassa que possibilitem atender as necessidades de transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto na obra. O mínimo teor de argamassa deve ser o suficiente para ocupar os vazios entre as partículas do agregado e lubrificar sua superfície. Embora sejam sugeridas certas orientações práticas para a

determinação da quantidade ideal de finos, parece claro que o responsável pela dosagem tem uma influência significativa na avaliação e na decisão sobre o teor de argamassa a ser finalmente adotado. O próprio método alerta sobre a necessidade de realizar ajustes no teor de argamassa de forma a considerar, antecipadamente, as perdas de materiais finos que venham a ocorrer nos processos de transporte e lançamento. Observa-se que a relação superfície/volume das peças a serem concretadas condicionam também o teor de argamassa a ser adotado no traço final.

d) A relação água/cimento (**x**) e a relação agregado/cimento (**m**) do traço de referência inicial ficam condicionadas pela imposição do abatimento requerido para o concreto, ou seja, o método não prefixa relações água/cimento de partida. Essa relação água/cimento será função, por sua vez, das quantidades de água e aditivos (plastificantes ou superplastificantes) que venham a ser usadas para atingir o abatimento procurado. Observa-se que este método possibilita, explicitamente, a utilização de aditivos, permitindo ao tecnologista adotar o teor mais adequado do ponto de vista técnico e/ou econômico.

e) Na determinação dos traços “muito rico” e “muito pobre”, a recomendação para a correção do teor de argamassa em 2%, para cada variação de 0,5 no valor do **m**, não se mostrou adequada na parte experimental da dissertação. O acréscimo ou decréscimo de 2% no teor de finos pareceu excessivo nos dois sentidos, sendo, portanto, preferível adotar valores de 0,5% de variação do teor de argamassa por cada 0,5 de variação do **m**. Melhor, ainda, seria seguir a recomendação do método no sentido de proceder a uma nova avaliação do teor ideal de argamassa quando se trata de ampliar a faixa de valores da relação **m**. No caso dos concretos dosados pelo método da EPUSP/IPT, na parte experimental do trabalho, e para facilitar o traçado de um único diagrama de dosagem para α constante, optou-se por manter fixo o teor de argamassa em 52% para **m** variando entre 4,5 e 8,63. Este teor de finos apresentou-se adequado ainda nos valores limites do intervalo de variação de **m**. Entretanto, poderia-se dizer que pequenos ajustes de +1% de argamassa no traço 1: 8,63 e -1% no traço 1: 4,5 poderiam ter sido adequados para conseguir um teor “ideal de argamassa” nos traços limites do intervalo de dosagem estudado.

f) Vale a pena alertar que as correções que devem ser realizadas sobre o traço adotado inicialmente, para conseguir obter o teor de argamassa ideal e o abatimento procurado, podem levar a um processo de ajuste experimental bastante demorado. Este processo de ajuste pode ser agilizado quando são preparadas antecipadamente as quantidades de cimento e areia, que devem ser adicionadas, para conseguir teores de argamassa α crescentes. Caso estas providências não sejam adotadas, o processo de ajuste pode ocasionar perdas de água por diversos efeitos, como, por

exemplo, a evaporação para o ambiente do laboratório, a absorção de água por parte dos agregados não saturados completamente e inclusive a perda de água de amassamento pela absorção dos grãos de cimento. Este conjunto de fatores termina causando uma distorção no cálculo da água efetivamente utilizada na mistura dos materiais introduzidos na betoneira. Além disso, um maior tempo de mistura pode introduzir diferenças significativas entre o abatimento do concreto produzido no laboratório e o abatimento do concreto produzido na obra, com os mesmos materiais e equipamentos. Estas distorções citadas no ensaio são agravadas, sem dúvida, quando se trabalha com aditivos cujo efeito plastificante ou superplastificante se reduz de forma considerável com o passar do tempo. Portanto, determinado, numa primeira mistura experimental, o teor de argamassa ideal do traço de referência e estabelecida a quantidade de água de amassamento necessária para atingir o abatimento pretendido, recomenda-se repetir o ensaio, com os materiais nas proporções previamente estabelecidas e com tempos de mistura compatíveis com os tempos de produção em obra, de forma a verificar a obtenção do abatimento previsto e as condições de trabalhabilidade e acabamento requeridas. Ensaio preliminares efetuados na primeira etapa do trabalho experimental mostraram que as resistências à compressão correspondentes ao traço de referência, obtido por ajustes sucessivos com maiores tempos de mistura, resultaram mais elevadas do que era esperado, sendo introduzidas distorções na determinação das regressões das curvas de Abrams. Quando, na segunda etapa do trabalho, foram repetidos os ensaios de determinação do traço de referência, estas distorções não se evidenciaram mais e os coeficientes de correlação das equações de Abrams ficaram próximos do valor 1. Foi possível, assim, construir curvas de Abrams bem ajustadas aos valores experimentais determinados.

g) A flexibilidade em termos da possibilidade de utilização de materiais diversos (inclusive aditivos) e a mínima necessidade de ensaios de caracterização dos agregados possibilitam a aplicação do método da EPUSP/IPT, quase sem restrições, em qualquer lugar do país onde se conte com mínima infra-estrutura laboratorial. A otimização das soluções de dosagem, encontradas, dependerão da experiência e do treinamento do responsável dos ensaios e dos fatores culturais e econômicos condicionantes da região, onde o concreto será aplicado.

h) Embora, a fundamentação teórica do método de dosagem da EPUSP/IPT seja simples e não se aprofunde na busca de possíveis composições ideais dos materiais constituintes, a aplicação prática do mesmo, com procedimentos laboratoriais e equipamentos relativamente simples e com custos operacionais relativamente baixos, procura a construção de um diagrama de dosagem que possibilita uma análise rápida e objetiva de alternativas de traços, que, não sendo as ótimas, resultam adequadas, do ponto de vista técnico e econômico.

i) Caso existam variações significativas nas características dos materiais constituintes do concreto ou eventualmente existam mudanças nos tipos de agregados, no aglomerante, ou nos aditivos, o método pode ser facilmente aplicado com o aproveitamento das informações já disponíveis e com um reduzido consumo de materiais e horas de trabalho.

6.3.3 Considerações sobre o método do INT (desenvolvido pelo Prof. Lobo Carneiro)

a) A grande vantagem do método de Lobo Carneiro é a possibilidade de ser desenvolvido com o mínimo de ensaios de laboratório, sendo necessárias, basicamente, as determinações das composições granulométricas dos agregados, as quais podem ser dispensadas quando se tem conhecimento das composições médias em uma dada localidade. O estabelecimento dos valores médios das granulometrias dos diferentes tipos de agregados de uma determinada região permite a determinação de composições granulométricas de dois ou mais agregados de maneira que estas se enquadrem dentro das faixas estabelecidas pelo Prof. Lobo Carneiro. O método do INT adota, da mesma maneira que Otto Graf, faixas de granulometrias ótimas, em lugar de curvas únicas que poderiam apresentar utilidade duvidosa ou ser simplesmente impraticáveis. As faixas de composições granulométricas contínuas ótimas sugeridas por Lobo Carneiro estão associadas com diferentes dimensões máximas características do agregado total (que vão entre 9,5 mm e 76 mm) e com três diferentes possibilidades de adensamento (que vão desde o adensamento manual até o adensamento vibratório intenso).

b) A granulometria ótima definida por Lobo Carneiro é aquela que permite obter uma mistura de concreto de máxima compacidade (mínimo de vazios) e para a qual corresponde um consumo mínimo de cimento quando é fixada uma mesma consistência e uma mesma relação água/cimento x . Fixados um consumo de cimento e uma determinada consistência, pode-se considerar que uma melhor distribuição granulométrica da mistura total de materiais secos permite a obtenção de concretos mais trabalháveis e mais resistentes. A maior resistência não é consequência direta da melhoria da granulometria, mas sim de seus efeitos na redução da porosidade da pasta através do decréscimo da quantidade de vazios e da diminuição da quantidade de água de amassamento. Além disso, uma boa distribuição granulométrica dos agregados permite uma maior compacidade, evitando as possíveis imperfeições da massa de concreto quando lançado e adensado.

c) É importante ressaltar que as curvas “ótimas” construídas por Lobo Carneiro são resultado de ensaios experimentais efetuados com agregados graúdos britados e areias, médias e finas,

encontrados na região do Rio de Janeiro. Portanto, quando os agregados disponíveis sejam muito diferentes dos usados para construir as curvas, os concretos dosados pelo método podem apresentar aspecto ruim. Neste sentido vale a pena lembrar que, conforme Lobo Carneiro, a aplicabilidade das composições granulométricas “ótimas” é uma questão relativa pois, se um concreto graduado segundo essas curvas apresentar mau aspecto, deverá ter-se sempre presente que, nessa situação, as curvas é que estarão erradas e não o mau aspecto do concreto.

d) A estimativa inicial da relação água/materiais secos, em função da Dimensão máxima característica do agregado e do tipo de adensamento a ser usado, não garante de fato a obtenção de um abatimento preestabelecido.

e) A diferença dos métodos da ABCP/ACI e da EPUSP/IPT, o método do INT demanda um maior trabalho de cálculo para estabelecer as proporções dos agregados e do cimento que determinam o traço de concreto básico procurado. Neste sentido, podem ser aplicadas três alternativas de trabalho que permitem a determinação de traços cujas composições granulométricas aproximam-se, com maior ou menor exatidão, às curvas ótimas propostas pelo método (método das tentativas, método dos mínimos quadrados, método gráfico “da Bahia”).

f) Em geral, os traços básicos determinados inicialmente por meio do método devem ser corrigidos para compatibilizar a relação água/cimento com a consistência desejada. Esta situação obriga a efetuar ajustes da relação água/materiais secos que levam a processos iterativos para determinar novas relações agregado/cimento de partida. Ou seja, o método pode se tornar um pouco trabalhoso e demandar diferentes etapas de trabalho experimental. Os baixos abatimentos obtidos inicialmente (menores que os 70 mm procurados) foram aumentados através do aumento da relação água/materiais, o que levou a um aumento do consumo de cimento para a relação água/cimento requerida. De qualquer forma, no final do processo iterativo de dosagem, os traços obtidos apresentaram consumos de cimento um pouco menores que os traços resultantes da aplicação dos outros métodos. A quantidade de materiais finos nos traços definitivos resultou similar à quantidade de finos contida nos traços dos outros métodos.

g) Quando se considera o teor de argamassa como um parâmetro que leva em consideração a quantidade de materiais finos (finos dos agregados e o cimento), passantes na peneira de abertura 4,8 mm, pode-se observar que as curvas granulométricas ótimas do Lobo Carneiro determinam, para cada Dimensão máxima característica da mistura total, os teores máximos e mínimos de argamassa, das misturas cimento-agregado possíveis. Nos gráficos, apresentados nas figuras 13 a 18, pode-se observar que, quando aumentam as Dimensões máximas características das

composições granulométricas, aumentam as percentagens de materiais finos passantes na peneira 4,8 mm. Ou seja, como era de se esperar, os teores de argamassa das composições granulométricas propostas pelo método diminuem com o aumento das dimensões máximas características.

Para a situação particular dos agregados empregados na parte experimental, com $D_{mc} = 25$ mm, as composições granulométricas do INT permitem deduzir como teores de argamassa limites os valores de 39% (para adensamento mecânico intenso) e 58% (para adensamento manual). Observa-se que o teor de argamassa de 52% obtido finalmente nos traços dosados pelo método do INT ficou compreendido entre o valor de $\alpha_I = 58\%$ determinado pela curva correspondente ao adensamento manual e o valor $\alpha_{II} = 49\%$ determinado pela curva correspondente ao adensamento mecânico moderado.

h) Quando os agregados disponíveis para o proporcionamento dos concretos são britas e areias naturais, o método do INT apresenta como grande vantagem a facilidade de compor misturas granulométricas que apresentam uma boa compacidade e uma trabalhabilidade adequada às condições de adensamento preestabelecidas. A diferença do método da ABCP, que de forma empírica recomenda proporções fixas de agregados graúdos, e a diferença do método da EPUSP/IPT, que propõe a determinação experimental da mistura de agregados graúdos no estado compactado seco, o método do Prof. Lobo Carneiro possibilita uma determinação teórica direta da composição granulométrica de todos os agregados. Mais ainda, quando se opta por trabalhar pelo método gráfico de mistura, é possível visualizar rapidamente as alternativas de composições granulométricas dos agregados disponíveis que mais se aproximam das curvas ideais propostas pelo método.

i) Pode-se dizer que o método do INT adapta-se bem ao tipo e às características dos materiais disponíveis na região de Porto Alegre e inclusive apresenta a vantagem de poder usar suas curvas granulométricas como referência para a seleção de agregados que possibilitem misturas trabalháveis e com granulometrias contínuas e compactas.

j) De igual forma que o método da ABCP/ACI, o método do INT possibilita a obtenção direta de traços com relações água/cimento prefixadas sem ser necessário a construção de diagramas de dosagem.

6.3.4 Considerações sobre o método do ITERS (desenvolvido pelo Prof. Petrucci)

a) O método de dosagem do Prof. Petrucci, criado no antigo ITERS - Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul - hoje CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul -, foi desenvolvido com o intuito de ser aplicado sem restrições na dosagem de concretos com os mais diversos materiais disponíveis na região. Ou seja, a diferença dos métodos da ABCP/ACI

e do INT, o método do ITERS (assim como o método da EPUSP/IPT) pode ser aplicado com materiais diversos em qualquer região do país. Todo o processo envolvido na determinação dos traços permite um conhecimento mais amplo dos materiais disponíveis e dos possíveis efeitos sobre a trabalhabilidade das misturas, incluindo-se a tendência à exsudação e/ou segregação. As informações obtidas no desenvolvimento do processo experimental de dosagem, que resultam no traçado de curvas que vinculam a relação água/materiais secos H (%) com o teor de argamassa α (%) e com índices de medida da trabalhabilidade, permitem determinar e comparar traços de concretos com propriedades e características adequadas aos diversos fins de obra. Assim podem ser observadas alterações quanto às condições de trabalhabilidade dos traços dentro de faixas amplas de variação das quantidades utilizadas de água de amassamento e das proporções entre os agregados graúdos e miúdos. Os equipamentos de avaliação da trabalhabilidade das misturas experimentais permitem prever o comportamento relativo dos concretos dosados quando adensados por meios manuais ou mecânicos em obra. Esta visão ampla da variação do comportamento das misturas de concreto justifica o uso do método do ITERS quando se busca determinar traços para centrais de produção que procurem avaliar o comportamento de diferentes alternativas de materiais disponíveis e/ou que pretendam otimizar as proporções de agregados miúdos e graúdos que apresentam características e propriedades relativamente uniformes ao longo do tempo. Fixada a relação água/cimento, a determinação da quantidade mínima de água de mistura, necessária para possibilitar uma determinada trabalhabilidade, leva a obtenção de traços econômicos, com menor consumo de pasta de cimento. Neste sentido, as possibilidades de otimização dos traços, quanto à economia de materiais e quanto à energia de lançamento e compactação, necessárias para condições prefixadas de trabalhabilidade, também parecem adquirir relevância em grandes obras, onde pequenas economias na produção de volumes unitários de concreto representam enormes economias em termos de volumes totais produzidos.

b) Devido a que o método de dosagem, desenvolvido por Petrucci, trabalha a partir de amostras dos materiais a serem efetivamente empregados na execução dos concretos, e considera as condições específicas de adensamento e a trabalhabilidade das misturas a serem produzidas, os desempenhos dos traços de concreto, aplicados em obra, se ajustam muito melhor às características previstas e aos comportamentos observados nas misturas experimentais. Ou seja, uma das grandes vantagens do método reside na segurança que transmite ao tecnólogo de concreto quanto à possibilidade de dispor de traços experimentais obtidos em laboratório com aplicabilidade quase imediata no canteiro, e, portanto, com um requerimento mínimo de ajustes necessários no canteiro de obras.

c) O método não apresenta nenhum tipo de tabela, fórmula ou curva que possibilite estimar previamente a correlação entre a relação água/cimento x e a resistência à compressão f_c . Uma vez selecionado o tipo de cimento e escolhidos os agregados a serem usados no proporcionamento dos concretos, deve-se partir para a determinação experimental do teor de argamassa ideal e da relação água/materiais secos que estabelecem a família de traços de concreto que possibilitarão a construção das curvas de Abrams nas idades de referência previstas. O método do ITERS é o único, entre os cinco métodos estudados, que estima o teor de argamassa, levando em consideração o efeito dinâmico do adensamento, avaliando de forma efetiva a trabalhabilidade.

d) Os efeitos dos aditivos plastificantes e/ou superplastificantes sobre as misturas de concreto podem ser avaliados nos ensaios de remoldagem, inclusive comparando-os com as misturas que não incorporam estes aditivos.

e) O método oferece duas alternativas de avaliação dos concretos estudados, dependendo da fluidez das misturas a serem usadas e das formas de adensamento empregadas no canteiro. Quando as misturas forem mais fluídas e o adensamento a ser usado em obra for manual, poderá empregar-se o aparelho de remoldagem original de Powers, montado sobre uma mesa de fluidez. Caso as misturas sejam mais rijas e o adensamento for por vibração, pode ser usado o aparelho de remoldagem de Powers, modificado por Wuerpel, montado sobre uma mesa vibratória. Observa-se que o uso do aparelho de remoldagem, na sua forma original, leva à escolha de traços mais argamassados, como meio de evitar uma tendência à segregação mais intensa, ocasionada pela maior energia de queda transmitida pela mesa de fluidez. Por esta razão, os comportamentos das misturas submetidas aos ensaios de remoldagem, sobre mesa vibratória, parecem representar mais adequadamente a situação dos concretos nas obras atuais, onde são procuradas misturas mais secas e econômicas, e onde está generalizado o uso de equipamentos de vibração, do tipo de agulha de imersão. De qualquer forma, independentemente do sistema de remoldagem empregado (manual ou vibratório), pode-se dizer que o grande valor do método do ITERS consiste em permitir comparações reais da trabalhabilidade de diferentes misturas de concreto.

f) Por ser um método basicamente laboratorial, ele demanda equipamentos específicos para a realização dos ensaios. Os equipamentos usados no desenvolvimento do método exigem certos cuidados de operação e ajuste, de forma a evitar erros na determinação dos índices de remoldagem. Quando os índices de remoldagem, medidos em segundos, são baixos e não diferem muito para as diferentes relações H , pode ser difícil evidenciar diferenças de trabalhabilidade entre as misturas ensaiadas. No desenvolvimento da parte experimental foi possível comprovar que quando se trabalha

com concretos de consistência plástica ou fluída, as diferenças na trabalhabilidade das misturas ensaiadas podem ser melhor avaliadas quando se usa a mesa de remoldagem manual em lugar da mesa de remoldagem com sistema vibratório. Como exemplo desta afirmação foi possível confirmar, no laboratório, que enquanto os índices de remoldagem determinados pelo sistema manual variaram entre 23 e 61 golpes para misturas de consistência plástica ($70 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$), os índices de remoldagem medidos pelo sistema vibratório variaram entre 1,8 s a 3,4 s. Ou seja, nos concretos de consistência plástica, o equipamento manual é mais sensível às variações das proporções dos agregados e às variações das quantidades de água. Por outro lado, quando se trata de avaliar misturas de concreto seco, que seguramente serão adensadas em obra, através de equipamentos de vibração enérgica, parece ser mais indicado usar como índice de remoldagem, aquele resultante da utilização do ensaio de Powers, realizado com a mesa vibratória. Praticamente, foi possível confirmar que, para misturas de concreto de consistência seca (abatimento inferior a 30 mm), o processo de remoldagem pelo sistema manual, além de apresentar valores superiores aos 90 golpes, apresentava indícios claros de segregação e gerava, no cilindro interno do aparelho, um núcleo central de britas que dificultava grandemente o processo de remoldagem para o cilindro externo. Neste aspecto, pode ser constatado que, algumas vezes, o processo de remoldagem na mesa de fluidez deve ser interrompido pois, devido à segregação da mistura de concreto no processo de adensamento, é formado um núcleo central de britas no cilindro interno, que impede a total remoldagem da massa de concreto.

g) Embora os equipamentos empregados, no método do ITERS, pretendam independizar os ensaios da influência do operador, a experiência do tecnólogo envolvido no processo de dosagem é de fundamental importância. Os ensaios devem ser conduzidos e avaliados, preferencialmente, por técnicos acostumados às práticas e aos equipamentos laboratoriais e capazes de interpretar corretamente as observações realizadas no processo de proporcionamento. O conhecimento das relações existentes entre as necessidades de trabalhabilidade na obra e os índices obtidos através dos ensaios de remoldagem é um fator importante, que possibilita uma aplicação mais eficiente do método.

h) A utilização do ensaio de abatimento do cone de Abrams, de uso relativamente freqüente em obra, pode ser uma maneira alternativa de avaliar a trabalhabilidade dos concretos tanto na obra como no laboratório. Porém, a variabilidade do ensaio de abatimento (devida às condicionantes do próprio ensaio e à dependência do operador) tem apresentado dificuldades para a determinação precisa de curvas que permitam o estabelecimento das relações ótimas entre a/m e H para uma dada medida da consistência. Cabe destacar, também, que é difícil estabelecer uma correspondência direta entre a medida do abatimento e o índice de remoldagem, pois o ensaio de

abatimento do tronco de cone é um ensaio de caráter marcadamente estático enquanto que os ensaios de remoldagem são ensaios essencialmente dinâmicos.

i) O procedimento de dosagem criado por Petrucci considera como parâmetros básicos e independentes, o teor de argamassa α e a relação entre a quantidade total de água e o total de materiais secos da mistura H . O método requer, em princípio, a realização de um grande número de ensaios que podem consumir uma significativa quantidade de horas de trabalho e um volume apreciável de material. Este fato pode ocasionar custos elevados que inviabilizem a aplicação do método para obras de pequeno e médio porte que não envolvam elevados volumes de concreto ou que não apresentem exigências técnicas importantes, quanto ao desempenho do material, no estado fresco e endurecido.

j) Em caso de mudanças significativas nas características dos agregados empregados, todo o processo de dosagem deve recomeçar, devendo-se repetir os ensaios laboratoriais básicos que são os mais pesados de realizar.

6.3.5 Considerações sobre o método da SCNF (desenvolvido por Roger Vallette)

a) O método desenvolvido pelo Eng. Roger Vallette, na SNCF, procura a obtenção de misturas de concreto que, com um mínimo consumo de cimento e uma máxima relação agregado graúdo/agregado miúdo, apresentem experimentalmente uma trabalhabilidade adequada às necessidades de obra. Este princípio de trabalho leva à procura de traços de concreto “pobres” em cimento e em agregados finos (“pobres” em argamassa), o que obriga a trabalhar também com baixa demanda de água, de forma a evitar uma excessiva tendência à exsudação e à segregação nos processos de transporte, lançamento e adensamento. A aplicação experimental deste método de dosagem obriga ao tecnologista a se acostumar com misturas de aspecto áspero, com um aparente excesso de brita e levemente exsudantes. O tecnologista deve ter presente que, além de certo limite, a falta de grãos finos pode tornar o concreto pouco trabalhável e poroso.

b) Este método, a diferença dos quatro anteriores, é o mais exigente quanto ao tipo de informações sobre as características dos agregados. Ele demanda o conhecimento prévio das massas específicas e unitárias de todos os materiais componentes e a determinação das respectivas “águas de molhagem”. O conceito de “água de molhagem”, introduzido por Vallette, está diretamente relacionado com a quantidade de água necessária para envolver todas as partículas do material, sem que se observe excesso de líquido.

c) Na apresentação teórica do procedimento de dosagem da SNCF, torna-se necessário familiarizar-se com vários conceitos e definições que devem ser aplicados para cada um dos materiais constituintes do concreto e que são introduzidos através de expressões matemáticas. Este fato torna um pouco complicado o entendimento do roteiro do método e sua própria aplicação. No estudo teórico inicial do método apresentam-se algumas dificuldades para equacionar os conceitos e visualizar a maneira prática de sua utilização. Um técnico pouco comprometido com o entendimento dos procedimentos de dosagem, dificilmente optará pela sua aplicação, especialmente quando necessite resultados rápidos e de procedimentos experimentais simples de aplicar. Neste sentido, qualquer um dos outros quatro procedimentos anteriormente discutidos são mais fáceis de entender e mais fáceis de aplicar.

Para facilitar a aplicação do método, foram incorporadas sugestões, fórmulas e “dicas” de vários tecnologistas e pesquisadores, que ajudam na tarefa de determinar mais rapidamente os parâmetros considerados nas diferentes etapas do método e agilizam o desenvolvimento da dosagem no laboratório.

d) Somente com a completa aplicação teórica e experimental do método do Vallette foi possível a total compreensão dos objetivos e das vantagens dos resultados obtidos. Também foi possível comprovar que, no desenvolvimento do processo de aplicação das diferentes etapas de dosagem no laboratório, o conhecimento e a experiência do tecnologista tornam-se elementos decisivos para conseguir uma resposta exitosa do método. Sem dúvida, este método é muito mais influenciado pelo tecnologista do que qualquer outro dos métodos estudados.

e) Uma vez entendidas as equações teóricas propostas pelo método, e conhecidas completamente as características físicas dos agregados, é possível a determinação teórica de um traço inicial, que funcione adequadamente. Pode-se dizer que, fixado um conjunto qualquer de materiais componentes do concreto, o traço teórico inicial, obtido pelo método da SNCF, tem maiores probabilidades de dar respostas adequadas do que o traço teórico inicial obtido pelo método da ABCP/ACI. Esta afirmação está fundamentada no fato objetivo de que o método da SNCF considera um maior número de informações dos materiais componentes do que o método da ABCP. Além disso, no processo de verificação e de ajuste experimental dos traços básicos, dos respectivos métodos, o traço inicial proposto pelo método de Vallette foi mais adequado do que o traço proposto pela ABCP/ACI. O processo de ajuste do traço inicial do método de Vallette foi relativamente fácil, seguindo as diretrizes teóricas e as fórmulas deduzidas pelo método.

f) O Método da SCNF não possibilita a obtenção direta de traços com relações água/cimento prefixadas, é necessário passar por todo um processo teórico e experimental de ajuste das

proporções dos agregados e do cimento para poder encontrar traços de “concretos plenos”, trabalháveis e com mínimos consumos de cimento e areia. A partir desses traços básicos é possível, numa segunda etapa, ajustar as quantidades de cimento e areia para atingir traços com relações água/cimento prefixadas. Posteriormente, numa etapa final, é possível manter o teor de argamassa e a relação água/cimento de forma a ajustar, através da relação água/materiais secos, a consistência requerida.

g) Outra vantagem do método desenvolvido por Vallette é a possibilidade de ajustar o traço inicial de “concreto pleno” para obter um traço básico com consumo de cimento prefixado. Este ajuste pode ser feito de forma completa a partir das formulações teóricas extraídas dos princípios do método.

h) Do ponto de vista experimental foi possível verificar mínimos teores de argamassa nos quatro traços obtidos pelo método da SNCF. Além disso, os quatro traços apresentaram uma tendência de consumos de cimento menores que os traços com as mesmas relações água/cimento determinados pelos outros quatro métodos. Confirma-se assim a tendência de utilização do método quando se trata de dosar concretos com máxima economia de cimento e com mínimo consumo de partículas finas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

- Os cinco métodos de dosagem estudados neste trabalho foram escolhidos, em primeiro lugar, pela sua origem diversa a partir dos principais centros tecnológicos e instituições de pesquisa do Brasil. Como geralmente esses centros de estudo e divulgação se concentram em regiões com significativo peso econômico e grande desenvolvimento científico, resulta natural que sua difusão nos meios acadêmico e técnico-profissional aconteça de forma intensa e relativamente rápida. Portanto, além de sua representatividade e importância tecnológica, existe uma grande divulgação desses procedimentos de dosagem que incentiva sua utilização generalizada. Por sua vez esta aplicação intensa permite testar e ampliar os limites de uso em situações diversas e com diferentes materiais, disponíveis regionalmente. Uma questão a ser destacada é que os métodos de dosagem empregados no Brasil não se filiam exclusivamente a filosofias ou princípios de trabalho desenvolvidos no exterior, como nos Estados Unidos e na Europa. Apenas dois dos cinco métodos estudados, o da SNCF (de origem francesa) e o da ABCP (de origem norte-americana), podem ser considerados aplicações ou adaptações mais ou menos diretas de métodos estrangeiros. Os outros três procedimentos de proporcionamento analisados neste trabalho são resultado do talento e do esforço de tecnólogos nascidos no país que, baseados em teorias diversas, conseguiram apresentar soluções particulares para os problemas de dosagem enfrentados nas regiões onde desenvolveram suas atividades de trabalho e pesquisa.

- O objetivo principal do desenvolvimento da parte experimental do trabalho foi direcionado ao entendimento prático das atividades de dosagem propostas por cada um dos procedimentos de proporcionamento abordados. Neste sentido a escolha de relações água/cimento determinadas e a fixação de uma consistência, compatível com a obtenção de concretos plásticos, elaborados com os mesmos materiais, permitiu antecipar que as resistências à compressão obtidas não poderiam ser muito diferentes, enquanto os consumos de cimento e os teores de argamassa determinados pelos métodos não variassem de forma significativa.

- Os cinco métodos de dosagem estudados apresentaram respostas similares em termos de trabalhabilidade e de resistências à compressão. Todos os métodos estudados se adequaram muito bem para o proporcionamento de concretos estruturais com consistências compatíveis com as necessidades de lançamento por métodos tradicionais e se adaptaram muito bem às areias naturais

e aos agregados graúdos britados encontrados na região de Porto Alegre e empregados nas dosagens. Portanto pode-se concluir que, a partir de agregados, com granulometrias contínuas e peso normal (massa específica compreendida entre $\gamma = 2,6 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma = 2,9 \text{ kg/dm}^3$), todos os cinco métodos estudados dão respostas igualmente satisfatórias, quando se trata de produzir concretos estruturais com consistência plástica e com resistências à compressão consideradas nas faixas baixas e médias (compreendidas entre 15 MPa e 40 MPa, na idade de 28 dias). Estatisticamente não foram detectadas diferenças significativas entre as resistências obtidas, para as mesmas relações água/cimento, através dos diferentes métodos.

- Quando se comparam os consumos de cimento das famílias de concretos, obtidas no programa experimental, constata-se que as respostas oferecidas, pelos cinco métodos de dosagem estudados, apresentam diferenças significativas. Neste aspecto pode-se afirmar que o método do INT/Lobo Carneiro parece evidenciar o menor consumo de cimento. Entretanto quando se avalia, de maneira conjunta, as respostas das resistências à compressão e as respostas do consumo de cimento, através dos “fatores de eficiência”, constata-se que o método da SNCF/Roger Vallette apresenta o maior rendimento para todos os níveis de resistência estudados. O segundo método, em termos de eficiência, resulta ser o método do ITERS/Eládio Petrucci.

- Uma questão que deve ser sempre levada em conta, quando se parte para a aplicação dos métodos de dosagem racionais, é a necessidade de selecionar e adotar um determinado conjunto de materiais componentes, que deverão manter suas propriedades e características aproximadamente constantes ao longo do período de utilização do traço. Alguns dos métodos estudados, como o método da SNCF e o método do ITERS, podem apresentar soluções de proporcionamento muito sensíveis às variações dos materiais usados, e em função da intensidade dessas alterações podem ser necessários ajustes significativos dos traços que obriguem a reiniciar todo o processo de dosagem. Outros métodos, como o da ABCP/ACI, podem deixar de dar respostas satisfatórias e até anti-econômicas quando os agregados se afastam daqueles pressupostos pelo método. No caso do método do INT, as variações nas dimensões máximas características e nas composições granulométricas dos agregados obrigarão à determinação analítica ou gráfica de novas misturas que se ajustem às curvas ideais propostas. Outros métodos, como o da EPUSP/IPT, podem possibilitar um ajuste rápido dos traços, inclusive no canteiro de obras, e oferecer soluções ainda satisfatórias com agregados de características diferentes.

- É importante destacar que a maioria dos métodos de dosagem estudados (métodos do INT, ITERS, SNCF) foi desenvolvida numa época em que o uso de aditivos plastificantes e/ou

superplastificantes era incipiente ou não tinha começado praticamente. Portanto não deve resultar estranho o fato de que esses métodos omitam referências específicas e/ou orientações quanto ao uso e o proporcionamento dos aditivos. Por outro lado, o método da EPUSP/IPT e a versão original do método do ACI 211.1-81 (fonte básica do método da ABCP) fazem referência ao uso de aditivos, pois eles são métodos mais modernos que surgiram numa época em que a utilização destes produtos químicos já estava bastante consolidada. Entretanto a versão do método da ABCP, apresentada no trabalho “Parâmetros de Dosagem do Concreto” (RODRIGUES, 1984), não faz referência explícita quanto ao uso de qualquer tipo de aditivo (plastificante, superplastificante ou incorporador de ar).

- Uma questão interessante a observar nos métodos de dosagem estudados é aquela relacionada à composição de diferentes graduações de agregados graúdos. Enquanto o método da ABCP sugere um procedimento empírico com misturas de proporções fixas desses agregados, o método da EPUSP/IPT sugere um procedimento experimental que procura uma mistura de agregados graúdos cujas proporções permitam obter um valor máximo da massa unitária no estado compactado seco. O método do iters (de igual forma que o da SNCF) não apresenta nenhum tipo de orientação quanto à mistura de agregados, e apenas sugere que os agregados a serem usados na dosagem sejam reduzidos a um único agregado graúdo e a um único agregado miúdo “que representem o melhor possível a combinação de materiais” que serão efetivamente empregados na obra. O método do INT é o único método, dos cinco estudados, que permite saber como combinar os agregados disponíveis, ajustando-os às curvas granulométricas ótimas, definidas para cada Dimensão máxima característica do agregado.

- Qualquer que seja o método de dosagem adotado, ele nunca poderá ser considerado como independente da influência do tecnologista que o aplica. Ou seja, em alguns casos (métodos do ITERS, SNCF, EPUSP/IPT) o conhecimento e a experiência do tecnologista poderão influenciar mais fortemente decisões ou escolhas nas sucessivas etapas do método. Em outros casos (ABCP, INT), a experiência e o conhecimento do tecnologista serão decisivos nas etapas iniciais de aplicação e nos processos de ajuste do traço final.

- A escolha de um ou de outro método de dosagem dependerá da familiaridade e do conhecimento que o tecnologista tenha sobre cada procedimento de proporcionamento e da ocasional disponibilidade de tempo e de equipamentos. Na aplicação prática de todos os métodos existirá, numa maior ou menor medida, a influência do tecnologista, que decidirá sobre as proporções dos agregados graúdos e dos agregados miúdos e determinará os teores de argamassa

mais adequados do ponto de vista das necessidades de transporte e acabamento em obra. Características como a exsudação e a coesão da massa de concreto apresentam certas dificuldades para uma avaliação objetiva. Certamente, nestes aspectos, as decisões do tecnologista terão influência marcante quanto ao tipo e maneira de efetuar as correções necessárias. A questão da utilização de aditivos, quanto ao tipo e teor a serem empregados, constitui um problema onde, mais uma vez, podem intervir de forma combinada a experiência, o conhecimento e a subjetividade do profissional encarregado da dosagem. Neste aspecto, a grande diversidade de aditivos disponíveis comercialmente e, especialmente, as significativas diferenças de desempenho existentes entre eles, podem ser fatores complicadores dos processos de dosagem. Os aditivos podem causar importantes alterações na reologia do concreto fresco e, em certos casos, podem provocar efeitos adversos nas propriedades do concreto endurecido.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA A ESCOLHA DE MÉTODOS DE DOSAGEM EM FUNÇÃO DE SITUAÇÕES PARTICULARES OU DE UM CONTEXTO ESPECÍFICO

O estudo teórico das propostas de dosagem estudadas permite apresentar algumas orientações ou recomendações que podem ser úteis, na seleção de uso dos métodos, em situações particulares:

- Quando se procura o máximo rendimento do cimento e busca-se a maior economia dos traços, para determinada resistência pré-fixada, justifica-se o emprego dos métodos de dosagem mais complexos e trabalhosos, do ponto de vista experimental, como são, o método da SNCF/Vallette e o método do ITERS/Petrucci. Estes métodos, que demandam um maior investimento em equipamentos e trabalho de laboratório, fornecerão respostas finais mais econômicas, especialmente quando se trata da determinação de concretos que serão empregados em larga escala, onde, pequenas economias de cimento por metro cúbico geram margens de lucro significativas na produção de grandes volumes. Também é importante destacar que o emprego destes métodos, para a obtenção de soluções ajustadas a materiais determinados, justifica-se quando é possível garantir um bom controle das condições de produção e pode-se esperar uma certa constância das características dos materiais empregados. Os métodos da SNCF/Vallette e do ITERS/Petrucci permitem, durante seu desenvolvimento, a obtenção e a comparação de traços com mínimos teores de argamassa (α %) e mínimas relações água/materiais secos (H %) e podem ser usados com vantagens quando os materiais disponíveis não são conhecidos ou não apresentam as características adequadas para a aplicação dos métodos da ABCP ou do INT;

- Quando se procura dosar concretos com consumos preestabelecidos de cimento ou se prioriza a obtenção de mínimos consumos de pasta e de argamassa, o método da SNCF parece ser o mais indicado, embora seja trabalhoso e requeira uma cuidadosa caracterização prévia dos materiais;
- Quando os agregados disponíveis apresentem características similares às consideradas pelos respectivos métodos e não se pretenda investir muitas horas de trabalho e/ou empregar equipamentos específicos para ensaios laboratoriais, pode ser interessante a utilização dos métodos da ABCP ou do INT para a determinação de um traço inicial com relação água/cimento prefixada. As soluções apresentadas pelos métodos, provavelmente, não serão as ótimas, mas possibilitarão uma solução inicial que poderá ir sendo ajustada no decorrer do tempo, a partir dos requerimentos de trabalhabilidade da obra e em função do controle tecnológico que venha a ser implementado;
- Quando os materiais disponíveis não se enquadrem nos métodos anteriores e não se disponha de grandes recursos laboratoriais nem de muito tempo para avaliar diferentes alternativas e misturas de concreto, o método da EPUSP/IPT pode ser empregado com eficácia para determinar rapidamente e de forma experimental traços com teores de argamassa e características de trabalhabilidade adequadas às necessidades de obra.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para o desenvolvimento de futuras pesquisas sugerem-se as seguintes idéias de trabalho:

- a) Devem ser levantados, pesquisados e desenvolvidos procedimentos teóricos ou laboratoriais que possibilitem a obtenção de composições granulométricas de agregados que gerem misturas de concreto fáceis de trabalhar e compactar com uma mínima demanda de pasta de cimento. Recomendações e orientações claras neste sentido podem ajudar a melhorar as características e propriedades das misturas obtidas pelos métodos estudados neste trabalho.
- b) Adotar os critérios desenvolvidos e aplicados nos capítulos 4 e 6 para comparar outros métodos de dosagem e ampliar o número de itens considerados de forma a poder simplificar as decisões quanto às possibilidades e oportunidades de uso de qualquer procedimento de proporcionamento que venha a ser estudado. Na medida em que novos métodos possam ser avaliados e plenamente entendidos, eles podem contribuir para o desenvolvimento de um método mais objetivo e mais completo de dosagem.
- c) Realizar estudos comparativos entre métodos de dosagem desenvolvidos para outras finalidades específicas, como, por exemplo: dosagem de concreto massa, dosagem de concretos bombeáveis de consistência fluída e dosagem de concretos leves, entre outros. Espera-se que futuros trabalhos possam continuar e aprofundar esta linha de pesquisa de forma a gerar subsídios básicos para a integração de outros métodos existentes e para o eventual desenvolvimento de métodos de dosagem mais eficazes. Destaca-se, neste aspecto, que o sistema normativo brasileiro, a diferença do sistema norte-americano e do sistema inglês, que possuem normas de dosagem de concretos desde 1936 e 1947, respectivamente, está carente de orientações específicas que contribuam para ordenar e simplificar o trabalho de engenheiros e técnicos. O desenvolvimento de novos métodos e/ou o aperfeiçoamento de métodos nacionais, já existentes, podem permitir a obtenção, de forma rápida e segura, de concretos que devem satisfazer características de desempenho cada vez mais rigorosas, com resistências e exigências de durabilidade cada vez maiores.

REFERÊNCIAS

- ABRAMS, D. A. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1918. Bulletin 1.
- ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; CANOVAS, M. F. Composición y dosificación de hormigones de alta resistencia. **Cemento e Hormigón**, n. 709, p. 971 - 990, ago. 1992.
- ALEXANDERSON, J. The influence of the properties of cement and aggregate on the consistence of concrete. Fresh Concrete: Important properties and their measurement. In: SEMINAR RILEM, 22nd - 24th March 1973, Leeds, **Proceedings...** Leeds: The University, 1973. V. 2 , pp. 3.2-1 to 3.2-16.
- ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, Porto Alegre.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116 R-90: Cement and concrete terminology**: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1994b. Part 1: materials and general properties of concrete.
- **ACI 309 R-87: Guide for consolidation of concrete**: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1994c. Part 2: construction and inspection pavements.
- **Guide to durable concrete**: reported by ACI Comité 201.2R: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1991. Part 1.
- **ACI 211.1-81: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete**: ACI manual of concrete practice. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988). Part 1: materials and general properties of concrete.
- **ACI 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete**: ACI manual of concrete practice. Detroit, Michigan, 1994a. Part 1: materials and general properties of concrete.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125**. Philadelphia, 1993.
- ARAÚJO, P. S. S.; MARCIANO, Z. A. N. **Método de Lobo Carneiro**. São Paulo: EPUSP, 1988. Trabalho apresentado na disciplina: Estrutura Interna e Dosagem de Concreto.
- ARREDONDO, F. (Comp). **Manuales y normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento**: Dosificación de Hormigones. 3ª ed., Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1969.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Reunião do GLA-RILEM**: Práticas Correntes de Dosagem de Concreto nos Países Latino-americanos, Santiago de Chile, 8 a 11 de set. de 1965. São Paulo, 1965.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994b.
- **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994a.

- **NBR 5742:** Cimento Portland - análise química de cimento Portland: processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 1976.
- **NBR 5743:** Cimento Portland - determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989b.
- **NBR 5744:** Cimento Portland - determinação de enxofre na forma de Sulfeto. Rio de Janeiro, 1991c.
- **NBR 5746:** Cimento Portland - determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989c.
- **NBR 5747:** Cimento Portland - determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989d.
- **NBR 6118:** Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1980.
- **NBR 7211:** Agregado para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 1983a.
- **NBR 7215:** Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- **NBR 7217:** Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987a.
- **NBR 7223:** Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1982a.
- **NBR 7227:** Cimento Portland - determinação de óxido de Cálcio livre pelo Etileno-glicol. Rio de Janeiro, 1990.
- **NBR 7251:** Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982c.
- **NBR 7809:** Agregado graúdo - determinação do índice formado pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1982b.
- **NBR 7810:** Agregado em estado compactado seco - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983b.
- **NBR 8522:** Concreto - determinação do Módulo de deformação estática e diagrama de tensão – deformação. Rio de Janeiro, 1983c.
- **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.
- **NBR 9204:** Concreto endurecido - determinação da resistividade elétrica volumétrica. Rio de Janeiro, 1985.
- **NBR 9776:** Agregados - determinação da massa específica de agregado miúdo por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987d.
- **NBR 9777:** Agregados - determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987c.
- **NBR 9833:** Concreto fresco - determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987b.

- **NBR 9937:** Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987e.
- **NBR 10786:** Concreto endurecido - determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989a.
- **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991a.
- **NBR 11580:** Cimento Portland: determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1991b.
- **NBR 12655:** Preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro, 1996a.
- **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1998c.
- **NBR NM 47:** Concreto fresco - determinação do teor de ar pelo método pressométrico. Rio de Janeiro, 1998e.
- **NBR NM 67:** Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998a.
- **NBR NM 68:** Concreto - determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998b.
- **NBR NM 76:** Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998d.
- BASÍLIO, F. A. **Considerações Gerais sobre a Dosagem do Concreto.** In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, maio de 1977, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1977.
- **Tecnologia avançada de dosagem de concretos: Método da ABCP.** In: “Curso de tecnologia avançada de concreto”. Brasília: Ministério de Ciência e Tecnologia – INT, 1968.
- BAUER, L. A. F. **Controle de qualidade do concreto.** In: DEZ ANOS DE SIMPACTON: 1978 -1987, Campinas. São Paulo: Pini, 1988.
- BOGGIO, A.; BORGES, A. **Dosagem de Concretos: Método do Prof. Lobo Carneiro e método do ACI.** Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 1989.
- BOGGIO, A.; SILVA, M. F. S.; FORMOSO, C. T. Qualidade em estruturas de concreto: Recomendações para implantação de uma correta tecnologia através de treinamento. In: REIBRAC, 36.,19 a 23 de setembro de 1994, Porto Alegre. **Anais....** São Paulo: IBRACON, 1994.
- BUARQUE DE HOLANDA FERREIRA, A.. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa.** 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986.
- BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c.** São Paulo: ABCP, 1989.
- **Método de Dosagem de Concreto para Pavimentos.** ET-73 – ABCP. São Paulo: ABCP, 1984.
- BUCHER, H. R. E.; RODRIGUES, P. P. F. **Correlações entre as Resistências Mecânicas do Concreto.** In: SEMINÁRIO SOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO, 1983, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1983.

- CAMARGO, W. M. Fixação na dosagem das propriedades finais dos concretos: correlação entre as propriedades da composição do concreto fresco e das propriedades tecnológicas do concreto endurecido. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, 1977, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1977.
- CANNON, R. W. Optimization of concrete mix proportioning using reduced factorial experimental technique. **ACI Materials Journal**, p. 569 - 576, nov./dec. 1987.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **High Performance concrete. State of the art report.** Bulletin d'information, London, n. 197, 1990.
- CORMON, P. **Fabricación del hormigón.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1979.
- CREMONINI, R. A. **Análise de estruturas acabadas:** contribuição para a determinação da relação entre as resistências potencial e efetiva do concreto. 1994. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo.
- DAFICO, D. A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland.** 1997. Dissertação (Mestrado). UFSC, Florianópolis.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica.** 1995. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo.
- DAY, K. W. **Concrete mix design: Quality Control and specification.** London: E & FN Spon, 1995.
- DEWAR, J. D. The workability of ready mixed concrete. Fresh Concrete: Important properties and their measurement. In: SEMINAR RILEM 22nd - 24th March 1973, Leeds. **Proceedings...** Leeds: The University, 1973. v.3 p. 7.6-1 to 7.6-30.
- DJANIKIAN, J. G. **Método de Roger Vallette para Dosagem de Concreto: uma experiência prática. Aplicação do Método de Roger Vallette no Sifão do Rio Pinheiros.** São Paulo, IBRACON, 1980.
- DRAFFIN, J. O. A brief history of lime, cement, concrete and reinforced concrete. **Journal of the Western Society of Engineers**, Chicago, v. 48, n. 1, p. 14-47, mar. 1943.
- EQUIPE DE FURNAS. Laboratório de concreto. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo:** ensaio e propriedades. São Paulo: Pini, 1997.
- ESPER, M. W.; MESSAROS, R. M. **Estudo do método de dosagem ACI/ABCP.** São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e de Construção Civil, 1998.
- FIGUEIREDO, E. et al. **Método de Dosagem Lobo Carneiro.** São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e de Construção Civil, 1990.
- FORONI, V. H. **O importante é dar o primeiro passo.** Programa de recuperação de mão-de-obra na construção. Método Engenharia, [s. d.]
- GIAMMUSSO, S. E. **Concreto Bombeado.** ET – 63. São Paulo: ABCP, 1987.
- **Dosagem do Concreto.** A Construção na Região Sul, n 248, junho / 1989.
- **Preparo do concreto** ET – 42. São Paulo: ABCP, 1995.

- GLANVILLE, W. H.; COLLINS, A. R.; MATTHEWS, D. **The grading of aggregates and workability of concrete**. London, Dept. of Scientific and Industrial Research, 1954. 38p. (Technical Paper n° 5).
- HELENE, P. R. L. **Contribuição para o estabelecimento de parâmetros para a dosagem e controle de concretos de cimento Portland**. 1987. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 1987.
- **Controle da qualidade na indústria da construção civil**. A Construção na Região Sul, n. 250, agosto / 1989.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: PINI, 1992.
- HUMMEL, A. **Prontuário del Hormigón: hormigones normales, hormigones ligeros**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1966.
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. **Durabilidad del Concreto (ACI- 201)**. México, Editorial LIMUSA, 1989.
- KAPLAN, M. F. The effects of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, n.29, aug. 1958.
- KASMATKA, S. H.; PANARESE W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 13° ed., Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 1988. 205 p.
- LEA, F.; DESCH, C. **The chemistry of cement and concrete**. London, Arnold, 1956. 637 p.
- LEGRAND, C. **Estudio reológico y mecánico del concreto fresco**. Caracas, Asociación Venezolana de productores de Cemento, 1975. p. 95-115.
- LOBO CARNEIRO, F. L. **Dosagem de Concretos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1953.
- **Dosagem de concretos plásticos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1937.
- 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.
- MALHOTRA, V. M. Trabajabilidad del concreto. **Revista IMCYC**, México, 7 (39): 8 -24, jul./ago., 1987.
- MALTZ, E. L. **O concreto para barragens de gravidade**. Publicação da palestra proferida na 2ª reunião de dirigentes do DNOS. Porto Alegre, 1955.
- MEHTA, P. K. Advancements in concrete technology. **Concrete International**, v. 21, n. 6, p. 69-6, june. 1999.
- **Concrete: structure, properties, and materials**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1986.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- MEKBEKIAN, G. et al. **Dosagem de concreto: Método ACI**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, junho 1990. Trabalho apresentado na Disciplina PCC.739 - "Estrutura Interna e Dosagem dos Concretos de Cimento Portland" .

- MESEGUER, Á. G. **Controle e garantia da qualidade na construção**. São Paulo: SINDUSCON, Projeto/ PW, 1991.
- MONTEIRO, P. J. M.; HELENE, P. R. L.; KANG, S. H. Designing concrete mixes for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. **Materials and Structures**, v. 26, 1993.
- MURATA, J.; KIKUKAWA, H. Studies on rheological analysis of fresh concrete. Fresh concrete: Important properties and their measurement. In: SEMINAR RILEM, 22nd - 24th March 1973, Leeds. **Proceedings...** Leeds: The University, 1973. V.1, pp. 1.2-1 to 1.2-33.
- MURDOCK, L. J. The workability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v.12, n. 36, 1960.
- NASCIMENTO A. A., AGUILLAR FILHO, D.; PIZA, E. **René Feret**. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Junho/1990. Trabalho apresentado na Disciplina PCC.739-"Estrutura Interna e Dosagem dos Concretos de Cimento Portland" .
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto** 2ª ed. rev. São Paulo: PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. London: Longman Scientific & Technical, 1987.
- PAULON, V. A. **Execução de concretos duráveis**. ET – 84. São Paulo: ABCP, 1986.
- PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. M. **Estudo da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. Boletim Técnico PCC 43, v.55, n. 5, p. 193 – 210, maio 1995.
- PETRUCCI, E. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. rev. São Paulo: Globo, 1995.
- **Dosagem de concretos de cimento: Prática corrente no Rio Grande do Sul, Brasil**. In: BASÍLIO, F. A. Anexo aos apontamentos para a reunião GLA – RILEM, Chile, 1965.
- POPOVICS, S. The use of the fineness modulus for the grading evaluation of aggregates for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 18, n. 56, p. 131-140, sep. 1966.
- POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- **Studies of workability of concrete**. **Journal of the American Concrete Institute**, n.28, p. 419-448, 1932.
- **The physical structure and engineering properties of concrete**. (Research and Development Laboratories, Bull. n. 90). Chicago, PCA, 1958. 28p.
- PREVIATO, S. A. P. **Aspectos do controle tecnológico da dosagem do concreto massa**. 1986. Dissertação (Mestrado) EPUSP, São Paulo.
- PRISZKULNIK, S. **Aspectos reológicos do cimento fresco e sua dosagem: Métodos ACI e ITES**. In: COLÓQUIO DE DOSAGEM DE CIMENTO, maio de 1977, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1977.
- RAABE, A. L.; BONIN, L. C. **Qualificação de agregados para concretos e argamassas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 1995. Relatório de Pesquisa.
- RAABE, A. L., KAZMIERCZAK, C. S., CASSAL, S. B. **Dosagem de Concretos pelos Métodos de Fuller e Petrucci**. Porto Alegre. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil,

NORIE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Out. 1989. Trabalho apresentado na disciplina “Estrutura interna e dosagem dos concretos de cimento Portland”

RAINHA, V. K. **Concrete for Construction: facts and practice**. New Delhi: Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited. 1988. 301 p.

RECENA, F. A. P. **Curso de dosagem e patologia do concreto**. Apostilas.[s.d.].

----- **Dosagem empírica do concreto**. Boletim técnico CIENTEC, Porto Alegre, n.11, abr. 1989.

ROAD RESEARCH LABORATORY. **The grading of aggregates and workability of concrete**. Paper nº 5 - 2nd Edition , 1963.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET - 67. São Paulo: ABCP, 1990.

RODRIGUES FILHO; DIAS, P. H.; DUCATTI, V. A. **A dosagem do concreto pelo método de Ary Frederico Torres**. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, Programa de Pós-Graduação, 1988. Trabalho apresentado na disciplina “Estrutura Interna e Dosagem de Concretos”.

SAAD, M. N. A.; OLIVEIRA, P. J. R.; SALLES, F. M. **A influência de alguns parâmetros sobre a resistência do concreto**. In: SEMINÁRIO SOBRE CONTROLE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO, 27 de Junho a 2 de Julho de 1983, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1983. R3. 14 p.

SANTOS BASÍLIO, E. **Agregados para concreto**. São Paulo: ABCP, 1977.

----- **Dosagem de concretos especiais**. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, maio de 1977, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1977.

SCARDOELLI, L. S. et al. **Melhorias de qualidade e produtividade: iniciativas das empresas de construção civil**. Porto Alegre: Programa de Qualidade e Produtividade da Construção Civil no Rio Grande do Sul, 1994.

SILVA, L. F. **Dosagem do concreto segundo o Método Roger Vallette**. 1977. Dissertação (Mestrado). 52 p. Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Planejamento, São Carlos.

SILVA, M. F. S. **Organização da formação profissional da mão-de-obra operária em empresas de construção**. In: SEMINÁRIO: QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., outubro de 1994, Porto Alegre. p. 149 – 168.

SILVA, P. F. A.; MARCIANO, Z. A. N. **Estrutura Interna e Dosagem dos Concretos de Cimento Portland “Lobo Carneiro”**. São Paulo: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, 1º sem. 1988.

SOBRAL, H. S. **Dosagem experimental dos concretos ET-23**. 2º ed. rev. atual. São Paulo, ABCP, 1979.

----- **Durabilidade dos concretos ET – 43**. São Paulo: ABCP, 1990.

----- **A generalização das técnicas de dosagem (Método de Powers)**. In: COLÓQUIO DE DOSAGEM DE CONCRETO, maio de 1977, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1977.

----- **Propriedades do concreto fresco ET-15**. São Paulo: ABCP, 1996.

- . **Propriedades do concreto fresco.** In: DEZ ANOS DE SIMPATCON: 1978-1987, 1988, Concrelix, Campinas. São Paulo: PINI, 1988.
- . **Reologia e trabalhabilidade dos concretos.ET – 62.** rev. atual. São Paulo: ABCP, 1990.
- . **Resistência mecânica e deformações do concreto ET-56.** São Paulo: ABCP, 1983.
- SOUZA, R. de et al. **Sistema de gestão de qualidade para empresas construtoras.** São Paulo: Centro de Tecnologia de Edificações/PINI/SINDUSCON, 1995.
- SPIEGEL, M. R. **Estadística.** Cali, Colombia: Libros McGraw-Hill, 1975.
- TANGO, C. E. S. **Contribuição ao estudo da resistência à compressão de cimentos e concretos.** 1983. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Construção Civil, São Paulo, 1977.
- . **Mistura sem Mistério.** Revista Técnica, n.4, maio/jun. 1993.
- TARTUCE, R.; GIOVANNETTI, E. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland.** São Paulo: PINI/ IBRACON, 1990.
- TATTERSALL, G. H. **The Workability of Concrete:** a view point publication. London: Cement and Concrete Association, 1978.
- TATTERSALL, G. H.; TERZIAN, P. R. **Exigências Básicas na Produção e Aplicação do Concreto em Estruturas. ET- 6.** São Paulo: ABCP, 1990. 88 p.
- TORRES, A. F. **Introdução ao estudo da dosagem racional do concreto.** São Paulo, ABCP, 1956. 68 p.
- TORRES, A. F.; ROSMAN, C. E. E. **Método para dosagem racional dos concretos.** São Paulo, ABCP, 1956. 69 p.
- TROXELL, G. E.; DAVIS, H. E. **Composition and properties of concrete.** New York: Mc Graw-Hill, 1956. 434 p.
- URIARTT, A. **Prática de dosagem dos concretos.** Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Materiais, 1985. Apostilas da Disciplina “Materiais de Construção”.
- VALLETTE, R. **Composition des Bétons:** mise au point de la question. Centre d’études e de recherche de L’industrie des Ligants Hydraulics, Publication Technique, n. 13, Mars. 1949.
- VALLETTE, R., **Manuel de Composition des betons:** methode expérimentale Vallette. Paris, Editions Eyrolles, 3ª ed. 1963.
- VASCONCELLOS, J. M. C. **Fundamentos da dosagem racional dos concretos.** Palestra proferida durante a sessão de instalação da Seção regional de Pernambuco do IBRACON em 30/11/ 1977, em São Paulo.
- VERÇOSA, E. J. **Apostilas para a prática de laboratório de materiais de construção civil.** Porto Alegre: Escola Politécnica da PUCRS, 1994.
- . **Dosagem de concreto, Apostilas da PUCRS.** Porto Alegre: Escola Politécnica da PUCRS, 1986.
- VERDÚ, F. **Dosificación de Hormigones.** Madrid, Inst. Técnico Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1965.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela 46: análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	p
Intercept	33073,93	1	33073,93	11096,15	0,000000
método	26,31	4	6,58	2,21	0,085545
a/c	2912,37	3	970,79	325,70	0,000000
método x a/c	67,94	12	5,66	1,90	0,064309
Erro	119,23	40	2,98		

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

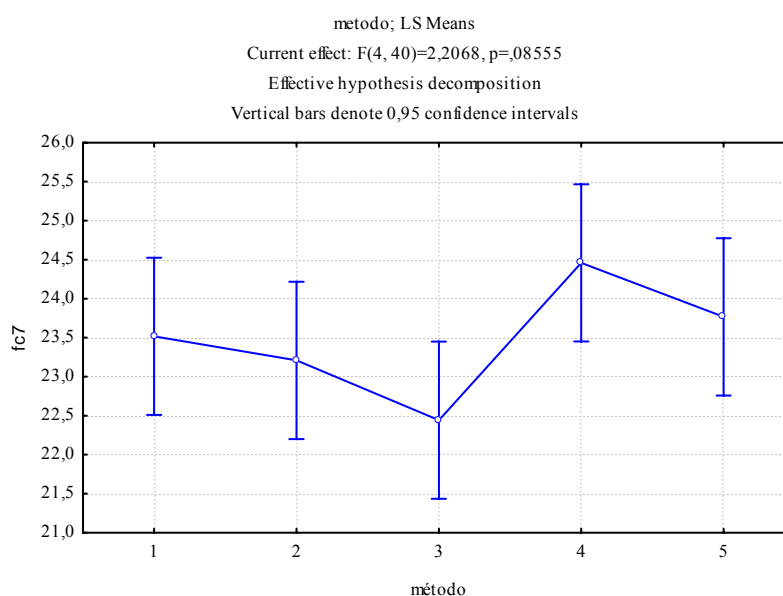


Figura 31: gráfico da ANOVA para a resistência à compressão aos 7 dias

Tabela 47: análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	p
Intercept	50291,94	1	50291,94	12678,64	0,000000
método	38,61	4	9,65	2,43	0,063070
a/c	3956,45	3	1318,82	332,47	0,000000
método x a/c	50,14	12	4,18	1,05	0,422594
Erro	158,67	40	3,97		

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

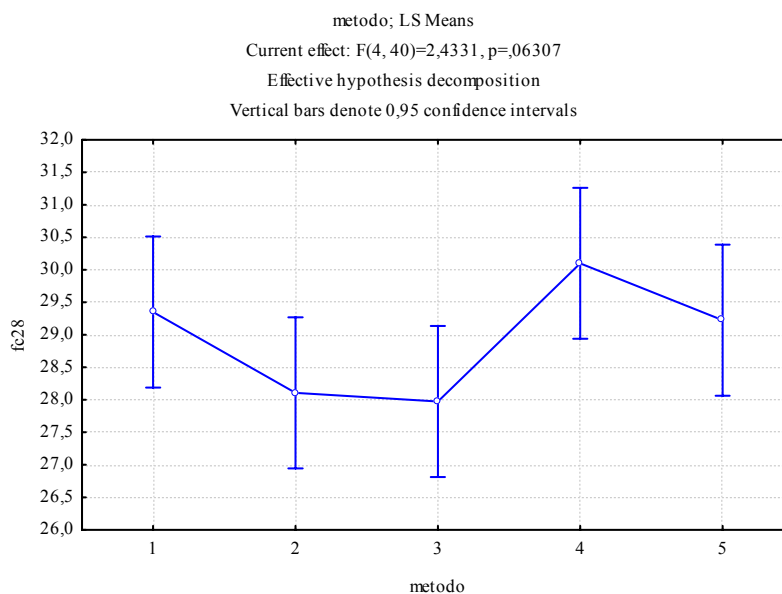


Figura 32: gráfico da ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias

Tabela 48: análise de variância dos resultados do consumo de cimento

	SQ	GDL	MQ	Teste F	p
Intercept	5634328	1	5634328	774558,0	0,000000
método	626	4	157	21,5	0,000000
a/c	248596	3	82865	11391,6	0,000000
Erro	378	52	7		

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

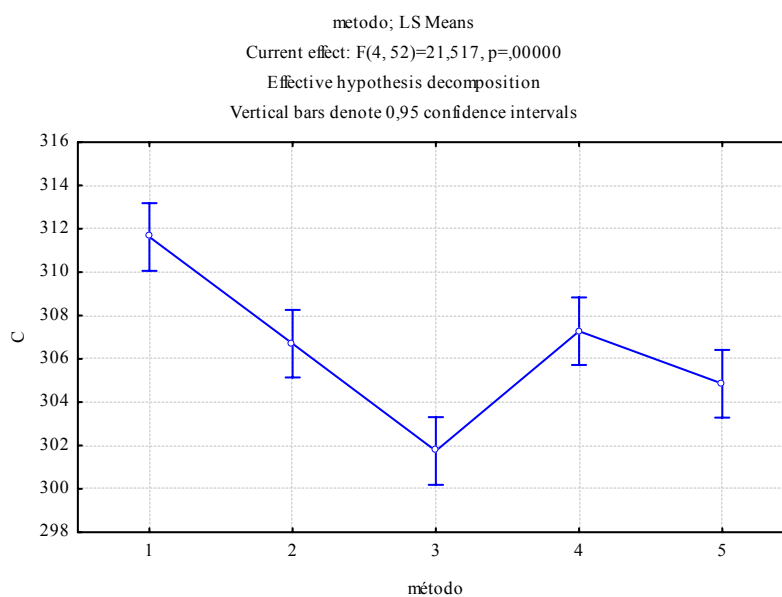


Figura 33: gráfico da ANOVA para o consumo de cimento