

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM PARA
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Martha Figueiredo Alves

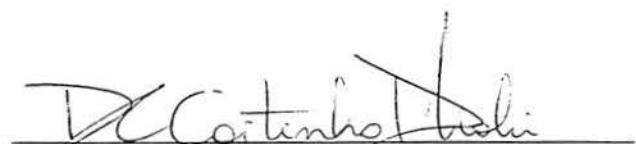
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
Abril 2000

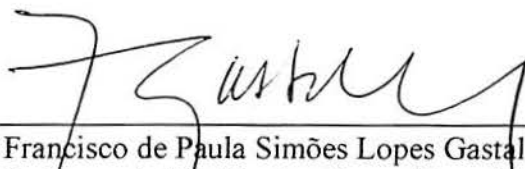
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Prof. Ruy Alberto Cremonini
Dr. pela Universidade de São Paulo
Orientador



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



Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Berenice Toralles Carbonari (UEL)
Dr.ª. pela Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

Geraldo Cechella Isaia (UFSM)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Maria Luiza Cañas Martins (UCPEL)
Dr.ª. pela Universidad Politècnica de Madrid, Espanha

Aos meus pais Volnei e Gilca,
pelo amor incondicional

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo conforto de saber que Ele existe.

Aos meus pais Volnei e Gilca, por terem sempre acreditado na minha capacidade, e as minhas irmãs Débora e Lúcia, que junto com eles criaram um ambiente de paz, tranquilidade e amor. Agradeço ainda o interesse e a importância que eles deram a este trabalho, valorizando-o tanto quanto eu.

À prof^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin, por ter lançado a idéia original desta pesquisa, por ter dividido comigo seu vasto conhecimento técnico, pelo incentivo, amizade e responsabilidade com que orientou esta pesquisa.

Ao prof. Ruy Alberto Cremonini, por ter orientado esta pesquisa com extrema sabedoria e seriedade, incentivando o meu aprendizado e estimulando a minha curiosidade. Agradeço ainda seu constante entusiasmo e dedicação, além da paciência e da amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, sob forma de bolsa de estudo, durante a realização desta pesquisa.

Às empresas Camargo Corrêa Cimentos S.A. e Fosroc do Brasil pela generosa doação do material utilizado no programa experimental.

Aos técnicos, funcionários e amigos do LEME - Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, pela colaboração e seriedade com que participaram desta pesquisa.

Aos amigos, colegas, professores e funcionários do NORIE, pela amizade, convivência, companheirismo e apoio durante esta jornada.

Às amigas e colegas Alessandra Brito, Graziella Oliari e Jocelise Jacques, pela amizade sincera, pelo constante incentivo e pelas inúmeras horas de conversas compartilhadas.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	3
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	4
2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	6
2.1 HISTÓRICO	6
2.2 DEFINIÇÃO.....	7
2.3 UTILIZAÇÃO.....	8
2.4 ESTRUTURA DO CONCRETO	10
2.4.1 Fase esqueleto granular ou agregado.....	11
2.4.2 Pasta de cimento hidratada.....	11
2.4.3. Zona de transição	13
2.5 SELEÇÃO DE MATERIAIS	14
2.5.1 Cimento Portland	15
2.5.2 Agregados	18
2.5.2.1 Agregado graúdo.....	18
2.5.2.2 Agregado miúdo.....	19
2.5.3 Água.....	20
2.5.4 Adições minerais.....	20
2.5.5 Aditivos químicos.....	22
2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO	24
2.6.1 Propriedades no estado fresco.....	24
2.6.2 Propriedades no estado endurecido.....	27
3 MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO.....	31
3.1 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO CONVENCIONAL	31
3.1.1 Método ACI/ABCP (Rodrigues, 1995)	32
3.1.2 Método IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992)	35
3.2 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	38
3.2.1 Métodos baseados no critério do volume absoluto.....	38
3.2.1.1 Método Nawy (1996).....	38
3.2.1.2 Método Aitcin (1998).....	40
3.2.2 Métodos baseados na otimização do esqueleto granular.....	42
3.2.2.1 Método Mehta e Aitcin (1990b)	43
3.2.2.2 Método de Larrard (1990).....	45
3.2.2.3 Método Domone e Soutsos (1994)	48
3.2.2.4 Método Toralles Carbonari (1996)	50
3.2.2.5 Método O'Reilly Díaz (1998)	52
4 METODOLOGIA.....	54
4.1 ESCOLHA DOS MÉTODOS DE DOSAGEM	54
4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55
4.2.1 Cimento Portland	55
4.2.2 Agregado graúdo	56
4.2.3 Agregado miúdo.....	57
4.2.4 Adição mineral	57
4.2.5 Aditivo químico.....	58
4.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	58
4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM	59
4.4.1 Método IPT/EPUSP.....	59
4.4.1.1 Concreto-piloto.....	60

4.4.1.2 Concreto de Alta Resistência (1ª etapa).....	62
4.4.1.2.1 Produção do concreto.....	62
4.4.1.2.2 Apresentação dos resultados.....	64
4.4.1.3 Concreto de Alta Resistência (2ª etapa).....	67
4.4.1.3.1 Produção do concreto.....	67
4.4.1.3.2 Apresentação dos resultados.....	69
4.4.2 Método Mehta/Aitcin.....	71
4.4.2.1 Determinação dos traços e quantidades de material.....	71
4.4.2.2 Produção do Concreto de Alta Resistência.....	73
4.4.2.3 Apresentação dos resultados.....	75
4.4.3 Método Toralles Carbonari.....	76
4.4.3.1 Ensaios preliminares e otimização das misturas de concreto.....	76
4.4.3.2 Produção do Concreto de Alta Resistência.....	83
4.4.3.3 Apresentação dos resultados.....	85
4.4.4 Método Aitcin.....	86
4.4.4.1 Ensaios preliminares e otimização das misturas de concreto.....	86
4.4.4.2 Produção do Concreto de Alta Resistência.....	89
4.4.4.3 Apresentação dos resultados.....	90
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	93
5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	93
5.1.1 Análise da normalidade.....	93
5.1.1.1 Valores médios.....	94
5.1.1.1.1 Valores espúrios.....	98
5.1.1.2 Valores potenciais.....	99
5.1.1.2.1 Valores espúrios.....	102
5.1.2 Provas de significância.....	103
5.2 ANÁLISE TÉCNICA DOS RESULTADOS.....	104
5.2.1 Método IPT/EPUSP.....	104
5.2.1.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão.....	104
5.2.1.1.1 Valores médios.....	104
5.2.1.1.2 Valores potenciais.....	106
5.2.1.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (ft/fc).....	108
5.2.1.2.1 Valores médios e potenciais.....	108
5.2.1.3 Consumo de material por m ³ de concreto.....	110
5.2.1.4 Custos.....	111
5.2.2 Método Mehta/Aitcin.....	112
5.2.2.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão.....	112
5.2.2.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (ft/fc).....	113
5.2.2.3 Consumo de material por m ³ de concreto.....	115
5.2.2.4 Custos.....	116
5.2.3 Método Toralles Carbonari.....	116
5.2.3.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão.....	116
5.2.3.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (ft/fc).....	118
5.2.3.3 Consumo de material por m ³ de concreto.....	119
5.2.3.4 Custos.....	120
5.2.4 Método Aitcin.....	120
5.2.4.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão.....	120
5.2.4.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (ft/fc).....	122
5.2.4.3 Consumo de material por m ³ de concreto.....	124
5.2.4.4 Custos.....	124
5.2.5 Comparação entre métodos.....	125
5.2.5.1 Consumo de cimento por m ³ de concreto.....	125
5.2.5.2 Custo do m ³ de concreto.....	127
5.2.5.3 Diagrama de Dosagem.....	129
5.2.5.4 Teores de argamassa e volumes de pasta e esqueleto granular.....	131
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
6.1 CONCLUSÕES.....	133
6.1.1 Conclusões gerais.....	133
6.1.2 Conclusões específicas.....	134
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	135
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Relação de alguns edifícios altos construídos com concreto de alta resistência.....	7
Tabela 2.2	Relação de pontes executadas com concreto de alta resistência.....	9
Tabela 4.1	Caracterização química, física e mecânica do cimento ARI.....	56
Tabela 4.2	Granulometria do agregado graúdo (NBR 7217/87).....	56
Tabela 4.3	Características físicas do agregado graúdo.....	56
Tabela 4.4	Granulometria do agregado miúdo (NBR 7217/87).....	57
Tabela 4.5	Características físicas do agregado miúdo.....	57
Tabela 4.6	Características físicas da sílica ativa.....	57
Tabela 4.7	Características químicas da sílica ativa.....	57
Tabela 4.8	Quantidade de material do concreto-piloto.....	61
Tabela 4.9	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição).....	63
Tabela 4.10	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição).....	63
Tabela 4.11	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (3ª repetição).....	63
Tabela 4.12	Valores de resistência à compressão simples, método IPT/EPUSP.....	65
Tabela 4.13	Valores de resistência à tração por compressão diametral, método IPT/EPUSP.....	66
Tabela 4.14	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição – 2ª tentativa).....	68
Tabela 4.15	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição – 2ª tentativa).....	68
Tabela 4.16	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (3ª repetição – 2ª tentativa).....	69
Tabela 4.17	Valores de resistência à compressão simples, Método IPT/EPUSP, 2ª tentativa.....	70
Tabela 4.18	Valores de resistência à tração por compressão diametral, Método IPT/EPUSP, 2ª tentativa.....	70
Tabela 4.19	Níveis de resistências.....	71
Tabela 4.20	Consumo de água por m ³ , para cada nível de resistência.....	72
Tabela 4.21	Volume fracionado da pasta de cimento para 1 m ³ de concreto.....	72
Tabela 4.22	Volume e proporção de agregados, para 1 m ³ de concreto.....	73
Tabela 4.23	Quantidade de material, em kg/m ³	73
Tabela 4.24	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição).....	74
Tabela 4.25	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição).....	74
Tabela 4.26	Valores de resistência à compressão simples, método Mehta/Aitcin.....	75
Tabela 4.27	Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Mehta/Aitcin.....	76
Tabela 4.28	Valores mínimos de relações a/c para as pastas de cimento.....	77
Tabela 4.29	Massa unitária em estado compactado seco.....	78
Tabela 4.30	Massa unitária e índice de vazios dos esqueletos granulares.....	78
Tabela 4.31	Combinações de pastas e esqueleto granular.....	80
Tabela 4.32	Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P1/E2.....	80
Tabela 4.33	Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P2/E2.....	81
Tabela 4.34	Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P3/E2.....	81
Tabela 4.35	Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P4/E2.....	81
Tabela 4.36	Resultados de resistência à compressão, P1/E2.....	82
Tabela 4.37	Resultados de resistência à compressão, P2/E2.....	82
Tabela 4.38	Resultados de resistência à compressão, P3/E2.....	83
Tabela 4.39	Resultados de resistência à compressão, P4/E2.....	83
Tabela 4.40	Combinações ideais de pastas e esqueleto granular.....	83
Tabela 4.41	Quantidade de material para a produção de CAR, 2ª repetição.....	84
Tabela 4.42	Quantidade de material para a produção de CAR, 3ª repetição.....	84
Tabela 4.43	Valores de resistência à compressão simples, método Toralles Carbonari.....	85
Tabela 4.44	Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Toralles Carbonari.....	85
Tabela 4.45	Níveis de resistências.....	86
Tabela 4.46	Relação água/aglomerante para cada nível de resistência.....	87
Tabela 4.47	Tabela de Dosagem – nível de resistência A.....	88
Tabela 4.48	Tabela de Dosagem – nível de resistência B.....	88
Tabela 4.49	Tabela de Dosagem – nível de resistência C.....	88
Tabela 4.50	Tabela de Dosagem – nível de resistência D.....	89
Tabela 4.51	Tabela de Dosagem – nível de resistência E.....	89
Tabela 4.52	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição).....	90
Tabela 4.53	Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição).....	90
Tabela 4.54	Valores de resistência à compressão simples, método Aitcin.....	91
Tabela 4.55	Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Aitcin.....	92
Tabela 5.1	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método IPT (valores médios).....	95

Tabela 5.2 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Mehta (valores médios) ..	95
Tabela 5.3 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Toralles Carbonari (valores médios).....	96
Tabela 5.4 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Aitcin (valores médios)...	96
Tabela 5.5 Provas de normalidade (valores médios)	97
Tabela 5.6 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das amostras, depois de retirados os valores espúrios (valores médios).....	99
Tabela 5.7 Provas de normalidade, depois de retirados os valores espúrios	99
Tabela 5.8 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método IPT (valores potenciais)	100
Tabela 5.9 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Mehta (valores potenciais).....	100
Tabela 5.10 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Toralles Carbonari (valores potenciais)	100
Tabela 5.11 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Aitcin (valores potenciais)	101
Tabela 5.12 Provas de normalidade (valores potenciais).....	101
Tabela 5.13 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das amostras, depois de retirados os valores espúrios (valores potenciais).....	102
Tabela 5.14 Provas de normalidade, depois de retirados os valores espúrios	102
Tabela 5.15 Modelos de ajustes das curvas f_c X a/c , método IPT.....	105
Tabela 5.16 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT.....	107
Tabela 5.17 Evolução da resistência à compressão com a idade - estimativas baseadas na bibliografia, para cimento CP V-ARI.....	107
Tabela 5.18 Consumo de material por m^3 de concreto, em kg.....	110
Tabela 5.19 Custos - método IPT	111
Tabela 5.20 Modelos de ajustes das curvas f_c X a/c , método Mehta/Aitcin	112
Tabela 5.21 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Mehta/Aitcin	113
Tabela 5.22 Consumo de material por m^3 de concreto, em kg.....	115
Tabela 5.23 Custos - método Mehta/Aitcin	116
Tabela 5.24 Modelos de ajustes das curvas f_c X a/c , método Toralles Carbonari.....	117
Tabela 5.25 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Toralles Carbonari	118
Tabela 5.26 Consumo de material por m^3 de concreto, em kg.....	119
Tabela 5.27 Custos - método Toralles Carbonari	120
Tabela 5.28 Modelos de ajustes das curvas f_c X a/c , método Aitcin.....	121
Tabela 5.29 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Aitcin	122
Tabela 5.30 Consumo de material por m^3 de concreto, em kg.....	124
Tabela 5.31 Custos - método Aitcin.....	125
Tabela 5.32 Comparativo de custos para a faixa de 65 MPa a 80 MPa	128
Tabela 5.33 Teores de argamassa e volumes de pasta e esqueleto dos diversos traços de concreto.....	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Ajuste da curva $a/c \times m$, concreto-piloto.....	61
Figura 5.1 Emprego do papel de probabilidade, amostra A28C	98
Figura 5.2 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT – valores médios	104
Figura 5.3 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método IPT - valores médios.....	105
Figura 5.4 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT – valores potenciais.....	106
Figura 5.5 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método IPT - valores potenciais.....	107
Figura 5.6 Relação f_t/f_c , método IPT – valores médios e potenciais	108
Figura 5.7 Resistência à tração X resistência à compressão, método IPT - valores médios e potenciais	109
Figura 5.8 Consumo de cimento dos diversos traços - método IPT	110
Figura 5.9 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Mehta/Aitcin	112
Figura 5.10 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Mehta/Aitcin	113
Figura 5.11 Relação f_t/f_c , método Mehta/Aitcin.....	114
Figura 5.12 Resistência à tração X resistência à compressão, método Mehta/Aitcin.....	115
Figura 5.13 Consumo de cimento dos diversos traços - método Mehta/Aitcin.....	116
Figura 5.14 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Toralles Carbonari	117
Figura 5.15 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Toralles Carbonari.....	117
Figura 5.16 Relação f_t/f_c , método Toralles Carbonari	118
Figura 5.17 Resistência à tração X resistência à compressão, método Toralles Carbonari.....	119
Figura 5.18 Consumo de cimento dos diversos níveis - método Toralles Carbonari.....	120
Figura 5.19 Evolução da resistência com a idade, método Aitcin.....	121
Figura 5.20 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Aitcin	122
Figura 5.21 Relação f_t/f_c , método Aitcin	123
Figura 5.22 Resistência à tração X resistência à compressão, método Aitcin.....	123
Figura 5.23 Consumo de cimento dos diversos traços - método Aitcin.....	124
Figura 5.24 Consumo de cimento por faixas de resistência à compressão	125
Figura 5.25 Consumo de cimento para o intervalo de resistência à compressão de 55 MPa a 85 MPa.....	126
Figura 5.26 Custo do concreto por faixas de resistência	127
Figura 5.27 Custo do m^3 de concreto para o intervalo de resistência à compressão de 55 MPa a 85 MPa.....	128
Figura 5.28 Diagrama de Dosagem.....	130

RESUMO

A utilização do concreto de alta resistência (CAR) como material de construção tem se intensificado nas últimas décadas devido aos muitos benefícios que ele proporciona, seja no estado fresco seja no estado endurecido. Além de poder ser submetido a tensões mais elevadas, quando comparado ao concreto convencional o CAR apresenta vantagens em termos de custos, tempo de execução, diminuição de seções de peças estruturais e conseqüentes ganhos em área útil, entre outros. Entretanto, principalmente no âmbito nacional, pouca ênfase tem sido dada a métodos de dosagem específicos para CAR, de forma que nos locais onde este material é produzido muitas vezes são utilizados métodos de dosagem para concreto convencional. Esta pesquisa parte da hipótese de que para a produção de concreto de alta resistência, a utilização de métodos de dosagem específicos traz grandes vantagens ao produto final, quando comparados à utilização de métodos de dosagem convencionais. O objetivo principal é produzir CAR por diferentes métodos de dosagem, específicos ou não, de forma que eles possam ser avaliados e comparados do ponto de vista técnico e econômico. Para tal, foram utilizados quatro métodos de dosagem, sendo três específicos para concreto de alta resistência e um para concreto convencional, e o concreto produzido por estes métodos foi submetido aos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. Os resultados finais indicam que, para a produção de concreto de alta resistência, há uma diferença significativa entre a utilização de métodos específicos para CAR e de métodos para concreto convencional, principalmente em termos de consumo de material cimentante por m^3 de concreto e de custos, além de diferenças nos valores de resistência alcançados.

ABSTRACT

The use of high-strength concrete (HSC) has gained wide acceptance in the last decades due to its characteristics both in fresh and hardened states. Among the benefits that the use of HSC brings, when compared to the use of normal concrete, we can list: increase of mechanical strength, reduction in costs, higher speed of execution and reduction in sections of structural elements. Although, once little attention has been paid to its mix proportioning methods, specially in Brazil, HSC ends up being produced according to usual concrete's mix proportioning methods. This research deals with the idea that, in order to make HSC, the use of specific mix proportioning methods brings several advantages to the final product when compared to usual concrete's mix proportioning methods. To prove that, HSC has been produced by four different methods, three of them specially developed for HSC and one developed for usual concrete, and the concrete produced has been submitted to mechanical strength tests. The results indicate that the production of HSC according to specific mix proportioning methods brings important benefits, such as decrease of the amount of cementitious material required to produce concrete and reduction in costs as a consequence, besides the increase in the mechanical strength achieved.

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Nas últimas décadas, o concreto vem sendo largamente utilizado como material de construção, seja em ambientes de agressão moderada, seja em ambientes fortemente agressivos. Isto se deve ao fato dele possuir excelente resistência à água, poder ser moldado numa variedade de formas e tamanhos, e ser mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras do que outros materiais de construção. Para ilustrar tal afirmativa, Mehta e Monteiro (1994) estimam que o consumo mundial de concreto chega a ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano.

Além dos aspectos citados acima, a utilização do concreto enquanto material estrutural é favorecida pelas suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência à compressão, parâmetro muito significativo para os engenheiros projetistas e para os que exercem controle de qualidade. Essa propriedade possui importante dimensão para a caracterização do material, servindo de referência para a sua classificação.

Com o aumento das exigências do mercado quanto ao desempenho estrutural, surgiu a necessidade de produção de concreto com resistências mecânicas maiores do que as do concreto comumente empregado. Aparece, então, o chamado concreto de alta resistência (CAR), que vem ao encontro a essas necessidades, pois pode ser submetido a tensões mais elevadas, trazendo uma série de vantagens estruturais.

Na crescente utilização do CAR em estruturas tais como edifícios altos, plataformas marítimas e pontes, e sua conseqüente competição com outros materiais, como o aço por exemplo, destaca-se o papel do concreto como alternativa eficiente, seja pela redução no gasto de energia, seja pela sua facilidade em ser executado e lançado em obra.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a vantajosa relação custo/benefício do CAR em comparação ao aço, aliada a maior velocidade de execução permitida, fizeram com que boa parte dos edifícios altos antes executados em aço passassem a ser construídos em concreto. Desde que convenientemente dosado, o concreto possui uma das melhores relações custo/resistência mecânica entre os materiais estruturais (Dafico, 1997).

No contexto nacional, pode-se dizer que a produção de concreto de alta resistência aumentou de forma considerável na última década. A falta de conhecimento e tecnologia, entretanto, gerou a necessidade de maiores estudos sobre esse material, daí a realização, em 1996 e 1999 dos 1st e 2nd International Congress on High-Performance Concrete and Quality of Concrete Structures, em Florianópolis, SC e Gramado, RS, respectivamente.

Embora o uso do concreto de alta resistência esteja sendo feito com maior frequência, seus métodos de dosagem, e conseqüente determinação das proporções ideais dos materiais empregados na sua confecção merecem mais estudos.

As dosagens de CAR são geralmente caracterizadas por baixas relações água/aglomerante, altos consumos de cimento, e a presença de vários aditivos, tais como redutores de água (plastificantes e superplastificantes), retardadores de pega, e adições como a sílica ativa (Mehta e Aitcin, 1990a).

O concreto de alta resistência vem sendo produzido utilizando-se métodos de dosagem para concretos convencionais, pois são poucos os métodos de dosagem desenvolvidos especificamente para CAR (Mindess, 1994). Embora atualmente já existam parâmetros e critérios de dosagem, além de alguns métodos e procedimentos específicos para a produção de CAR, os materiais e suas correspondentes proporções ainda são muitas vezes selecionados empiricamente através de extensos testes de laboratório.

Segundo Domone e Soutsos (1994), a otimização das proporções dos materiais é mais difícil de ser feita para o concreto de alta resistência do que para o concreto convencional. Além disso, muitos métodos existentes de dosagem de concreto são baseados em dados e conhecimentos de materiais existentes numa região ou país em especial, e geralmente restringem-se ao cimento Portland, agregados e água. Esses métodos não são adequados para a otimização dos muitos fatores que devem ser considerados para a dosagem de concreto de alta resistência.

O concreto de alta resistência, por normalmente incorporar adições e aditivos, apresenta uma estrutura interna complexa, o que dificulta a utilização e a extrapolação dos métodos clássicos de dosagem, principalmente, devido aos seguintes aspectos: compatibilidade entre o aditivo e o aglomerante, baixa relação água/cimento ou água/aglomerante, e eficácia do aditivo tanto em relação à seqüência de colocação como na perda de propriedades com o tempo (Toralles, 1998).

Segundo Alaejos e Cánovas (1994), existem problemas para a produção de concreto de alta resistência quando utilizam-se métodos de dosagem convencionais, tais como:

- as relações entre resistência característica e resistência média não são válidas porque são baseadas em estudos experimentais de concreto convencional;
- as curvas de relação a/c X resistência obtidas experimentalmente, e nas quais se baseiam alguns métodos de dosagem, foram obtidas para concretos sem aditivos. Acima de 60 MPa, quando geralmente é necessária a utilização de aditivo, não se pode dizer com precisão que relação a/c corresponde a que valor de resistência;
- a consistência desejada (fluida ou líquida), função da forma de lançamento do concreto, só pode ser alcançada com a incorporação de aditivos à mistura;
- as adições também não são levadas em consideração na produção do concreto convencional.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa tem por objetivo geral produzir concreto de alta resistência por diferentes métodos de dosagem de concreto, de forma que eles possam ser avaliados e comparados, do ponto de vista técnico e econômico. Estarão sendo levados em conta requisitos de resistência mecânica, trabalhabilidade, consumo de cimento e custos.

Dentre os objetivos específicos, pretende-se verificar a necessidade dos aditivos superplastificantes na produção de concreto de alta resistência; comparar o consumo de cimento necessário para a produção de CAR pelos diversos métodos de dosagem estudados, e estimar o menor custo possível para a produção de CAR, classificando-o por níveis de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Parte-se da hipótese de que para a produção de CAR, a utilização de métodos de dosagem específicos para concretos de alta resistência traz grandes vantagens ao produto final, quando comparados à utilização de métodos de dosagem convencionais.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, que obedecem a seguinte ordem:

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução à pesquisa, destacando-se sua justificativa e importância, além de seus objetivos, estrutura e limitações.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte sobre concreto de alta resistência, seu histórico, utilização, vantagens e desvantagens, além de aspectos técnicos como materiais constituintes e propriedades mecânicas. Ainda, é referenciado o início da utilização do CAR em estruturas, no Brasil e no mundo.

No capítulo 3 resumem-se alguns dos métodos de dosagem de concreto utilizados atualmente, específicos ou não para concreto de alta resistência. São destacados os princípios básicos de cada método, suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 4 apresenta a metodologia empregada na parte experimental desta pesquisa, começando pela descrição e caracterização dos materiais empregados, tais como cimento Portland, areia, brita, água, aditivo superplastificante e sílica ativa. Apresenta-se, então, o desenvolvimento experimental, a partir da justificativa da escolha dos métodos a serem executados, seguindo-se o planejamento e execução das dosagens pelos métodos selecionados. Neste capítulo, ainda, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência mecânica de cada um dos métodos executados.

No capítulo 5 são analisados e comentados os resultados dos ensaios apresentados anteriormente, no qual também é abordada a análise estatística dos resultados, além de análise de custos e consumo de material por m^3 de concreto.

As conclusões finais constam do capítulo 6, assim como sugestões para futuras pesquisas.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa consta do estudo e execução de concreto de alta resistência por métodos de dosagem diferentes. Depois de realizada uma análise de vários métodos de dosagem, específicos ou não para CAR, foram escolhidos quatro para serem executados, segundo critérios de praticidade, custos, consumo de material e viabilidade técnica.

Dos métodos escolhidos para serem estudados são avaliadas apenas características de resistência mecânica, por serem a ênfase do concreto de alta resistência. No que diz respeito à durabilidade, Mehta (1999) explica que as baixas relações água/cimento empregadas na fabricação do CAR já garantem que requisitos de durabilidade, tais como baixa permeabilidade, estejam sendo considerados.

São realizados ensaios de resistência à compressão simples nas idades de 3, 7 e 28 dias, e de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade. Esses ensaios foram escolhidos pela sua relevância e importância, e pela necessidade de se limitar a pesquisa em função de disponibilidade de tempo, material e recursos humanos. Outros ensaios que não foram realizados nesta pesquisa, tais como ensaio de resistência à tração na flexão, ensaio de módulo de deformação e determinação do coeficiente de Poisson poderão ser desenvolvidos em outras pesquisas nesta área.

Ainda como limitação desta pesquisa pode-se destacar a utilização de adição constante em 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento, e a utilização de um único tipo de aditivo superplastificante. Estas especificações ocorreram em função da necessidade de fixar-se parâmetros, de forma que os resultados obtidos pelos diversos métodos possam ser comparados entre si.

2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

2.1 HISTÓRICO

O desempenho satisfatório das estruturas, a longo prazo, tem se tornado vital para a economia de todas as nações. Neste contexto, o concreto vem sendo o maior provedor de infra-estruturas estáveis e confiáveis, desde as civilizações gregas e romanas (Nawy, 1996).

Enquanto na virada do século XX a resistência à compressão do concreto era em torno de 13,8 MPa (Nawy, 1996), nos anos 50 foram produzidos concretos da ordem de 35 MPa. Gjorv (1994) relata que nos anos 60 concretos na faixa de 40 a 50 MPa eram usados comercialmente. Para ilustrar tal afirmativa, Mehta e Aitcin (1990a) relatam a produção industrial de concretos de 50 MPa, pela primeira vez nos EUA, em 1965, que foram utilizados nos pilares do edifício Lake Point Tower, em Chicago.

Nos anos 70, a resistência do concreto chegava a 60 MPa, sendo que novamente em Chicago, concretos dessa ordem foram utilizados nos pilares dos 28 andares inferiores do edifício Water Tower, que tem um total de 79 andares (Mehta e Aitcin, 1990a).

Nos anos 80, Nova York, Texas, Toronto, Chicago e Seattle sediaram a construção de prédios com estruturas de concreto da ordem de 50, 80, 95, 117 e 120 MPa, respectivamente (Mehta e Aitcin, 1990a).

A Tabela 2.1 ilustra o início da utilização do concreto de alta resistência, apresentando uma relação de alguns edifícios altos que aplicaram CAR na sua estrutura.

Atualmente, concretos com resistência à compressão de até 140 MPa, em corpos-de-prova cilíndricos, são produzidos com frequência nos EUA e Europa, sendo que em alguns laboratórios, concretos de até 315 MPa já foram produzidos de forma experimental, com materiais diferenciados (Nawy, 1996).

Esse grande avanço na tecnologia do concreto ao longo das décadas, assim como o desenvolvimento de novos materiais e componentes surgiu junto com o aumento das necessidades de desempenho e resistência, que já não estavam sendo satisfeitas. A deterioração do material, o mau desempenho das estruturas a longo prazo, a limitação dos

valores de resistência obtidos e a grande demanda de novas formas arquitetônicas aceleraram as pesquisas da microestrutura de pastas e concretos, gerando a necessidade de elaboração de novos códigos e normas.

Tabela 2.1 Relação de alguns edifícios altos construídos com concreto de alta resistência

Edifício	Lugar	Ano	Andares	Resistência (MPa)
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	52
Water Tower Place	Chicago	1975	79	62
River Plaza	Chicago	1976	56	62
Texas Commerce Tower	Houston	1981	75	52
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	69
Grand Arche de la Défense	Paris	1988	--	65
Scotia Plaza Building	Toronto	1988	68	70
Two Union Square	Seattle	1989	58	115
Pacific First Center	Seattle	1989	44	115
Trump Tower	Nova York	--	68	55
One Wacker Place	Chicago	1990	100	80
One Peachtree Center	Atlanta	1991	95	83
Suarez Trade	Salvador	1993	31	60

Fonte: Alaejos e Cánovas, 1992; Dal Molin, 1995; Aitcin, 1998.

2.2 DEFINIÇÃO

O concreto de alta resistência tem sido bastante utilizado nas últimas décadas, ainda que considerado por muitos como material bastante recente. Com a continuidade do seu desenvolvimento, sua classificação tem mudado bastante.

Baseado na resistência à compressão, referida aos 28 dias de idade, o concreto tem sido classificado em diferentes categorias ao longo do tempo. O comitê 363 do ACI (1991, 1998) estabelece 41 MPa (6000 psi) como sendo a linha divisória entre concreto convencional e concreto de alta resistência, embora reconheça que a definição de concreto de alta resistência varia regionalmente: em locais onde concretos de 62 MPa (9000 psi) vêm sendo produzidos comercialmente, é considerado CAR aquele concreto que fique na faixa de 83 a 103 MPa (12000 a 15000 psi), entretanto, em regiões onde o limite máximo da resistência do concreto comercializado normalmente é de 34 MPa (5000 psi), concretos de 62 MPa podem ser considerados de alta resistência.

Domone e Soutsos (1994) definem concreto de alta resistência aquele cuja resistência é igual ou superior a 80 MPa, enquanto que Alaejos e Cánovas (1992) definem como CAR aquele concreto cuja resistência característica à compressão aos 28 dias supere os 45 MPa. O CEB (1990a, 1995) estabelece 50 MPa como limite inferior de resistência à compressão para concreto de alta resistência.

A Norma Brasileira (NBR 8953/92), por sua vez, classifica o concreto em Classes I e II, sendo que a primeira compreende concretos de até 50 MPa e a segunda, concretos com resistência maiores que 50 MPa, podendo ser este valor considerado o limite entre concreto convencional e de alta resistência no Brasil.

Segundo Nawy (1996), concreto de alta resistência é um conceito relativo. Enquanto uma resistência é considerada normal para alguns, pode ser considerada alta resistência para outros.

Como pode-se observar, existem algumas dificuldades na definição de concreto de alta resistência. Variações nas faixas de resistência do concreto devem-se ao fato de que várias pesquisas vêm sendo realizadas e o conhecimento e a utilização dos concretos de alta resistência aumentados.

2.3 UTILIZAÇÃO

Dentre as principais vantagens do concreto de alta resistência em relação ao concreto convencional e também em relação a outros materiais de construção, cabe salientar, quanto a sua utilização, as seguintes:

- diminuição das dimensões das peças estruturais, principalmente dos pilares de edifícios altos, o que aumenta o espaço livre a ser ocupado dos diversos pavimentos, principalmente nos andares mais baixos e mais sobrecarregados, onde as seções transversais são maiores;
- no caso de vigas, utilização de elementos mais esbeltos e de maior comprimento, reduzindo-se o número de vigas necessárias para suportar um determinado esforço;
- redução do peso das estruturas, com conseqüente diminuição da carga nas fundações;
- redução de deformações instantâneas, como conseqüência de um maior módulo de deformação;
- diminuição de deformações a longo prazo, com a redução considerável do fenômeno de fluência;
- aumento da durabilidade das estruturas, por ser uma material menos poroso e permeável, estando assim menos sujeito a agentes agressivos do ambiente;

- considerável redução de custos devido, principalmente, a diminuição das seções das peças estruturais e conseqüente redução na quantidade de metros cúbicos de concreto necessários;
- maior rapidez de execução.

Dentre os vários empregos do CAR deve-se salientar sua utilização em pontes, que é prática bastante comum e merece destaque. Carpenter (apud Dal Molin, 1995) lista como vantagens desta utilização a maior resistência à compressão por unidade de custo, peso e volume; maior módulo de deformação, que é vantajoso quando deflexões controlam o projeto; e maior resistência à tração, que é parâmetro de controle no projeto de elementos de concreto protendido.

Redução do peso próprio e possibilidade de execução de vãos maiores também são outras vantagens do emprego de CAR em pontes. A Tabela 2.2 apresenta algumas pontes executadas com concreto de alta resistência.

Tabela 2.2 Relação de pontes executadas com concreto de alta resistência

Ponte	Lugar	Ano	Resistência (MPa)
Coweman River	Washington	--	48
Willows Bridge	Toronto	1967	41
Tower Road	Washington	1981	55
River Stour	Wimborne	1981	56
Huntington to Proctor	W. Va. to Ohio	1984	55
Annacis	British Columbia	1986	55
Joigny Bridge	Bourgogne	1989	60
Pertuiset	Loire	1990	60
Pasarelas de Barcelona	Barcelona	1991	80
Île de Ré Bridge	França	1988	68
Confederation Bridge	Canadá	1997	69

Fonte: Alaejos e Cánovas, 1992; Dal Molin, 1995; Aitcin, 1998; Langley, 1999

Além dessas utilizações, pode-se encontrar na bibliografia emprego para o CAR nas seguintes estruturas: plataformas marítimas (Haug e Jakobsen, 1990; Alaejos e Cánovas, 1992; Hoff, 1994; Aitcin, 1998), pavimentos rodoviários (Helland, 1990; Balbo, 1999), reatores nucleares (de Larrard et al, 1990), túneis submarinos (Alaejos e Cánovas, 1992) e reparos e recuperação de estruturas (Chorinsky, 1990).

Entretanto, existem alguns inconvenientes na utilização de concreto de alta resistência, que não podem ser deixados de lado. O principal deles está relacionado ao extremo controle, vigilância e rigor durante a produção e lançamento em obra. É preciso que haja pessoal

qualificado para a execução deste concreto e que o seu planejamento seja embasado em grande conhecimento técnico do comportamento deste material.

Como este material não tem ampla aplicação prática se comparado ao concreto convencional, sua utilização ainda possui algumas lacunas, tais como falta de experiência prática e de conhecimento por parte dos seus executores. Essas lacunas muitas vezes desestimulam os construtores, acostumados ao concreto convencional, no momento do emprego de CAR.

Quanto ao aspecto econômico, os altos consumos de cimento, a utilização de aditivos e adições e a necessidade de utilização de materiais de excelente qualidade colaboram para tornar o custo por metro cúbico deste concreto bem mais caro que o do concreto convencional. Porém, a quantidade de material necessário para suportar uma mesma carga é sensivelmente menor ao utilizar-se concreto de alta resistência.

Desta forma, para cada caso deve ser feita uma análise de custos prévia, que indicará a vantagem ou desvantagem econômica desta utilização. Um estudo de viabilidade econômica da utilização de CAR em edifícios altos foi feita por Dal Molin e Wolf (1990, apud Dal Molin, 1995), considerando a realidade brasileira. Este estudo analisou o consumo de concreto, armadura e fôrmas para a estrutura do 3º pavimento de um edifício de 15 andares executado em concreto convencional ($f_{ck} = 21$ MPa) e em concreto de alta resistência ($f_{ck} = 60$ MPa). O custo da estrutura executada com CAR foi 12 por cento inferior ao custo da estrutura com concreto convencional, sem considerar as vantagens relativas ao menor peso nas fundações, a maior área útil, a maior durabilidade e a velocidade de execução.

2.4 ESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto de alta resistência, quando analisado microscopicamente, apresenta três fases bastante distintas. A primeira delas é composta por partículas de agregado de tamanho e formas variadas, também chamada esqueleto granular. A segunda fase é o meio ligante dessas partículas, composta de uma massa contínua de pasta endurecida. E finalmente a terceira fase, chamada de zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas do agregado graúdo e pasta.

2.4.1 Fase esqueleto granular ou agregado

Esta fase é predominantemente responsável pelas propriedades de módulo de deformação, estabilidade dimensional e massa específica do concreto. Das suas características, as que exercem maior influência sobre o concreto são volume, tamanho e distribuição de poros, enquanto que as características químicas e mineralógicas interferem de forma menos significativa no conjunto (Mehta e Monteiro, 1994).

Para a produção de concretos convencionais não é necessária a utilização de agregados extraordinariamente resistentes, pois sabe-se que o elo fraco do conjunto é a zona de transição. Em se tratando de concreto de alta resistência, porém, as fases pasta de cimento hidratada e zona de transição podem ser tão resistentes que se a fase esqueleto granular, principalmente os agregados graúdos, não forem muito resistentes, ela passa a ser o elo fraco da estrutura (Aitcin, 1998).

2.4.2 Pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento hidratada é resultado da mistura das partículas de cimento anidro com água, que vão formando cristais, e que ao longo do tempo começam a preencher o espaço vazio ocupado inicialmente pela água e partículas em dissolução.

Essas partículas de cimento são basicamente compostas de silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Depois de hidratado, o cimento apresenta-se em três fases sólidas distintas: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio (etringita), além de grãos de cimento que permanecem na fase sólida, pois dependendo do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns não chegam a se hidratar totalmente.

A resistência da pasta de cimento hidratada deriva principalmente das forças de atração de Van der Waals. A adesão entre duas superfícies sólidas pode ser atribuída a estas forças de natureza física, sendo o grau de ação aderente dependente da extensão e natureza das superfícies envolvidas. Quanto à presença da fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que constitui de 50 a 60 % do volume de sólidos na pasta, pode-se dizer que ela é a mais importante na determinação da resistência da pasta. Quanto aos cristais de hidróxido de cálcio, que constituem de 20 a 25 % do volume de sólidos da pasta, sua contribuição para a

resistência devido às forças de Van der Waals é limitada, devido ao fato de sua área específica ser consideravelmente menor se comparada com a do C-S-H.

Existem três aspectos importantes que devem ser considerados para melhorar-se cada vez mais a resistência da fase pasta de cimento hidratada: porosidade, uma vez que um número significativo de grandes poros ou vazios (de diâmetro maior que 50nm) são prejudiciais à resistência do concreto, ainda mais se estes vazios se concentrarem em um mesmo local; tamanho dos grãos, pois grãos de tamanho pequeno, de uma forma geral, colaboram para o aumento da resistência do concreto; e homogeneidade, já que a heterogeneidade da microestrutura é considerada como fonte de perda de resistência do conjunto (Mehta e Aitcin, 1990a e Aitcin, 1998).

Dos aspectos citados acima, a porosidade é o que exerce maior influência na estrutura da pasta de cimento e, conseqüentemente, sobre todo o conjunto. Desta forma, será dado a ela maior destaque.

POROSIDADE: em algum momento do processo de hidratação do cimento, o espaço não preenchido entre as partículas de material cimentante transforma-se em vazios ou poros capilares. Entretanto, sabe-se que o volume da pasta de cimento hidratada é 8 a 10% menor que o volume combinado do material cimentante anidro com a água (Aitcin, 1998). Esta contração química que acompanha o processo de hidratação da pasta, reduzindo seu volume, geralmente causa retração, principalmente em casos de cura mal executada. Desta forma, várias microfissuras surgem na pasta de cimento hidratada, e a sua incidência depende da quantidade de silicatos anidros que já se hidrataram e das restrições ao movimento das partículas causadas pelo esqueleto granular.

Os principais fatores que afetam a porosidade da pasta de cimento hidratada são a relação entre o volume de água e o volume de silicatos anidros, e a quantidade de ar incorporado na mistura.

Segundo Feret (1892, apud Aitcin, 1998), a seguinte expressão resume o que foi supracitado:

$$f'c = k \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2$$

onde: $f'c$ = resistência à compressão da pasta de cimento hidratada;
 w, c, a = volume de água, cimento e ar, respectivamente;
 k = constante dependente do tipo de cimento.

Essa expressão pode ser reescrita, desconsiderando-se o ar incorporado, que usualmente é inferior a 1 ou 2% do volume total do concreto:

$$f'c = k \frac{1}{(1 + (w/c))^2}$$

de onde fica claro que para aumentar-se a resistência é preciso reduzir-se a relação água/cimento.

Ao reduzir-se a relação água/cimento, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras durante a mistura, diminuindo a porosidade capilar e o espaço livre para a formação de vazios.

Daí concluí-se que para uma efetiva diminuição da porosidade da pasta de cimento anidro é necessário reduzir-se ao máximo a quantidade de ar incorporado e a relação água/cimento da mistura, limitando-os apenas ao suficiente e necessário para dar ao concreto a trabalhabilidade necessária ao seu transporte e lançamento.

Fica claro, então, que é possível aumentar-se a resistência da pasta de cimento hidratada através das seguintes providências: redução do número de vazios, e para tanto, deve-se reduzir a quantidade de água na mistura; eliminação, ao máximo, dos cristais de hidróxido de cálcio, adicionando-se material pozolânico que, junto com os cristais de Ca(OH)_2 , formam silicato de cálcio hidratado; e aumento das proporções de silicato dicálcico na composição do cimento, por ser o composto que gera a menor quantidade de hidróxido de cálcio (Mehta e Aitcin, 1990a; Mehta e Monteiro, 1994; Nawy, 1996).

2.4.3. Zona de transição

A zona de transição, considerada como o elo mais fraco da estrutura, é a fase da resistência limite no concreto convencional. É devido à presença da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais, anteriormente citados.

Segundo Mehta e Aitcin (1990a), o chamado efeito-parede pode tentar explicar o fenômeno da pouca resistência da zona de transição, ou seja, o possível bloqueio da distribuição homogênea da água no concreto, dependente do tamanho, forma e textura do agregado graúdo. Este efeito de bloqueio da água em torno do agregado, que eleva a relação água/cimento nas vizinhanças do agregado, torna a pasta de cimento não homogênea. No momento em que o concreto for submetido a tensões, as primeiras fissuras surgirão na zona de transição.

De maneira geral, a resistência do concreto cresce ao longo do período de cura, contanto que as partículas de cimento anidro continuem a se hidratar. Essa hidratação continuada tende a diminuir a quantidade de vazios, especialmente na zona de transição.

Dentro do contexto da microestrutura do concreto, há uma grande necessidade de buscar-se métodos de controlar a pasta de cimento hidratada, especialmente na zona de transição, para que se alcance maiores resistências. Manter a relação água/cimento baixa, principalmente na vizinhança dos agregados e conseqüentemente, baixa porosidade e homogeneidade da pasta endurecida, é o primeiro requisito a ser considerado.

Outra medida eficiente para aumentar-se a resistência da zona de transição é o uso de adições pozolânicas, tais como a sílica ativa. As partículas de sílica ativa interferem na movimentação de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados. Além de contribuir para a diminuição da espessura da zona de transição, a sílica ativa preenche os vazios deixados pelas partículas de cimento próximos à superfície do agregado e reduz a concentração do hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado.

2.5 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Uma seleção cuidadosa dos materiais e do proporcionamento dos mesmos é de vital importância para garantir o êxito do concreto de alta resistência e constitui o primeiro passo para a sua fabricação. Especialmente no caso de concretos de alta resistência, a seleção prévia dos materiais é considerada crítica se deseja-se garantir êxito, já que trata-se da obtenção de um concreto de elevada qualidade e elevada resistência.

O cuidado e atenção necessários no momento da escolha dos materiais reside principalmente no fato de que há uma grande quantidade de cimentos e agregados disponíveis, numa variedade de composições e propriedades, que dificultam a escolha dos

materiais a serem utilizados na dosagem do concreto de alta resistência. A situação é agravada pelo número considerável de aditivos e adições existentes que podem ser usados simultaneamente. As considerações feitas durante a seleção de materiais para a produção de concretos convencionais não são suficientes para serem aplicados ao CAR.

É preciso admitir que a seleção dos materiais e a otimização dos componentes de um concreto de alta resistência, é mais uma arte do que uma ciência (Aitcin, 1998). Por exemplo, para um determinado material cimentante, uma baixa relação água/aglomerante pode ser alcançada de diversas maneiras: aumentando-se a quantidade de pasta, diminuindo-se a quantidade de água ou ainda, adotando-se ambos procedimentos, ao mesmo tempo que se regula a quantidade de aditivo para que se obtenha a trabalhabilidade necessária com o menor custo.

Portanto, a seleção dos materiais para um concreto de alta resistência deve partir de dois objetivos fundamentais:

- conseguir as máximas resistências: ainda que este possa parecer um objetivo óbvio, deve-se levar em conta que se pode fabricar concretos de alta resistência, por exemplo, com quantidades muito altas de adições, ou relações água/cimento extremamente baixas, devido ao elevado consumo de aditivos superplastificantes. Porém, é possível obter-se a mesma resistência em condições menos extremas, otimizando-se os componentes da mistura. Este, portanto, é um objetivo inicial: obter o máximo rendimento de todos os componentes da mistura para se alcançar a máxima resistência, ao menor custo;
- conseguir consistências adequadas: este é um objetivo primordial quando se trata de fabricar CAR. As relações água/cimento tão baixas, necessárias para que se alcance um determinado nível de resistência, exigem que se escolha, a medida do possível, materiais que demandem a menor quantidade de água possível.

2.5.1 Cimento Portland

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico utilizado na produção do concreto. Sua obtenção é feita através da moagem do clínquer, que são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro compostos essencialmente de silicatos de cálcio e alumínio aquecidos a altas temperaturas (Mehta e Monteiro, 1994).

A hidratação do cimento consiste basicamente na reação entre os grãos de cimento anidro e a água. Deste processo de hidratação resultam três fases sólidas bastante distintas, conforme citado em 2.4.2: silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio (etringita). Do ponto de vista de resistência, é importante que a fase C-S-H seja a mais densa possível, pois é ela a principal responsável pela resistência do concreto.

Dentre as principais características do cimento, três merecem destaque: sua finura, sua composição química e sua compatibilidade com os aditivos.

Quanto à finura, sabe-se que o tamanho de suas partículas influi de forma significativa na velocidade da reação de hidratação. Quanto maior for a superfície específica das partículas, mais rapidamente ocorre o processo de hidratação do cimento, aumentando-se sua resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Isso acontece porque aumenta-se a superfície de contato entre as partículas de cimento e a água, com conseqüente aceleração do processo de endurecimento da pasta de cimento. Entretanto, sabe-se também que se o cimento for muito fino, o consumo de água aumenta, interferindo nas propriedades de resistência mecânica.

Quanto à composição química, o cimento Portland pode apresentar-se puro, sem adições especiais, ou composto com adições do tipo escórias, pozolanas ou fileres. Ele ainda pode ser encontrado com variações nos teores dos seus principais componentes (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), favorecendo algumas propriedades de acordo com os requisitos que se deseja alcançar.

No caso específico do concreto de alta resistência, o uso de cimentos puros, ou com baixos teores de adições, é bastante indicado. As adições no cimento substituem parte do clínquer que durante a hidratação iria se transformar em hidróxido de cálcio. A formação de silicato de cálcio hidratado resultante da combinação entre adição (sílica ativa) e hidróxido de cálcio é responsável por aumentos na resistência do conjunto. Havendo escassez de hidróxido de cálcio, nem a sílica ativa incorporada à mistura, nem a própria adição do cimento poderão contribuir para esses ganhos de resistência. Recomenda-se, então, o uso de cimentos do tipo CP I, por ser puro e não muito fino e do tipo CP V - ARI, por também ser puro e produzir alta resistência inicial.

Durante a hidratação, o cimento libera grande quantidade de calor, atingindo diretamente o comportamento de pega e endurecimento do concreto. Isso ocorre porque ao reagirem com a água, os componentes do cimento tentam atingir estados estáveis de baixa energia, e para isso, liberam energia na forma de calor. Portanto, o calor de hidratação do cimento depende da sua composição química. Cimentos com elevados teores de C_2S , por exemplo, apresentam baixa liberação de calor e conseqüente endurecimento lento (Mehta e Monteiro, 1994).

No que diz respeito à compatibilidade entre cimento e aditivo, é importante considerar-se a compatibilidade química, que é influenciada pelas composições químicas do cimento e do aditivo. Além disso, sabe-se que quanto mais fino for o cimento, maior será a quantidade de superplastificante necessária para obter-se uma mesma trabalhabilidade, uma vez que a finura do cimento influencia diretamente na eficiência do aditivo (Aitcin, 1998). Ainda outros fatores, tais como a disponibilidade de um ou outro tipo de cimento ou aditivo no local onde se vai utilizá-los, precisam ser considerados.

O consumo de cimento por metro cúbico de concreto é um importante parâmetro de avaliação na viabilidade de utilização de um concreto, seja na parte técnica ou econômica. Para concretos de alta resistência, o consumo de cimento supera os 400 kg/m^3 , que é um valor acima do comumente empregado para concretos convencionais, em torno de 300 a 350 kg/m^3 (Alaejos e Cánovas, 1992). É preciso, porém, ter-se cuidado com aumentos excessivos de pasta de cimento, que podem não só aumentar como também diminuir a resistência do concreto.

Existe um consumo ideal de cimento para cada mistura de concreto, que permite alcançar-se as características de resistência e trabalhabilidade desejadas. Entretanto, em casos de produção de concretos em que é necessário reduzir-se muito a relação água/cimento e a água de mistura é insuficiente para permitir que se atinja a consistência desejada, pode ser necessário aumentar-se a quantidade de cimento, acima do consumo ideal, para que se possa aumentar a água e manter a relação água/cimento (Alaejos e Cánovas, 1992).

É possível produzir-se concretos com elevados teores de cimento, mas isso compromete a estrutura, pelo menos do ponto de vista econômico. Além disso, problemas de ordem técnica podem surgir, tais como aparecimento de fissuras, causadas pela retração do concreto e elevada liberação de calor durante a hidratação do cimento, prejudicando a vida útil da estrutura.

2.5.2 Agregados

A qualidade dos agregados utilizados na produção do concreto exerce grande influência nas suas propriedades. Isso ocorre porque aproximadamente três quartos do volume do concreto é ocupado pelos agregados (Gjorv, 1994). Para concretos de alta resistência, entretanto, a qualidade dos agregados chega a ser fator limitante da obtenção de boa trabalhabilidade e alta resistência.

A seleção dos agregados deve ser cuidadosamente executada, pois a medida que aumenta-se a resistência que se deseja alcançar, a fase esqueleto granular pode tornar-se o elo fraco da estrutura, entrando em colapso por não suportar tensões muito elevadas.

2.5.2.1 Agregado graúdo

Em se tratando de agregado graúdo para concreto de alta resistência, é necessário bastante controle das características de dimensão máxima, granulometria, forma e resistência dos grãos.

DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (DMC): existem muitas controvérsias sobre a DMC. Para concretos convencionais, a DMC pode ficar na faixa de 12 a 25 mm, ou até exceder esse limite, por ser mais econômico, mas para concretos de alta resistência é difícil precisar esse valor.

Recomenda-se a utilização da menor DMC possível para conseguir-se a maior superfície específica de contato pasta-agregado, aumentando-se a superfície de aderência do agregado à pasta. Além disso, a água passa mais facilmente entre grãos menores, diminuindo seu acúmulo entre eles, e conseqüentemente, diminuindo o tamanho da zona de transição. Agregados menores ainda trazem o benefício de apresentarem menos falhas, pois o processo de redução do seu tamanho já eliminou defeitos internos do agregado, o que contribui para o aumento da resistência do concreto.

Mehta e Aitcin (1990a) sugerem que a DMC ideal encontra-se entre 10 e 12 mm. Alaejos e Cánovas (1992) sugerem manter a DMC do concreto de alta resistência entre 12 e 14 mm, enquanto que o Comitê 363 do ACI (1991) indica a utilização de agregados com DMC entre 9,5 e 12,7 mm para a produção de CAR.

Contrariando todas as recomendações citadas sobre a DMC, de Larrard e Belloc (1992) apresentam excelentes resultados experimentais, onde concretos de alta resistência são

obtidos com agregados de DMC de até 20 mm. Os materiais utilizados neste concreto são cimento Portland, brita calcária, areia, sílica ativa, aditivo superplastificante e água. Os valores de resistência chegaram a 122 MPa, com trabalhabilidade medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone de 205 mm.

GRANULOMETRIA: a distribuição granulométrica dos agregados interfere diretamente na demanda de água da mistura, e conseqüentemente, na trabalhabilidade do concreto. Sabe-se que agregados de granulometria contínua, onde não há deficiência ou excesso de qualquer fração do agregado, geram um melhor empacotamento, uma vez que as partículas menores preenchem os vazios existentes entre as partículas maiores. Desta forma, diminui-se a quantidade de pasta necessária e, conseqüentemente, o consumo de cimento.

FORMA: quanto à forma do agregado, estudos mostram que partículas angulares, como a pedra britada, produzem maiores resistências do que partículas arredondadas, como o seixo rolado (ACI 363, 1991). A principal razão disto é a maior facilidade de aderência entre pasta e agregado na presença de partículas angulares. Porém, a angulosidade não pode ser muito acentuada, a ponto de causar aumento no consumo de água e redução de trabalhabilidade.

Partículas lamelares, por serem muito frágeis e facilmente quebráveis, devem ser evitadas. Além de contribuírem pouco ou até prejudicarem a resistência do concreto, elas são muito ásperas e produzem misturas que requerem mais água ou mais aditivo para que se alcance a trabalhabilidade desejada.

RESISTÊNCIA: em relação ao aspecto resistência, parece óbvio que para concreto de alta resistência necessita-se utilizar agregado de alta resistência. Se o agregado apresentar baixa resistência ele acabará sendo o fator limitante da resistência de todo o conjunto.

2.5.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado normalmente é a areia natural. Para ser adequado ao uso em concreto ele deve apresentar-se livre de impurezas orgânicas, argila ou qualquer material deletério e não apresentar excessiva quantidade de finos (Nawy, 1996). Sua propriedade mais influente no concreto de alta resistência é a finura, que é quantificada através do módulo de finura, MF, cujo valor ideal é de aproximadamente $MF = 3,0$ (Mehta e Aitcin, 1990a; Alaejos e Cánovas, 1992; ACI 363, 1991).

A quantidade de finos no concreto de alta resistência é normalmente elevada e estas partículas finas (cimento e principalmente sílica ativa) preenchem os eventuais poros existentes na estrutura, melhorando as propriedades do concreto, principalmente no estado endurecido. Desta forma, no que se refere à areia, ela não precisa ser muito fina, já que o concreto de alta resistência é suficientemente rico de partículas finas do material cimentante, que do ponto de vista de trabalhabilidade e segregação a finura da areia passa a não ser tão importante (Aitcin, 1998).

O uso de areia mais grossa, e conseqüentemente, com grãos maiores, passa a ser aconselhável pois resulta, inclusive, em um pequeno decréscimo na água de mistura necessária para atingir-se determinada trabalhabilidade, uma vez que a sua superfície específica é menor, o que é vantajoso em termos de resistência e custos.

2.5.3 Água

A água utilizada na produção do concreto de alta resistência segue os mesmos requisitos de qualidade exigidos para a água utilizada para concretos convencionais, ou seja, deve ser potável (NBR 6118/78), provindo geralmente do abastecimento da rede pública.

Em casos em que a água utilizada for de baixa qualidade, devem ser feitos testes comparativos de resistência entre concretos executados com água destilada e com a água de baixa qualidade (ACI 363, 1991).

2.5.4 Adições minerais

As adições, na sua maior parte, são minerais provenientes de subprodutos industriais, considerados como resíduos. Seu emprego no concreto de alta resistência representa elevados benefícios para a economia, consumo de energia, proteção ambiental e conservação de recursos naturais. Em termos técnicos, os benefícios mais importantes se apresentam na forma de aumento de resistência, diminuição de permeabilidade e porosidade e conseqüente aumento na durabilidade.

Dentre as adições pozolânicas mais comumente utilizadas, destacam-se a sílica ativa e as cinzas volantes, que podem ser incorporadas ao material cimentante como adições ou substituições de parte do cimento da pasta.

SÍLICA ATIVA: a sílica ativa é um subproduto que se obtém no processo de fabricação do metal silício e do ferro-silício. Suas partículas são esféricas e o Comitê 226 do

ACI (1987) especifica seu diâmetro médio em $0,1\mu\text{m}$, o que significa ser cem vezes menor que o diâmetro médio das partículas de cimento.

Os benefícios da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto devem-se a dois fatores: ao efeito químico causado pelas rápidas reações pozolânicas que ela produz e ao efeito físico causado pela sua extrema finura, chamado de efeito filer.

O efeito pozolânico consiste em reações químicas entre a sílica e o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação do cimento. Os cristais de hidróxido de cálcio pouco contribuem para o desenvolvimento da resistência do concreto, porém, ao se combinarem com a sílica ativa, eles formam silicatos de cálcio hidratados, que contribuem de forma significativa para a resistência do conjunto.

O efeito filer consiste no preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de agregado e principalmente entre os produtos de hidratação do cimento pelas minúsculas partículas de sílica ativa, que de outra forma seriam preenchidos por água ou ar.

Devido ainda as suas características físicas, a matriz composta de sílica ativa torna-se densa mesmo antes das ligações químicas entre as partículas de cimento terem se desenvolvido (Aitcin, 1998).

No que diz respeito à demanda de água, a grande superfície específica das esferas de sílica ativa aumenta sua capacidade de absorção, aumentando, assim, a demanda de água no concreto. Esse aumento pode chegar a 40%, em casos de adição de aproximadamente 16% de sílica ativa sobre a massa de cimento (Nawy, 1996). Para evitar-se a adição de água na mistura, é imprescindível o uso de aditivos redutores de água, que dispersam as partículas de cimento e de sílica ativa, diminuindo o contato entre elas.

As dosagens de sílica ativa empregadas no concreto de alta resistência normalmente oscilam entre 5 e 10 % sobre a massa de cimento, conseguindo-se incrementos de resistência de até 30%. Dosagens de 15 a 20 % de adição de sílica ativa sobre a massa de cimento podem ser feitas, incrementando-se ainda mais os valores de resistência, porém, deve ser considerado o custo bastante elevado deste produto (Alaejos e Cánovas, 1992).

CINZA VOLANTE: um outro tipo de adição bastante comum é a cinza volante, subproduto do processo de combustão do carvão de centrais termoelétricas. Quando comparada à sílica ativa, a cinza se apresenta menos rica em sílica reativa e o tamanho de suas

partículas é bem maior. Sua utilização no concreto é justificada pela sua ação pozolânica, ainda que com menores efeitos que os da sílica ativa.

A adição de cinza volante produz um aumento de resistência que se manifesta em idades um pouco mais avançadas, o que não é o caso da sílica ativa, cuja influência é verificada nas primeiras idades. A porcentagem ideal de utilização deste material, como adição ao cimento, fica em torno de 15 a 25 % sobre a massa de cimento (Alaejos e Cánovas, 1992).

Independente de qual adição esteja sendo utilizada, melhorias nas características do concreto fresco ou endurecido são garantidas. No estado fresco, a substituição de 10 a 20 % do cimento por uma ou mais adições pode não só reduzir o calor de hidratação como produzir consideráveis melhorias na trabalhabilidade do concreto. A presença de partículas finas da adição melhora propriedades reológicas, tais como coesividade, reduzindo as tendências de segregação e exsudação (Mehta e Aitcin, 1990a).

No estado endurecido, ganhos de resistência e diminuição da permeabilidade são as duas maiores razões da utilização das adições. Além dessas, a diminuição da retração por secagem, diminuição na corrosão das armaduras e diminuição das deformações causadas pela ação gelo-degelo também são boas razões para justificar o uso destas adições.

2.5.5 Aditivos químicos

Aditivos químicos são materiais solúveis em água, adicionados à mistura do concreto em pequenas quantidades, que podem trazer benefícios em termos de redução de água, dispersão, trabalhabilidade, ganhos de resistência e durabilidade (Ramachandran, 1994). Sua função principal é modificar as propriedades do concreto, tornando-o mais adequado ao manuseio, à economia e ao gasto energético (Nawy, 1996).

O desempenho dos aditivos incorporados ao concreto depende de vários fatores tais como natureza e quantidade de aditivo, composição e superfície específica do cimento, natureza e proporcionamento dos agregados, seqüência de adição de água e do aditivo à mistura, compatibilidade entre adições (se houver mais de uma), relação água/cimento e condições de cura (Mailvaganam, 1999).

Os principais tipos de aditivos são os seguintes: aceleradores de pega, incorporadores de ar, redutores de água - plastificantes e superplastificantes - e retardadores de pega. A

produção de concreto de alta resistência está pelo menos vinculada à utilização de aditivos redutores de água do tipo superplastificantes.

Segundo Collepari et al (1999), a invenção dos superplastificantes representa um dos passos mais importantes para a produção do concreto de alto desempenho (que também engloba a produção de concreto de alta resistência), uma vez que estes aditivos atuam no concreto dispersando as partículas de cimento que apresentam uma grande tendência a flocular quando entram em contato com a água de amassamento. Sua utilização se dá, segundo os autores, com três diferentes propósitos, ou pela combinação deles:

- aumentar a trabalhabilidade sem mudar qualquer componente da mistura;
- reduzir a demanda de água em até 30%, de forma a reduzir a relação água/cimento, aumentando a resistência e/ou melhorando requisitos de durabilidade;
- reduzir a demanda de água e cimento, a fim de evitar possíveis fissuração, retração e tensões térmicas causadas pelo calor de hidratação do cimento.

Os superplastificantes são classificados, de acordo com a sua composição química, em quatro categorias:

- condensados de formaldeído e melamina sulfonada;
- condensados de formaldeído e naftaleno sulfonado;
- lignosulfonatos modificados;
- copolímeros.

A maioria dos trabalhos sobre esses aditivos consistem em estudos de superplastificantes à base de melamina sulfonada ou naftaleno sulfonado (Ramachandran, 1983; Collepari, 1994; Hewlet e Rixon, 1977; apud Dal Molin, 1995).

Um cuidado que se deve ter durante a utilização dos superplastificantes, ressaltando-se o controle de qualidade, é a rápida perda da trabalhabilidade do concreto com o tempo, uma vez que a eficiência do aditivo é limitada a um tempo curto. Este efeito está associado com a formação de sulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita, que precipita incorporando um grande volume de água livre. Os fatores que originam este fenômeno estão associados com o

tipo de aditivo, sua dosagem, a temperatura do concreto, a natureza dos agregados e o tipo de cimento.

No que diz respeito ao tipo de cimento, é sabido que cimentos que apresentam na sua composição grande quantidade de C_3A perdem a trabalhabilidade mais rapidamente (Alaejos e Cánovas, 1992; Dal Molin, 1995; Toralles, 1998). Daí a necessidade de estudar-se a compatibilidade cimento-aditivo antes da sua utilização.

Na tentativa de minimizar-se a perda na trabalhabilidade do concreto, uma parcela do aditivo pode ser separada e incorporada ao concreto somente no momento do seu lançamento (Mehta e Aitcin, 1990b). Além disso, a redosagem do aditivo, que consiste em adicionar mais superplastificante à mistura quando esta começa a perder a trabalhabilidade, também é uma maneira de evitar-se este inconveniente. É importante, porém, muito cuidado, pois uma superdosagem de aditivo pode aumentar o risco de segregação, diminuir a resistência do concreto, retardar sua cura e aumentar o seu custo final.

A quantidade de superplastificante utilizada deve variar de 0,8 a 2 % de sólidos sobre a massa de material cimentante, sendo que a parte sólida do aditivo é geralmente em torno de 40 %. Não havendo experiência prévia com o aditivo, 1% é o valor recomendado para a primeira tentativa (Mehta e Aitcin, 1990b). Como o aditivo se apresenta geralmente na forma de solução, a água presente na solução deve ser considerada e diminuída da água de mistura.

A escolha do tipo de superplastificante é geralmente determinada em função do seu custo, dosagem e compatibilidade com os outros materiais. É comum, em alguns casos, o uso de um plastificante e um superplastificante, dependendo da necessidade e dos recursos disponíveis.

2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.6.1 Propriedades no estado fresco

Segundo Aitcin (1998) existem duas razões muito importantes para que as propriedades do concreto no estado fresco sejam cuidadosamente controladas. A primeira delas refere-se ao lançamento do concreto, pois dependendo da forma de lançamento, o concreto geralmente precisa ser muito trabalhável. A segunda refere-se às propriedades do concreto no estado endurecido, pois acredita-se que um concreto cujas propriedades no estado

fresco são rigorosamente controladas garantirá um concreto com propriedades bastante satisfatórias no estado endurecido.

Dentre as propriedades do concreto de alta resistência no estado fresco, é preciso destacar a importância do controle da massa específica, trabalhabilidade e teor de ar incorporado.

MASSA ESPECÍFICA: a massa específica do concreto fresco corresponde à massa de uma unidade de volume do concreto fresco adensado de acordo com a normalização brasileira, considerando-se o volume de ar aprisionado ou incorporado (NBR 9833/87). Comparativamente, a massa específica do concreto de alta resistência é maior que a do concreto convencional, executado com os mesmos materiais, uma vez que o concreto de alta resistência contém mais cimento e menos água.

Enquanto a massa específica do concreto de alta resistência sem e com ar incorporado é de aproximadamente 2500 kg/m^3 e 2400 kg/m^3 , respectivamente, para concretos convencionais esses valores são diminuídos de 50 a 100 kg/m^3 (Aitcin, 1998).

TRABALHABILIDADE: a trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade (ASTM C 125/93). Essa propriedade compreende, pelo menos, dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade, e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação. A medida da trabalhabilidade é comumente feita através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR 7223/82).

Dos fatores que afetam a consistência do concreto, e conseqüentemente a sua trabalhabilidade, é preciso destacar aqueles relacionados ao esqueleto granular e ao comportamento reológico da pasta de cimento.

No que diz respeito ao esqueleto granular, devem ser cuidadosamente observada a proporção entre agregados graúdo e miúdo, suas granulometrias e forma, seja para a produção de concreto de alta resistência ou concreto convencional.

O comportamento reológico da pasta de cimento está diretamente ligado à relação água/aglomerante. Quanto maior esta relação, como 0,50, por exemplo, mais as partículas finas estarão diluídas em água e esta passa a ser fisicamente responsável pela reologia da

pasta. Neste caso, as partículas cimentantes ficam muito separadas entre si e a sua interação durante a hidratação não afeta a trabalhabilidade do concreto.

Com a diminuição desta relação, e a adição de superplastificante, a situação torna-se mais complexa do ponto de vista reológico, pois a água não é mais a responsável pela reologia da pasta, e sim as partículas de material cimentante, que passam a interagir fisicamente, de acordo com sua forma, distribuição de grãos e reatividade química, pois estão muito mais próximas umas das outras.

O superplastificante incorporado à mistura para deflocular as partículas cimentantes, interage com as partículas de cimento em hidratação, tornando ainda mais complexo o conjunto de fatores que influenciam a reologia e a trabalhabilidade do concreto de alta resistência (Aitcin, 1998).

Conforme citado em 2.5.5, a incorporação de superplastificantes à mistura do concreto traz consigo o efeito indesejado da rápida perda de trabalhabilidade ao longo do tempo. Para concretos de alta resistência, que requerem cada vez menos água e mais aditivo, os problemas de incompatibilidade entre cimento e aditivo são mais acentuados. Às vezes alguns tipos de cimento são rejeitados para serem utilizados com determinado aditivo, não por dificuldade de alcançar-se a resistência desejada, mas pela rápida perda de trabalhabilidade com o tempo (Mailvaganam, 1999).

Uma vez que os superplastificantes são responsáveis pelo aumento da trabalhabilidade inicial do concreto, seu efeito pode ser considerado transitório, e geralmente não se mantém por mais de 30 a 60 minutos. A fim de evitar-se, ou diminuir-se a perda de trabalhabilidade do concreto com o tempo, algumas providências podem ser tomadas, tais como: colocar o aditivo somente no momento do lançamento do concreto; dosar o aditivo além da quantidade normalmente recomendada; redosar o aditivo de tempos em tempos ou utilizar algum tipo de agente retardador (Ramachandran, 1994; Collepari, 1999).

O comportamento reológico da pasta de cimento é alvo constante de pesquisas, sendo a trabalhabilidade do concreto um dos parâmetros mais preocupantes. Aitcin (1998) sugere o uso de agentes incorporadores de ar como forma de aumentar a trabalhabilidade do concreto. Para ilustrar tal afirmativa, o autor relata um caso de produção de concreto com resistência à compressão de 100 MPa aos 91 dias, com 4,5% de ar incorporado.

AR INCORPORADO: *Concretos sem incorporadores de ar* - geralmente o concreto de alta resistência contém de 1 a 3% de ar aprisionado, uma vez que sua mistura é mais viscosa que a do concreto convencional. Quanto menor for a relação água/aglomerante, mais viscoso será o concreto de alta resistência. Entretanto, dependendo da combinação cimento-aditivo, é possível manter-se o teor de ar aprisionado entre 1 e 1,5 % em concretos com relação água/aglomerante 0,30. Para concretos com relação água/aglomerante menor que 0,30, porém, torna-se difícil reduzir o teor de ar aprisionado para menos de 1,5 ou 2% (Aitcin, 1998).

Concretos com incorporadores de ar - é possível incorporar até 4 a 5% de ar ao concreto, para melhorar suas propriedades no estado fresco, porém um total de 3 a 4% de ar aprisionado já garante considerável aumento de trabalhabilidade do concreto, trazendo benefícios ao seu lançamento e cura. Essa incorporação de ar é recomendável em misturas onde o comportamento reológico obtido não é o ideal, compensando, inclusive, eventuais perdas de resistência (Aitcin, 1998).

2.6.2 Propriedades no estado endurecido

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO: conforme já foi mencionado no capítulo 1, a resistência à compressão é uma das principais e mais significativas propriedades do concreto, a ponto de servir de referência para a sua classificação. Sua determinação fornece uma estimativa do desempenho do concreto tanto em termos mecânicos como, indiretamente, da sua durabilidade.

Obviamente, a resistência à compressão do concreto de alta resistência é mais alta do que a do concreto convencional. Para concretos convencionais, a resistência à compressão aumenta inversamente proporcional à relação água/aglomerante. Para concretos de alta resistência, esta proporcionalidade só é válida até que se alcance a resistência máxima do agregado graúdo. Quando isso ocorre, e a resistência do agregado é menor que a resistência da pasta de cimento hidratada, a resistência à compressão do concreto já não aumenta significativamente com a diminuição da relação água/material cimentante.

Considerando-se o ganho de resistência nas primeiras idades, é preciso dizer que a temperatura do concreto no momento do seu lançamento, assim como a temperatura ambiente e a quantidade de aditivo incorporado à mistura influenciam-no sobremaneira.

É possível obter-se concretos com alta resistência inicial, por exemplo, entre 20 e 30 MPa nas primeiras 24 horas, mantendo-se uma relação água/aglomerante entre 0,30 e 0,35 em temperatura ambiente de 20°C. Obter-se alta resistência antes das primeiras 12 horas, porém, é bem difícil. Duas ou três horas a mais de cura a 20°C, entretanto, podem fazer grande diferença, pois a presença dos aditivos superplastificantes ou retardadores de pega inibem o início da reação de hidratação, que se desenvolve rapidamente depois de iniciada. Na Universidade de Sherbrooke, concretos de alta resistência com 75 MPa de resistência à compressão nas primeiras 24 horas foram desenvolvidos, com relação água/aglomerante de 0,22 e cimento de alta resistência inicial, porém, o abatimento não pôde ser mantido acima de 150 mm por mais de 15 minutos (Aitcin, 1998).

No que diz respeito ao ganho de resistência a longo prazo, pode-se dizer que esta propriedade é bastante afetada pelo tipo de cura do concreto. Malhotra et al (1990) mostram, através de pesquisa experimental, que a resistência à compressão de concretos nas idades de 182 e 365 dias submetidos à cura úmida é maior que a resistência à compressão de concretos submetidos à cura ao ar, e que essa diferença de resistência tende a diminuir quando ocorre a adição de sílica ativa.

Quanto à cura de concretos com adição de sílica ativa, Maage et al (1990, apud Dal Molin, 1995) concluíram, através de pesquisa experimental, que os efeitos negativos da cura ao ar na resistência do concreto com sílica ativa são similares aqueles do concreto sem adições. Esta afirmação está em consonância com os resultados obtidos por Dal Molin (1995), que não identificou a interação sílica ativa x cura como efeito significativo na resistência à compressão.

Um aspecto importante, em nível experimental, é o tipo de capeamento utilizado no momento da determinação da resistência à compressão. É preciso cuidar-se para que ele seja bem executado, de forma a garantir adequada distribuição de carga na área de contato entre o concreto e os pratos da prensa. É preciso evitar-se, também, que o material utilizado no capeamento rompa antes que o próprio concreto de alta resistência. Pode-se utilizar como capeamento diferentes tipos de resina, compostos a base de enxofre ou apenas o polimento das superfícies do concreto, sendo que cada um destes capeamentos pode conduzir a resistências finais diferentes. Deve-se, portanto, citar sempre o tipo de capeamento utilizado (Mindess, 1994).

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: a resistência à tração do concreto pode ser estimada através de 3 ensaios diferentes: ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ensaio de resistência à tração na flexão e ensaio de resistência à tração direta.

O crescimento da resistência à tração ocorre até os 14 dias de idade, segundo de Larrard e Malier (1992, apud Dal Molin, 1995), ao contrário da resistência à compressão, que continua crescendo após os 14 dias, podendo aumentar ainda 10 a 20% do seu valor.

A NBR 6118/78 correlaciona a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão, embora ainda não estando ajustada para a realidade dos concretos de alta resistência, da seguinte forma:

$$f_{tk} = 1/10 (f_{ck}), \text{ para } f_{ck} \leq 18 \text{ MPa e}$$

$$f_{tk} = 0,7 + 0,06 (f_{ck}), \text{ para } f_{ck} > 18 \text{ MPa,}$$

onde f_{tk} = valor característico da resistência à tração

f_{ck} = valor característico da resistência à compressão

de onde já se pode observar que a proporção entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples diminui a medida que a resistência à compressão cresce.

Para concretos convencionais, o valor da resistência à tração pode ser superior a 10% do valor da resistência à compressão. Porém, para concretos com resistência à compressão de 85MPa ou mais, esse valor pode chegar a menos de 5% (CEB, 1990b; Gjorv, 1994).

Carrasquillo et al (1981, apud CEB, 1990b e Aitcin, 1998) propõe a seguinte correlação entre resistência à tração e resistência à compressão, para um intervalo de aproximadamente 21 a 83 MPa:

$$f_{tk} = 0,54 (f_{ck})^{1/2}, \text{ em (MPa)}$$

O Comitê 363 do ACI (1991) sugere, para $21 \text{ MPa} < f_{ck} < 83 \text{ MPa}$:

$$f_{tk} = 0,59 (f_{ck})^{0,55}, \text{ em (MPa)}$$

MÓDULO DE DEFORMAÇÃO: o conhecimento do módulo de deformação do concreto é muito importante, principalmente nos casos em que se deseja calcular as deformações em diferentes elementos estruturais do conjunto.

Para medir-se o módulo de deformação do concreto é necessário medir-se simultaneamente a carga aplicada e a deformação gerada por esta carga. Medir estes dois parâmetros separadamente é fácil, porém medi-los simultaneamente torna-se complicado a medida que necessita-se de equipamentos especiais, mais sofisticados. Na tentativa de evitar esse processo complexo, pesquisadores têm tentado achar uma maneira simples de estimar o módulo de deformação, correlacionando-o, geralmente, com a resistência à compressão.

Aitcin (1998) apresenta uma série destas correlações, ao mesmo tempo que ressalta que elas ajustam-se bem para o concreto convencional e não tão bem para concretos de alta resistência:

- Gardner e Zhao, em 1991, para $f_c > 27$ MPa:

$$E'_c = 9(f'_c)^{1/3} \text{ em (GPa);}$$

- Carrasquillo, Nilson e Slate, em 1981 e o Comitê 363 do ACI (1991), para $21 \text{ MPa} < f_c < 83 \text{ MPa}$:

$$E_c = 3,32(f'_c)^{1/2} + 6,9 \text{ em (GPa);}$$

- CEB (1990b), para $f_c > 40$ MPa:

$$E_{c_{28d}} = 10(f'_c + 8)^{1/3} \text{ em (GPa);}$$

onde: E_c ou E'_c = módulo de elasticidade do concreto;

f'_c = resistência à compressão, em MPa.

Calixto et al (1995) apresenta como resultado de pesquisa experimental e estudo estatístico a seguinte correlação:

$$E_c = 4546 + 3719(f_c)^{1/2} \text{ em (MPa), para } 10 \text{ MPa} < f_c < 81 \text{ MPa,}$$

sendo que para esta pesquisa foram utilizados materiais nacionais, e a correlação obtida foi aplicada a resultados de pesquisadores estrangeiros, obtendo-se bons ajustes.

3 MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO

O objetivo de qualquer método de dosagem é determinar uma proporção adequada e econômica dos materiais constituintes do concreto, que possam ser usados na sua produção, chegando-se o mais perto possível de se alcançar as várias propriedades que se deseja, com o menor custo. Será sempre difícil desenvolver um método de dosagem teórico, que possa ser usado universalmente com várias combinações de cimento Portland, quaisquer agregados e quaisquer adições. Isto acontece porque além do fato de que os elementos constituintes do concreto devem responder a alguns critérios de aceitação normalizados, o produto final também deve obedecer a critérios de resistência e trabalhabilidade. Além disso, até certo ponto, as mesmas propriedades do concreto, seja fresco ou endurecido, podem ser alcançadas de várias maneiras, com os mesmos materiais (Aitcin, 1998).

A literatura das últimas décadas tem mostrado o crescente interesse pelas questões de dosagem e proporcionamento dos materiais constituintes do concreto, sendo que nos últimos anos pode-se incluir considerável número de estudos de programas computacionais (de Larrard e Sedran, 1994; Nawy, 1996; Day, 1996; Ganju, 1996; de Larrard e Sedran, 1996; Popovics e Popovics, 1996; Aitcin, 1998). Este interesse crescente deve-se, justamente, ao fato de que há uma limitação nos métodos de dosagem de concreto existentes, principalmente para concreto de alta resistência, onde pode haver a incorporação de novos materiais, tais como aditivos superplastificantes e sílica ativa.

3.1 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO CONVENCIONAL

Existem diversos métodos de dosagem para concreto convencional, cuja utilização varia regionalmente, dependendo de condições técnicas, disponibilidade de material, conhecimento dos métodos, entre outros.

Dentre eles, merecem destaque nesta pesquisa os Métodos ACI/ABCP e IPT/EPUSP. O Método ACI/ABCP fundamenta-se no critério do volume absoluto, que serve de base para vários métodos de dosagem específicos para concreto de alta resistência. O Método IPT/EPUSP, além de ser largamente utilizado no Brasil, não apresenta restrições a sua utilização para concreto de alta resistência, ao contrário do anterior, indicando que a sua utilização para a produção de CAR poderia ser recomendável.

3.1.1 Método ACI/ABCP (Rodrigues, 1995)

O Comitê 211 do ACI publicou em 1981 um método de dosagem de concreto (ACI 211/1989), que fornece o proporcionamento dos materiais para uma primeira tentativa de mistura, a ser ajustada no canteiro de obras ou no laboratório, em função dos requisitos de trabalhabilidade e resistência. Esse método de dosagem foi adaptado à realidade brasileira, principalmente para que se cumprisse a NBR 7211/83, passando a chamar-se método ABCP, sobre o qual será dissertado a seguir.

Fundamentos básicos:

- a) Os valores de resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, função da resistência do cimento e da relação a/c , devem estar na faixa entre 10 e 40 MPa;
- b) A trabalhabilidade adequada para a moldagem *in loco* deve ser de semi-plástica à fluida. A consistência do concreto pode ser pré-estabelecida ou escolhida em função da aplicação estrutural do concreto;
- c) A relação a/c do concreto é fixada com base em critérios de durabilidade e resistência mecânica, dependendo da finalidade e grau de exposição da estrutura. Para ocasiões em que não é possível escolher a relação a/c em função da resistência mecânica, uma curva de aproximação em função da resistência do cimento é apresentada, num intervalo que abrange resistências mecânicas do concreto entre 10 e 40 MPa e relações a/c entre 0,45 e 0,80;
- d) A determinação aproximada do consumo de água no concreto é feita em função do abatimento, que deve ficar entre 40 e 100 mm, e da dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC) que pode variar de 9,5 a 38 mm;
- e) O proporcionamento entre agregado graúdo e miúdo é feito determinando-se o teor ótimo de agregado graúdo na mistura, função da DMC e da finura da areia. Este é o ponto chave da dosagem do concreto, que vai ditar a trabalhabilidade e o custo final;
- f) O consumo de areia é função dos teores de pasta e agregado graúdo do concreto;
- g) A determinação do volume de agregado miúdo é feita através do critério do volume absoluto, que consiste em subtrair-se do volume total do concreto os volumes conhecidos de todos os outros constituintes, obtendo-se assim, o volume da areia;

h) O consumo de cimento normalmente varia de 200 a 400 kg/m³;

i) Este método foi desenvolvido de maneira a fornecer um baixo teor de areia para misturas plásticas, que além do benefício econômico, facilita ao operador identificar se a mistura estiver pouco argamassada, ou argamassada em excesso, apenas visualmente.

Requisitos de projeto:

a) DMC;

b) Consistência desejada do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone;

c) Condições de exposição ou finalidade da obra;

d) Resistência de dosagem do concreto.

Ensaio preliminares necessários:

a) tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;

b) análise granulométrica e massa específica dos agregados disponíveis;

c) massa unitária compactada do agregado graúdo.

Etapas de dosagem:

a) Ensaio preliminares;

b) Fixação da relação a/c, feita com base em critérios de resistência mecânica e durabilidade. No que diz respeito à resistência do cimento, utiliza-se as Curva de Abrams do cimento em questão; no que diz respeito à durabilidade, cabe levar-se em consideração o grau de exposição e a intensidade dos agentes agressivos ao concreto;

c) Determinação do consumo de água do concreto, tabelado em função do seu abatimento e da DMC;

d) Determinação do consumo de cimento, calculado com base no consumo de água e na relação a/c;

e) Determinação do consumo de agregado graúdo, tabelado em função da DMC e do módulo de finura da areia;

f) Determinação do consumo de agregado miúdo, através do critério do volume absoluto;

g) Apresentação do traço do concreto, em massa ou volume;

h) Mistura experimental e eventuais correções: a mistura experimental pode ser feita em laboratório, cuidando-se para que a betoneira utilizada possua as mesmas características da betoneira da obra, onde a mistura deverá ser ajustada.

A água de amassamento nunca deve ser colocada de uma só vez, e sim gradativamente, determinando-se a consistência do concreto pelo ensaio de abatimento, até que se obtenha a consistência desejada.

Caso haja necessidade de correção do traço, uma vez que a mistura esteja pouco argamassada, deve-se acrescentar mais areia à mistura, mantendo-se constante a relação a/c.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O proporcionamento dos materiais é facilmente realizado, uma vez que tenham sido feitos os ensaios preliminares;
- O método é desenvolvido de forma a fornecer, para misturas plásticas, o menor teor de areia. Desta forma, tem-se duas vantagens: a primeira é a econômica, e a segunda refere-se à facilidade de identificação de misturas inadequadas, por parte de um examinador experiente, caso haja falta ou excesso de argamassa.

b) Desvantagens

- O método limita-se a um intervalo de resistência do concreto aos 28 dias de idade entre 10 a 40 MPa;
- Os valores a partir dos quais é realizado o proporcionamento dos materiais são todos tabelados e essas tabelas não abrangem todos os tipos de materiais existentes. Alguns autores criticam o uso de tabelas, ressaltando a sua pouca eficiência. Hover (1995)

apresenta uma série de gráficos em substituição às tabelas incluídas no método de dosagem ACI 211 (1989). Segundo o autor, o “coração” do método é a informação contida nas tabelas, que tornam-se muito mais claras e eficazes em forma de gráficos;

- O gráfico que fornece a relação a/c não especifica o tipo de cimento utilizado, fazendo referência apenas à resistência do cimento aos 28 dias de idade;
- No caso da resistência à compressão obtida ser diferente da esperada, é preciso que se faça uma nova dosagem, a fim de corrigir-se a relação a/c , e um novo acerto de trabalhabilidade e teor de argamassa.

3.1.2 Método IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992)

Este método de dosagem é conhecido como Método IPT/EPUSP, por ter sido desenvolvido na EPUSP/IPT (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Tecnológicas). O método tem sido bastante utilizado nacionalmente, em função da sua fácil execução e fácil proporcionamento dos materiais.

Fundamentos básicos:

- a) A relação a/c é o parâmetro mais importante do concreto estrutural;
- b) Definida a relação a/c e definidos certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas;
- c) O concreto é mais econômico quanto maior a DMC e menor o abatimento do tronco de cone;
- d) As Lei de Abrams e Lyse são aceitas como “leis de comportamento”;
- e) É possível construir-se um diagrama de dosagem para cada conjunto de materiais, onde os parâmetros resistência à compressão, relação a/c , relação agregados secos/cimento e consumo de cimento por metro cúbico de concreto são apresentados, no qual pode-se modelar o comportamento do concreto.

Requisitos de projeto:

- a) DMC;

- b) Consistência desejada do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone;
- c) Tipo de elemento estrutural a que se destina o concreto;
- d) Resistência característica à compressão do concreto;
- e) Definição da relação a/c máxima, em função de critérios de durabilidade e resistência.

Ensaio preliminares necessários:

- a) tipo, classe e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- b) massa unitária e coeficiente de inchamento do agregado miúdo;
- c) massa unitária e DMC do agregado graúdo.

Etapas de dosagem:

- a) Caracterização do material;
- b) Definição da relação a/c, através de curvas médias de correlação entre resistência à compressão e relação a/c para cada tipo de cimento;
- c) Determinação do teor ideal de argamassa: É preciso determinar-se um teor mínimo de argamassa capaz de proporcionar um concreto adequado ao lançamento, que não apresente porosidade ou falhas de concretagem e que, por outro lado, não gere um custo elevado ou manifestações patológicas associadas ao excesso de argamassa. Desta forma, fixa-se um traço inicial, que geralmente é o traço 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) e determina-se o teor ideal de argamassa através de variações na proporção dos materiais, feitas por tentativa e por observações práticas;
- d) Determinação das misturas experimentais: Após a determinação do teor ideal de argamassa para o traço inicial são determinados traços auxiliares para viabilizar a montagem do diagrama de dosagem. Os traços auxiliares, que geralmente são 1:3,5 e 1:6,5, são executados mantendo-se constante o teor ideal de argamassa obtido, e acrescentando-se água aos poucos em cada mistura, até encontrar-se o abatimento desejado;

Na determinação dos traços auxiliares são mantidos fixos o abatimento do tronco de cone e o teor de argamassa, sendo que este último, segundo os autores, deve adotar um acréscimo de dois pontos percentuais para cada 0,5 de acréscimo no traço além de 6,5 e um decréscimo de dois pontos percentuais para cada 0,5 de decréscimo no traço aquém de 3,5 (no caso da execução de traços auxiliares tais como 1:2 e 1:8).

e) De posse dos valores de resistência à compressão na idade desejada, relação a/c, traço e consumo de cimento, constrói-se o diagrama de dosagem.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método é facilmente desenvolvido e requer poucos ensaios de caracterização do material;
- O método baseia-se num teor ideal de argamassa, que é definido experimentalmente, evitando-se a dosagem de um concreto com falta ou excesso de argamassa;
- O diagrama de dosagem obtido indica o modelo de comportamento do concreto executado com determinados materiais, para um mesmo abatimento, dentro de uma faixa de resistência. Desta forma, não é preciso repetir-se a dosagem experimental para que se conheça o traço, consumo de cimento e relações a/c para os concretos que estiverem nesta faixa.

b) Desvantagens

- O teor ideal de argamassa é mantido constante para os traços que se afastam de até 1,5 ponto do traço inicial, geralmente o traço 1:5 (até 1:3,5 e 1:6,5). Para os outros traços, como o 1:2 e 1:8, o método sugere pequenos aumentos e diminuições no teor de argamassa, dependendo do caso. Ainda assim, pode haver falta ou excesso de argamassa nos traços muito extremos, surgindo a necessidade de novas determinações experimentais do teor de argamassa;
- O diagrama de dosagem obtido é válido apenas para a faixa de resistência alcançada pelo concreto produzido nos diferentes traços, não devendo ser extrapolado.

3.2 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

Em 1984, o Comitê 363 do ACI publicou o estado-da-arte do concreto de alta resistência (ACI, 1991). Esta publicação consta de uma série de informações sobre a seleção de materiais, dosagem, produção e propriedades do concreto de alta resistência, além de considerações de projeto estrutural, utilização e aspectos econômicos. A partir daí, outras pesquisas, e conseqüentes publicações, têm ocorrido nesta área, embora a lacuna do conhecimento sobre o proporcionamento dos materiais constituintes do CAR, principalmente no âmbito nacional, ainda esteja aberta.

Parte da dificuldade na dosagem deste concreto está na falta de códigos e normas que estabeleçam critérios e regras a serem seguidos, padronizando a produção do concreto de alta resistência.

Ainda que com muita dificuldade, alguns métodos ou procedimentos de dosagem para concreto de alta resistência têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Alguns deles serão citados a seguir, com a descrição de suas características mais importantes.

3.2.1 Métodos baseados no critério do volume absoluto

Alguns métodos específicos para concreto de alta resistência seguem a abordagem do Método ACI/ABCP, que fundamenta-se no critério do volume absoluto para quantificar os materiais utilizados. A seguir são apresentados alguns deles.

3.2.1.1 Método Nawy (1996)

Fundamentos básicos:

a) A determinação do volume de agregado miúdo é feita através do critério do volume absoluto, que consiste em subtrair-se do volume total do concreto os volumes conhecidos de todos os outros constituintes, obtendo-se, assim, o volume da areia;

b) Existe um teor ótimo de agregado graúdo, função da sua DMC, que fornece o melhor esqueleto granular;

c) Os valores de resistência aos 28 dias a serem alcançados ficam na faixa de 48 a 69 MPa, sem a utilização de aditivo e de 48 a 83 MPa com a utilização de superplastificante;

d) O método oferece a opção de trabalhar com a resistência à compressão do concreto aos 56 dias de idade, pois o autor defende a idéia de que as estruturas são submetidas à carga apenas a partir dos 60 dias.

Requisitos de projeto:

- a) DMC;
- b) Abatimento;
- c) Resistência à compressão que se deseja alcançar;
- d) Utilização ou não de superplastificante.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Verificação do tipo e classe do cimento;
- b) Módulo de finura da areia;
- c) Teor de umidade dos agregados;
- d) Massa unitária compactada dos agregados;
- e) Massa específica dos agregados.

Etapas de dosagem:

- a) Estimativa do teor ótimo de agregado graúdo no volume total, função da DMC;
- b) Estimativa da água de mistura e do teor de ar incorporado: de acordo com a trabalhabilidade e a DMC, os valores de consumo de água e teor de ar incorporado encontram-se tabelados;
- c) São feitas correções na água de mistura, em função da absorção da areia;
- d) Escolha da relação água/aglomerante, função da utilização ou não de superplastificante, da DMC e da resistência que se deseja alcançar;
- e) Conhecendo-se o consumo de água e a relação água/aglomerante, calcula-se o consumo de material cimentante;

f) A quantidade de areia utilizada na mistura é calculada pelo método do volume absoluto;

g) Determinação do traço do concreto.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O traço do concreto para uma primeira tentativa é rapidamente obtido, uma vez conhecidas as características necessárias dos agregados;
- Não são necessárias muitas misturas experimentais até que se obtenha o traço final;
- O método permite a utilização ou não de adição, e esta definição só é preciso ser feita no penúltimo passo, quando calcula-se a quantidade de material cimentante.

b) Desvantagens

- O método utiliza altos consumos de cimento, que além do custo elevado, podem trazer problemas técnicos de retração, devido ao alto calor de hidratação;
- Os ajustes na mistura são feitos com base em observações no abatimento, durante a execução do concreto. Se o abatimento requerido não estiver sendo alcançado, é preciso aumentar-se a água da mistura e recalcular a quantidade dos outros materiais, ou acrescentar mais aditivo;
- A quantidade de aditivo a ser utilizada não é levada em consideração durante o proporcionamento dos materiais, logo, sua incorporação à mistura é feita aleatoriamente no momento da execução da mesma.

3.2.1.2 Método Aitcin (1998)

Fundamentos básicos:

a) Segue a mesma abordagem do método do ACI 211 (1989), e baseia-se na combinação de resultados empíricos derivados da experiência e no critério do volume absoluto;

b) O método deve ser utilizado para produção de concretos na faixa de 40 a 160 MPa de resistência à compressão;

c) A forma do agregado é considerada durante o cálculo do proporcionamento dos materiais.

Requisitos de projeto:

- a) Abatimento;
- b) Resistência que se deseja alcançar;
- c) DMC.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Ponto de saturação do aditivo;
- b) Massa específica e quantidade de sólidos do aditivo;
- c) Massa específica do cimento, areia e brita;
- d) Forma do agregado graúdo;
- e) Teor de ar incorporado;
- f) Absorção dos agregados.

Etapas de dosagem:

a) Estimativa da relação água/aglomerante, feita através de um gráfico que a relaciona com a resistência à compressão do concreto;

b) Determinação da quantidade mínima de água na mistura, tabelada em função do ponto de saturação do superplastificante;

c) Determinação da dosagem de superplastificante, feita de acordo com o ponto de saturação. Se este for desconhecido, sugere-se começar com 1% de sólidos sobre a massa de material cimentante;

d) Estimativa do consumo de agregado graúdo. Esta estimativa é feita com base na forma do agregado. Se a forma do agregado não for facilmente definida, sugere-se adotar 1000 kg/m^3 ;

e) Estimativa da quantidade de ar incorporado à mistura. Se este número for desconhecido, sugere-se utilizar 1,5% como valor inicial;

f) Preenchimento da tabela de dosagem. O método apresenta uma tabela que é preenchida à medida que o proporcionamento dos materiais é calculado. Ao final, determina-se o traço da dosagem e a quantidade de material, em quilos por m^3 de concreto e para a betonada que será produzida.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método considera características particulares dos materiais, tais como a forma do agregado graúdo, o que torna o seu proporcionamento mais eficaz;
- A tabela de dosagem preenchida serve como um roteiro de cálculo e facilita a estimativa da quantidade de materiais empregados na dosagem.

b) Desvantagens

- Por ser baseado em experiências anteriores, o método serve apenas como guia. Ajustes na primeira tentativa devem ser feitos;
- É específico para os materiais selecionados. Qualquer alteração nas características de algum dos materiais precisa ser levada em consideração.

3.2.2 Métodos baseados na otimização do esqueleto granular

Alguns métodos específicos para concreto de alta resistência, entretanto, seguem uma outra abordagem que não a do critério do volume absoluto. O princípio fundamental destes métodos é a otimização de um esqueleto granular que apresente o menor índice de vazios possível. Alguns métodos que seguem este fundamento básico são descritos a seguir.

3.2.2.1 Método Mehta e Aitcin (1990b)

Fundamentos básicos:

a) Segundo os autores, através deste método é possível produzir-se concreto de alta resistência na faixa entre 60 e 120 MPa. Esta faixa começa em 60 MPa, por ser este um valor que caracteriza um concreto de baixa permeabilidade, como espera-se que seja o concreto de alta resistência. O limite superior é fixado em 120 MPa porque eles acreditam ser este o valor máximo que se pode alcançar utilizando-se agregados naturais e aumentando-se a resistência da pasta de cimento através do controle do consumo de água e das adições;

b) O consumo de água depende da DMC e do abatimento desejado, e influencia diretamente na resistência;

c) Considera-se que o concreto de alta resistência contém 2% de ar aprisionado;

d) Do volume total do concreto, existe uma proporção ideal entre o esqueleto granular e a pasta de cimento hidratada que apresenta o menor índice de vazios possível. Este valor é fixo e corresponde a 35% de pasta de cimento para 65% de esqueleto granular.

Requisitos de projeto:

a) Resistência à compressão que se deseja alcançar;

b) Abatimento;

c) DMC.

Ensaio preliminares necessários:

a) Massa específica do cimento, agregados e adições.

Etapas de dosagem:

a) Estimativa do consumo de água: é apresentada uma tabela da estimativa dos consumos máximos de água, que inclui os valores 65, 75, 90, 105 e 120 MPa. Para os outros valores que encontram-se na faixa entre 60 e 120 MPa é preciso interpolar-se este consumo. Esta estimativa é baseada na experiência com concretos com superplastificantes de alto abatimento e com agregados de DMC entre 12 e 19 mm;

b) Fracionamento em volume dos componentes da pasta de cimento: a pasta de cimento no estado fresco contém cimento anidro, água, ar e geralmente adição mineral. São apresentadas três opções de mistura, no que diz respeito às adições. A primeira opção é feita somente com cimento Portland, sem adições. A segunda utiliza adições do tipo cinza volante ou escória, enquanto que a terceira opção emprega cinza volante ou escória, mais sílica ativa;

c) Estimativa do conteúdo de agregado: devido ao relativo alto volume da pasta de cimento para misturas de concreto de alta resistência, geralmente não é necessário mais de 40% de agregado miúdo no volume total de agregado. Assim sendo, para a primeira tentativa, a razão entre agregado miúdo e graúdo é 2:3;

d) Cálculo da massa dos materiais: de posse dos valores das massas específicas dos materiais, converte-se seus volumes em massa e determina-se a quantidade de material necessária;

e) Dosagem do superplastificante: a quantidade de superplastificante incorporada varia entre 0,8 e 2% de sólidos sobre a massa do material cimentante. Para a primeira tentativa, 1% é recomendado;

f) Ajustes na umidade: alguns ajustes na água podem ser necessários, principalmente se o volume de água do aditivo não foi descontada da água de mistura. Além disso, ajustes na água de mistura podem ser feitos, se necessários, em função da umidade dos agregados.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método é facilmente desenvolvido, e requer poucos ensaios de caracterização dos materiais;
- Pressupõe-se que sendo 35% do volume total do concreto ocupado pela pasta de cimento anidro e 65% pelo esqueleto granular, está alcançando-se o menor teor de vazios, dispensando os ensaios de índice de vazios e de massa unitária compactada dos agregados;
- O consumo de água máximo é simplesmente interpolado de uma tabela, independente do tipo de cimento, agregado ou adição que será utilizado.

b) Desvantagens

- Uma vez que este método presume várias considerações iniciais, o cálculo das quantidades de material da mistura para a primeira tentativa serve apenas de guia, podendo surgir a necessidade de modificá-la, segundo requisitos de trabalhabilidade e resistência. Podem ser necessárias outras tentativas em laboratório, usando-se até mesmo outros materiais, para que se determine a proporção da mistura que melhor atinge os critérios de trabalhabilidade e resistência exigidos. De qualquer forma, algumas sugestões para possíveis ajustes são oferecidas pelos autores:

Se o concreto não apresentar a consistência desejada, a dosagem de superplastificante pode ser gradualmente aumentada, até que se atinja a consistência requerida. Porém, aumentar a quantidade de superplastificante pode trazer efeitos indesejados, tais como tendência a segregação ou maior perda de consistência com o tempo. Isto pode ser corrigido com o aumento da razão entre agregado miúdo e graúdo ou pelo uso de agregado miúdo com módulo de finura menor. No caso de concretos sem adições, isto pode ser resolvido com a incorporação de sílica ativa, cinza volante ou ambos. Para resolver o problema da perda de consistência, combinações de outros tipos ou marcas de superplastificante e cimento devem ser testados.

Se a resistência à compressão aos 28 dias de idade se apresentar menor do que o esperado, reduções no consumo de água podem resolver o problema.

3.2.2.2 Método de Larrard (1990)

Fundamentos básicos:

- a) A resistência de um concreto feito com determinado material é basicamente controlada pela natureza da pasta de ligação (fórmula de Féret);
- b) A trabalhabilidade de um concreto cuja resistência é fixada está fortemente ligada à concentração de pasta e a fluidez da mesma (modelo de Farris);
- c) A máxima resistência será, teoricamente, alcançada com uma pasta de cimento puro;
- d) Para uma dada resistência e uma dada trabalhabilidade, há um índice ótimo de areia/agregados que minimiza a quantidade de pasta;

e) Este índice ótimo permanece inalterado se a pasta for substituída por um mesmo volume de uma outra pasta, feita com os mesmos materiais, mas proporções diferentes, e que tenha mesma viscosidade;

f) É possível obter-se concreto de alta resistência a partir da composição de um concreto convencional.

Requisitos de projeto:

- a) DMC;
- b) Abatimento;
- c) Resistência à compressão que se deseja alcançar.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Granulometria dos agregados;
- b) Execução de um concreto convencional, para a estimativa do consumo de água;
- c) Ensaio de tempo de fluxo (Cone de Marsh).

Etapas de dosagem:

a) Dosar um concreto de alta resistência chamado concreto de controle que contenha uma grande quantidade de superplastificante e uma quantidade de cimento que corresponda a menor demanda de água. Para a granulometria usual dos agregados, esta quantidade de cimento é em torno de 425 kg/m^3 . A água deste concreto deve ser ajustada de forma a produzir a trabalhabilidade certa, medida com um equipamento dinâmico, tal como o equipamento LCL ou o ensaio Vebe;

b) Medir o tempo de fluxo da pasta do concreto de controle. A relação água/cimento desta pasta deve ser computada levando-se em conta a umidade do agregado;

c) Arbitrariamente escolher as porcentagens dos componentes das pastas (por exemplo: 90 % cimento + 10 % sílica ativa ou 75 % cimento + 20 % cinza volante + 5 % sílica ativa);

d) Para cada pasta, adicionar uma pequena quantidade de superplastificante, ajustando o teor de água para que se obtenha uma pasta com tixotropia adequada (entretanto, que passe pelo cone com tempo de fluxo de aproximadamente 20 segundos). Com a relação a/c temporariamente fixada, adicionar superplastificante até que o tempo de fluxo não diminua mais. Esta quantidade de superplastificante representa o valor de saturação, e permanecerá fixado de uma vez por todas;

e) Ajustar o teor de água para se obter o mesmo tempo de fluxo da pasta de controle. Como consequência, a relação a/c está agora fixada para cada pasta;

f) Medir as mudanças nas características do fluxo com o tempo durante a mistura do concreto de alta resistência (para evitar o risco de perda de trabalhabilidade). Se o tempo de fluxo aumentar muito, um aditivo retardador deve ser adicionado para mantê-lo sob o valor de referência;

g) Estimar a resistência do concreto de alta resistência feito com as diferentes pastas. Esta estimativa pode ser feita pela fórmula de Féret. Uma precisão melhor será alcançada com ensaios de compressão nas diferentes argamassas. Cada argamassa deve ser dosada com o mesmo volume de pasta para apresentar a mesma trabalhabilidade;

h) Executar o concreto de alta resistência, a partir da escolha de uma das pastas ensaiadas anteriormente (passo g), usando o mesmo material granular e o mesmo volume de pasta do concreto de controle. Seguindo o modelo de Farris, o concreto de alta resistência e o concreto de controle terão a mesma trabalhabilidade. Depois disso, deve-se checar se as propriedades de consistência e resistência estão coerentes. Se a resistência estiver muito alta ou muito baixa retornar ao passo anterior e escolher outra pasta.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- A principal hipótese deste método diz respeito ao uso do índice de saturação do superplastificante, que leva a concretos com boas propriedades, principalmente no estado fresco;
- A quantidade de pasta de cimento é moderada, de forma a evitar problemas de calor de hidratação, fissuração e retração.

b) Desvantagens

- É um método bastante trabalhoso, que requer vários ensaios preliminares, incluindo a execução de um concreto convencional de controle;
- É baseado em um modelo teórico e uma fórmula empírica;
- Utiliza-se grande quantidade de superplastificante, podendo encarecer o produto final.

3.2.2.3 Método Domone e Soutsos (1994)

Fundamentos básicos:

a) Baseia-se na teoria da compacidade máxima, que tem como princípio que os agregados devem ocupar o maior volume possível de concreto, e os vazios devem ser preenchidos com a pasta de material cimentante;

b) É essencial utilizar-se uma baixa relação água/aglomerante, mas para tanto não se deve aumentar o consumo de cimento, que não colabora para o aumento de resistência;

c) O uso de aditivo é fundamental para garantir a baixa relação água/aglomerante sem que haja a necessidade de aumentar-se o consumo de cimento;

d) A relação água/aglomerante é controlada pela resistência que se deseja alcançar;

e) As misturas são feitas com quantidade de areia correspondente ao conteúdo mínimo de vazios, que deve levar ao menor consumo de cimento;

f) A resistência da zona de transição entre a superfície do agregado e a pasta de cimento hidratada exerce grande influência na resistência do conjunto.

Requisitos de projeto:

a) DMC;

b) Abatimento;

c) Resistência à compressão que se deseja alcançar.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Determinação do índice de vazios das várias misturas de agregado miúdo e gráudo;
- b) Secagem dos agregados em estufa.

Etapas de dosagem:

a) Diferentes pastas de cimento são estabelecidas, variando-se a relação água/cimento e teores de superplastificante;

b) Essas pastas são misturadas ao esqueleto granular que apresentou, nos ensaios preliminares, o menor índice de vazios. Cada pasta é misturada ao esqueleto em várias quantidades, começando-se com aquela correspondente ao índice de vazios, e aumentando-se até um máximo de 9% o chamado excesso de pasta;

c) A quantidade mínima de areia, que corresponde ao menor índice de vazios, é reduzida em aproximadamente 10%, e novas combinações pastas-esqueletos são feitas. Essas reduções na areia são feitas de 2,5 em 2,5%, e têm por finalidade reduzir-se o excesso de pasta;

d) Todas as misturas são moldadas e ensaiadas, e a melhor delas será a que apresentar a resistência requerida aos 28 dias de idade, com a trabalhabilidade estabelecida inicialmente, e que é medida ao longo da execução das misturas.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método procura utilizar o menor consumo possível de cimento, evitando problemas de calor de hidratação, fissuração e retração;
- É possível produzir concreto de alta resistência com os mais variados tipos de materiais, principalmente de agregados, uma vez que são realizadas vários ensaios preliminares e misturas de concreto com teores diferentes de agregados.

b) Desvantagens:

- São necessários vários ensaios preliminares e misturas experimentais;

- O índice de vazios dos agregados é determinado através de um aparelho específico para este fim.

3.2.2.4 Método Toralles Carbonari (1996)

Fundamentos básicos:

a) A idéia principal deste método é que concretos de alta resistência podem ser produzidos através da otimização, em separado, da pasta e do esqueleto granular, fazendo-se, então, a composição ótima da mistura dos dois;

b) Existe um esqueleto granular que apresenta o menor índice de vazios. A este esqueleto deve ser combinada uma pasta de cimento em uma quantidade superior a este índice de vazios, chamado excesso de pasta.

Requisitos de projeto:

- a) Abatimento;
- b) Resistência à compressão que se deseja alcançar;
- c) Tipo e dosagem de adição.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Ensaio de consistência normal;
- b) Ensaio do Cone de Marsh;
- c) Massa específica das pastas de cimento;
- d) Ensaio de compactação dos agregados secos;
- e) Análise granulométrica dos agregados;
- f) Absorção e massa específica dos agregados.

Etapas de dosagem:

a) Otimização da pasta de cimento: a relação água/aglomerante é fixada, sendo que o seu limite inferior é dado através do ensaio de consistência normal, e o limite superior, através do ensaio do Cone de Marsh, que estima o ponto de saturação do superplastificante;

b) Otimização do esqueleto granular: é escolhido o esqueleto cuja relação agregado miúdo/agregado graúdo apresentar o menor índice de vazios. Esta escolha é feita com base em ensaios de compactação dos agregados secos (NBR 7810/83);

c) Combinação pasta-esqueleto granular: são realizadas várias combinações de teores de pasta e esqueleto granular, começando-se com o teor zero, que corresponde ao valor exato do índice de vazios, sem excessos de pasta, até mais ou menos 10% de excesso. São produzidos concretos com os vários teores de excesso de pasta que poderão ser ensaiados à compressão simples a qualquer idade, sendo que a autora do método realizou os ensaios aos 14 dias de idade. O traço ideal será aquele que conseguir combinar a resistência esperada, na faixa de trabalhabilidade exigida.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método consegue fazer a melhor combinação possível entre os materiais utilizados.

b) Desvantagens

- Vários ensaios preliminares precisam ser realizados, que consomem tempo e material, além de recursos humanos;
- São realizadas várias misturas experimentais, entre os diversos teores de pasta e o esqueleto granular;
- É preciso combinar pelo menos três relações diferentes entre agregado graúdo / agregado miúdo para se determinar o melhor esqueleto granular;
- Nem sempre o traço que atinge a resistência desejada apresenta o abatimento requerido. As vezes, é preciso utilizar-se um traço que atinja resistência menor, para manter-se a trabalhabilidade que se quer.

3.2.2.5 Método O'Reilly Díaz (1998)

Fundamentos básicos:

a) O método enfatiza a questão da composição ótima dos agregados, e propõe a determinação de um esqueleto granular que forneça o menor índice de vazios. Para tanto é preciso analisar-se a forma das partículas;

b) É estimada a característica "A" do agregado graúdo, que é um parâmetro que considera sua forma e superfície. Esta característica "A" é determinada matematicamente em função da resistência à compressão aos 28 dias do cimento e do concreto, da consistência do concreto e da relação a/c, ou através de um modelo físico-matemático proposto;

c) O método propõe um modelo físico-matemático para a determinação da característica "A" do agregado graúdo que consta de fotografar, ampliar e analisar as partículas do agregado, analisando de forma minuciosa sua forma.

Requisitos de projeto:

- a) Abatimento;
- b) Resistência que se deseja alcançar;
- c) DMC;
- d) Resistência à compressão média do cimento aos 28 dias de idade.

Ensaio preliminares necessários:

- a) Granulometria dos agregados;
- b) Massa unitária compactada da mistura dos agregados;
- c) Massa específica absoluta dos agregados e da mistura dos agregados.

Etapas de dosagem:

a) Determinação da relação ótima dos agregados graúdos e miúdos, através da estimativa da porcentagem de vazios em várias misturas diferentes de agregados;

b) Determinação da quantidade de água necessária para a consistência requerida, através da elaboração de misturas de concreto com a trabalhabilidade requerida. Os consumos de cimento e água utilizados são escolhidos com base na experiência, e as misturas são executadas até que se alcance o abatimento desejado;

c) Determinação da característica “A” do agregado graúdo, através de cálculos ou do modelo físico-matemático proposto pelo autor;

d) O consumo final de cimento é determinado matematicamente, em função da característica “A” do agregado, da relação a/c, da resistência à compressão do cimento e da resistência à compressão que se deseja obter;

e) De posse de todos estes valores, a composição ótima da mistura de concreto é estabelecida, e são moldados corpos-de-prova para verificar-se a resistência à compressão do concreto aos 7 e 28 dias.

Vantagens e desvantagens:

a) Vantagens

- O método baseia-se em características dos agregados não consideradas anteriormente por outros métodos de dosagem.

b) Desvantagens

- O método baseia-se muito em experiências anteriores. Desta forma, o número de tentativas até que se determine o traço ideal pode vir a ser grande;
- A determinação da característica “A” do agregado graúdo proposta pelo método é extremamente trabalhosa e inviável;
- O método não considera o uso de aditivos e adições;
- A característica “A” do agregado graúdo só poderá ser calculada (no caso da não utilização do modelo físico-matemático proposto) após 28 dias da execução das misturas de concreto com a trabalhabilidade de que necessita-se, uma vez que os valores de resistência extraídos destes concretos são dados de entrada neste cálculo.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento experimental desta pesquisa, a partir da justificativa para a escolha dos métodos de dosagem a serem executados.

É feita a descrição dos materiais escolhidos para serem utilizados na produção do concreto de alta resistência, com sua caracterização. São apresentados os métodos escolhidos acompanhados da sua descrição passo a passo, incluindo ensaios preliminares, aferição de métodos, proporcionamento dos materiais, determinação dos traços experimentais e produção do concreto.

Após a descrição da execução de cada método, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral.

4.1 ESCOLHA DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

Para o desenvolvimento desta pesquisa experimental foram selecionados quatro métodos de dosagem, pelos quais o concreto de alta resistência é executado e submetido aos ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral.

Os métodos escolhidos foram Método IPT/EPUSP, Método Mehta/Aitcin, Método Toralles Carbonari e Método Aitcin, sendo que esta escolha foi feita seguindo alguns critérios de praticidade, princípios fundamentais e limitações técnicas de cada método.

O Método IPT/EPUSP foi selecionado por ser bastante difundido e utilizado no país. Além disso, ele é de fácil aplicação, podendo ser executado em obra, sem necessidade de ensaios especiais de laboratório.

O Método Mehta/Aitcin foi escolhido para ser executado devido ao seu fácil desenvolvimento e execução. É um método bastante prático para ser aplicado em obra.

O Método Toralles Carbonari foi selecionado por ser, provavelmente, o primeiro método de dosagem de concreto de alta resistência desenvolvido por uma pesquisadora brasileira.

E, finalmente, o Método Aitcin, que foi escolhido por seguir a mesma abordagem do ACI 211 (1989), porém, abrangendo faixas de resistência bem mais altas; por ser de fácil execução e por considerar características dos materiais que outros métodos não consideram.

O Método ABCP/ACI não pôde ser selecionado por apresentar algumas limitações. A principal delas é a que diz respeito às relações água/cimento, já que o valor mínimo considerado pelo método é de 0,45. No caso da produção de concreto de alta resistência, as relações água/cimento empregadas são as menores possíveis, e certamente encontram-se na faixa abaixo deste valor.

Os Métodos Domone e Soutsos e de Larrard baseiam-se na medida da fluidez das pastas de cimento, e têm o mesmo princípio do Método Toralles Carbonari, que parte da otimização, em separado, da pasta de cimento e do esqueleto granular. Porém, ambos são muito trabalhosos, uma vez que requerem uma série de ensaios preliminares que, na prática, podem vir a inviabilizar sua utilização.

O Método O'Reilly Díaz não foi indicado para ser executado por demandar muito tempo, além de não poder ser executado em condições normais de laboratório.

O Método Nawy não foi escolhido para ser executado porque apresentou, durante seu estudo preliminar, elevados consumos de cimento, o que o torna inviável técnica e economicamente, para os materiais disponíveis.

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção dos materiais utilizados nesta pesquisa deu-se, principalmente, em função da disponibilidade dos mesmos na região.

4.2.1 Cimento Portland

Foi utilizado Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, cujas características químicas, físicas e mecânicas, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1 Caracterização química, física e mecânica do cimento ARI

Características	Determinações	Valores Obtidos
Químicas	Perda ao fogo	2,13 %
	Resíduo insolúvel	0,39 %
	Óxido de Magnésio (MgO)	1,51 %
	Óxido de Enxofre (SO ₃)	3,27 %
	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,08 %
	Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,89 %
	Óxidos de Cálcio Livre (CaO)	0,98 %
	C ₃ S	59,92 %
	C ₂ S	11,79 %
	C ₃ A	5,11 %
Físicas	Massa específica absoluta	3,11 kg/dm ³
	Finura - índice de finura	1,60 %
	Finura - área específica	433 m ² /kg
	Consistência normal	29,1%
	Expansibilidade a quente	0,3 mm
	Tempo de pega inicial	3h 18 min
	Tempo de pega final	4h 52 min
Mecânicas	Resistência à compressão 1 dia	25,1 MPa
	Resistência à compressão 3 dias	38,6 MPa
	Resistência à compressão 7 dias	43,9 MPa
	Resistência à compressão 28 dias	51,9 MPa

4.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é o disponível no mercado local. É uma brita de origem basáltica, com dimensão máxima característica (DMC) igual a 19 mm. A caracterização física deste material consta nas Tabelas 4.2 e 4.3, a seguir.

Tabela 4.2 Granulometria do agregado graúdo (NBR 7217/87)

Abertura peneira	% média retida	% média retida acumulada
19,0	4	4
12,5	52	56
9,5	28	84
6,3	14	98
4,8	1	99
< 4,8	1	100

Tabela 4.3 Características físicas do agregado graúdo

Característica	Norma	Valor
Dimensão máxima característica (DMC) (mm)	NBR 7217/87	19
Módulo de finura	NBR 7217/87	7,87
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9937/87	3,06
Graduação	NBR 7211/83	Brita 1
Absorção (%)	NBR 9937/87	0,43

4.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia proveniente do Rio Jacuí. A caracterização física deste material consta nas Tabelas 4.4 e 4.5, a seguir.

Tabela 4.4 Granulometria do agregado miúdo (NBR 7217/87)

Abertura peneira	% média retida	% média retida acumulada
4.8	--	--
2.4	3	3
1.2	9	12
0.6	27	39
0.3	50	89
0.15	10	99
< 0.15	1	100

Tabela 4.5 Características físicas do agregado miúdo

Característica	Norma	Valor
Dimensão máxima característica (DMC) (mm)	NBR 7217/87	2,4
Módulo de finura	NBR 7217/87	2,42
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9776/86	2,63
Graduação (zona)	NBR 7211/83	3 (média)
Absorção (%)	NBR 9777/87	0,36

4.2.4 Adição mineral

A adição utilizada foi a sílica ativa, fornecida em forma de pó, seco e proveniente de um mesmo lote de fabricação. Suas características químicas e físicas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas nas Tabelas 4.6 e 4.7, a seguir.

Tabela 4.6 Características físicas da sílica ativa

Massa específica	2.22 kg/dm ³
Superfície específica	14.20 m ² /g
Umidade	0.67
Densidade	0.40
Ph	8.48

Tabela 4.7 Características químicas da sílica ativa

SiO ₂	95,1 %
Fe ₂ O ₃	0,10 %
CaO	0,24 %
Al ₂ O ₃	0,09 %
MgO	0,44 %
Na ₂ O	0,22 %
K ₂ O	0,93 %
Perda ao fogo	2,32 %

4.2.5 Aditivo químico

O aditivo utilizado foi superplastificante a base de naftaleno sulfonado. A massa específica do aditivo é de $1,24 \text{ kg/dm}^3$, sendo ele composto por 40 por cento de sólidos.

4.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Foi realizado um planejamento dos experimentos, com o auxílio do NAE – Núcleo de Assessoria Estatística, do Instituto de Matemática da UFRGS, com a finalidade de planejar-se o programa experimental desta pesquisa com embasamentos matemáticos, garantindo-se que os dados obtidos sejam válidos e estatisticamente significativos.

Através da ferramenta estatística “n-Query Advisor”, foram realizados cálculos de tamanho de amostra, para determinar-se o número de repetições de cada traço de concreto.

Desta forma, ficou estabelecido que para o primeiro método a ser executado, Método IPT/EPUSP, seriam produzidos cinco traços de concreto, sendo que cada um deles deveria ser repetido três vezes, obtendo-se um total de quinze pontos na curva de Abrams. Para o segundo método executado, o Método Mehta/Aitcin, deveriam ser produzidos cinco traços de concreto, sendo cada um deles repetido duas vezes, obtendo-se um total de dez pontos na curva de Abrams.

Para o Método Toralles Carbonari deveriam ser produzidos quatro traços de concreto com três repetições para cada traço e, finalmente, para o Método Aitcin, deveriam ser produzidos cinco traços de concreto com duas repetições de cada um. O número de traços produzidos por cada método foi estabelecido em função de princípios de cada método, enquanto que o número de repetições de cada traço foi estabelecido através de fundamentos estatísticos.

Os métodos de dosagem foram executados um de cada vez. Para cada método foi feita a primeira execução de todos os traços de concreto, seguida da segunda e terceira repetições, quando necessária.

Toda a parte experimental desta pesquisa foi realizada no LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Os ensaios foram desenvolvidos num período de oito meses, que estendeu-se de março a outubro de 1999. Para a produção do concreto estudado foi utilizada betoneira com eixo vertical, com capacidade de mistura de aproximadamente 80 litros.

Para cada traço foram moldados nove corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de 10 x 20 cm, de acordo com a NBR 5738/94 com a seguinte finalidade: seis para o ensaio de resistência à compressão simples, sendo dois para a idade de três dias, dois para a idade de sete dias e dois para a idade de 28 dias. Os três CP's restantes foram moldados para o ensaio de tração por compressão diametral na idade de 28 dias. Os CP's destinados ao ensaio de resistência à compressão simples tiveram seus topos regularizados com capeamento à base de enxofre.

De posse dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de idade do concreto produzido por cada método, foi feita uma análise dos resultados, para verificar se o tamanho da amostra utilizada realmente garantia uma probabilidade de acerto significativa quando testava-se as hipóteses de correlação das variáveis dependentes e independentes desta pesquisa.

Para os casos em que o número de traços e repetições realizados não eram suficiente, novas repetições de traços de concreto deveriam ser realizadas.

4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM

Foram fixados alguns parâmetros, válidos para todos os métodos de dosagem executados, a fim de que os resultados obtidos possam ser comparados entre si. São eles:

- abatimento: 120 ± 20 mm, por ser esta uma trabalhabilidade usual para concreto bombeado;
- aditivo: acrescentado à mistura durante sua execução, em quantidade mínima suficiente para alcançar-se a trabalhabilidade desejada;
- adição: 10% sobre a massa de cimento;
- resistência à compressão: acima de 50 MPa.

4.4.1 Método IPT/EPUSP

O primeiro método executado foi o método de dosagem de concreto do IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Helene e Terzian, 1992). Este método já foi descrito de forma genérica no Capítulo 3, e sua execução neste trabalho será descrita a seguir.

Inicialmente, foi feita a seleção dos materiais a serem utilizados, cuja caracterização não seria necessária para a execução do método.

Foi executado um concreto-piloto para definir-se o teor ideal de argamassa e as misturas experimentais. Este concreto-piloto será detalhadamente explicado a seguir.

4.4.1.1 Concreto-piloto

O concreto-piloto foi o primeiro concreto produzido por este método. O objetivo principal da sua execução foi definir o teor ideal de argamassa. De posse deste valor, define-se as misturas experimentais e determina-se suas relações a/c .

O traço-piloto executado foi o traço 1:5 (1:m; cimento: agregados secos totais, em massa).

Para definir-se o teor ideal de argamassa fixa-se a quantidade de agregado graúdo da primeira mistura (p), e encontra-se o valor do agregado miúdo (a), uma vez que $m = (a + p)$, e $m = 5$.

O teor de argamassa (α) é dado a partir da expressão $\alpha = \frac{1+a}{1+a+p}$, onde:

α = teor de argamassa;

a = proporção agregado miúdo/cimento, em massa;

p = proporção agregado graúdo/cimento, em massa.

Uma vez que este traço 1:m inicial, definido como sendo 1:5 é um traço-piloto, e a quantidade inicial de agregado graúdo (p) é pré-estabelecida, são necessários pequenos ajustes dos valores de areia (a) e cimento, mantendo-se “ m ” constante e igual a 5, para estimar-se o teor ideal de argamassa. Essa quantidade ideal de argamassa deve ser suficiente para preencher os vazios do agregado graúdo e permitir o acabamento. Os ajustes da areia e cimento, de caráter totalmente experimental, são realizados com o auxílio do preenchimento de uma tabela.

O teor ideal de argamassa é determinado por tentativa e por observações práticas, e a execução do traço 1:5 permitiu definir o teor ideal de argamassa $\alpha = 50\%$. Uma vez definido este valor, ele é válido para todo o concreto produzido por este método.

Depois de definido o teor ideal de argamassa, acrescentou-se água à mistura, até que se alcançou a trabalhabilidade desejada, determinando-se, assim, a relação a/c.

Os traços auxiliares desta pesquisa foram 1:4, 1:3, 1:2 e 1:1,5. Esses valores foram assim definidos porque para valores de "m" maiores que 5, as relações a/c são muito altas e não se consegue produzir concreto de alta resistência. A inclusão de traços como o 1:2 e 1:1,5 ocorreu em função da necessidade diminuir-se ao máximo os valores de "m", e conseqüentemente, as relações a/c, de forma que se atingisse altas resistências sem a necessidade de extrapolar-se a curva a/c X fc.

O concreto-piloto e as misturas experimentais foram produzidos e suas composições são descritas na Tabela 4.8 a seguir. A água colocada nestas misturas foi a suficiente e necessária para alcançarmos um abatimento fixado em 50 ± 10 mm.

Tabela 4.8 Quantidade de material do concreto-piloto

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50 \%$					
TRAÇO	1:5	1:4	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	6,67	8,00	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	13,33	12,00	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,28	3,28	3,56	4,35	5,00
a/c	0,49	0,41	0,36	0,33	0,31
Abatimento (mm)	40	45	50	50	70
Consumo cimento (kg/m^3)	391	472	584	752	878
H (%)	7,83	8,20	9,00	10,90	12,50

O ajuste da curva a/c X m referente aos traços de concreto produzidos é apresentado na Figura 4.1.

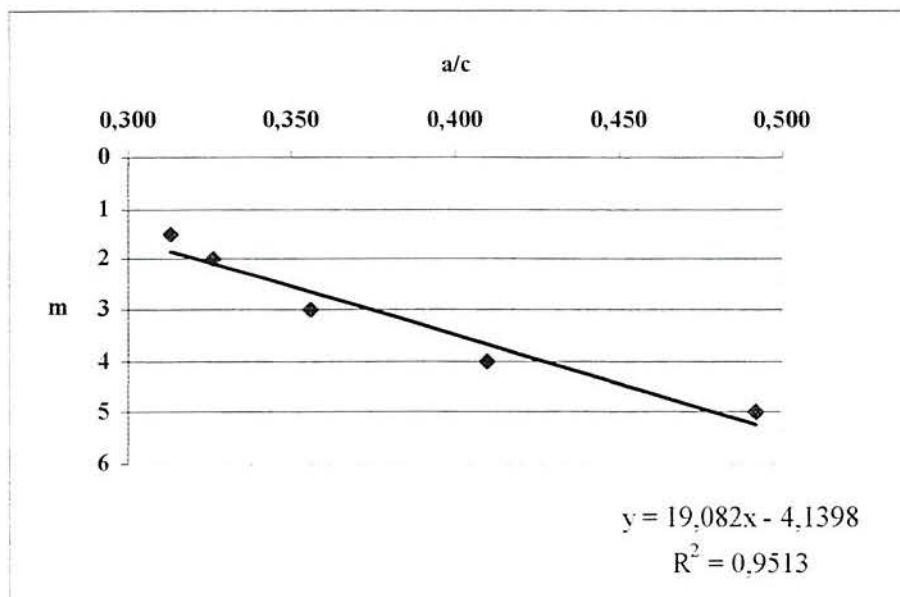


Figura 4.1 Ajuste da curva a/c x m, concreto-piloto

Obs.: Para o cálculo do consumo de cimento por m³ de concreto apresentado na Tabela 4.8 foi calculado o volume de concreto produzido com uma determinada quantidade de cimento, através da seguinte expressão:

$$V_{\text{concreto}} = \frac{M_{\text{cimento}}}{\gamma_{\text{cimento}}} + \frac{M_{\text{areia}}}{\gamma_{\text{areia}}} + \frac{M_{\text{brita}}}{\gamma_{\text{brita}}} + \frac{M_{\text{silica}}}{\gamma_{\text{silica}}} + \frac{M_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}}$$

Conhecendo-se a quantidade de cimento utilizada para produzir esse volume de concreto (V_{concreto}) pode-se determinar o consumo de cimento para um m³ de concreto.

A colocação dos materiais na betoneira obedeceu à seguinte ordem:

- brita (20 kg);
- parte da água (aproximadamente a metade);
- início da mistura;
- cimento;
- restante da água;
- areia.

4.4.1.2 Concreto de Alta Resistência (1ª etapa)

4.4.1.2.1 Produção do concreto

De posse dos valores do teor ideal de argamassa $\alpha = 50\%$, das relações a/c para cada traço e da quantidade de material, partiu-se para a produção do concreto de alta resistência com adições e aditivos.

As relações a/c foram mantidas fixas para os mesmos valores de “m” na produção do CAR, porém foram transformadas em relação água/material cimentante devido à incorporação da adição para atingir-se a alta resistência. Os aditivos foram utilizados para garantir que se alcance o abatimento estabelecido para o CAR.

Para a execução de cada traço, a quantidade de material utilizado encontra-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$					
TRAÇO	1:5	1:4	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	6,67	8,00	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	13,33	12,00	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,58	3,57	3,86	4,64	4,84
SÍLICA (kg)	0,67	0,80	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,49	0,41	0,35	0,32	0,28
ADITIVO (l)	0,053	0,082	0,104	0,181	0,224
ADITIVO (%)	0,72	0,92	0,95	1,23	1,27
Abatimento (mm)	140	120	130	140	95
Consumo cimento (kg/m ³)	378	453	558	714	847
H (%)	8,17	8,20	9,00	10,67	11,20

Obs.: A porcentagem de aditivo adicionada à mistura refere-se ao total de material cimentante.

De acordo com o NAE – Núcleo de Assessoria Estatística, foram realizadas duas outras repetições dos cinco traços de concreto produzidos, conforme consta nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$					
TRAÇO	1:5	1:4	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	6,67	8,00	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	13,33	12,00	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,58	3,57	3,86	4,64	4,84
SÍLICA (kg)	0,67	0,80	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,49	0,41	0,36	0,32	0,28
ADITIVO (l)	0,0459	0,1010	0,1092	0,1409	0,2410
ADITIVO (%)	0,62	1,15	0,99	0,96	1,37
Abatimento (mm)	105	140	105	130	110
Consumo cimento (kg/m ³)	378	453	558	714	847
H (%)	8,17	8,20	9,00	10,67	11,20

Tabela 4.11 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (3ª repetição)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$					
TRAÇO	1:5	1:4	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	6,67	8,00	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	13,33	12,00	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,58	3,57	3,86	4,64	4,84
SÍLICA (kg)	0,67	0,80	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,49	0,41	0,36	0,32	0,28
ADITIVO (l)	0,0401	0,0760	0,1123	0,1258	0,1849
ADITIVO (%)	0,55	0,86	1,02	0,86	1,05
Abatimento (mm)	110	125	130	105	105
Consumo cimento (kg/m ³)	378	453	558	714	847
H (%)	8,17	8,20	9,00	10,67	11,20

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- brita (20 kg);
- parte da água (aproximadamente a metade);
- início da mistura;
- cimento;
- restante da água ;
- sílica ativa;
- aditivo;
- areia.

4.4.1.2.2 Apresentação dos resultados

As Tabela 4.12 e 4.13 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral preconizados, respectivamente, pelas NBR 5739/94 e NBR 7222/94.

Os resultados apresentados neste capítulo representam todos os CP's ensaiados, independente das resistências médias ou potenciais, antes da retirada dos valores espúrios.

Tabela 4.12 Valores de resistência à compressão simples, método IPT/EPUSP

Traço	fc₃ (MPa)	fc₇ (MPa)	fc₂₈ (MPa)	Repetição
1:1,5	51,93	57,35	64,72	1 ^a
	51,15	54,25	61,62	
1:1,5	51,54	59,68	67,04	2 ^a
	44,95	53,48	61,23	
1:1,5	50,38	53,48	55,80	3 ^a
	50,38	51,93	55,41	
1:2	49,60	47,28	60,45	1 ^a
	48,83	46,11	58,13	
1:2	43,40	46,89	58,90	2 ^a
	41,08	46,89	47,28	
1:2	46,50	48,83	51,15	3 ^a
	45,73	47,28	50,38	
1:3	44,95	52,70	63,17	1 ^a
	44,18	51,15	56,19	
1:3	44,18	51,93	57,35	2 ^a
	44,18	48,44	52,70	
1:3	43,40	50,38	60,45	3 ^a
	41,46	44,95	54,25	
1:4	40,69	49,60	57,74	1 ^a
	39,91	44,95	56,96	
1:4	36,16	46,11	50,38	2 ^a
	34,63	43,40	41,46	
1:4	40,69	44,18	55,03	3 ^a
	39,14	44,18	48,83	
1:5	33,11	39,91	45,73	1 ^a
	32,35	34,63	45,73	
1:5	30,07	36,92	45,73	2 ^a
	29,69	36,92	44,18	
1:5	34,63	37,68	44,95	3 ^a
	32,35	37,68	44,18	

Tabela 4.13 Valores de resistência à tração por compressão diametral, método IPT/EPUSP

Traço	ft₂₈ (MPa)	Repetição
1:1,5	3,98	1 ^a
	3,98	
	3,78	
1:1,5	4,36	2 ^a
	3,98	
	3,98	
1:1,5	4,17	3 ^a
	3,98	
	3,98	
1:2	4,36	1 ^a
	3,98	
	3,88	
1:2	4,75	2 ^a
	4,56	
	4,17	
1:2	4,56	3 ^a
	4,36	
	3,98	
1:3	5,14	1 ^a
	5,14	
	4,95	
1:3	5,14	2 ^a
	4,36	
	4,36	
1:3	4,95	3 ^a
	3,98	
	3,98	
1:4	4,75	1 ^a
	4,36	
	4,36	
1:4	4,36	2 ^a
	4,17	
	4,17	
1:4	4,36	3 ^a
	3,98	
	3,59	
1:5	4,56	1 ^a
	4,36	
	3,59	
1:5	4,56	2 ^a
	4,56	
	4,36	
1:5	4,75	3 ^a
	3,98	
	3,98	

4.4.1.3 Concreto de Alta Resistência (2ª etapa)

4.4.1.3.1 Produção do concreto

Com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de concreto de alta resistência dosados por este método, algumas considerações foram feitas:

1. O máximo valor de resistência potencial alcançado aos 28 dias de idade foi $f_c = 67,04$ MPa. Este valor não foi tão alto como os que se pretendia alcançar;
2. À medida em que os traços de concreto ficavam mais ricos, o teor de água (H%) aumentava;
3. A quantidade de aditivo superplastificante adicionada na mistura cresceu do traço mais pobre ao traço mais rico, como era de se esperar;
4. A trabalhabilidade do concreto, medida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, fixada inicialmente em 120 ± 20 mm, foi alcançada e serviu de parâmetro para limitar o uso do aditivo.

A partir das considerações citadas anteriormente, foi possível identificar as prováveis causas para justificar esses valores de resistência. Assim sendo, na tentativa de tornar viável a produção de concreto com resistências maiores do que as alcançadas por este método, novos critérios foram estabelecidos e o método de dosagem foi executado novamente.

Para os traços 1:5 e 1:4 o valor de “H %” foi praticamente igual, ou seja, $H=8,20\%$. Decidiu-se, então, fixar este valor em $H \sim 8,20\%$ para todos os demais traços (1:3; 1:2; 1:1,5), e repeti-los, diminuindo-se desta forma a água de mistura e a relação a/aglomerante, na tentativa de se elevar a resistência dos concretos produzidos.

Desta forma, a água de mistura foi reduzida em até 22 %. Para compensar esta redução de água, observada principalmente em termos de perda de trabalhabilidade, foi adicionado às misturas mais aditivo superplastificante, chegando este aumento a ser da ordem de 90%.

Assim, para os traços 1:3; 1:2 e 1:1,5, foram recalculadas as quantidades de material por m^3 de concreto, e o concreto foi produzido novamente, respeitando o número de

repetições estabelecido pelo Núcleo de Assessoria Estatística, assim como o número de nove CP's moldados por traço de concreto.

As Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a quantidade de material empregado na mistura de concreto para as três novas repetições.

Tabela 4.14 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição – 2ª tentativa)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$			
TRAÇO	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,61	3,61	3,61
SÍLICA (kg)	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,33	0,25	0,21
ADITIVO (l)	0,1286	0,1967	0,3295
ADITIVO (%)	1,17	1,34	1,87
Abatimento (mm)	180	120	165
Consumo cimento (kg/m ³)	568	758	912
H (%)	8,25	8,33	8,40

Tabela 4.15 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição – 2ª tentativa)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$			
TRAÇO	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,61	3,61	3,61
SÍLICA (kg)	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,33	0,25	0,21
ADITIVO (l)	0,1263	0,2126	0,3520
ADITIVO (%)	1,15	1,45	2,00
Abatimento (mm)	215	130	210
Consumo cimento (kg/m ³)	568	758	912
H (%)	8,25	8,33	8,40

O aditivo superplastificante foi sendo adicionado ao concreto, durante a mistura, de acordo com a necessidade, porém sem a preocupação de fixar-se uma faixa de trabalhabilidade a ser alcançada. Pode-se inclusive observar que os valores do abatimento alcançados ultrapassaram o limite anteriormente estabelecido de 120 ± 20 mm. Isso ocorreu porque nesta segunda etapa a preocupação foi alcançar-se maiores valores de resistência.

Por serem concretos bastante ricos houve dificuldade em manter-se a trabalhabilidade máxima em 140 mm, uma vez que pequenas acréscimos de aditivo alteram muito o abatimento do concreto. Desta forma, decidiu-se por manter o abatimento em um mínimo de

120 mm. Sabe-se, inclusive, que a quantidade de aditivo adicionado não altera a resistência do concreto, podendo trazer, entretanto, variações no seu custo final. É importante, porém, não ultrapassar o valor crítico a partir do qual o excesso de aditivo começa a causar incorporação de ar e/ou segregação no concreto além de retardo de pega.

Tabela 4.16 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (3ª repetição – 2ª tentativa)

TEOR DE ARGAMASSA $\alpha = 50\%$			
TRAÇO	1:3	1:2	1:1,5
CIMENTO (kg)	10,00	13,33	16,00
AREIA (kg)	10,00	6,67	4,00
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,61	3,61	3,61
SÍLICA (kg)	1,00	1,33	1,60
a/aglomerante	0,33	0,25	0,21
ADITIVO (l)	0,1100	0,1947	0,3107
ADITIVO (%)	1,00	1,33	1,76
Abatimento (mm)	135	175	140
Consumo cimento (kg/m^3)	568	758	912
H (%)	8,25	8,33	8,40

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- brita (20 kg);
- parte da água (aproximadamente a metade);
- início da mistura;
- cimento;
- restante da água + 1% aditivo;
- sílica ativa;
- mais aditivo;
- areia.

4.4.1.3.2 Apresentação dos resultados

As Tabela 4.17 e 4.18 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral desta segunda etapa.

Tabela 4.17 Valores de resistência à compressão simples, Método IPT/EPUSP, 2ª tentativa

Traço	fc ₃ (MPa)	fc ₇ (MPa)	fc ₂₈ (MPa)	Repetição
1:1,5	59,29	65,49	84,87	1ª
	54,64	53,09	81,77	
1:1,5	58,90	70,92	79,83	2ª
	54,64	58,90	78,28	
1:1,5	63,94	70,92	74,79	3ª
	61,62	65,49	68,59	
1:2	60,84	57,74	76,34	1ª
	56,19	55,41	66,27	
1:2	58,90	62,78	73,24	2ª
	51,15	59,29	72,47	
1:2	57,74	61,62	75,57	3ª
	52,70	61,62	71,69	
1:3	47,66	53,48	64,72	1ª
	43,79	52,31	59,68	
1:3	49,60	55,41	67,82	2ª
	47,28	48,83	67,04	
1:3	44,18	53,86	65,10	3ª
	43,40	53,48	63,17	

Tabela 4.18 Valores de resistência à tração por compressão diametral, Método IPT/EPUSP, 2ª tentativa

Traço	ft ₂₈ (MPa)	Repetição
1:1,5	4,17	1ª
	4,17	
	3,98	
1:1,5	4,85	2ª
	4,66	
	4,66	
1:1,5	5,82	3ª
	5,04	
	4,66	
1:2	5,33	1ª
	4,56	
	4,56	
1:2	4,75	2ª
	4,56	
	4,36	
1:2	5,14	3ª
	4,36	
	3,98	
1:3	4,95	1ª
	4,75	
	4,56	
1:3	6,01	2ª
	5,04	
	4,66	
1:3	4,85	3ª
	4,66	
	4,66	

4.4.2 Método Mehta/Aitcin

O segundo método executado foi o Método Mehta/Aitcin (Mehta e Aitcin, 1990b), cujos princípios fundamentais foram descritos anteriormente no capítulo 3. Entretanto, o seu desenvolvimento passo a passo é explicado a seguir.

4.4.2.1 Determinação dos traços e quantidades de material

1º passo: Escolha da resistência

Para a execução deste método, e com base nos resultados das dosagens de concreto de alta resistência pelo método do IPT/EPUSP, a fim de se poder comparar as faixas de resistência entre métodos, foram escolhidos como níveis de resistência à compressão simples aos 28 dias de idade os valores mostrados na Tabela 4.19 a seguir:

Tabela 4.19 Níveis de resistências

Nível	Resistência (MPa)
A	50
B	65
C	80
D	95
E	110

O valor 50 MPa foi escolhido para a resistência mínima que se quer adotar por ser a linha divisória entre concretos das Classes I e II, de acordo com a NBR 8953/92, sendo que o concreto de alta resistência enquadra-se na Classe II.

O valor 110 MPa foi escolhido como valor máximo de resistência a ser alcançado porque considerou-se que com os materiais empregados seria muito difícil se alcançar resistências maiores que esta.

2º passo: Estimativa do consumo de água

A quantidade de água a ser adicionada na mistura é interpolada da tabela de consumo de água apresentada pelos autores do método, e que nos leva aos valores apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 Consumo de água por m^3 , para cada nível de resistência

Nível	Resistência (MPa)	Consumo de água (l/m^3)
A	50	175
B	65	160
C	80	145
D	95	135
E	110	125

3º passo: Fracionamento em volume dos componentes da pasta de cimento

É considerada pasta de cimento 35% do volume total do concreto, valor este que representa, segundo os autores, uma ótima solução em termos de trabalhabilidade, resistência e estabilidade dimensional.

A pasta de cimento é composta pelo cimento anidro, água, ar e adição (sílica ativa).

Para o concreto de alta resistência, foi estimado em 2% o volume de ar incorporado.

Este método de dosagem utiliza-se de materiais cimentantes além do cimento, preferencialmente como substituição, trabalhando com os valores calculados com base em volumes. A fim de padronizar-se o programa experimental, e uma vez que os outros métodos de dosagem utilizados empregam os outros materiais cimentantes como adição, calculando-os sobre a massa de cimento, decidiu-se que para todos os métodos executados seria feita adição de sílica ativa em 10% sobre a massa de cimento.

A Tabela 4.21 mostra a composição da pasta de cimento, em m^3 , que corresponde a um total de $0,35 m^3$ para cada $1 m^3$ de concreto.

Tabela 4.21 Volume fracionado da pasta de cimento para $1 m^3$ de concreto

Nível	Água	Ar	Cimento	Sílica ativa (SA)	Cimento + SA
A	0,175	0,02	0,141	0,014	0,155
B	0,160	0,02	0,155	0,015	0,170
C	0,145	0,02	0,168	0,017	0,185
D	0,135	0,02	0,177	0,018	0,195
E	0,120	0,02	0,190	0,020	0,210

4º passo: Estimativa do conteúdo de agregado

Como a pasta de cimento é $0,35 m^3$, para $1 m^3$ de concreto, a parcela de agregados corresponde a $0,65 m^3$. A proporção entre agregado miúdo e agregado graúdo, segundo os autores, é de 40% para o nível A, e para os demais níveis, esta proporção vai diminuindo, de acordo com a tabela 4.22, que mostra os valores em proporção, para formar $0,65 m^3$.

Tabela 4.22 Volume e proporção de agregados, para 1 m³ de concreto

Nível	agregado miúdo	agregado graúdo	proporção
A	0,260	0,390	2:3
B	0,253	0,397	1,95:3,05
C	0,247	0,403	1,90:3,10
D	0,240	0,410	1,85:3,15
E	0,234	0,416	1,80:3,20

5º passo: Cálculo das massas dos materiais

Com base na massa específica dos materiais empregados, calcula-se a quantidade de material, em kg/m³, conforme apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 Quantidade de material, em kg/m³

Nível	fc (MPa)	material cimentante		água	agreg. graúdo	agreg. miúdo	total	a/ag
		CP	SA					
A	50	421	42,1	175	1193	684	2515,1	0,37
B	65	462	46,2	160	1213	667	2548,2	0,31
C	80	503	50,3	145	1233	650	2581,3	0,26
D	95	530	53,0	135	1253	633	2604,0	0,23
E	110	571	57,1	120	1273	615	2636,1	0,19

6º passo: Dosagem de superplastificante

Neste estudo, a quantidade de aditivo superplastificante adicionado à mistura foi definida durante a realização da mesma, tendo sido usada a quantidade de aditivo mínima suficiente para se alcançar a trabalhabilidade requerida.

Depois de feito o proporcionamento dos materiais seguindo o roteiro passo a passo apresentado pelo método, foi possível identificar os traços correspondentes aos diversos níveis de resistência, que são, de A a E, 1:4,5; 1:4,1; 1:3,7; 1:3,6 e 1:3,3, respectivamente.

4.4.2.2 Produção do Concreto de Alta Resistência

Para a execução de cada traço, a quantidade de material utilizada encontra-se na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição)

TRAÇO	1:4,5	1:4,1	1:3,7	1:3,6	1:3,3
CIMENTO (kg)	7,06	7,61	8,15	8,46	8,96
AREIA (kg)	11,46	10,99	10,54	10,10	9,67
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Água (l)	2,90	2,62	2,35	2,18	2,06
SÍLICA (kg)	0,71	0,76	0,82	0,85	0,90
Aditivo (litros)	0,094	0,119	0,196	0,238	0,555
Aditivo (%)	1,21	1,42	2,18	2,56	5,63
a/aglomerante	0,37	0,31	0,26	0,23	0,21
Abatimento (mm)	130	120	170	145	45
Consumo cimento (kg/m ³)	431	472	516	544	586
H (%)	6,73	6,08	5,53	5,00	4,88

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- brita (20 kg);
- parte da água (aproximadamente a metade);
- início da mistura;
- cimento;
- restante da água ;
- 1% aditivo;
- sílica ativa;
- mais aditivo;
- areia;
- mais água se necessário.

A moldagem dos CP's obedeceu os mesmos critérios anteriormente citados, e assim como para o primeiro método, foi realizada uma segunda repetição de todos os traços, conforme mostra a Tabela 4.25.

Tabela 4.25 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição)

TRAÇO	1:4,5	1:4,1	1:3,7	1:3,6	1:3,3
CIMENTO (kg)	7,06	7,61	8,15	8,46	8,96
AREIA (kg)	11,46	10,99	10,54	10,10	9,67
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Água (l)	2,89	2,62	2,35	2,18	2,03
SÍLICA (kg)	0,71	0,76	0,82	0,85	0,90
Aditivo (litros)	0,087	0,134	0,179	0,242	0,491
Aditivo (%)	1,12	1,60	2,00	2,60	4,98
a/aglomerante	0,37	0,31	0,26	0,23	0,21
Consumo cimento (kg/m ³)	430	472	516	544	586
Abatimento (mm)	105	160	160	90	60
H (%)	6,73	6,08	5,53	5,00	4,88

4.4.2.3 Apresentação dos resultados

As Tabela 4.26 e 4.27 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral do concreto executado por este método.

Tabela 4.26 Valores de resistência à compressão simples, método Mehta/Aitcin

Traço	fc₃ (MPa)	fc₇ (MPa)	fc₂₈ (MPa)	Repetição
1:3,3	69,37	76,34	82,54	1 ^a
	67,82	72,47	82,54	
1:3,3	73,24	74,40	89,52	2 ^a
	63,17	72,85	62,78	
1:3,6	71,30	70,92	86,03	1 ^a
	65,88	69,75	75,18	
1:3,6	66,65	72,08	91,84	2 ^a
	65,49	68,20	82,54	
1:3,7	59,68	68,59	83,32	1 ^a
	58,13	65,10	80,60	
1:3,7	57,35	59,68	76,73	2 ^a
	52,70	59,68	70,53	
1:4,1	53,48	58,90	73,24	1 ^a
	53,48	58,13	65,49	
1:4,1	57,74	65,49	78,67	2 ^a
	56,96	53,09	68,59	
1:4,5	42,63	53,48	61,23	1 ^a
	41,85	48,83	57,74	
1:4,5	48,05	50,38	70,14	2 ^a
	44,95	48,83	58,51	

Tabela 4.27 Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Mehta/Aitcin

Traço	f_{t28} (MPa)	Repetição
1:3,3	7,27	1 ^a
	6,30	
	6,30	
1:3,3	7,08	2 ^a
	5,92	
	5,92	
1:3,6	6,89	1 ^a
	6,30	
	5,92	
1:3,6	6,69	2 ^a
	6,30	
	6,11	
1:3,7	6,89	1 ^a
	6,11	
	6,11	
1:3,7	5,72	2 ^a
	5,53	
	5,33	
1:4,1	6,11	1 ^a
	5,92	
	5,72	
1:4,1	6,11	2 ^a
	6,11	
	5,92	
1:4,5	5,72	1 ^a
	5,14	
	4,56	
1:4,5	5,53	2 ^a
	5,53	
	5,14	

4.4.3 Método Toralles Carbonari

O terceiro método de dosagem de concreto executado foi o Método Toralles Carbonari (Toralles Carbonari, 1996), cujo desenvolvimento passo a passo será explicado a seguir.

4.4.3.1 Ensaios preliminares e otimização das misturas de concreto

Este método fundamenta-se na hipótese de que a composição de um concreto de alta resistência pode ser obtida a partir da otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular, definindo-se a quantidade de pasta requerida no concreto.

1ª etapa: otimização da pasta de cimento

Foram otimizadas quatro pastas de cimento diferentes, para serem combinadas com o esqueleto granular. Cada uma destas pastas possui um teor de aditivo diferente, variando de 0,5 a 2% de superplastificante sobre a massa de material cimentante.

- relação água/cimento (a/c):

Para a determinação do limite inferior das relações a/c foi estimada a demanda de água de cada pasta, que corresponde a uma pasta de consistência normal, obtida através do ensaio de consistência normal (NBR 11580/91). A Tabela 4.28, a seguir, mostra os valores mínimos de relações a/c para as quatro pastas.

Tabela 4.28 Valores mínimos de relações a/c para as pastas de cimento

Pasta	Teor de aditivo (%)	Relação a/c mínima
P1	0,5	0,26
P2	1,0	0,23
P3	1,5	0,21
P4	2,0	0,19
P5	3,0	0,19

Os teores de aditivo ensaiados foram 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0%, e observou-se que aumentando-se o teor de aditivo além de 2,0%, a demanda mínima de água não diminuía mais, daí a limitação do teor máximo de aditivo em 2,0%.

- relação adição mineral/cimento (sa/c):

Foi adotado como porcentagem de referência 10% de adição sobre a massa de cimento. De acordo com ensaios realizados pela autora do método, foi constatado que 15% de adição não melhora a fluidez da pasta, chegando esta inclusive a não fluir para relações a/c baixas. Dependendo do tipo de adição, somente 5% já favorece em muito a fluidez da pasta.

- relação superplastificante/cimento (sp/c):

A relação superplastificante/cimento foi fator determinante na composição das diversas pastas de cimento. Foram escolhidos os seguintes teores de aditivo, em relação à massa de material cimentante: 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % e 2,0 %.

2ª etapa: Otimização do esqueleto granular

Nesta etapa, adota-se a hipótese de que o esqueleto granular ótimo é aquele que apresenta o menor índice de vazios quando se mistura e compacta em seco os agregados que o constitui. Para a otimização do esqueleto granular trabalha-se com o ensaio de compactação de agregados secos.

- relação areia/brita (a/b):

A relação areia/brita é o principal fator determinante da composição granular que proporciona, nas condições ideais, o mínimo de vazios do esqueleto.

Desta forma, foram feitas combinações de areia e brita para que se encontrasse o esqueleto granular com menor índice de vazios. Para tal, determinou-se a massa unitária dos agregados em estado compactado seco, conforme consta na Tabela 4.29 a seguir, de acordo com a NBR 7810/83.

Tabela 4.29 Massa unitária em estado compactado seco

Massa unitária dos agregados (kg/dm³)	
Agregado miúdo	1,53
Agregado graúdo	1,56

As combinações entre areia e brita, em volume, foram preparadas e ensaiadas de acordo com a NBR 7810/83 para determinar-se a massa unitária da mistura e o seu índice de vazios. A Tabela 4.30 mostra os valores da massa unitária e índice de vazios das misturas.

Tabela 4.30 Massa unitária e índice de vazios dos esqueletos granulares

Esqueleto granular	areia/brita (em volume)	Massa unitária (kg/dm³)	índice de vazios (%)
E1	45/55	2,07	27,3
E2	50/50	2,06	27,1
E3	55/45	2,03	27,6
E4	60/40	2,00	28,1

Para determinar-se o índice de vazios das diversas misturas foi utilizada a seguinte expressão:

$$\%V = \frac{V_t - V_s}{V_t} (100)$$

Onde: %V = índice de vazios da mistura;
 V_s = volume de sólidos da mistura;
 V_t = volume total da mistura.

Para o esqueleto E2, por exemplo, cuja proporção em volume é 1 (50/50), foram utilizados 11,48 kg de areia e 11,70 kg de brita, apresentando uma proporção em massa de 0,98. O recipiente utilizado na mistura possui um volume de 15,1 dm³ (V_t), que multiplicado pela massa unitária da mistura (2,06 kg/dm³) resulta em uma massa total de 31,106 kg, dos quais 15,40 kg seriam de areia e 15,70 kg de brita, caso não houvessem vazios. Transformando-se essas massas em volume, tem-se o volume de sólidos da mistura (V_s). De posse desses valores é possível determinar-se a %V conforme a expressão apresentada anteriormente.

3ª etapa: combinação pasta - esqueleto granular

O objetivo desta etapa é determinar o conteúdo ótimo de pasta capaz de assegurar os requisitos necessários em termos de resistência à compressão e trabalhabilidade medida pelo abatimento do Cone de Abrams.

Para se obter o conteúdo ótimo de pasta correspondente ao concreto que melhor satisfaça o desempenho requerido (de resistência e trabalhabilidade), parte-se de uma cota inferior de porcentagem de pasta (chamado índice zero) que corresponde ao mínimo de vazios do esqueleto granular e, a partir daí, se obtém o excesso de pasta necessário para alcançar os requisitos desejados (é preciso moldar o concreto com os vários teores de pasta, ensaiá-lo e encontrar o teor ideal).

O esqueleto E2 foi combinado com as quatro pastas de cimento (P1, P2, P3 e P4) em cinco teores diferentes de pasta. O primeiro deles foi o chamado I=0, que corresponde a um teor de pasta exatamente igual ao índice de vazios. Esse I=0 foi sofrendo acréscimos de 2,5% de pasta, até chegar-se a 10%, que caracterizaram os outros teores de pasta, I=2,5; I=5; I=7,5 e I=10.

Desta forma, cada pasta foi combinada cinco vezes com o esqueleto granular, conforme ilustrado na Tabela 4.31 a seguir.

Tabela 4.31 Combinações de pastas e esqueleto granular

Esqueleto granular	Pasta	Índice de excesso de pasta (I)
E2	P1	0
E2		2,5
E2		5
E2		7,5
E2		10
E2	P2	0
E2		2,5
E2		5
E2		7,5
E2		10
E2	P3	0
E2		2,5
E2		5
E2		7,5
E2		10
E2	P4	0
E2		2,5
E2		5
E2		7,5
E2		10

Foram produzidos concretos combinando-se o esqueleto com as várias pastas, nos diferentes índices de excesso de pasta. Esses concretos produzidos foram moldados, curados e ensaiados aos 14 dias de idade, de acordo com as NBR 5738/94 e NBR 5739/94. A Tabela 4.32, a seguir, mostra o proporcionamento dos materiais utilizados na mistura de concreto contendo a pasta P1 e o esqueleto E2.

Tabela 4.32 Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P1/E2

PASTA P1 - ESQUELETO E2					
ÍNDICE	0	2,5	5	7,5	10
CIMENTO (kg)	5.33	5.80	6.31	6.80	7.29
AREIA (kg)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
BRITA (kg)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
ÁGUA (l)	1.92	2.05	2.17	2.72	2.78
SÍLICA (kg)	0.53	0.58	0.63	0.68	0.73
a/aglomerante	0.33	0.32	0.32	0.37	0.35
ADITIVO (l)	0.029	0.032	0.035	0.037	0.040
ADITIVO (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Abatimento (mm)	15	15	25	80	100
Consumo cimento (kg/m ³)	490	519	549	557	585

A respeito deste proporcionamento de materiais, cabe salientar-se que durante a mistura do concreto, algumas vezes houve a necessidade de acrescentar-se mais água à mistura, além da quantidade mínima estabelecida pelo ensaio de consistência normal já citado. Isso ocorreu porque a trabalhabilidade desejada estava longe de ser alcançada com a

demanda de água mínima. Não se optou pelo aumento de aditivo ao invés do acréscimo de água, porque a mudança no teor de aditivo descaracterizaria as pastas de cimento.

As Tabelas 4.33, 4.34 e 4.35 mostram o proporcionamento dos materiais para as misturas entre o esqueleto granular e as pastas P2, P3 e P4.

Tabela 4.33 Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P2/E2

PASTA P2 - ESQUELETO E2					
ÍNDICE	0	2,5	5	7,5	10
CIMENTO (kg)	11.21	12.24	13.27	14,31	15.34
AREIA (kg)	19,61	19,61	19,61	19,61	19,61
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	3,24	3,16	3,52	3,93	4,43
SÍLICA (kg)	1,12	1,22	1,33	1,43	1,53
a/aglomerante	0,27	0,24	0,25	0,25	0,27
ADITIVO (l)	0,123	0,135	0,146	0,157	0,169
ADITIVO (%)	1	1	1	1	1
Abatimento (mm)	15	5	10	40	105
Consumo cimento (kg/m ³)	525	565	593	617	638

Tabela 4.34 Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P3/E2

PASTA P3 - ESQUELETO E2					
ÍNDICE	0	2,5	5	7,5	10
CIMENTO (kg)	5.80	6.35	6.88	7.42	7.95
AREIA (kg)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
BRITA (kg)	10.00	10,00	10,00	10,00	10,00
ÁGUA (l)	1,60	1,62	1,89	1,90	2,00
SÍLICA (kg)	0,58	0,64	0,69	0,74	0,79
a/aglomerante	0,26	0,24	0,26	0,24	0,24
ADITIVO (l)	0,096	0,105	0,114	0,122	0,131
ADITIVO (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Abatimento (mm)	125	90	195	155	150
Consumo cimento (kg/m ³)	541	580	603	638	667

Tabela 4.35 Quantidade de material utilizado na produção de CAR, P4/E2

PASTA P4 - ESQUELETO E2					
ÍNDICE	0	2,5	5	7,5	10
CIMENTO (kg)	5,93	6,46	7,02	7,56	8,11
AREIA (kg)	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
BRITA (kg)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ÁGUA (l)	1,48	1,49	1,65	1,70	1,82
SÍLICA (kg)	0,60	0,65	0,70	0,76	0,81
a/aglomerante	0,24	0,22	0,22	0,21	0,21
ADITIVO (l)	0,131	0,142	0,154	0,166	0,178
ADITIVO (%)	2	2	2	2	2
Abatimento (mm)	200	105	140	150	130
Consumo cimento (kg/m ³)	556	595	625	659	687

Como o objetivo desta etapa é determinar o conteúdo ótimo de pasta que assegure os requisitos necessários de resistência à compressão e trabalhabilidade, fez-se o ensaio de resistência à compressão desses concretos aos 14 dias de idade e escolheu-se, para cada pasta de cimento, o teor de excesso de pasta que, misturado ao esqueleto granular, adequou-se melhor aos requisitos de resistência e trabalhabilidade. Quanto à trabalhabilidade, procurou-se escolher o concreto cujo abatimento ficasse em torno de 120 ± 20 mm, e quanto à resistência, escolheu-se o concreto que apresentasse a maior resistência, com boa trabalhabilidade.

As Tabelas 4.36 a 4.39, a seguir, indicam os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto produzido com as diversas combinações pasta-esqueleto, sendo que para cada índice diferente de pasta foram moldados dois corpos-de-prova.

Tabela 4.36 Resultados de resistência à compressão, P1/E2

Índice	f_{c14} (MPa)	Abatimento (mm)
I = 0	53,48	15
	51,15	
I = 2,5	51,93	15
	54,25	
I = 5	51,93	25
	57,35	
I = 7,5	50,38	80
	52,70	
I = 10	51,93	100
	51,15	

Tabela 4.37 Resultados de resistência à compressão, P2/E2

Índice	f_{c14} (MPa)	Abatimento (mm)
I = 0	65,10	15
	55,80	
I = 2,5	65,10	5
	62,00	
I = 5	65,10	10
	67,82	
I = 7,5	67,04	40
	74,02	
I = 10	55,03	105
	63,55	

Tabela 4.38 Resultados de resistência à compressão, P3/E2

Índice	f_{c14} (MPa)	Abatimento (mm)
I = 0	58,13	125
	64,72	
I = 2,5	69,37	90
	73,24	
I = 5	63,55	195
	60,84	
I = 7,5	72,47	155
	74,02	
I = 10	55,41	150
	60,07	

Tabela 4.39 Resultados de resistência à compressão, P4/E2

Índice	f_{c14} (MPa)	Abatimento (mm)
I = 0	67,04	200
	62,00	
I = 2,5	69,37	105
	75,57	
I = 5	71,69	140
	79,44	
I = 7,5	76,34	150
	72,47	
I = 10	76,73	130
	79,44	

A Tabela 4.40, a seguir, mostra as combinações entre pasta e esqueleto escolhidas como as que melhor se adaptam às necessidades observadas.

Tabela 4.40 Combinações ideais de pastas e esqueleto granular

Esqueleto granular	Pasta	Índice de excesso de pasta (I)
E2	P1	10
E2	P2	10
E2	P3	7,5
E2	P4	10

4.4.3.2 Produção do Concreto de Alta Resistência

Uma vez escolhidas as melhores combinações de cada pasta de cimento com o esqueleto granular, ficam definidas as misturas ideais do concreto.

Seguindo a orientação do NAE, o concreto de alta resistência foi executado mais duas vezes, sendo que agora foram repetidas apenas as misturas ideais, que são aquelas que melhor

preenchem os requisitos de trabalhabilidade e resistência. As Tabelas 4.41 e 4.42 mostram o proporcionamento dos materiais das repetições das misturas ideais.

Tabela 4.41 Quantidade de material para a produção de CAR, 2ª repetição

Pasta / Índice	P1 / I=10	P2 / I=10	P3 / I=7,5	P4 / I=10
CIMENTO (kg)	14,57	15,34	14,83	16,20
AREIA (kg)	19,61	19,61	19,61	19,61
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	5,54	4,43	3,66	3,47
SÍLICA (kg)	1,46	1,53	1,48	1,62
a/aglomerante	0,35	0,26	0,22	0,19
ADITIVO (l)	0,080	0,169	0,245	0,356
ADITIVO (%)	0,5	1,0	1,5	2,0
Consumo cimento (kg/m³)	585	637	641	692
Abatimento (mm)	120	145	185	205

Tabela 4.42 Quantidade de material para a produção de CAR, 3ª repetição

Pasta / Índice	P1 / I=10	P2 / I=10	P3 / I=7,5	P4 / I=10
CIMENTO (kg)	14,57	15,34	14,83	16,20
AREIA (kg)	19,61	19,61	19,61	19,61
BRITA (kg)	20,00	20,00	20,00	20,00
ÁGUA (l)	5,38	4,43	3,66	3,39
SÍLICA (kg)	1,46	1,53	1,48	1,62
a/aglomerante	0,34	0,26	0,22	0,19
ADITIVO (l)	0,080	0,169	0,245	0,356
ADITIVO (%)	0,5	1,0	1,5	2,0
Consumo cimento (kg/m³)	589	637	641	692
Abatimento (mm)	115	100	95	100

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- brita (20 kg);
- parte da água (aproximadamente um terço);
- início da mistura;
- cimento;
- segundo terço da água;
- sílica ativa;
- último terço da água;
- areia;
- mais água, se necessário.

É importante salientar que o aditivo foi misturado à água antes de iniciada a mistura, uma vez que se conhecia a quantidade exata de aditivo que seria incorporado à mesma. Desta forma, cada vez que se adicionava um pouco da água, parte do aditivo também estava sendo adicionado.

4.4.3.3 Apresentação dos resultados

As Tabela 4.43 e 4.44 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral do concreto executado por este método.

Tabela 4.43 Valores de resistência à compressão simples, método Toralles Carbonari

Teor SP	fc ₃ (MPa)	fc ₇ (MPa)	fc ₂₈ (MPa)	Repetição
0,5 %	43,40	50,38	60,45	1 ^a
	44,18	55,03	59,68	
0,5 %	43,40	45,73	62,00	2 ^a
	41,46	44,18	59,68	
1,0 %	56,58	62,78	67,04	1 ^a
	52,70	54,25	58,13	
1,0 %	58,13	62,00	69,75	2 ^a
	51,15	55,80	67,43	
1,5 %	63,94	69,75	85,64	1 ^a
	60,07	65,10	74,02	
1,5 %	65,88	63,55	80,60	2 ^a
	60,45	60,45	68,98	
2,0 %	60,45	72,85	79,44	1 ^a
	59,29	72,08	76,73	
2,0 %	64,33	74,02	89,90	2 ^a
	60,84	71,30	74,40	

Tabela 4.44 Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Toralles Carbonari

Teor SP	ft ₂₈ (MPa)	Repetição
0,5 %	4,17	1 ^a
	4,17	
	3,78	
0,5 %	5,24	2 ^a
	4,46	
	4,07	
1,0 %	5,33	1 ^a
	5,33	
	4,75	
1,0 %	5,63	2 ^a
	4,85	
	4,66	
1,5 %	5,53	1 ^a
	5,33	
	4,75	
1,5 %	5,63	2 ^a
	4,85	
	4,66	
2,0 %	7,86	1 ^a
	5,14	
	4,75	
2,0 %	5,82	2 ^a
	5,63	
	5,04	

4.4.4 Método Aitcin

O último método de dosagem de concreto executado foi o Método Aitcin (Aitcin, 1998), cuja descrição experimental é apresentada a seguir.

4.4.4.1 Ensaio preliminares e otimização das misturas de concreto

1º passo: escolha da trabalhabilidade que se quer alcançar

Assim como para os outros métodos de concreto executados, a fim de comparar os resultados, fica estabelecido que o abatimento do concreto será de 120 ± 20 mm.

2º passo: determinação da DMC

A DMC do agregado foi determinado durante a caracterização do material, que é o mesmo para toda a pesquisa experimental, por ser o material disponível na região.

3º passo: escolha da resistência à compressão que se quer alcançar

Escolheu-se os mesmos níveis de resistência utilizados na execução do Método Mehta/Aitcin, uma vez que se deseja obter subsídios para comparação de métodos por faixas de resistência, ou seja, os valores apresentados na Tabela 4.45.

Tabela 4.45 Níveis de resistências

Nível	Resistência (MPa)
A	50
B	65
C	80
D	95
E	110

4º passo: estimativa da relação água/aglomerante

A partir de um gráfico que correlaciona resistência à compressão aos 28 dias de idade com a relação água/aglomerante, é possível determinar, para os valores de resistência que se deseja alcançar, as respectivas relações água/aglomerante. A Tabela 4.46, a seguir, mostra os valores das relações água/aglomerante retirados deste gráfico.

Tabela 4.46 Relação água/aglomerante para cada nível de resistência

Nível	Resistência (MPa)	Relação água/aglomerante
A	50	0,35
B	65	0,31
C	80	0,28
D	95	0,25
E	110	0,23

5º passo: estimativa da demanda de água e de aditivo

A demanda de água na mistura é estimada com base no ponto de saturação do aditivo. Em casos em que esse valor é desconhecido, o autor sugere utilizar-se 1% de sólidos sobre a massa de material cimentante, que corresponde a 135 l/m³. Cabe lembrar que nesta pesquisa, com exceção do Método Toralles Carbonari, o superplastificante foi sempre adicionado à mistura em quantidade aleatória, até que se alcançasse a trabalhabilidade desejada.

6º passo: estimativa da demanda de agregado graúdo

Na determinação da demanda de agregado graúdo por m³ de concreto, este método estabelece valores em função de características de forma do agregado. Nesta pesquisa, a forma do agregado graúdo utilizado varia de alongado e chato a normal, cuja demanda é de aproximadamente 975 kg/m³.

7º passo: estimativa do ar incorporado

Para casos em que se desconhece a quantidade de ar incorporado à mistura, o autor sugere uma estimativa inicial de 1,5%.

8º passo: preenchimento da tabela de dosagem

De posse de todas essas informações, o autor sugere o preenchimento de uma tabela de dosagem que estima a quantidade de todos os outros materiais, em volume e em peso. O método do volume absoluto, sugerido pelo ACI 211 (1989), é utilizado para estimar-se a demanda de agregado miúdo. A seguir, são apresentadas as tabelas de dosagem para os cinco níveis de resistência (Tabelas 4.47; 4.48; 4.49; 4.50 e 4.51).

Tabela 4.47 Tabela de Dosagem – nível de resistência A

f _c = 50 MPa		1	2	3	4	5	6
Material		Consumo Kg/m ³	Volume l/m ³	Dosagem SSD cond.	Correções água	Composição l/m ³	betonada
Água		135	135	135		133,13	2,09
Cimento	a/c = 0,35	386	351	113,1	351	351	5,50
			35	15,8	35	35	0,55
S.A.							
Brita		975	318,6	975		975	15,29
Areia			402	1054		1054	16,54
Ar		1,5	15				
S.P.		1,0	3,12		1,87	3,12	0,049
Total			598	2550			40,0

Tabela 4.48 Tabela de Dosagem – nível de resistência B

f _c = 65 MPa		1	2	3	4	5	6
Material		Consumo Kg/m ³	Volume l/m ³	Dosagem SSD cond.	Correções água	Composição l/m ³	betonada
Água		135	135	135		132,89	2,08
Cimento	a/c = 0,31	435	396	127,7	396	396	6,19
			40	17,8	40	40	0,62
S.A.							
Brita		975	318,6	975		975	15,26
Areia			386	1011		1011	15,82
Ar		1,5	15				
S.P.		1,0	3,52		2,11	3,52	0,055
Total			614	2556			40,0

Tabela 4.49 Tabela de Dosagem – nível de resistência C

f _c = 80 MPa		1	2	3	4	5	6
Material		Consumo Kg/m ³	Volume l/m ³	Dosagem SSD cond.	Correções água	Composição l/m ³	betonada
Água		135	135	135		132,66	2,07
Cimento	a/c = 0,28	482	438	141,4	438	438	6,84
			44	19,7	44	44	0,68
S.A.							
Brita		975	318,6	975		975	15,22
Areia			370	970		970	15,14
Ar		1,5	15				
S.P.		1,0	3,90		2,34	3,90	0,061
Total			630	2562			40,0

Tabela 4.50 Tabela de Dosagem – nível de resistência D

fc = 95 MPa		1	2	3	4	5	6
Material		Consumo Kg/m ³	Volume l/m ³	Dosagem SSD cond.	Correções água	Composição 1m ³	betonada
Água		135	135	135		132,38	2,06
Cimento	a/c = 0,25	540	491	158,4	491		7,64
			49	22,1	49		0,76
S.A.						49	0,76
Brita		975	318,6	975		975	15,18
Areia			351	919		919	14,31
Ar		1,5	15				
S.P.		1,0	4,37		2,62	4,37	0,068
Total			649	2569			40,0

Tabela 4.51 Tabela de Dosagem – nível de resistência E

fc = 110 MPa		1	2	3	4	5	6
Material		Consumo Kg/m ³	Volume l/m ³	Dosagem SSD cond.	Correções água	Composição 1m ³	betonada
Água		135	135	135		132,15	2,05
Cimento	a/c = 0,23	587	534	172,1	534		8,29
			53	24,0	53		0,83
S.A.						53	0,83
Brita		975	318,6	975		975	15,14
Areia			335	878		878	13,64
Ar		1,5	15				
S.P.		1,0	4,75		2,85	4,75	0,074
Total			665	2575			40,0

4.4.4.2 Produção do Concreto de Alta Resistência

A partir do preenchimento das Tabelas de Dosagem, foi possível partir-se para a produção do concreto de alta resistência. As Tabelas de Dosagem, inclusive, determinam as quantidades de material para a betonada que se vai produzir, indicando o material necessário para o número de CP's que se quer moldar.

Desta forma, e de acordo com o NAE, foram executadas duas repetições de cada traço de concreto, respeitando-se o número de nove CP's para cada traço. As Tabelas 4.52 e 4.53 ilustram o proporcionamento dos materiais para a produção do concreto.

Tabela 4.52 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (1ª repetição)

NÍVEL	A	B	C	D	E
CIMENTO (kg)	5,50	6,19	6,84	7,64	8,29
AREIA (kg)	16,54	15,82	15,14	14,31	13,64
BRITA (kg)	15,29	15,26	15,22	15,18	15,14
Água colocada (l)	2,09	2,08	2,07	2,06	2,05
SÍLICA (kg)	0,55	0,62	0,68	0,76	0,83
Aditivo (litros)	0,162	0,136	0,150	0,144	0,176
Aditivo (%)	2,67	2,00	2,00	1,72	1,93
a/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23
Abatimento (mm)	90	120	150	140	160
Consumo cimento (kg/m ³)	351	396	438	491	534
H (%)	5,15	5,17	5,19	5,10	5,11

Tabela 4.53 Quantidade de material utilizado na produção de CAR (2ª repetição)

NÍVEL	A	B	C	D	E
CIMENTO (kg)	5,50	6,19	6,84	7,64	8,29
AREIA (kg)	16,54	15,82	15,14	14,31	13,64
BRITA (kg)	15,29	15,26	15,22	15,18	15,14
Água colocada (l)	2,09	2,08	2,07	2,06	2,05
SÍLICA (kg)	0,55	0,62	0,68	0,76	0,83
Aditivo (litros)	0,182	0,161	0,166	0,168	0,176
Aditivo (%)	3,00	2,37	2,21	2,00	1,93
a/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23
Abatimento (mm)	130	150	160	150	140
Consumo cimento (kg/m ³)	351	396	438	491	534
H (%)	5,15	5,17	5,19	5,10	5,11

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- brita;
- parte da água;
- início da mistura;
- cimento;
- restante da água ;
- sílica ativa;
- aditivo;
- areia;
- mais aditivo, se necessário.

4.4.4.3 Apresentação dos resultados

As Tabela 4.54 e 4.55 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral do concreto executado por este método.

Tabela 4.54 Valores de resistência à compressão simples, método Aitcin

Traço	fc₃ (MPa)	fc₇ (MPa)	fc₂₈ (MPa)	Repetição
1:3,5	69,37	77,50	88,35	1 ^a
	55,80	69,37	83,32	
1:3,5	62,78	71,30	84,87	2 ^a
	58,51	68,98	62,78	
1:3,9	63,55	75,57	71,30	1 ^a
	55,41	71,69	68,20	
1:3,9	69,37	72,85	82,15	2 ^a
	53,09	71,69	78,28	
1:4,4	55,03	58,90	75,95	1 ^a
	51,93	58,90	66,65	
1:4,4	54,64	61,23	73,63	2 ^a
	51,15	55,80	59,68	
1:5,0	48,83	58,13	72,08	1 ^a
	47,66	55,80	58,13	
1:5,0	48,83	55,80	66,65	2 ^a
	46,50	55,03	64,33	
1:5,8	39,53	48,05	58,90	1 ^a
	39,53	44,95	54,25	
1:5,8	41,08	45,34	53,48	2 ^a
	36,16	40,69	50,76	

Tabela 4.55 Valores de resistência à tração por compressão diametral, método Aitcin

Traço	ft₂₈ (MPa)	Repetição
1:3,5	5,75	1ª
	5,43	
	5,43	
1:3,5	6,01	2ª
	5,63	
	4,46	
1:3,9	5,24	1ª
	4,85	
	4,85	
1:3,9	6,79	2ª
	5,82	
	4,66	
1:4,4	5,63	1ª
	5,63	
	4,66	
1:4,4	5,82	2ª
	5,63	
	5,24	
1:5,0	5,63	1ª
	5,33	
	4,66	
1:5,0	6,89	2ª
	5,53	
	5,04	
1:5,8	6,01	1ª
	5,43	
	5,04	
1:5,8	6,01	2ª
	5,04	
	4,66	

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e diametral. Os resultados são analisados do ponto de vista estatístico e técnico, e são levados em consideração aspectos de consumo de material por m^3 de concreto e custos.

5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A análise estatística foi realizada com a finalidade de garantir-se a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples e diametral dos corpos-de-prova moldados em concreto pelos diferentes métodos estudados. Para tanto, foi feita a verificação da normalidade das distribuições representadas por cada amostra, considerando-se os resultados médios e potenciais de cada uma delas. Foi verificada também a influência das variáveis independentes (idade e traço) na variável dependente (resistência).

5.1.1 Análise da normalidade

É sabido que a maioria dos resultados de resistência do concreto convencional obtidos experimentalmente obedecem à distribuição normal de Gauss, principalmente os resultados de resistência à compressão simples. No entanto, esta tendência de comportamento precisa ser comprovada, ainda mais no caso desta pesquisa, que lida com concreto de alta resistência, cuja adequação às leis de comportamento do concreto convencional ainda gera dúvidas.

Neste sentido, e para que haja uma adequada interpretação das provas de significância, foram utilizados métodos gráficos e analíticos para verificar-se a hipótese de normalidade.

O método gráfico empregado é aquele que se utiliza do papel de probabilidade (Nanni, 1981), e representa as freqüências relativas acumuladas, com algumas modificações nas escalas, de forma que se as freqüências provêm de uma distribuição normal, seus valores acumulados são representados por uma linha reta.

O método analítico utilizado é a prova de Kolmogorov-Smirnov (KS) (Nanni, 1981), que consiste na comparação das freqüências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal. Este método, além de possuir boa potência, ou seja, não existe uma

probabilidade grande de aceitar a hipótese de normalidade quando ela não é verdadeira, pode ser usado para amostras com poucos exemplares ($n \leq 4$).

Serão apresentados apenas exemplos do método gráfico que se utiliza do papel de probabilidade, uma vez que a análise do resultado é feita de forma visual. O emprego deste método de análise de normalidade nesta pesquisa tem o objetivo de complementar os resultados da análise feita através da prova de Kolmogorov-Smirnov.

Os resultados da prova de Kolmogorov-Smirnov são expressos através da comparação de frequências observadas e esperadas, ou seja, através da comparação de valores calculados e tabelados, sendo que a condição exigida é que os valores tabelados sejam maiores que os calculados.

A análise da normalidade, tanto pelo método gráfico quanto pelo analítico, foi realizada com o auxílio do “software” STATISTICA.

Para o caso da rejeição da hipótese de normalidade, é realizada a verificação dos valores considerados espúrios, que são aqueles valores que encontram-se fora dos limites da distribuição normal. Havendo a presença de valores espúrios na amostra, eles são desconsiderados e a amostra é novamente submetida aos testes de normalidade.

5.1.1.1 Valores médios

O tamanho das amostras analisadas variou em função do número de repetições de cada traço de concreto, para cada método. Na análise dos chamados valores médios, foram levados em consideração todos os corpos-de-prova moldados, ou seja, os dois CP's de cada par, fazendo-se a média de todos os valores obtidos para cada traço (também chamados níveis), de cada idade.

As Tabelas 5.1 a 5.4, a seguir, ilustram os valores médios e correspondentes desvios-padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) das amostra analisadas.

Tabela 5.1 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método IPT (valores médios)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
I3C				I28C			
Nível A	32,03	1,87	5,83	Nível A	45,08	0,76	1,70
Nível B	38,54	2,55	6,61	Nível B	51,73	6,17	11,92
Nível C	45,98	2,54	5,53	Nível C	64,59	2,93	4,53
Nível D	56,25	3,71	6,60	Nível D	72,60	3,58	4,93
Nível E	58,84	3,72	6,32	Nível E	78,02	5,72	7,33
I7C				I28T'			
Nível A	37,29	1,70	4,57	Nível A	4,90	0,44	9,03
Nível B	45,40	2,25	4,96	Nível B	4,62	0,41	8,88
Nível C	52,89	2,28	4,21	Nível C	4,67	0,56	11,90
Nível D	59,74	2,80	4,69	Nível D	4,29	0,31	7,10
Nível E	64,14	7,00	10,92	Nível E	4,02	0,16	3,98

Tabela 5.2 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Mehta (valores médios)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
M3C				M28C			
Nível A	44,37	2,78	6,27	Nível A	61,91	5,96	9,19
Nível B	55,42	2,26	4,07	Nível B	71,50	5,75	8,04
Nível C	56,97	3,01	5,27	Nível C	77,80	5,55	7,13
Nível D	67,33	2,69	4,00	Nível D	83,97	6,95	8,27
Nível E	68,40	4,17	6,09	Nível E	79,35	11,52	14,52
M7C				M28T'			
Nível A	50,38	2,19	4,35	Nível A	5,27	0,42	7,94
Nível B	58,90	5,09	8,64	Nível B	5,98	0,16	2,65
Nível C	63,26	4,37	6,92	Nível C	5,95	0,56	9,36
Nível D	70,24	1,66	2,36	Nível D	6,37	0,36	5,67
Nível E	74,02	1,76	2,38	Nível E	6,46	0,58	8,95

Legenda:

A = método Aitcin

M = método Mehta/Aitcin

I = método IPT

T = método Toralles Carbonari

3, 7, 28 = idade do concreto ao ser ensaiado

C = ensaio de compressão simples

T' = ensaio de tração por compressão diametral

Tabela 5.3 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Toralles Carbonari (valores médios)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
T3C				T28C			
Nível A	43,11	1,16	2,69	Nível A	60,45	1,09	1,81
Nível B	54,64	3,26	5,97	Nível B	65,59	5,11	7,80
Nível C	62,59	2,80	4,48	Nível C	77,31	7,31	9,46
Nível D	61,23	2,17	3,55	Nível D	80,12	6,84	8,54
T7C				T28T'			
Nível A	49,73	4,05	8,15	Nível A	4,32	0,50	11,66
Nível B	58,90	4,30	7,30	Nível B	4,83	0,38	7,95
Nível C	67,56	5,35	7,93	Nível C	5,13	0,42	8,25
Nível D	74,40	3,11	4,18	Nível D	5,71	1,13	19,73

Tabela 5.4 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Aïtcin (valores médios)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
A3C				A28C			
Nível A	39,08	2,08	5,31	Nível A	54,35	3,38	6,23
Nível B	47,96	1,12	2,33	Nível B	65,30	5,78	8,85
Nível C	53,19	1,94	3,64	Nível C	68,98	7,35	10,66
Nível D	60,36	7,50	12,43	Nível D	74,98	6,37	8,50
Nível E	61,62	5,92	9,60	Nível E	79,83	11,56	14,48
A7C				A28T'			
Nível A	44,76	3,04	6,80	Nível A	5,37	0,56	10,36
Nível B	56,19	1,34	2,39	Nível B	5,51	0,76	13,80
Nível C	58,71	2,23	3,80	Nível C	5,44	0,42	7,81
Nível D	72,95	1,83	2,51	Nível D	5,37	0,81	15,09
Nível E	71,78	3,94	5,49	Nível E	5,45	0,53	9,77

A Tabela 5.5, a seguir, ilustra a análise de normalidade dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples nas idades de 3, 7 e 28 dias, e à compressão diametral aos 28 dias de idade.

Tabela 5.5 Provas de normalidade (valores médios)

Amostra	Papel de probabilidade	Kolmogorov-Smirnov			
		n	D_m	D_α	$D_m \leq D_\alpha$
A3C	Sim	20	0,11057	0,192	Sim
A7C	Sim	20	0,16875	0,192	Sim
A28C	Sim	20	0,09133	0,192	Sim
A28T'	Não	30	0,09875	0,159	Sim
M3C	Sim	20	0,12087	0,192	Sim
M7C	Sim	20	0,15317	0,192	Sim
M28C	Sim	20	0,12195	0,192	Sim
M28T'	Sim	30	0,14379	0,159	Sim
I3C	Sim	30	0,11394	0,159	Sim
I7C	Sim	30	0,08260	0,159	Sim
I28C	Sim	30	0,12987	0,159	Sim
I28T'	Não	45	0,12568	0,1348	Sim
T3C	Não	16	0,19248	0,213	Sim
T7C	Sim	24	0,13359	0,1768	Sim
T28C	Sim	16	0,13006	0,213	Sim
T28T'	Sim	24	0,13468	0,1768	Sim

Legenda:

n = número de exemplares da amostra

D_m = freqüências acumuladas observadas

D_α = freqüências acumuladas calculadas

Da Tabela 5.5 pode-se observar que quase todas as amostras enquadram-se na distribuição normal. No que diz respeito às amostras de resultados de resistência à compressão diametral, não se espera que elas comportem-se de acordo com a distribuição normal de Gauss. Entretanto, as amostras A28T', I28T' e T3C deverão ser analisadas quanto à presença de valores espúrios.

Cabe salientar-se que a prova de normalidade que se utiliza do papel de probabilidade consta de uma análise visual, e varia muito de acordo com a sensibilidade do observador. Nesta pesquisa, a sua utilização vem apenas complementar a prova de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

A Figura 5.1, a seguir, exemplifica a utilização do papel de probabilidade para a análise de normalidade da amostra A28C, considerando-se os valores médios.

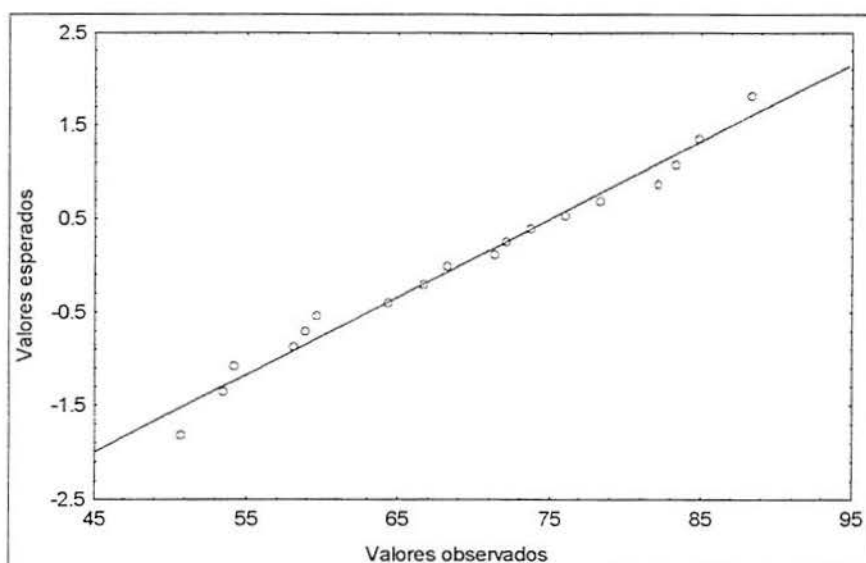


Figura 5.1 Emprego do papel de probabilidade, amostra A28C

5.1.1.1.1 Valores espúrios

A análise dos resíduos e conseqüentes valores espúrios é feita de acordo com Nanni (1981), que considera a presença de valores isolados que descaracterizam a amostra, indicando que ela não obedece a distribuição normal. A partir da retirada desses valores, que encontram-se fora dos limites da distribuição normal, é feita uma nova verificação da normalidade, podendo-se concluir, muitas vezes, que a distribuição é normal, ao contrário do que fora indicado a princípio.

Das três amostras analisadas, A28T', I28T' e T3C, foram encontrados valores espúrios nas duas primeiras, o que levou a retirada desses valores, e a novo cálculo de média, desvio-padrão e coeficiente de variação, seguido de nova análise de normalidade.

No que diz respeito à amostra T3C, não foi encontrada a presença de valores espúrios. Uma vez que a prova de normalidade de Kolmogorov-Smirnov indicou a amostra como obedecendo à distribuição normal e apenas a prova do papel de normalidade, que é uma análise visual, indicou a não normalidade dos resultados, a amostra permaneceu inalterada, sem a retirada de nenhum dos seus valores.

Independente das provas de normalidade a que as amostras foram submetidas, optou-se por fazer a análise dos valores espúrios em todas as amostras. Houve casos em que, apesar das provas de normalidade terem indicado que as amostras obedeciam a distribuição normal de Gauss, detectou-se a presença de valores que distanciavam-se muito da média, sendo considerados resíduos. Nesses casos, optou-se por retirá-los das amostras, analisando-as novamente, sem a presença desses valores.

A Tabela 5.6 mostra os novos valores de média, DP e CV das amostras que apresentaram valores espúrios, seguida da Tabela 5.7 que indica a realização de novas provas de normalidade.

Tabela 5.6 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das amostras, depois de retirados os valores espúrios (valores médios)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
A28C				A28T'			
Nível A	54,35	3,38	6,23	Nível A	5,37	0,56	10,36
Nível B	65,30	5,78	8,85	Nível B	5,51	0,76	13,80
Nível C	68,98	7,35	10,66	Nível C	5,59	0,21	3,80
Nível D	74,98	6,37	8,50	Nível D	5,37	0,81	15,09
Nível E	85,51	2,58	3,01	Nível E	5,65	0,24	4,31
M3C				I7C			
Nível A	44,37	2,78	6,27	Nível A	37,29	1,70	4,57
Nível B	55,42	2,26	4,07	Nível B	44,56	1,02	2,30
Nível C	56,97	3,01	5,27	Nível C	52,89	2,28	4,21
Nível D	66,00	0,59	0,89	Nível D	59,74	2,80	4,69
Nível E	68,40	4,17	6,09	Nível E	64,14	7,00	10,92
I28T'				T28T'			
Nível A	4,77	0,17	3,48	Nível A	4,13	0,24	5,91
Nível B	4,62	0,41	8,88	Nível B	4,83	0,38	7,95
Nível C	4,67	0,56	11,90	Nível C	5,13	0,42	8,25
Nível D	4,29	0,31	7,10	Nível D	5,28	0,44	8,33
Nível E	3,98	0,10	2,62				

Tabela 5.7 Provas de normalidade, depois de retirados os valores espúrios

Amostra	Papel de probabilidade	Kolmogorov-Smirnov			
		N	D_m	D_α	$D_m \leq D_\alpha$
A28C	Sim	19	0,09133	0,197	Sim
A28T'	Não	18	0,09875	0,202	Sim
M3C	Sim	19	0,12087	0,197	Sim
I7C	Sim	29	0,08260	0,162	Sim
I28T'	Não	18	0,12087	0,202	Sim
T28T'	Não	18	0,13468	0,202	Sim

5.1.1.2 Valores potenciais

Na análise dos chamados valores potenciais, de cada par de corpos-de-prova irmãos, foi considerado apenas o maior valor de resistência, de acordo com a NBR 12655/92, o que reduziu o tamanho das amostras de forma considerável.

As Tabelas 5.8 a 5.11 ilustram os valores médios e correspondentes desvios-padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) das amostras analisadas.

Tabela 5.8 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método IPT (valores potenciais)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
I3C				I28C			
Nível A	32,60	2,33	7,12	Nível A	45,47	0,45	0,99
Nível B	39,18	2,62	6,68	Nível B	54,38	3,72	6,85
Nível C	47,15	2,75	5,82	Nível C	65,88	1,69	2,57
Nível D	59,16	1,57	2,65	Nível D	75,05	1,61	2,15
Nível E	60,71	2,80	4,62	Nível E	79,83	5,04	6,31
I7C				I28T'			
Nível A	38,17	1,55	4,07	Nível A	4,17	0,19	4,56
Nível B	46,63	2,75	5,89	Nível B	4,56	0,20	4,28
Nível C	54,25	1,02	1,88	Nível C	4,95	0,83	16,76
Nível D	60,71	2,64	4,35	Nível D	5,07	0,30	5,83
Nível E	69,11	3,14	4,53	Nível E	5,27	0,64	12,20

Tabela 5.9 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Mehta (valores potenciais)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
M3C				M28C			
Nível A	45,34	3,83	8,45	Nível A	65,69	6,30	9,59
Nível B	55,61	3,01	5,42	Nível B	75,96	3,84	5,56
Nível C	58,52	1,65	2,82	Nível C	80,03	4,66	5,82
Nível D	68,98	3,29	4,77	Nível D	88,94	4,11	4,62
Nível E	71,31	2,74	3,84	Nível E	86,03	4,94	5,74
M7C				M28T'			
Nível A	51,93	2,19	4,22	Nível A	5,63	0,13	2,39
Nível B	62,20	4,66	7,49	Nível B	6,11	0	0
Nível C	64,14	6,30	9,82	Nível C	6,31	0,83	13,12
Nível D	71,50	0,82	1,15	Nível D	6,79	0,14	2,08
Nível E	75,37	1,37	1,82	Nível E	7,18	0,13	1,87

Tabela 5.10 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Toralles Carbonari (valores potenciais)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
T3C				T28C			
Nível A	43,79	0,55	1,26	Nível A	61,23	1,20	1,79
Nível B	57,36	1,20	1,91	Nível B	68,40	1,92	2,80
Nível C	64,91	1,37	2,11	Nível C	83,12	3,56	4,29
Nível D	62,39	2,74	4,40	Nível D	84,67	7,40	8,74
T7C				T28T'			
Nível A	50,90	4,74	9,30	Nível A	4,71	0,76	16,08
Nível B	62,78	0,78	1,24	Nível B	5,19	0,21	3,96
Nível C	69,11	5,27	7,62	Nível C	5,58	0,07	1,27
Nível D	75,44	3,51	4,66	Nível D	6,84	1,44	21,09

Tabela 5.11 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados - Método Aitcin (valores potenciais)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
A3C				A28C			
Nível A	40,31	1,20	2,72	Nível A	56,19	3,83	6,82
Nível B	48,83	0	0	Nível B	69,37	3,84	5,54
Nível C	54,84	0,28	0,50	Nível C	74,79	1,64	2,19
Nível D	66,46	4,12	6,19	Nível D	76,73	7,67	10,00
Nível E	66,08	4,66	7,05	Nível E	86,61	2,46	2,84
A7C				A28T'			
Nível A	46,70	1,92	4,10	Nível A	6,01	0	0
Nível B	56,97	1,65	2,89	Nível B	6,26	0,89	14,23
Nível C	60,07	1,65	2,74	Nível C	5,73	0,13	2,35
Nível D	74,21	21,92	2,59	Nível D	6,02	1,20	18,22
Nível E	74,40	4,38	5,89	Nível E	5,88	0,18	3,13

A Tabela 5.12, a seguir, ilustra a análise de normalidade dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples nas idades de 3, 7 e 28 dias, e à compressão diametral aos 28 dias de idade.

Tabela 5.12 Provas de normalidade (valores potenciais)

Amostra	Papel de probabilidade	Kolmogorov-Smirnov			
		n	D_m	D_α	$D_m \leq D_\alpha$
A3C	Sim	10	0,15514	0,262	Sim
A7C	Sim	10	0,18151	0,262	Sim
A28C	Sim	10	0,14815	0,262	Sim
A28T'	Não	10	0,27508	0,262	Não
M3C	Sim	10	0,14464	0,262	Sim
M7C	Sim	10	0,15538	0,262	Sim
M28C	Sim	10	0,13440	0,262	Sim
M28T'	Não	10	0,17923	0,262	Sim
I3C	Não	15	0,20644	0,219	Sim
I7C	Sim	15	0,08994	0,219	Sim
I28C	Sim	15	0,15136	0,219	Sim
I28T'	Não	15	0,13505	0,219	Sim
T3C	Não	8	0,22596	0,288	Sim
T7C	Sim	8	0,14977	0,288	Sim
T28C	Não	8	0,17740	0,288	Sim
T28T'	Não	8	0,28368	0,288	Sim

Da Tabela 5.12 pode-se observar que algumas amostras não se enquadram na distribuição normal. No que diz respeito às amostras de resultados de resistência à compressão diametral, conforme mencionado anteriormente, não se espera que elas comportem-se de acordo com a distribuição normal de Gauss. Entretanto, as amostras A28T', M28T', I3C, I28T', T3C, T28C e T28T' deverão ser analisadas quanto à presença de valores espúrios.

5.1.1.2.1 Valores espúrios

A análise dos resíduos e conseqüentes valores espúrios é feita da mesma forma que no caso anterior, para os valores médios. Porém, já que se está considerando as resistências potenciais, as amostras foram bastante reduzidas e houve casos de não existência de resíduos por ser a amostra muito pequena.

Independente das provas de normalidade a que as amostras foram submetidas, optou-se por fazer a análise dos valores espúrios em todas as amostras, assim como no caso anterior. A Tabela 5.13 mostra os novos valores de média, DP e CV das amostras que apresentaram valores espúrios, seguida da Tabela 5.14 que indica a realização de novas provas de normalidade.

Tabela 5.13 Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das amostras, depois de retirados os valores espúrios (valores potenciais)

Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]	Amostra	Média [MPa]	DP [MPa]	CV [%]
I3C				I28C			
Nível A	32.60	2,33	7,12	Nível A	45,73	0	0
Nível B	39.18	2.62	6.68	Nível B	54.38	3.72	6.85
Nível C	47.15	2.75	5.82	Nível C	65.88	1.69	2.57
Nível D	59.16	1.57	2.65	Nível D	75.05	1.61	2.15
Nível E	59,10	0,28	0,47	Nível E	79.83	5.04	6.31
I28T'							
Nível A	4,17	0,19	4,56	Nível D	5,07	0,30	5,83
Nível B	4,56	0,20	4,28	Nível E	4,90	0,07	1,44
Nível C	4,95	0,83	16,76				

Tabela 5.14 Provas de normalidade, depois de retirados os valores espúrios

Amostra	Papel de probabilidade	Kolmogorov-Smirnov			
		N	D_m	D_α	$D_m \leq D_\alpha$
I3C	Não	14	0,20006	0,226	Sim
I28C	Sim	14	0,15599	0,226	Sim
I28T'	Não	14	0,11846	0,226	Sim

Das Tabelas 5.13 e 5.14 pôde-se observar que apenas três amostras apresentaram valores espúrios, e que a retirada desses valores praticamente não afetou o resultados das provas de normalidade. Conforme citado anteriormente, as amostras que contém apenas os valores potenciais são menores que as que contém todos os valores de resistência (valores médios), o que dificulta a verificação da presença de valores resíduos.

Uma vez que apenas uma amostra não obedeceu a condição de normalidade da prova de Kolmogorov-Smirnov e que esta amostra é de resultados de ensaio de resistência à tração, para fins de análise de resultados todas as amostras serão consideradas como obedecendo a distribuição normal de Gauss.

5.1.2 Provas de significância

Através da utilização do “software” STATISTICA também foi realizada a análise da influência das variáveis independentes traço e idade na variável dependente resistência.

Para cada método de dosagem, verificou-se a influência dos diversos traços do concreto na sua resistência, assim como a influência das diferentes idades de 3, 7 e 28 dias.

Pôde constatar-se, como era esperado, que a resistência do concreto depende das variáveis idade e traço do concreto, sendo que esta última está diretamente ligada à relação água/material cimentante. Logo, foi confirmado que a variação na quantidade dos materiais e na idade a que o concreto é submetido aos ensaios gera diferenças estatisticamente significativas no resultado desses ensaios.

Entretanto, ao analisar-se estatisticamente a interação entre as variáveis traço e idade do concreto e sua influência na resistência à compressão, pôde-se observar que essa interação não exerce influência significativa na resistência à compressão, ao contrário do que era esperado. Este fenômeno provavelmente tenha ocorrido porque as relações a/ag estudadas são muito próximas e encontram-se numa faixa de relações a/ag muito baixa, característica do CAR. Além disso, os ganhos de resistência gerados até os 3 dias de idade não foram considerados, pois o intervalo estudado abrangeu as idades de 3, 7 e 28 dias.

Estes fatores, aliados às possíveis variações intrínsecas aos ensaios, contribuíram para que a interação traço e idade do concreto não influencie significativamente a resistência à compressão do concreto, do ponto de vista estatístico.

5.2 ANÁLISE TÉCNICA DOS RESULTADOS

5.2.1 Método IPT/EPUSP

5.2.1.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão

Fixada uma relação a/c , a resistência à compressão do concreto é função exclusiva do grau de hidratação do cimento (idade), sempre que se tratar de concretos produzidos com agregados convencionais de resistência superior a 60 MPa, considerando-se fixos os materiais constituintes do concreto (Helene e Terzian, 1992). Para ilustrar tal afirmativa, é apresentada, a seguir, a evolução da resistência à compressão com a idade do concreto produzido por este método, para as diferentes relações água/aglomerante (a/ag).

5.2.1.1.1 Valores médios

Considerando-se a evolução da resistência à compressão com a idade dos cinco traços do concreto, sendo eles 1:1,5; 1:2; 1:3; 1:4 e 1:5, pode-se dizer que o concreto apresentou, em média, 73,94% e 83,04% da sua resistência final aos 3 e 7 dias de idade, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 5.2.

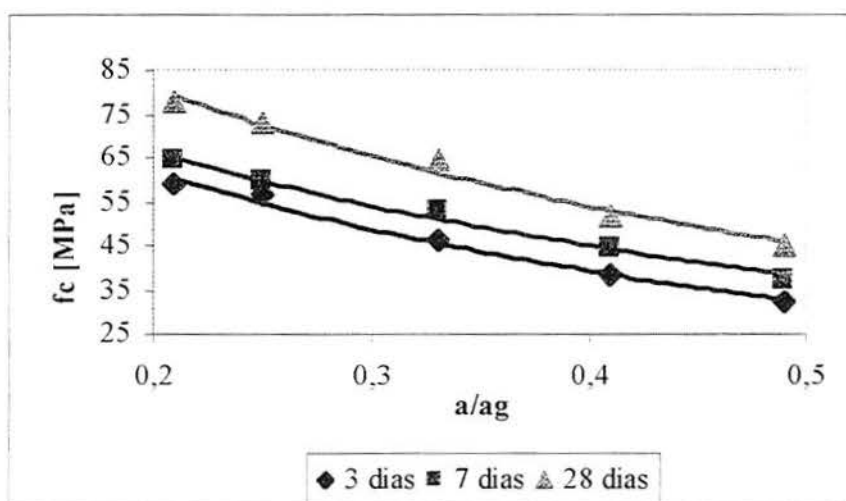


Figura 5.2 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT – valores médios

A respeito da Figura 5.2, é preciso dizer que as curvas f_c X a/ag foram ajustadas a partir de ajustes logarítmicos. Ainda assim, foram verificados vários modelos diferentes de ajustes, conforme consta da Tabela 5.15.

Tabela 5.15 Modelos de ajustes das curvas $f_c \times a/c$, método IPT

AJUSTE	Linear	Logarítmico	Polinomial	Potencial	Exponencial
3 dias	0,9934	0,9909	0,9961	0,9769	0,9966
7 dias	0,9984	0,9863	0,9984	0,9651	0,9933
28 dias	0,9897	0,9816	0,9903	0,9649	0,9879

Sabe-se que a resistência do concreto depende, fundamentalmente, de sua relação a/ag e do grau de hidratação do cimento. Entretanto, conforme o item 5.1.2, a interação destas duas variáveis não representou influência estatisticamente significativa, ou seja, o aumento da resistência com o tempo independe da relação a/ag .

Entretanto, a maior parte da bibliografia mostra que quanto maior a relação a/ag , mais lento é o ganho de resistência nas primeiras idades, enquanto que para relações a/ag mais baixas a parcela de ganho de resistência nas primeiras idades é bem maior. Estudos de Dal Molin (1995) mostram que para concretos com relações a/ag baixas a parcela de resistência à compressão nas primeiras idades pode chegar a 70 %, sendo que o ganho maior, para a relação a/ag mais baixa, ocorre aos 3 dias de idade.

A Figura 5.3 ilustra a influência da interação entre a relação a/ag e a idade na resistência à compressão do concreto.

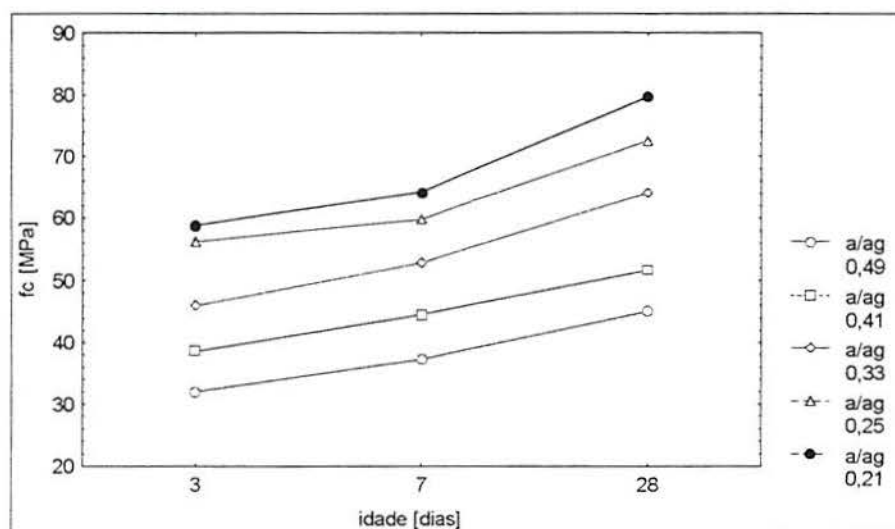


Figura 5.3 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método IPT - valores médios

5.2.1.1.2 Valores potenciais

A mesma análise feita para os valores médios também é feita para os valores potenciais. Neste caso, o concreto apresentou, em média, 73,54% e 83,80% da sua resistência final aos 3 e 7 dias de idade, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 5.4.

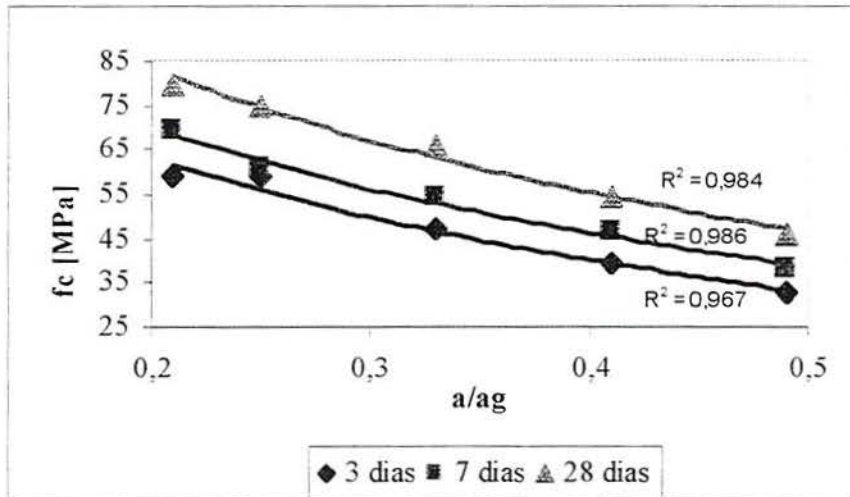


Figura 5.4 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT – valores potenciais

Pode-se observar que os percentuais de resistência ganhos aos 3 e 7 dias de idade são muito próximos, quando se considera os valores médios e os potenciais.

A respeito dos ajustes das curvas, assim como foi feito para os valores médios, seguiu-se a tendência logarítmica.

A Figuras 5.5 ilustra a influência da interação entre a relação a/ag e a idade na resistência à compressão do concreto.

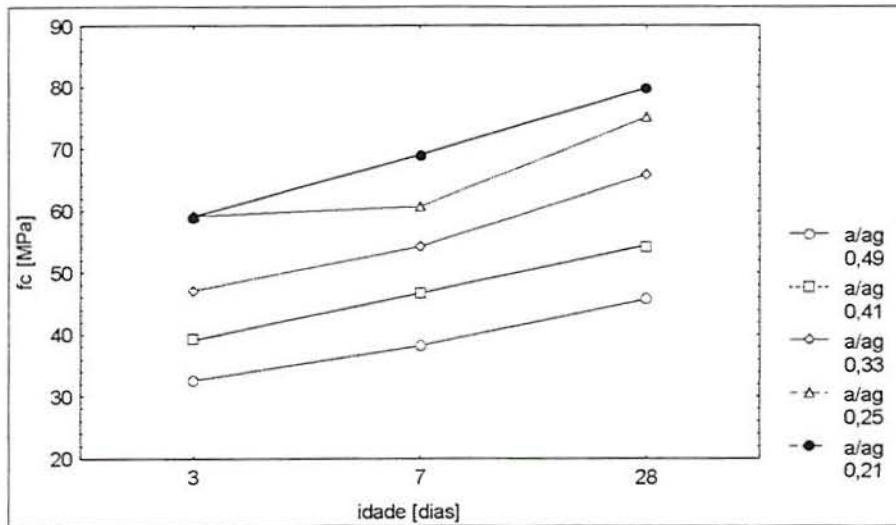


Figura 5.5 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método IPT - valores potenciais

Considerando-se a idade de 28 dias como sendo 100% da resistência à compressão, as Tabelas 5.16 e 5.17 ilustram, respectivamente, as taxas de resistência alcançadas aos 3 e 7 dias nesta pesquisa experimental e os valores propostos pelo Código Modelo do CEB (1990a), pelo ACI (1986, apud Dal Molin, 1995), pela NBR 7680/81 e por Helene e Terzian (1992).

Tabela 5.16 Evolução da resistência à compressão com a idade, método IPT

a/ag	3 dias	7 dias	28 dias
0,49 (valores médios)	0,71	0,83	1,0
0,49 (valores potenciais)	0,71	0,84	1,0
0,41 m	0,75	0,86	1,0
0,41 p	0,72	0,86	1,0
0,33 m	0,71	0,82	1,0
0,33 p	0,72	0,82	1,0
0,25 m	0,78	0,82	1,0
0,25 p	0,79	0,81	1,0
0,21 m	0,75	0,82	1,0
0,21 p	0,74	0,87	1,0

Tabela 5.17 Evolução da resistência à compressão com a idade - estimativas baseadas na bibliografia, para cimento CP V-ARI

Idade	3 dias	7 dias	28 dias
CEB (1990a)	0,66	0,82	1,0
ACI (1986)	0,59	0,80	1,0
NBR 7680/81	--	0,80	1,0
Helene e Terzian a/ag = 0,38	0,69	0,86	1,0

Comparativamente, pode-se observar que os valores obtidos nesta pesquisa experimental, principalmente para os 3 dias de idade, são um pouco superiores aos encontrados na Tabela 5.17. Esse fato pode ser justificado pelas baixas relações a/ag

utilizadas e pela adição de sílica ativa ao concreto. Além disso, para a maioria dos casos, a Tabela 5.17 não especifica quais relações a/ag estão sendo observadas.

Pode-se observar, também, que no que refere-se às taxas de resistência alcançadas considerando-se os valores médios e os potenciais (Tabela 5.16), esses valores diferem muito pouco entre si.

5.2.1.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (f_t/f_c)

Para concreto convencional, onde as relações a/c normalmente são superiores a 0,40, a relação f_t/f_c é da ordem de 10%. Entretanto, para concreto de alta resistência, essas relações tendem a diminuir, a medida em que as relações a/ag também vão diminuindo, podendo chegar a 5% (ACI 363, 1991).

A seguir, é apresentada a variação das relações f_t/f_c para o concreto produzido pelo Método IPT/EPUSP.

5.2.1.2.1 Valores médios e potenciais

A Figura 5.6 apresenta a tendência do comportamento da relação f_t/f_c .

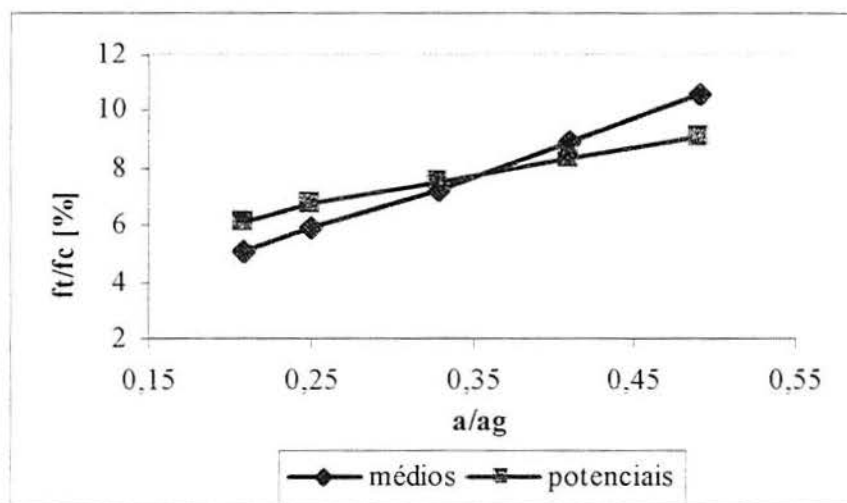


Figura 5.6 Relação f_t/f_c , método IPT – valores médios e potenciais

No que se refere aos valores médios, pode-se observar que os valores da relação f_t/f_c tendem a aumentar do traço mais rico para o mais pobre, sendo o valor máximo de 10,58%, para o traço 1:5. A resistência média à compressão alcançada pelo concreto executado neste traço, aos 28 dias de idade, é de 40,05 MPa, que caracteriza um concreto convencional.

Entretanto, para o traço mais rico 1:1,5, a relação f_t/f_c é de 5,10%, comprovando que essa relação diminui para os concretos de alta resistência. O concreto produzido pelo traço 1:1,5 atingiu, aos 28 dias de idade, resistência média à compressão de 78,02 MPa.

Para os valores potenciais, da mesma forma que para os médios, os valores da relação f_t/f_c aumentaram do traço mais rico para o mais pobre, sendo o valor máximo de 9,12%, para o traço 1:5. A resistência média a compressão alcançada pelo concreto executado neste traço, aos 28 dias de idade, é de 45,73 MPa, que ainda caracteriza um concreto convencional.

Seguindo ainda a tendência dos valores médios, para o traço mais rico 1:1,5, a relação f_t/f_c é de 6,14%, comprovando que essa relação diminui para os concretos de alta resistência. O concreto produzido pelo traço 1:1,5 atingiu, aos 28 dias de idade, resistência média à compressão de 79,83 MPa.

No que diz respeito ao crescimento da resistência à compressão em relação ao crescimento da resistência à tração, sabe-se que esses crescimentos não são diretamente proporcionais (ACI 363, 1991), fato que pode ser comprovado através da Figura 5.7.

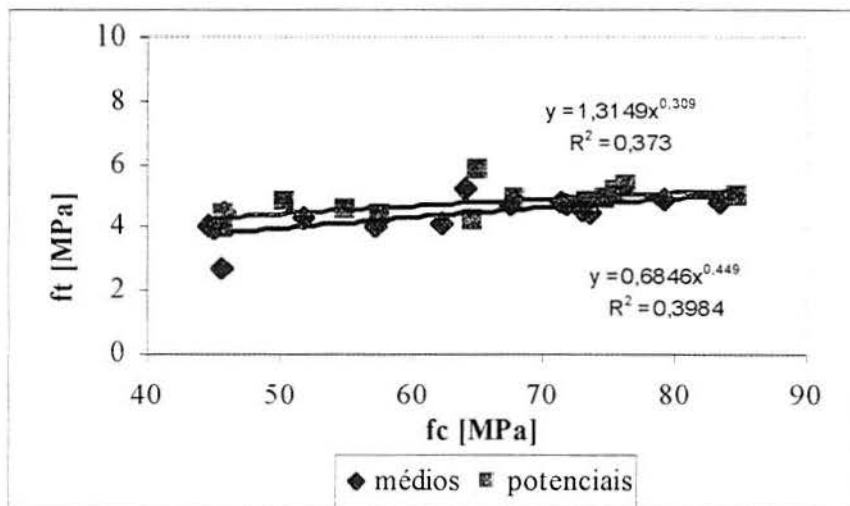


Figura 5.7 Resistência à tração X resistência à compressão, método IPT - valores médios e potenciais

As equações de correlação entre resistência à tração e resistência à compressão obedecem ao ajuste potencial, da mesma forma que as correlações apresentadas na bibliografia e mencionadas no item 2.6.2. Entretanto, para ambos os valores médios e potenciais o coeficiente de correlação entre as duas variáveis é bastante baixo. Isso deve-se, principalmente, ao fato do ensaio de resistência à tração por compressão diametral apresentar uma variabilidade muito grande.

5.2.1.3 Consumo de material por m³ de concreto

A Tabela 5.18 apresenta o consumo de material por m³ de concreto para os cinco traços de concreto.

Tabela 5.18 Consumo de material por m³ de concreto, em kg

TRAÇO	fc (MPa)	Cimento	Sílica Ativa	Areia	Brita	Água
1:5	45,73	378	37,8	755	1133	203
1:4	54,38	454	45,3	680	1132	204
1:3	65,88	568	56,8	568	1135	205
1:2	75,05	758	75,8	379	1138	205
1:1,5	79,83	912	91,2	228	1140	205

O consumo de cimento por m³ de concreto, parâmetro muito importante para a escolha do traço do concreto, variou de 378 kg/m³ para o traço mais pobre a 912 kg/m³ para o traço mais rico, indicando que a obtenção de CAR por este método gera elevadíssimo consumo de cimento. A Figura 5.8 mostra a variação no consumo de cimento dos diversos traços de concreto.

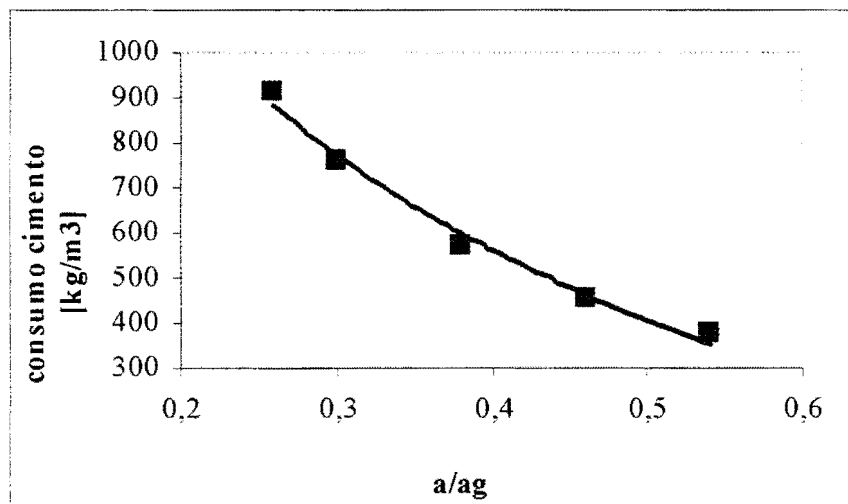


Figura 5.8 Consumo de cimento dos diversos traços - método IPT

Sabe-se que o alto consumo de cimento pode gerar vários problemas técnicos para o concreto. Uma vez que a reação de hidratação do cimento é um processo exotérmico, elevados teores de cimento liberam muito calor ao se hidratarem. Essa elevada liberação de calor é muitas vezes causa de retração no concreto, com conseqüente aparecimento de fissuras, prejudicando a vida útil da estrutura.

Além disso, o elevado teor de cimento corresponde a elevados teores de pasta. Em consequência disto, para concretos de mesma resistência à compressão, o que tiver na sua composição maior consumo de cimento será o mais deformável.

Outro importante aspecto, que está diretamente ligado ao consumo do material cimentante, é o custo. Como o cimento e a sílica ativa são materiais caros, quanto maior o seu consumo, mais caro será o metro cúbico do concreto.

5.2.1.4 Custos

Para a análise de custos desta pesquisa foram considerados os seguintes valores:

- Cimento: R\$ 0,21/kg;
- Silica Ativa: R\$ 0,45/kg;
- Areia: R\$ 13,00/m³;
- Brita: R\$ 18,00/m³;
- Superplastificante: R\$ 6,00/kg.

Cabe realizar-se uma relação entre a moeda corrente e o dólar, uma vez que esta última é universalmente utilizada para cálculo e comparações de custos. Desta forma, fica registrada a seguinte equivalência em março de 2000: R\$ 1,80 = US\$ 1,00.

A Tabela 5.19, a seguir, apresenta os custos finais de cada traço, em R\$/m³ de concreto.

Tabela 5.19 Custos - método IPT

Traço	fc (MPa)	Custo [R\$/m ³]
1:5.0	45.73	129.60
1:4.0	54.38	160.07
1:3.0	65.88	198.38
1:2.0	75.05	257.67
1:1.5	79.83	310.85

Pode-se observar que o traço mais pobre é, certamente, o que apresenta o menor custo. Da mesma forma, o traço mais rico é o mais caro de todos. Este elevado custo do traço mais rico deve-se ao grande consumo de cimento, sílica ativa e de aditivo, que vai diminuindo com o empobrecimento dos traços.

Fazendo-se uma análise de todos os aspectos considerados anteriormente, pode-se observar que os resultados se comportaram de forma bastante semelhante quando

considerados os valores médios e os valores potenciais. Desta forma, para a análise dos resultados dos próximos métodos serão utilizados apenas os valores potenciais. Essa decisão é embasada na NBR 12655/96, item 7.2.2.

5.2.2 Método Mehta/Aitcin

5.2.2.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão

Considerando-se a evolução da resistência com a idade dos cinco traços do concreto, sendo eles 1:3,3; 1:3,6; 1:3,7; 1:4,1 e 1:4,5, pode-se dizer que o concreto apresentou, em média, 75,16% e 81,82% da sua resistência final aos 3 e 7 dias de idade, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 5.9.

É preciso lembrar que os valores apresentados da evolução da resistência com a idade são valores médios dos cinco traços de concreto produzidos. Cabe salientar-se que, ao contrário do que foi apresentado em 5.1.2, olhando na Figura 5.9 observa-se que quanto mais rico o traço, maior o ganho de resistência nas primeiras idades.

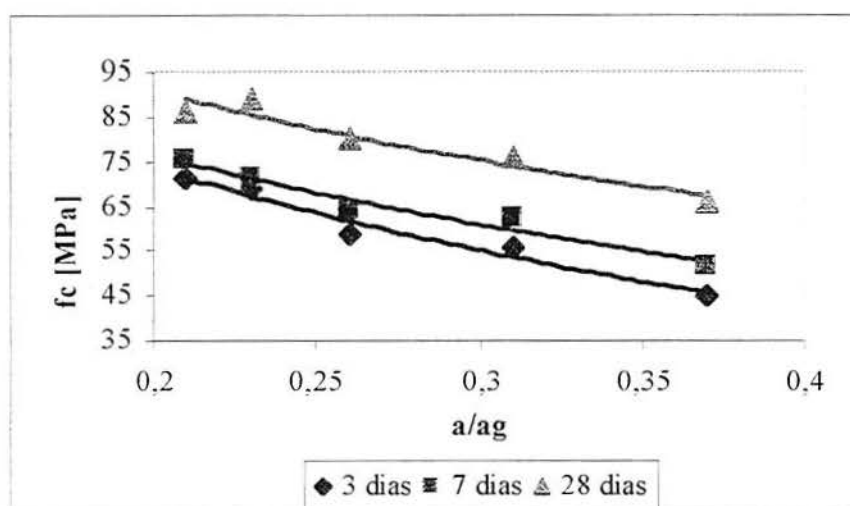


Figura 5.9 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Mehta/Aitcin

A respeito da Figura 5.9, é preciso dizer que as curvas $f_c \times a/c$ também foram ajustadas a partir de ajustes logarítmicos. Ainda assim, foram verificados vários modelos diferentes de ajustes, conforme consta na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 Modelos de ajustes das curvas $f_c \times a/c$, método Mehta/Aitcin

AJUSTE	Linear	Logarítmico	Polinomial	Potencial	Exponencial
3 dias	0,9482	0,9498	0,9495	0,9421	0,9508
7 dias	0,9781	0,9875	0,9865	0,9866	0,9863
28 dias	0,9017	0,8649	0,9402	0,8653	0,9058

A Figura 5.10 ilustra a influência da interação entre a relação a/ag e a idade na resistência à compressão do concreto.

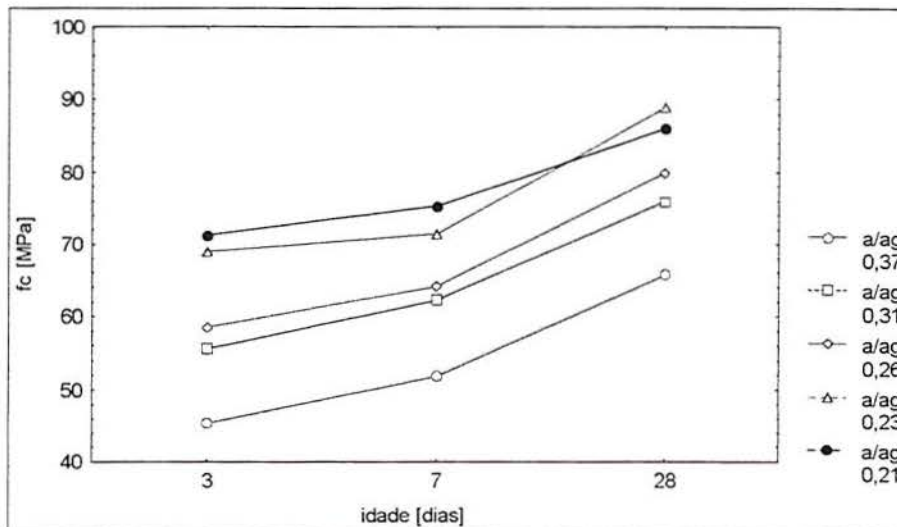


Figura 5.10 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Mehta/Aitcin

Assim como para o método anterior, não foi comprovada estatisticamente a influência da interação entre as variáveis idade e relação a/ag na resistência à compressão do concreto.

Considerando-se a idade de 28 dias como sendo 100% da resistência à compressão, a Tabela 5.21 ilustra as taxas de resistência alcançadas aos 3 e 7 dias por esse método. Esse valores podem ser comparados com os da Tabela 5.17 apresentada anteriormente.

Tabela 5.21 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Mehta/Aitcin

a/ag	3 dias	7 dias	28 dias
0,37	0,69	0,79	1,0
0,31	0,73	0,82	1,0
0,26	0,73	0,81	1,0
0,23	0,78	0,80	1,0
0,21	0,83	0,88	1,0

Observa-se a mesma tendência de comportamento do método anterior, quando os ganhos de resistência aos 3 e 7 dias de idade superam os limites da Tabela 5.17.

5.2.2.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (f_t/f_c)

A Figura 5.11, a seguir, apresenta a tendência do comportamento da relação f_t/f_c .

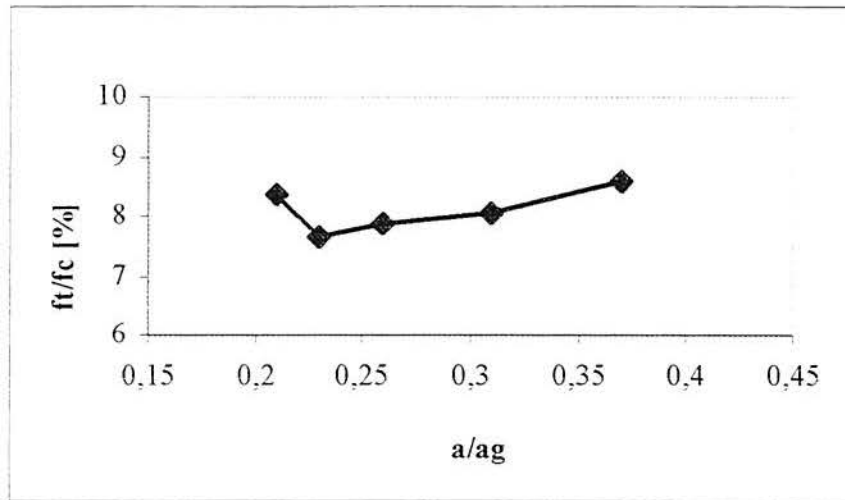


Figura 5.11 Relação f_t/f_c , método Mehta/Aitcin

Pode-se observar que os valores da relação f_t/f_c tendem a aumentar do traço mais rico para o mais pobre, sendo o valor máximo de 8,56%, para o traço 1:4,5. A resistência média à compressão alcançada pelo concreto executado neste traço, aos 28 dias de idade, foi de 65,69 MPa.

Entretanto, nos traços intermediários há uma diminuição dessa relação f_t/f_c , que não se comporta sempre de forma crescente. Esse fato pode ser decorrência da variabilidade que existe no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

De qualquer maneira, para o traço mais rico 1:3,3, a relação f_t/f_c é de 8,34%, comprovando que essa relação diminui para os concretos de alta resistência. O concreto produzido pelo traço 1:3,3 atingiu, aos 28 dias de idade, resistência média à compressão de 86,03 MPa.

Entretanto, ao observar-se os resultados de resistência apresentados no capítulo 4, vê-se que o traço mais rico 1:3,3 não foi o que apresentou os maiores resultados de resistência à compressão, e sim o traço 1:3,6. Desta forma, não se pode esperar que o traço 1:3,3 apresente a menor relação f_t/f_c . É perfeitamente aceitável que o concreto que apresentou maior resistência à compressão apresente também a menor relação f_t/f_c .

A Figura 5.12, a seguir, ilustra o crescimento das resistência à compressão pelo crescimento da resistência à tração.

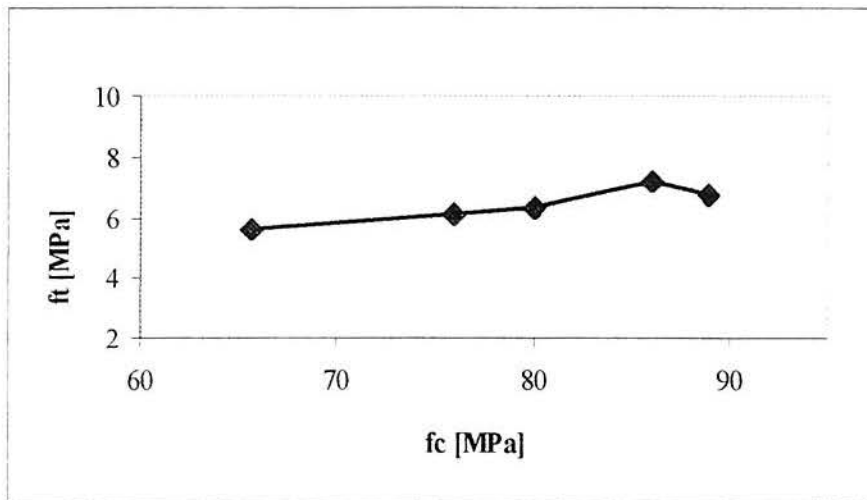


Figura 5.12 Resistência à tração X resistência à compressão, método Mehta/Aitcin

Conforme mencionado anteriormente, verifica-se que o traço que apresenta o maior valor de resistência à compressão não é o traço mais rico (1:3,3), e sim o segundo traço mais rico (1:3,6). Entretanto, para os valores de resistência à tração, esse comportamento não repetiu-se, conforme mostra a Figura 5.12.

A justificativa de conhecer-se o comportamento da resistência à compressão em relação à resistência à tração e vice-versa é que se pode estimar, por exemplo, um valor de resistência à compressão que garantirá determinado valor de resistência à tração, uma vez que é mais fácil dosar um concreto com base na resistência à compressão que se deseja alcançar.

5.2.2.3 Consumo de material por m³ de concreto

A Tabela 5.22 apresenta o consumo de material por m³ de concreto para os cinco traços de concreto.

Tabela 5.22 Consumo de material por m³ de concreto, em kg

TRAÇO	fc (MPa)	Cimento	Sílica Ativa	Areia	Brita	Água
1:4,5	65.69	430	43.0	700	1220	177
1:4,1	75.96	472	47.2	681	1240	162
1:3,7	80.03	516	51.6	667	1266	143
1:3,6	88.94	544	54.4	650	1286	132
1:3,3	86.03	586	58.6	632	1307	117

O consumo de cimento por m³ de concreto variou de 430 kg/m³ para o traço mais pobre a 586 kg/m³ para o traço mais rico. A Figura 5.13 mostra a variação no consumo de cimento dos diversos traços de concreto.

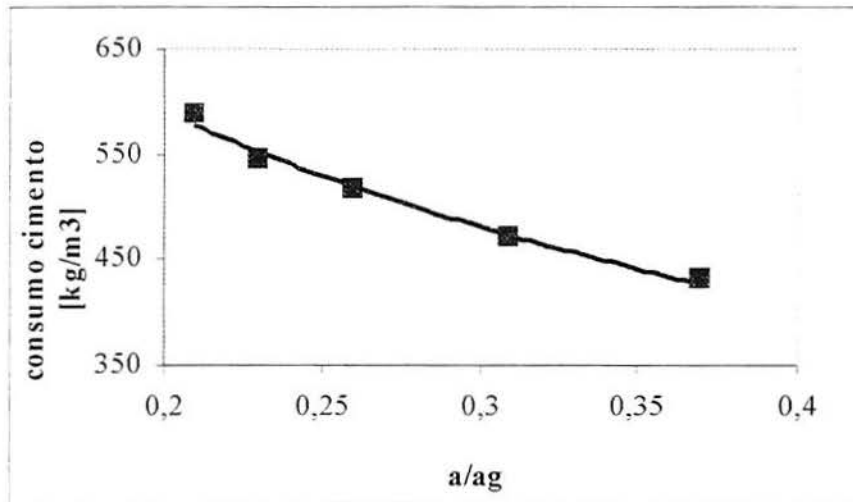


Figura 5.13 Consumo de cimento dos diversos traços - método Mehta/Aitcin

5.2.2.4 Custos

A Tabela 5.23, a seguir, apresenta os custos finais de cada traço, em RS/m^3 de concreto.

Tabela 5.23 Custos - método Mehta/Aitcin

Traço	f_c (MPa)	Custo [RS/m^3]
1:4.5	65,69	161,46
1:4.1	75,96	184,69
1:3.7	80,03	219,97
1:3.6	88,94	230,89
1:3.3	86,03	247,23

Assim como para o método anterior, pode-se observar que o traço mais pobre é o que apresenta o menor custo. Da mesma forma, o traço mais rico é o mais caro de todos. Este elevado custo do traço mais rico deve-se ao grande consumo de cimento e de aditivo superplastificante, que vai diminuindo com o empobrecimento dos traços.

5.2.3 Método Toralles Carbonari

5.2.3.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão

Considerando-se a evolução da resistência com a idade do concreto produzido com as quatro composições diferentes de pasta e esqueleto, pode-se dizer que o concreto apresentou, em média, 76,60% e 86,78% da sua resistência final aos 3 e 7 dias de idade, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 5.14.

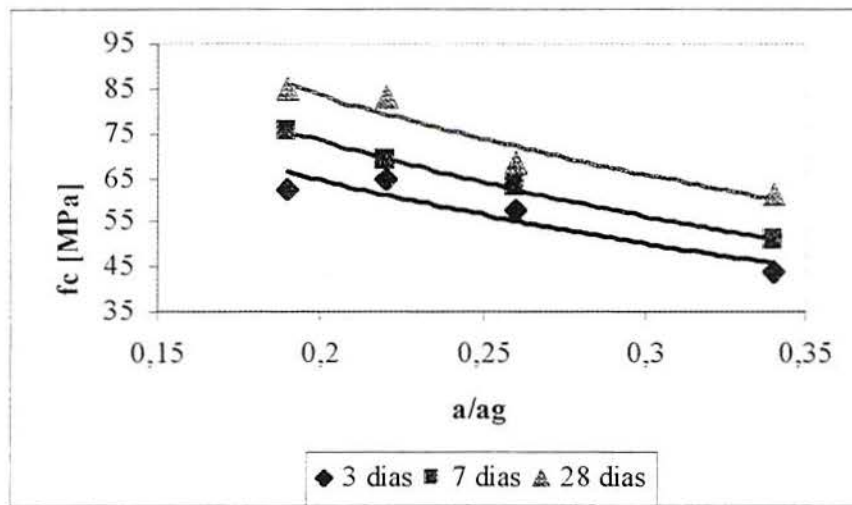


Figura 5.14 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Toralles Carbonari

A respeito da Figura 5.14, assim como nos casos anteriores, as curvas $f_c \times a/c$ foram ajustadas a partir de ajustes logarítmicos. Entretanto, foram verificados vários modelos diferentes de ajustes, conforme consta na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 Modelos de ajustes das curvas $f_c \times a/c$, método Toralles Carbonari

AJUSTE	Linear	Logarítmico	Polinomial	Potencial	Exponencial
3 dias	0,9374	0,9026	0,9631	0,8991	0,9384
7 dias	0,9686	0,9906	0,9992	0,9973	0,9849
28 dias	0,9051	0,9311	0,9515	0,9385	0,9170

A Figura 5.15 ilustra a influência da interação entre a relação a/ag e a idade na resistência à compressão do concreto.

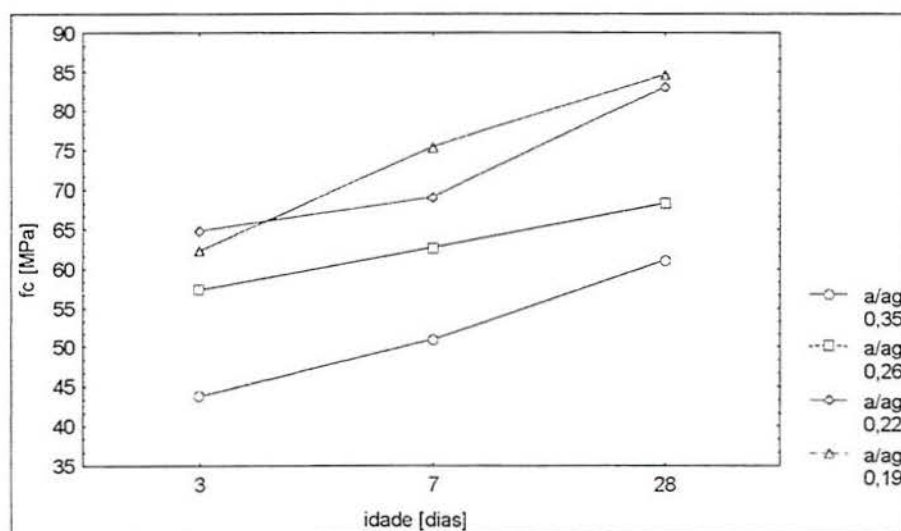


Figura 5.15 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Toralles Carbonari

Assim como para o método anterior, verifica-se a não influência da interação entre as variáveis idade e relação a/ag na resistência à compressão do concreto, comprovada estatisticamente em 5.1.2.

Considerando-se a idade de 28 dias como sendo 100% da resistência à compressão, a Tabela 5.25 ilustra as taxas de resistência alcançadas aos 3 e 7 dias por esse método. Esse valores podem ser comparados com os da Tabela 5.17 apresentada anteriormente.

Tabela 5.25 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Toralles Carbonari

a/ag	3 dias	7 dias	28 dias
0,35	0,72	0,83	1,0
0,26	0,84	0,92	1,0
0,22	0,78	0,83	1,0
0,19	0,74	0,89	1,0

Observa-se a mesma tendência de comportamento dos métodos anteriores, quando os ganhos de resistência aos 3 e 7 dias de idade superam os limites da Tabela 5.17.

5.2.3.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (f_t/f_c)

A Figura 5.16 apresenta a tendência de comportamento da relação f_t/f_c .

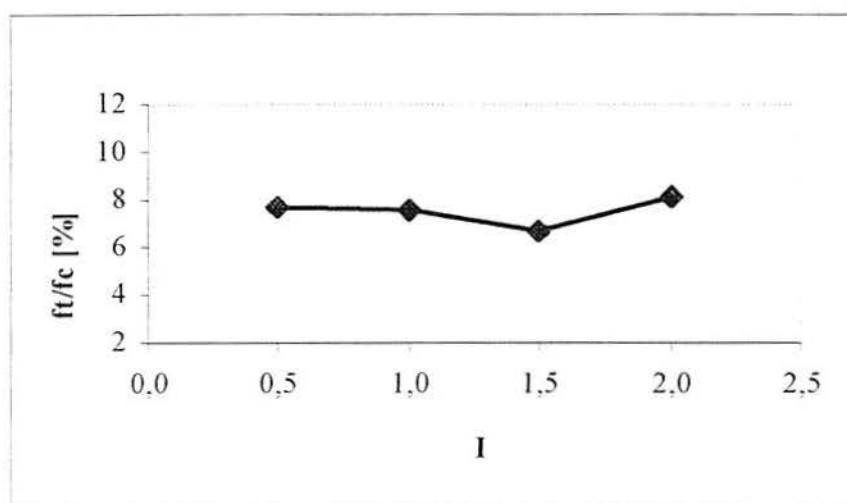


Figura 5.16 Relação f_t/f_c , método Toralles Carbonari

Observa-se que os valores da relação f_t/f_c não variam muito entre os quatro níveis diferentes, mantendo-se num intervalo entre 7,58% e 8,08%. Enquanto que o intervalo de resistência à compressão alcançado por este método está entre 61,23 MPa e 84,67 MPa, os valores de resistência à tração encontram-se entre 4,71 MPa e 6,84 MPa.

Considerando-se o ganho de resistência à tração entre os quatro níveis diferentes, o concreto produzido por este método apresentou uma variação de 45%, que corresponde ao dobro do ganho de resistência à tração apresentado, por exemplo, pelo método IPT (21%), do traço mais pobre ao traço mais rico. Para os valores de resistência à compressão, entretanto, ocorreu o inverso: enquanto o ganho de resistência entre os quatro níveis variou em 21%, para o método IPT este valor chegou a 74%, indicando uma inversão na tendência de comportamento.

Os valores de "m" para os quatro níveis de concreto produzidos por este método são bem parecidos, uma vez que este método possui procedimentos bastante diferentes, e não difere as misturas de concreto por valores de "m". Assim sendo, não se pode classificar os níveis por diferentes valores de "m", não havendo um traço mais rico ou mais pobre.

A Figura 5.17, a seguir, ilustra o crescimento das resistência à compressão pelo crescimento da resistência à tração.

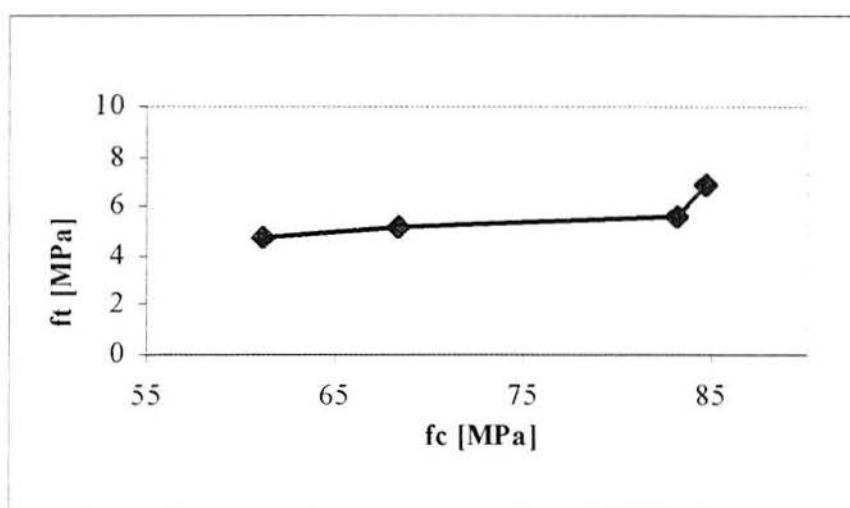


Figura 5.17 Resistência à tração X resistência à compressão, método Toralles Carbonari

5.2.3.3 Consumo de material por m³ de concreto

A Tabela 5.26 apresenta o consumo de material por m³ de concreto para os quatro níveis diferentes de concreto.

Tabela 5.26 Consumo de material por m³ de concreto, em kg

NÍVEL	fc (MPa)	Cimento	Sílica Ativa	Areia	Brita	Água
0,5	61.23	587	58,7	789	805	220
1,0	68.40	637	63,7	814	829	184
1,5	83.12	641	64,1	848	865	159
2,0	84.67	692	69,2	838	855	147

O consumo de cimento por m^3 de concreto variou de 587 kg/m^3 a 692 kg/m^3 . Embora o intervalo de variação deste consumo seja bem menor do que o dos outros métodos (105 kg/m^3), a obtenção de CAR por este método gera elevado consumo de cimento. A Figura 5.18 mostra a variação no consumo de cimento dos diversos traços de concreto.

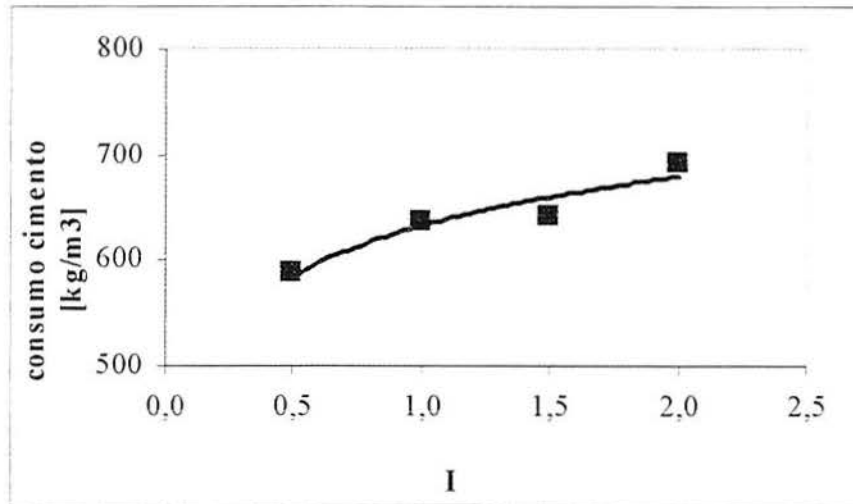


Figura 5.18 Consumo de cimento dos diversos níveis - método Toralles Carbonari

5.2.3.4 Custos

A Tabela 5.27, a seguir, apresenta os custos finais de cada traço, em $\text{R}\$/\text{m}^3$ de concreto.

Tabela 5.27 Custos - método Toralles Carbonari

Índice	f_c (MPa)	Custo [$\text{R}\$/\text{m}^3$]
0,5	61,23	185,05
1,0	68,40	220,96
1,5	83,12	244,10
2,0	84,67	284,79

Pode-se observar que o índice $I=0,5$ que apresenta o menor consumo de cimento e aditivo superplastificante é, certamente, o que apresenta o menor custo. Da mesma forma, o índice $I=2,0$ que apresenta o maior consumo de cimento e aditivo é o que representa o maior custo de todos.

5.2.4 Método Aitcin

5.2.4.1 Efeito das variáveis relação água/aglomerante e idade na resistência à compressão

Considerando-se a evolução da resistência com a idade dos cinco traços do concreto, sendo eles 1:3,5; 1:3,9; 1:4,4; 1:5,0 e 1:5,8, pode-se dizer que o concreto apresentou, em

média, 75,66% e 85,62% da sua resistência final aos 3 e 7 dias de idade, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 5.19.

É preciso lembrar que, da mesma forma que para os métodos anteriores, os valores apresentados da evolução da resistência com a idade são valores médios dos cinco traços de concreto produzidos.

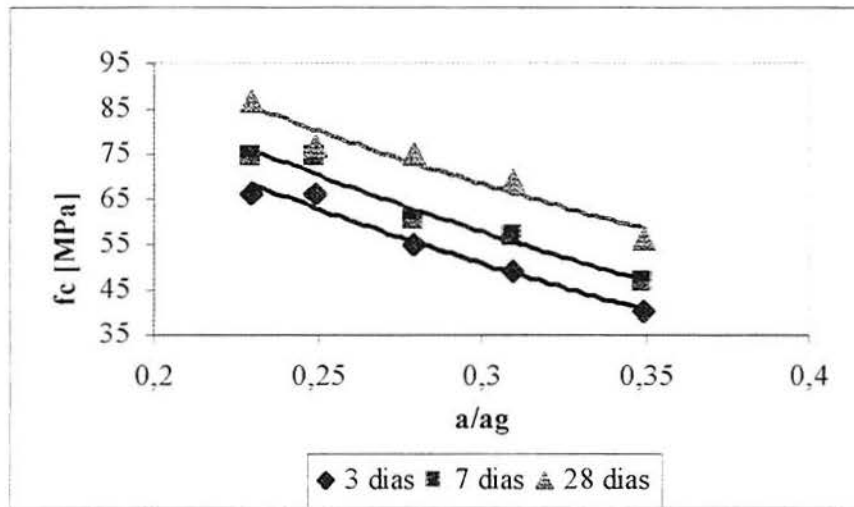


Figura 5.19 Evolução da resistência com a idade, método Aitcin

A respeito da Figura 5.19, as curvas f_c X a/c também foram ajustadas a partir de ajustes logarítmicos. Entretanto, assim como nos casos anteriores, foram verificados vários modelos diferentes de ajustes, conforme consta na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 Modelos de ajustes das curvas f_c X a/c , método Aitcin

AJUSTE	Linear	Logarítmico	Polinomial	Potencial	Exponencial
3 dias	0,9883	0,9758	0,9931	0,9581	0,9780
7 dias	0,9424	0,9356	0,9429	0,9327	0,9470
28 dias	0,9575	0,9659	0,9652	0,9684	0,9693

A Figura 5.20 ilustra a influência da interação entre a relação a/ag e a idade na resistência à compressão do concreto.

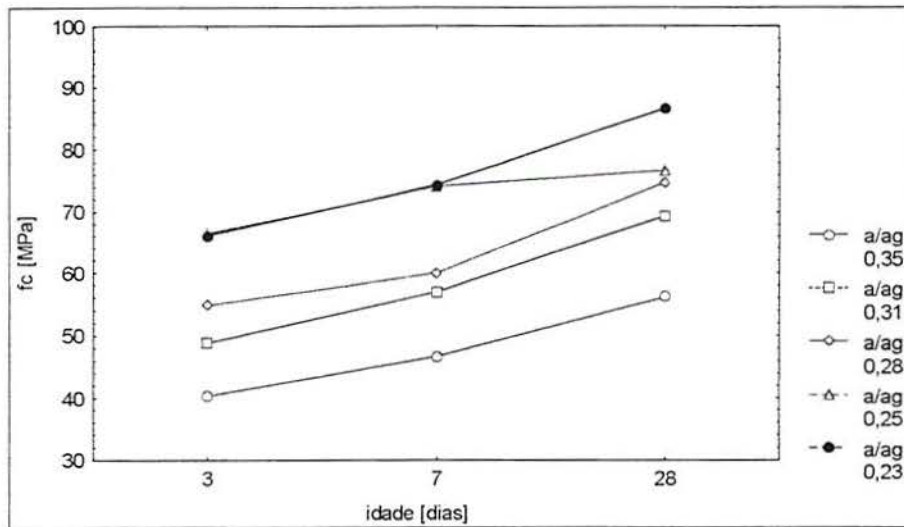


Figura 5.20 Influência da interação entre relação a/ag e idade na resistência à compressão, Método Aitcin

Assim como para os métodos anteriores, estatisticamente verifica-se a não influência da interação entre as variáveis idade e relação a/ag na resistência à compressão do concreto.

Considerando-se a idade de 28 dias como sendo 100% da resistência à compressão, a Tabela 5.29 ilustra as taxas de resistência alcançadas aos 3 e 7 dias por esse método. Esses valores podem ser comparados com os da Tabela 5.17 apresentada anteriormente.

Tabela 5.29 Evolução da resistência à compressão com a idade, método Aitcin

a/ag	3 dias	7 dias	28 dias
0,35	0,72	0,83	1,0
0,31	0,70	0,82	1,0
0,28	0,73	0,80	1,0
0,25	0,87	0,97	1,0
0,23	0,76	0,86	1,0

Observa-se a mesma tendência de comportamento dos métodos anteriores, quando os ganhos de resistência aos 3 e 7 dias de idade superam os limites da Tabela 5.17.

5.2.4.2 Relação resistência à tração/resistência à compressão (f_t/f_c)

A Figura 5.21, a seguir, apresenta a tendência do comportamento da relação f_t/f_c .

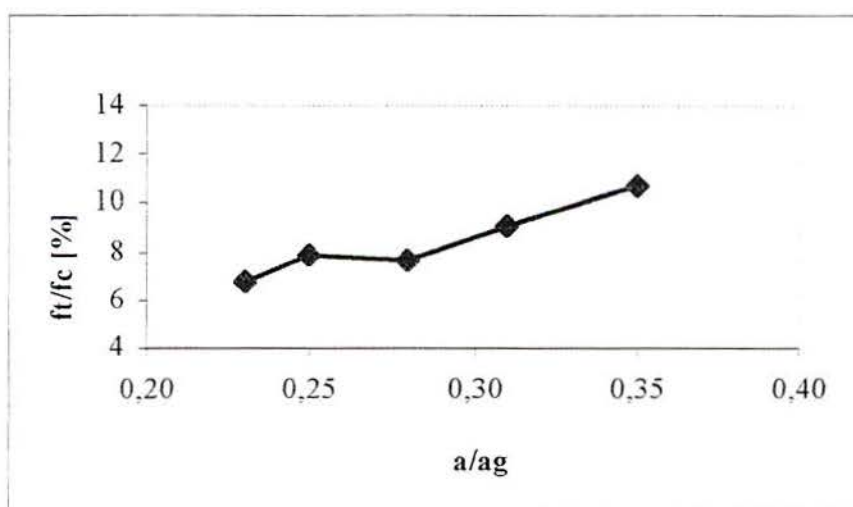


Figura 5.21 Relação f_t/f_c , método Aitcin

Pode-se observar que os valores da relação f_t/f_c tendem a aumentar do traço mais rico para o mais pobre, sendo o valor máximo de 10,70%, para o traço 1:5,8. A resistência média à compressão alcançada pelo concreto executado neste traço, aos 28 dias de idade, foi de 56,19 MPa.

Para o traço mais rico 1:3,5, a relação f_t/f_c foi de 6,79%, comprovando que essa relação diminui para os concretos de alta resistência. O concreto produzido pelo traço 1:3,5 atingiu, aos 28 dias de idade, resistência média à compressão de 86,61 MPa.

A Figura 5.22, a seguir, ilustra o crescimento das resistência à compressão pelo crescimento da resistência à tração.

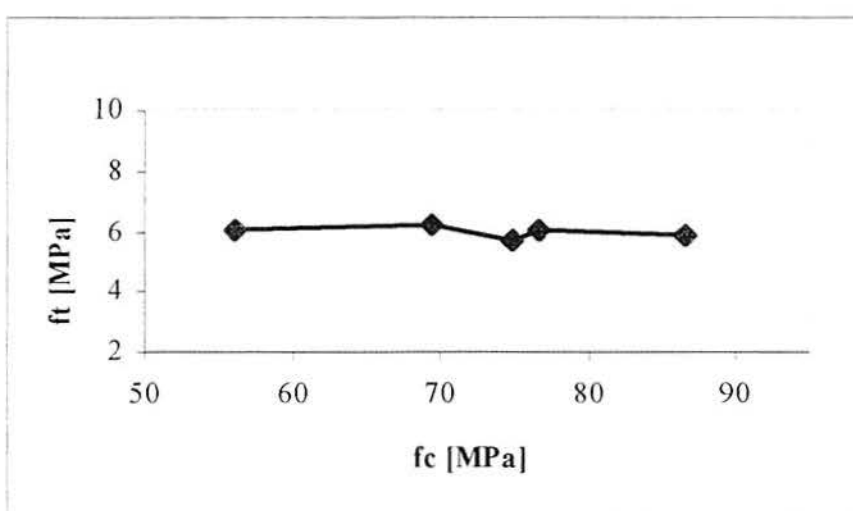


Figura 5.22 Resistência à tração X resistência à compressão, método Aitcin

5.2.4.3 Consumo de material por m^3 de concreto

A Tabela 5.30 apresenta o consumo de material por m^3 de concreto para os cinco traços de concreto.

Tabela 5.30 Consumo de material por m^3 de concreto, em kg

TRAÇO	fc (MPa)	Cimento	Sílica Ativa	Areia	Brita	Água
1:5,8	56,19	351	35,1	994	1071	133
1:5,0	69,37	396	39,6	996	1028	133
1:4,4	74,79	438	43,8	992	986	133
1:3,9	76,73	491	49,1	995	936	132
1:3,5	86,61	534	53,4	991	892	132

O consumo de cimento por m^3 de concreto variou de 351 kg/m^3 para o traço mais pobre a 534 kg/m^3 para o traço mais rico, indicando que a produção de concreto de alta resistência por este método é a que menos consome cimento. Um consumo de cimento de 534 kg/m^3 é um valor aceitável do ponto de vista técnico e econômico, em se tratando de concreto de alta resistência. A Figura 5.23 mostra a variação no consumo de cimento dos diversos traços de concreto.

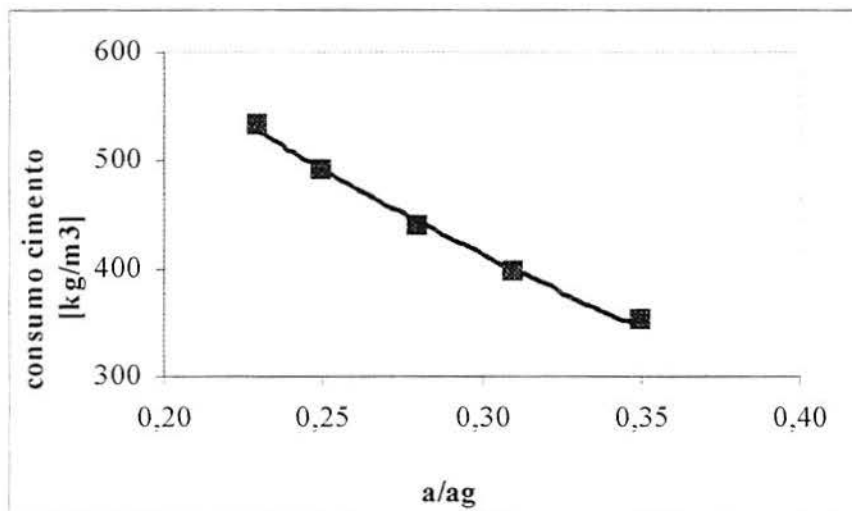


Figura 5.23 Consumo de cimento dos diversos traços - método Aitcin

5.2.4.4 Custos

A Tabela 5.31, a seguir, apresenta os custos finais de cada traço, em $\text{R\$/m}^3$ de concreto.

Tabela 5.31 Custos - método Aitcin

Traço	f_c (MPa)	Custo [R\$/m ³]
1:5,8	56,19	173,43
1:5,0	69,37	174,40
1:4,4	74,79	190,30
1:3,9	76,73	201,04
1:3,5	86,61	224,24

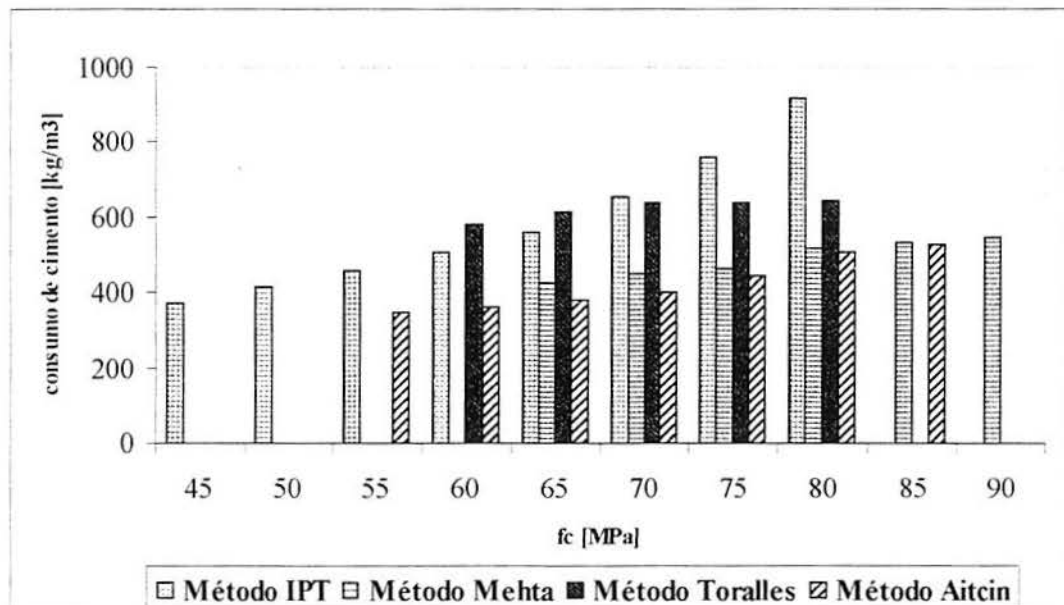
Da mesma forma que para os outros métodos, os traços mais ricos, cujo consumo de cimento e aditivo é maior, apresentam o maior custo, enquanto que os traços mais pobres apresentam um custo menor.

5.2.5 Comparação entre métodos

De acordo com os resultados apresentados e analisados anteriormente, é possível estabelecer-se um estudo comparativo entre os quatro métodos. Não se pretende apontar um dos métodos como sendo o melhor de todos, mas sim indicar como cada um deles se comporta e que resultados pode-se esperar relacionando-se critérios de resistência, custo, consumo de material e trabalhabilidade, com os materiais utilizados.

5.2.5.1 Consumo de cimento por m³ de concreto

A Figura 5.24 ilustra o consumo de cimento por faixas de resistência à compressão para os quatro métodos estudados.

**Figura 5.24** Consumo de cimento por faixas de resistência à compressão

Pode-se observar que o Método IPT abrange uma faixa que vai de 45 MPa a 80 MPa, o Método Mehta/Aitcin abrange uma faixa de 65 MPa a 90 MPa, enquanto que o Método Toralles Carbonari abrange o intervalo de 60 MPa a 80 MPa e o Método Aitcin de 55 MPa a 85 MPa.

No que diz respeito ao consumo de cimento por m^3 de concreto, está claro que o Método Aitcin é o que apresenta os menores consumos, seguido pelo Método Mehta/Aitcin, que apresenta o segundo menor consumo deste material.

O Método Toralles Carbonari apresenta o maior consumo de cimento por m^3 de concreto para a faixa entre 60 MPa e 65 MPa, sendo superado pelo Método IPT na faixa que vai de 70 MPa a 80 MPa.

Para tornar um pouco mais clara esta análise, a Figura 5.25, a seguir, ilustra o consumo de cimento por m^3 de concreto, no intervalo de 55 MPa a 85 MPa, para os quatro métodos de dosagem estudados.

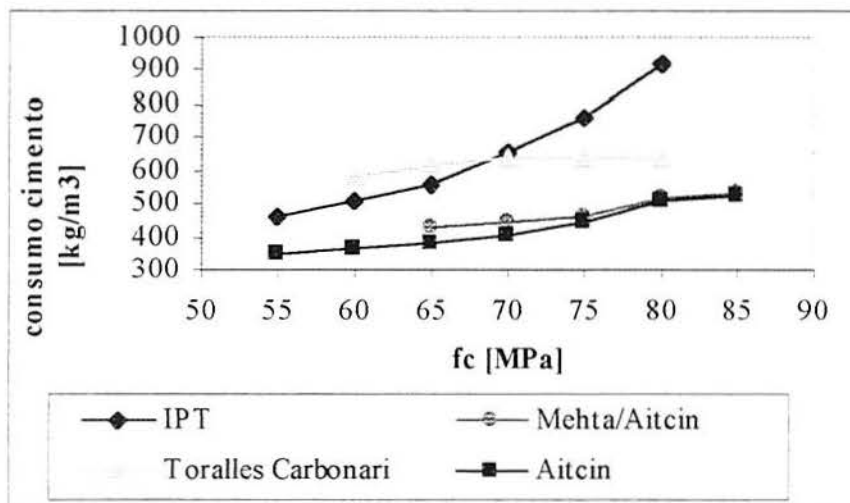


Figura 5.25 Consumo de cimento para o intervalo de resistência à compressão de 55 MPa a 85 MPa

Geralmente o consumo de cimento fornece uma estimativa do custo do m^3 do concreto, uma vez que seu custo é bem maior do que o de outros materiais utilizados, tais como areia e brita, de forma que há uma tendência de achar-se que o método que apresenta o maior consumo de cimento é também o de custo mais elevado. Entretanto, nesta pesquisa houve a adição da sílica ativa e de superplastificante às misturas de concreto, cujo custo também é bastante elevado. Daí a necessidade de um estudo de custos, conforme o item 5.2.5.2 a seguir.

5.2.5.2 Custo do m³ de concreto

A Figura 5.26 ilustra o custo do m³ de concreto, por faixas de resistência, para os quatro métodos estudados.

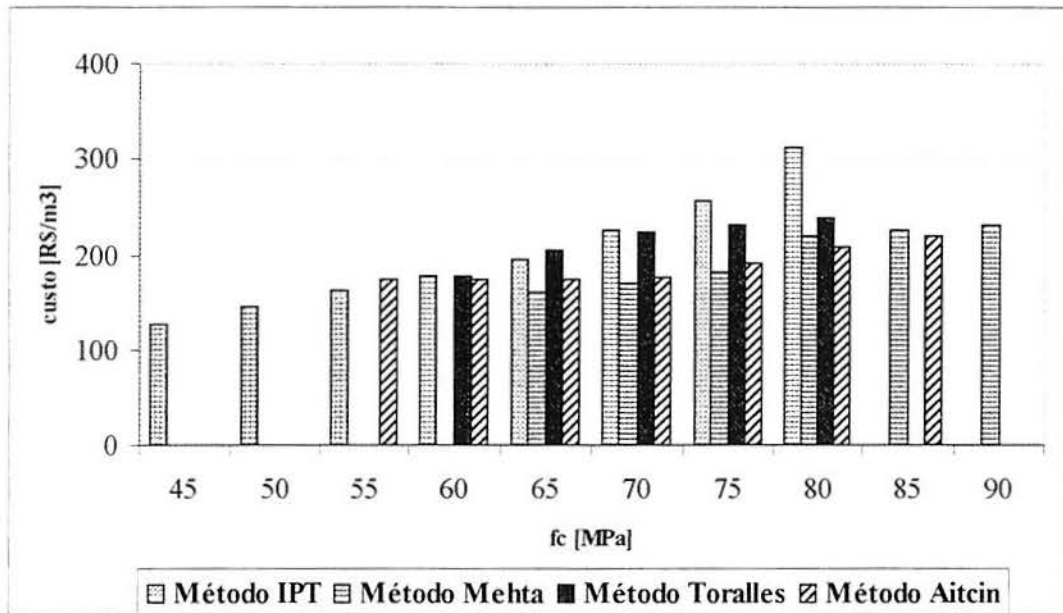


Figura 5.26 Custo do concreto por faixas de resistência

Embora o Método Aitcin tenha apresentado os menores consumos de cimento por m³ de concreto, a Figura 5.26 mostra que ele nem sempre representa a maior economia. Na faixa de resistência que vai de 65 MPa a 75 MPa, o Método Mehta apresenta-se como o mais econômico. Entretanto, a partir de 80 MPa, o Método Aitcin passa a ser o de menor custo.

Para concretos da ordem de 55 MPa, o Método IPT aparece como o mais econômico, sendo que para a faixa de 45 MPa a 50 MPa, seu custo é bastante acessível. Isto deve-se ao fato dele ser um método bastante eficiente para concreto convencional. Porém, a partir dos 60 MPa, ele praticamente classifica-se como o mais anti-econômico para todos os níveis de resistência estudados.

O Método Toralles Carbonari, apesar de não representar os maiores custos, apresenta custos bastante elevados se comparado com os Métodos Mehta/Aitcin e Aitcin.

A Figura 5.27, a seguir, representa o custo do m³ de concreto para a faixa de resistência à compressão de 55 MPa a 85 MPa, para os quatro métodos de dosagem estudados.

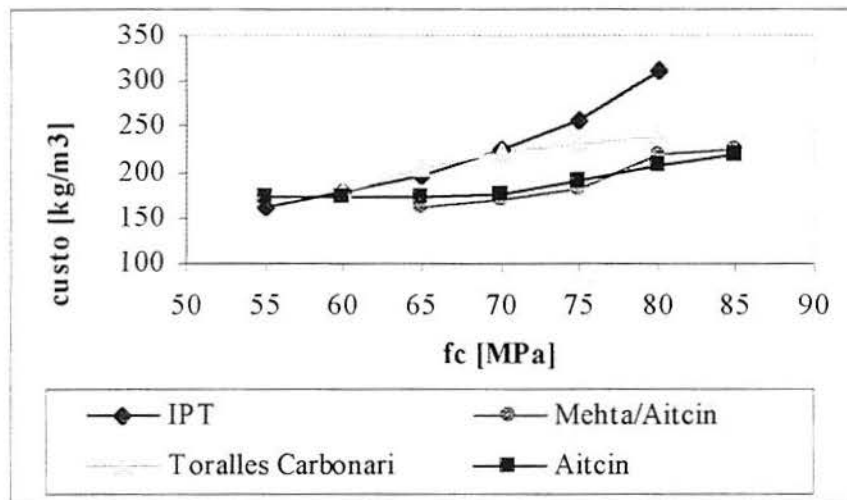


Figura 5.27 Custo do m³ de concreto para o intervalo de resistência à compressão de 55 MPa a 85 MPa

Nota-se que existem alguns pontos em que as curvas se cruzam, indicando que não existe um método que seja sempre o mais econômico. É preciso analisar-se cada valor de resistência à compressão em separado. No momento da escolha do método, dependendo da resistência que se quiser alcançar, deverá se escolher um ou outro método.

Ainda dentro da análise de custos, selecionou-se o intervalo de resistência à compressão alcançado pelos quatro métodos de dosagem, e estabeleceu-se um comparativo entre eles. Esse intervalo é de 65 MPa a 80 MPa, e a Tabela 5.32, a seguir, mostra a variação no custo, em porcentagem, para cada 5 MPa de acréscimo na resistência à compressão, considerando-se como referência o custo do m³ de concreto com resistência à compressão de 65 MPa para cada método.

Tabela 5.32 Comparativo de custos para a faixa de 65 MPa a 80 MPa

fc [MPa]	IPT	Mehta/Aitcin	Toralles C.	Aitcin
65	R\$ 195,50	R\$ 159,90	R\$ 203,90	R\$ 174,10
65-70	15%	7%	10%	1%
70-75	14%	7%	3%	9%
75-80	22%	20%	3%	9%
65-80	60%	37%	17%	20%
80	R\$ 312,80	R\$ 219,70	R\$ 239,20	R\$ 208,70

A Tabela 5.32 apresenta, ainda, a variação no custo do concreto de 65 MPa a 80MPa, mostrando os custos iniciais e finais para cada método neste intervalo.

Pode-se observar que, embora os acréscimos no custo do concreto varie bastante de 65 MPa a 80 MPa para os diversos métodos (entre 17 % e 60 %), esses valores não necessariamente indicam o método mais econômico. É preciso levar-se em consideração os

custos inicial e final do concreto produzido por cada método neste intervalo para então optar-se por um ou outro.

5.2.5.3 Diagrama de Dosagem

A Figura 5.28 mostra o Diagrama de Dosagem para os métodos IPT, Mehta/Aitcin e Aitcin. O método Toralles Carbonari, por seguir critérios diferentes, não permite que se construa seu Diagrama de Dosagem.

A partir do Diagrama de Dosagem é possível estimar-se o consumo de cimento, o traço ("m") e a relação a/ag para qualquer valor de resistência à compressão dentro do intervalo estudado, garantindo-se a produção do concreto para este valor de resistência, com os materiais utilizados.

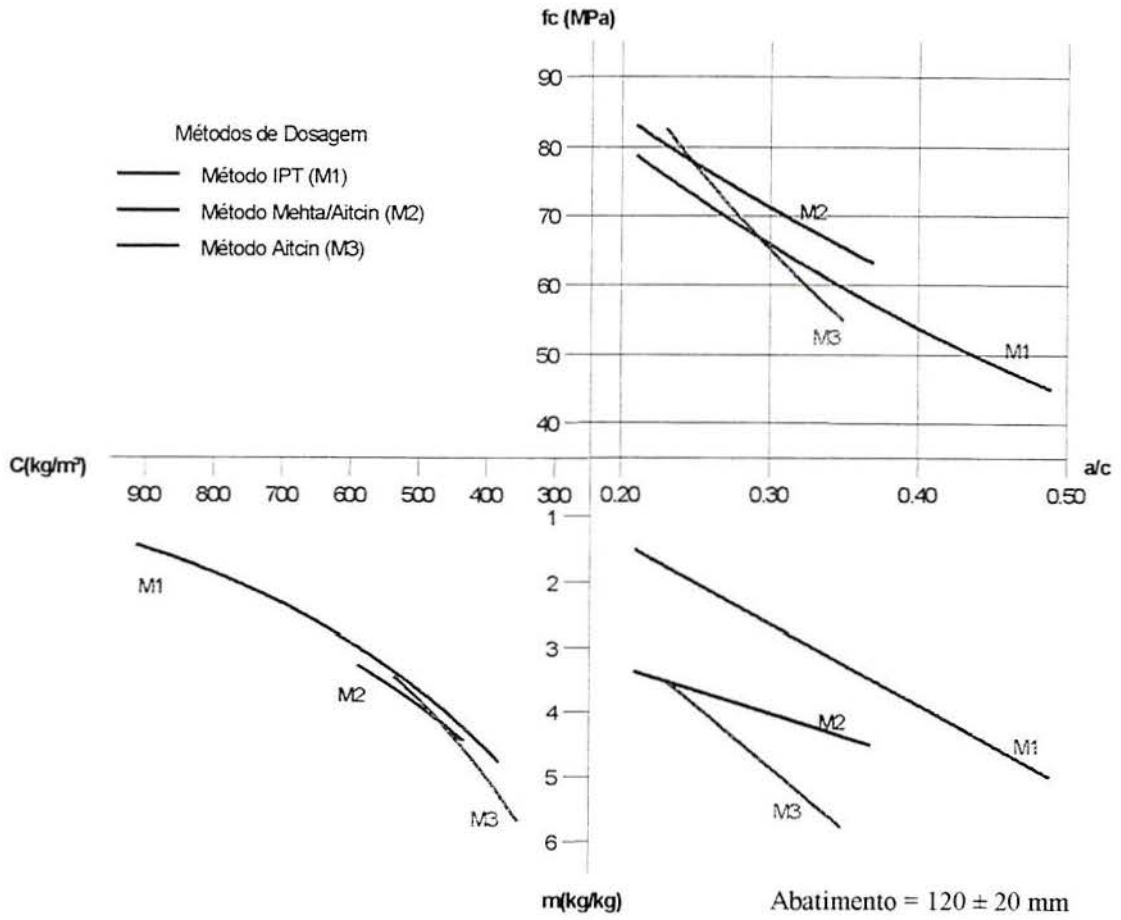


Figura 5.28 Diagrama de Dosagem

5.2.5.4 Teores de argamassa e volumes de pasta e esqueleto granular

A Tabela 5.33, a seguir, apresenta os teores de argamassa utilizados nos diversos traços de concreto produzidos pelos quatro métodos de dosagem, assim como as porcentagens, em volume, da pasta e do esqueleto granular de cada mistura de concreto.

Tabela 5.33 Teores de argamassa e volumes de pasta e esqueleto dos diversos traços de concreto

Traço	α (%)	Vpasta (%)	Vesq. (%)
MÉTODO IPT			
1:5	50	34	66
1:4	50	37	63
1:3	50	41	59
1:2	50	48	52
1:1,5	50	54	46
MÉTODO MEHTA/AITCIN			
1:4,5	48	35	65
1:4,1	48	35	65
1:3,7	48	35	65
1:3,6	48	35	65
1:3,3	49	35	65
MÉTODO TORALLES CARBONARI			
P1	63	44	56
P2	63	42	58
P3	63	39	61
P4	64	40	60
MÉTODO AITCIN			
1:5,8	59	27	73
1:5,0	59	28	72
1:4,4	59	30	70
1:3,9	59	32	68
1:3,5	59	33	67

No que se refere ao teor de argamassa das misturas de concreto, pode-se observar que esse valor apresentou-se constante para todos os traços executados por um mesmo método de dosagem. Para o Método IPT, que parte da determinação de um teor ideal de argamassa (α), sabe-se que esse valor é constante para todos os diferentes traços, uma vez que esse valor α é determinado e mantido fixo. Entretanto, ao calcular-se o teor de argamassa, em massa, dos traços de concreto executados pelos outros métodos, observou-se que esse valor também se mantém constante para os demais métodos.

Para os Métodos IPT e Mehta/Aitcin o teor de argamassa encontra-se na faixa dos 50 %, sendo que para os outros métodos esse valor encontra-se em torno de 60 %.

Considerando-se os volumes de pasta e de esqueleto granular, sabe-se que o Método Mehta/Aitcin estabelece que 35 % da mistura de concreto é composta de pasta e os outros 65 % são formados pelos esqueleto granular.

Os outros três métodos, no entanto, apresentam variações nas relações pasta/esqueleto, em volume, conforme apresentado na Tabela 5.33. Pode-se observar que, a medida em que o traço de concreto apresenta-se mais rico, maior é o volume de pasta encontrado na mistura e, conseqüentemente, maior é a resistência desse concreto.

Esse aumento no volume de pasta do traço mais pobre ao traço mais rico pode ser observado claramente para os Métodos IPT e Aitcin, sendo que para o Método Toralles Carbonari esses valores variaram em torno de 10 %, não obedecendo uma tendência clara de comportamento. Sabe-se que esse método apresenta um proporcionamento dos materiais diferente dos demais métodos, o que não permite classificar-se os diversos traços pela proporção m (cimento: materiais secos, em massa) e, conseqüentemente, determinar-se um traço mais rico ou mais pobre.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

6.1.1 Conclusões gerais

A utilização do concreto de alta resistência tende a intensificar-se cada vez mais, devido aos inúmeros benefícios que ela traz, quando comparada à utilização do concreto convencional ou ainda de outros materiais de construção.

Existem diversos métodos de dosagem, específicos ou não para concreto de alta resistência, que diferem uns dos outros por considerarem diferentes características dos materiais, por partirem de princípios diferentes e por desenvolverem o proporcionamento dos materiais obedecendo a seqüências distintas.

Esta pesquisa estudou quatro métodos de dosagem de concreto, sendo três específicos para concreto de alta resistência e um para concreto convencional. Os ensaios realizados foram ensaio de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral.

Dos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

1. Existe diferença significativa entre produzir-se concreto de alta resistência por métodos de dosagem específicos para CAR e métodos de dosagem para concreto convencional;
2. Para a produção de concreto de alta resistência há a necessidade da incorporação de aditivo superplastificante para se conseguir atingir ambos requisitos de trabalhabilidade e resistência;
3. O consumo de material por m^3 de concreto, principalmente de cimento, varia consideravelmente de um método para outro, sendo que para métodos específicos para CAR esse consumo é reduzido sobremaneira;
4. Em consequência do item anterior, o custo do m^3 de concreto também varia bastante quando compara-se, para uma mesma faixa de resistência, o custo final do concreto produzido pelos quatro métodos diferentes.

6.1.2 Conclusões específicas

Do ponto de vista da praticidade, existem métodos que são bem mais simplificados do que outros, exigindo poucos ensaios preliminares e partindo de pré-supostos. Cabe ao executor do concreto escolher o método que melhor se adequar as condições técnicas disponíveis.

Do ponto de vista da resistência mecânica, algumas considerações relevantes são apresentadas a seguir:

- Quanto à resistência à compressão: todos os métodos de dosagem executados possibilitaram produzir concretos da ordem de 85 MPa, chegando, em alguns casos, a concretos da ordem de 90 MPa;
- Quanto à resistência à tração por compressão diametral: a relação resistência à tração/resistência à compressão variou de aproximadamente 5,0 % para as maiores resistências à compressão (85 MPa), aproximando-se de 10% para as resistências à compressão menores (44 MPa).

Do ponto de vista técnico, são apresentadas as seguintes considerações:

- Foi possível produzir-se concreto com resistência mecânica da ordem de 85 MPa com consumo de cimento na faixa de 500 a 550 kg/m³, valor este considerado aceitável do ponto de vista técnico. Sabe-se que é preciso haver um limite no consumo de cimento para evitar o aparecimento de fissuras causadas por retração térmica e de secagem;
- O abatimento inicialmente fixado em 120 ± 20 mm foi atingido em praticamente todas as misturas, sendo que houve casos em que esse valor foi extrapolado.

Do ponto de vista estatístico, foi possível chegar-se a três considerações importantes:

- A resistência à compressão do concreto de alta resistência obedece a distribuição normal de Gauss;
- As variáveis traço do concreto (e conseqüente relação água/aglomerante) e grau de hidratação do cimento (idade a que o concreto é submetido ao ensaio) exercem influência significativa na resistência à compressão do concreto de alta resistência;

- A interação entre as variáveis idade e relação a/ag não influencia na resistência à compressão do concreto de alta resistência. Essa consideração só é verdadeira porque as relações a/ag estudadas são muito próximas e encontram-se numa faixa de relações a/ag muito baixa, característica do CAR. Além disso, os ganhos de resistência gerados até os 3 dias de idade não foram considerados, pois o intervalo estudado abrangeu apenas as idades de 3, 7 e 28 dias.

No que se refere ao custo do metro cúbico do concreto de alta resistência, comprovou-se que nem sempre o concreto que apresenta o maior consumo de cimento por m³ de concreto é, necessariamente, o mais caro. Isto deve-se ao fato de incorporar-se à mistura do CAR materiais tais como sílica ativa e aditivo superplastificante, cujo custo elevado influencia bastante no custo final, mesmo que a quantidade empregada desses materiais seja considerada pequena.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Os métodos de dosagem de concreto de alta resistência são, na sua maioria, métodos empíricos baseados na experiência de seus autores. Cada um desses métodos foi desenvolvido considerando os materiais existentes em determinada região.

No que se refere à realidade brasileira, existe uma gama enorme de materiais disponíveis, principalmente de agregados, que variam de uma região para outra, tornando impossível padronizar-se os métodos de dosagem em função dos materiais. Desta forma, há a necessidade de adequar-se os métodos de dosagem existentes para os diversos materiais comumente empregados na produção de concreto no país.

Além disso, é possível verificar-se o desempenho de outros tipos de aditivo quanto à obtenção de trabalhabilidade, incluindo superplastificantes de diferentes bases e aditivos incorporadores de ar. A viabilidade da utilização de outras adições também é uma possibilidade que merece ser estudada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. Londres: E&FN Spon, 1998. 591p.
- ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; CÁNOVAS, M.F. Composición y dosificación de hormigones de alta resistencia. **Cemento y Hormigon**, n. 709, p. 971-990, ago. 1992.
- ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; CÁNOVAS, M.F. Dosificación de hormigones de alta resistencia. **Cemento y Hormigon**, n. 738, p. 1299-1321, nov. 1994.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 226. Silica Fume in Concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.84, n.2, p. 158-166, Jan./Feb. 1987.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 211. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete: Proposed Revisions. **ACI Materials Journal**, v.86, n.1, p. 82-100, Jan./Feb. 1989.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-art Report on High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, part 1, 48p, 1991.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R-92 (Reapproved 1997). State-of-the-art Report on High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, part 1, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Definitions of Terms Relating to Concrete and Concrete Agregates**. ASTM C 125. Philadelphia, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária**: NBR 7810. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto - Especificação**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos**: NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa específica de agregado miúdo por meio do Frasco de Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da água da pasta de consistência normal:** NBR 11580. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico:** NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência:** NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto:** NBR 7680. Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Preparo, controle e recebimento de concreto:** NBR 12655. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.
- BALBO, J. T. Applications of High-Performance Concrete for Ultra-Thin Pavement Overlays (White-Topping). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings...** Michigan: CANMET/ACI, 1999. p. 731-743.
- CALIXTO, J. M. F; et al. Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 27., 1995, Tucumán, Argentina. **Memorias...** Tucumán: Laboratorio de Estructuras, Universidade Nacional de Tucumán, 1995. p. 93-102.
- CHORINSKY, E. Gf. Repair Systems for High Strength Concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **Proceedings...** California: CANMET / ACI, 1990.
- COLLEPARDI, S; et al. Mechanisms of Actions of Different Superplasticizers for High-Performance Concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings...** Michigan: CANMET/ACI, 1999. p. 503-523.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990:** Design Code. Lausanne, CEB, 1990a.

- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **High Performance Concrete: Recommended Extensions to the Model Code 90. Research Needs.** Lausanne, CEB, 1995. (Bulletin d'Information, 228)
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **High Performance Concrete: State of the Art Report.** Londres, CEB, 1990b. (Bulletin d'Information, 197)
- DAFICO, D. A. **Contribuição ao estudo de dosagem do concreto de Cimento Portland.** Florianópolis, 1997. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal de Santa Catarina.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssilica.** São Paulo, 1995. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- DAY, K. W. Computer Control of Concrete Proportions. **Concrete International.** v.18, n.12, Dec. 1996. p. 48-53.
- De LARRARD, F; SEDRAN, T. Computer-Aided Mix Design: Predicting Final Results. **Concrete International.** v.18, n.12, Dec. 1996. p. 39-41.
- De LARRARD, F; SEDRAN, T. Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the use of a Packing Model. **Cement and Concrete Research.** v. 24, n. 6, 1994. p. 997-1009.
- De LARRARD, F; BELLOC, A. Are Small Aggregates Really Better for Making High-Strength Concrete. **Cement, Concrete and Aggregates.** v. 14, n. 1, 1992. p. 62-63.
- De LARRARD, F. A Method for Proportioning High-Strength Concrete Mixtures. **Cement, Concrete and Aggregates.** v. 12, n. 2, 1990. p. 47-52.
- De LARRARD, F; et al. High-Strength Concrete for a Nuclear Power Plant. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **Proceedings...** California: CANMET / ACI, 1990.
- DOMONE, P; SOUTSOS, M. An Approach to the Proportioning of High-Strength Concrete Mixes. **Concrete International.** v. 16, n. 10, 1994. p. 26-31.
- GANJU, T. N. Spreadsheets Mix Designs. **Concrete International.** v. 18, n.12, Dec. 1996. p. 35-38.
- GJORV, O. E. High-Strength Concrete. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in Concrete Technology.** Ottawa: CANMET, 1994. p.19-82.
- HAUG, A.K; JAKOBSEN, B. In-situ and Design Strength for Concrete in Offshore Platforms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **Proceedings...** California: CANMET / ACI, 1990.
- HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI, 1992. 349p.

- HELLAND, S. High Strength Concrete Used in Highway Pavements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **Proceedings...** California: CANMET / ACI, 1990.
- HOFF, G. C. Concrete for Offshore Structures. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p.83-123.
- HOVER, K. Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI 211.1-91. **Concrete International**, v. 17, n.9, Sep. 1995. p. 49-53.
- LANGLEY, W. Concrete Mix Proportioning to Meet Durability Concerns for Confederation Bridge. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings...** Michigan: CANMET/ACI, 1999. p.129-148.
- MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings...** Michigan: CANMET/ACI, 1999. p.615-634.
- MALHOTRA, V. M. Strength Development Characteristics of High-Strength Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **Proceedings...** California: CANMET / ACI, 1990.
- MEHTA, P. K. Advancements in Concrete Technology. **Concrete International**, v. 21, n.6, Jun. 1999. p. 69-76.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MEHTA, P.K; AITCIN, P.C. Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete. In: HSC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION ON HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **ACI SP-121**. Bekkeley, (CA): W.T.Hester, 1990a. p. 265-286.
- MEHTA, P.K; AITCIN, P.C. Principles Underlying Production for High Strength Performance Concrete. **Cement, Concrete & Aggregates** v. 12, n.2, p. 70-78. 1990b.
- MINDESS, S. **High Performance Concretes and Applications**. London: Edward Arnold, 1994.
- NANNI, L.F. **Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1981. (Caderno Técnico, 30/81)
- NAWY, E.G. **Fundamentals of High Strength High Performance Concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340p.
- O'REILLY DÍAZ, V. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: PINI, 1998.

- POPOVICS, S; POPOVICS, J.S. Novel Aspects in Computerization of Concrete Proportioning. **Concrete International**, v. 18, n. 12, Dec. 1996. p. 54-58.
- RAMACHANDRAN, V. Recent Progress in the Development of Chemical Admixtures. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p.785-838.
- RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1995. 32p.
- TORALLES CARBONARI, B. M. **Concreto de alto desempenho: do laboratório à obra**. Florianópolis: ENTAC – Encontro Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 1998.
- TORALLES CARBONARI, B. M. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Barcelona, 1996. 174p. Tese (doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.