

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

**OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE DOSAGEM E
PROPORCIONAMENTO DO CONCRETO DOSADO EM CENTRAL
COM A UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS: ESTUDO DE CASO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Área de Concentração: Construção Civil, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

VANESSA DA COSTA MARTINS

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis, março de 2005.

**“OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE DOSAGEM E PROPORCIONAMENTO DO
CONCRETO DOSADO EM CENTRAL COM A UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS:
ESTUDO DE CASO”**

VANESSA DA COSTA MARTINS

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof^ª. Henriette Lebre La Rovere - Coordenadora do PPGEC

Prof^º. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. – Orientador / Moderador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr. Wellington Longuini Repette - ECV/UFSC

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene - USP

Dr. Paulo César Correia Gomes - UFAL

A Deus, porque Dele,
por Ele e para Ele são
todas as coisas.
(Rm 11:36)

AGRADECIMENTOS

À Polimix Concreto Ltda., por estar sempre de portas abertas, dando total liberdade para realização deste estudo na central de São José, e pela doação do cimento e agregados utilizados nesta pesquisa. Agradeço, principalmente, ao Eng. Joélcio Stocco e à Eng. Leila Beatriz da Silva, que sempre se mostraram interessados e apoiaram todas as nossas iniciativas de pesquisas científicas e tecnológicas na área de concreto dosado em central. Hoje, mais do que colegas de profissão, são meus amigos.

À Grace Brasil Ltda., na pessoa do Eng. Patrick Dal Molim, pela doação dos aditivos utilizados nesta pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC, da UFSC, e aos funcionários Luiz Henrique dos Santos e Renato Santana da Lapa, por serem solícitos e pacientes. Também sou grata ao funcionário Roque Medeiros de Lima que, além da ajuda muitas vezes prestada, tornou meus dias de trabalho no laboratório mais divertidos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC - e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, por terem me concedido a bolsa de estudos.

Ao professor, orientador e amigo, Luiz Roberto Prudêncio Jr, por ter aberto as portas da pesquisa para mim, ainda na graduação. Ao longo de quatro anos e meio de convivência, conquistou minha admiração por seu profissionalismo, conhecimento e extrema competência.

Aos professores Wellington L. Repette, Paulo Roberto do L. Helene e Paulo César C. Gomes, por aceitarem participar da avaliação deste trabalho.

Aos bolsistas de Iniciação Científica João Henrique Torresani e Washington L. A. da Silva Jr., que participaram ativamente da parte experimental desta pesquisa. Agradeço a dedicação, empenho e amizade, sem os quais este trabalho não estaria concluído.

À amiga e companheira ao longo de todo o curso de mestrado, Karoline A. de Melo, pelos estudos e trabalhos realizados em conjunto nas disciplinas cursadas e pelos dias em que dividimos o LMCC para a realização da parte experimental dos nossos trabalhos, momentos que guardarei na memória com carinho e saudades.

À amiga, Eng. Luciana M. L. Calçada, pelos ensinamentos quando ainda era sua bolsista de Iniciação Científica, tão úteis na realização do programa experimental deste trabalho. Agradeço, também, a participação no Exame de Qualificação deste trabalho, contribuindo com sugestões para o seu aprimoramento.

À Família GTec (Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à base de Cimento Portland), composto por: Regina, Luciana, Alexandre, Giovanna, Juliana, Sílvia, Karoline, Gabriela, Rodrigo, Alan, Renato, Denis, Tiago, João, Washington, Wilson, Maria Carolina e Gabriel, além dos professores Prudêncio e Wellington. Amigos que, além de me auxiliarem na realização do programa experimental, tornaram meus dias de trabalho mais alegres e agradáveis.

À minha mãe, Mariangela, por estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida, me dando amor, apoio e compreensão. Ao meu pai, José Valle, pelo seu incentivo, atenção e carinho. Ao meu irmão, Anderson, pelo carinho e amizade, apesar da distância.

Aos meus avós, Nicácio e Ambelina, aos meus tios, Jorge e Izabel, e à minha madrinha, Dulcemar, por sempre acreditarem em mim e participarem da realização de mais este sonho.

Ao meu namorado, amigo e companheiro, Eberson - Beto -, que participou da fase mais importante e decisiva deste trabalho, sendo meu maior incentivador. Agradeço pelas horas de auxílio no laboratório e, principalmente, por ter sacrificado suas férias para estar ao meu lado e me dar todo o apoio durante a redação final deste trabalho. Não tenho palavras para agradecer-te, Beto, pelo amor, cumplicidade e, mais ainda, por pensares sempre em mim antes de ti.

Aos pais do meu namorado, Maria e José Nilo, por terem me acolhido algumas vezes em sua casa com tanto carinho. Aproveito para desculpar-me pelos finais de semana que mal podia lhes dar atenção porque estava redigindo este trabalho.

Às amigas Beatriz Neves, Nadiesda dos Santos e Priscila Moysés, agradeço pela amizade e carinho, que ficarão guardados para sempre em meu coração, e me desculpo pelos diversos momentos em que estive ausente.

E, acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida e por me capacitar e encorajar a enfrentar os desafios que surgem, me fazendo crescer a cada vitória.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo Geral	4
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	6
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 DEFINIÇÃO	7
2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES	8
2.3.1 Cimento Portland	8
2.3.2 Agregados	12
2.3.3 Água	13
2.3.4 Adições Minerais	13
2.3.5 Aditivos	17
2.4 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO	18
2.4.1 Trabalhabilidade	18
2.4.2 Perda de Abatimento	22
2.4.3 Segregação e Exsudação	25
2.4.4 Tempo de Pega	27
2.4.5 Temperatura do Concreto	28
2.5 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO	31
2.5.1 Resistência à Compressão Axial	31
2.5.2 Módulo de Deformação	32
2.6 ESTUDO DE DOSAGEM	33
2.6.1 Método IPT / EPUSP	34
2.6.2 Considerações Sobre o Método IPT / EPUSP	37
2.7 CONCRETO DOSADO EM CENTRAL	40
2.7.1 Definição	40
2.7.2 Breve Histórico no Brasil	41
2.7.3 Centrais de Concreto e Seus Equipamentos	42
2.7.4 Processo de Produção	49
2.7.5 Controle da Qualidade	56
3 ADITIVOS	59
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
3.2 DEFINIÇÃO	60
3.3 CLASSIFICAÇÃO	60
3.4 ADITIVOS PLASTIFICANTES	62
3.4.1 Definição	62
3.4.2 Modo de Ação	64

3.4.3	Efeitos no Concreto	65
3.4.4	Método de Adição	67
3.5	ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES	67
3.5.1	Definição	67
3.5.2	Modo de Ação	69
3.5.3	Efeitos no Concreto	73
3.5.4	Método de Adição	76
3.6	ADITIVOS RETARDADORES DE PEGA	79
3.6.1	Definição	79
3.6.2	Modo de Ação	80
3.6.3	Efeitos no Concreto	81
3.6.4	Método de Adição	82
3.7	COMPATIBILIDADE	82
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	84
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	86
4.3	ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM IPT / EPUSP PARA CDC	88
4.4	CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE DOSAGEM – ETAPA 1	90
4.5	ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS E ARGAMASSAS QUANTO À CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA – ETAPA 2	93
4.6	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM LABORATÓRIO – ETAPAS 3 E 4	95
4.6.1	Variáveis Analisadas	95
4.6.2	Argamassas – Etapa 3	96
4.6.3	Concretos – Etapa 4	101
4.7	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM CAMPO (CDC) – ETAPA 5	105
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
5.1	ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS E ARGAMASSAS QUANTO À CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA	110
5.2	CURVAS DE DOSAGEM	117
5.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM LABORATÓRIO	120
5.3.1	Argamassas	120
5.3.2	Concretos	130
5.4	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM CAMPO (CDC)	136
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
6.1	CONCLUSÕES	143
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	148
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
	APÊNDICE A	157
	APÊNDICE B	162
	APÊNDICE C	165
	APÊNDICE D	183
	APÊNDICE E	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimento portland nacionais e respectivas normas.....	12
Tabela 2 – Classificação do controle da qualidade do concreto em termos de desvio-padrão (NBR 7212:1984).	58
Tabela 3 – Classificação do controle da qualidade do concreto em termos de coeficiente de variação (ACI 214-93 apud AITCIN, 2000b).	58
Tabela 4 – Resultados das análises física, química e mecânica do cimento portland CP IV.....	86
Tabela 5 – Caracterização dos agregados utilizados nas etapas 1, 2 e 3.	87
Tabela 6 – Caracterização dos agregados utilizados na etapa 4.	87
Tabela 7 – Características dos aditivos.	88
Tabela 8 – Composições dos traços estudados.	90
Tabela 9 – Composições das argamassas de referência.	96
Tabela 10 – Resumo dos procedimentos realizados nas diversas argamassas em cada momento.	99
Tabela 11 – Composições dos concretos de referência.	102
Tabela 12 – Resumo dos procedimentos realizados nos concretos em cada momento.....	106
Tabela 13 – Quantidades de materiais do CDC (kg/m ³).	107
Tabela 14 - Características dos concretos produzidos.....	111
Tabela 15 – Equações do diagrama de dosagem.	118
Tabela 16 – Parâmetros obtidos a partir do diagrama de dosagem.	119
Tabela 17 – Resultados teóricos e experimentais de módulo de deformação estático.	135
Tabela 18 – Resumo dos resultados médios obtidos na etapa 5.	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre massa específica relativa e resistência relativa (GLANVILLE, COLLINS e MATTHEWS, 1947 apud NEVILLE, 1997).....	19
Figura 2 – Influência da temperatura sobre a perda de abatimento (DODSON, 1990 apud NEVILLE, 1997).....	23
Figura 3 – Perda de abatimento para diferentes teores de cinza volante em substituição ao cimento portland e para cinzas com diferentes percentuais de perda ao fogo (RAVINA e SOROKA, 2002).....	24
Figura 4 – Efeito da temperatura sobre o abatimento e a água necessária para alterá-lo (ACI 305R-91).....	29
Figura 5 – Diagrama de dosagem, método IPT/ EPUSP – modelo de comportamento (HELENE e TERZIAN, 1993).....	37
Figura 6 – Fluxograma representativo do estudo experimental do Método IPT / EPUSP.....	38
Figura 7 – Central vertical (LIEBHERR, 2005).....	44
Figura 8 – Central horizontal (LIEBHERR, 2005).....	44
Figura 9 – Controle manual.....	45
Figura 10 – Controle automático (LIEBHERR, 2005).....	45
Figura 11 – (a) Interior de um balão com seus helicóides (LIEBHERR, 2005); (b) caminhão-betoneira com suas diversas partes.....	47
Figura 12 – (a) Válvulas múltiplas; (b) válvulas múltiplas – barras corrediças (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).....	48
Figura 13 – Válvula tipo borboleta ou Flaper (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).....	49
Figura 14 – Válvula de fluxo direto – sistemas: (a) Rockschieber; (b) “S”; (c) tromba (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).....	49
Figura 15 – Via direta para o mastro distribuidor (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).....	49
Figura 16 – Ilustração esquemática dos redutores de água à base de lignossulfonato e gluconato (JOLICOEUR et al, 2003).....	63
Figura 17 - Estrutura floculada da pasta de cimento (a) e das partículas dispersas (b) (AÏTCIN et al, 1994).....	65
Figura 18 – Estrutura química dos polímeros: naftaleno (N), melamina (M) e poliacrilato (PA) (COLLEPARDI, M., 2003).....	69
Figura 19 – (a) Potencial zeta de pastas de cimento com polímero acrílico (PA) e polímero sulfonado (N) em função da sua dosagem; (b) Adsorção de PA e N na superfície do cimento em função da dosagem destes polímeros; (c) Influência dos polímeros PA e N na fluidez de argamassas de cimento com $a/c = 0,4$ (COLLEPARDI, M., 1998).....	71
Figura 20 – Representação esquemática de: (a) efeito de repulsão eletrostática; (b) polímero sulfonado (naftaleno - N) e seu efeito eletrostático na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).....	71
Figura 21 – Representação esquemática de: (a) efeito de repulsão estérica; (b) polímero acrílico (PA) e seu efeito estérico na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).....	72
Figura 22 – Perda de abatimento a 20°C em misturas sem e com superplastificante, para o mesmo abatimento inicial. Superplastificante: 0,4% de sólidos de naftaleno em relação à massa de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).....	74
Figura 23 – Perda de abatimento de concretos com superplastificantes de base naftaleno (N), melamina (M) e aril alquila (A), em várias temperaturas, medida 30 minutos depois da mistura (YAMAMOTO e KOBAYASHI, 1986).....	76

Figura 24 – Efeito do método de adição do superplastificante à base de naftaleno no abatimento inicial, para mesmo a/c. R = mistura de referência, sem aditivo (a/c=0,45); A = mistura com aditivo - adição atrasada (1 minuto após a mistura do cimento com a água); I = mistura com aditivo - adição imediata (COLLEPARDI, M., 1998).	77
Figura 25 – Retenção da trabalhabilidade com dosagens repetidas (CHAN, FENG e TSANG, 1996).	79
Figura 26 – Dosagens repetidas para manter o abatimento em 200 mm (HATTORI, 1979 apud RAMACHANDRAN et al, 1998).	79
Figura 27 – Fluxograma representativo do programa experimental.	85
Figura 28 – Prensa eletrônica utilizada na execução dos ensaios de ruptura à compressão.	93
Figura 29 – Esquema do aparato montado para aquecimento do ar (CALÇADA, 2004).	100
Figura 30 – Fotografias do aparato montado para resfriamento do ar.	101
Figura 31 – Caixa com os materiais utilizados e corpos-de-prova moldados.	101
Figura 32 – Aparato acoplado ao corpo-de-prova para ensaio de módulo de deformação.	105
Figura 33 – Abatimento dos concretos e aberturas inicial, com 15 golpes e com 30 golpes das argamassas em função do tempo e após a adição de aditivo SP.	113
Figura 34 – Relação entre abatimento de concreto e abertura de argamassa.	114
Figura 35 – Relação entre abatimento de concreto e abertura inicial de argamassa.	115
Figura 36 – Resistência à compressão aos 28 dias e teor de ar incorporado em função do tempo de mistura, f_{ck} e abatimento do concreto.	116
Figura 37 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de concretos e argamassas.	117
Figura 38 – Relações obtidas em cada quadrante a partir dos pontos experimentais para os abatimentos de: (a) (10 ± 2) cm e (b) (14 ± 2) cm.	118
Figura 39 – Diagrama de dosagem.	119
Figura 40 – Consistência em função do tempo para o traço F25S10 em diferentes temperaturas.	122
Figura 41 – Consistência em função do tempo para o traço F35S10 em diferentes temperaturas.	123
Figura 42 – Consistência em função do tempo para o traço F25S14 em diferentes temperaturas.	124
Figura 43 – Consistência em função do tempo para o traço F35S14 em diferentes temperaturas.	125
Figura 44 – Resistência à compressão das argamassas produzidas a diferentes temperaturas.	129
Figura 45 – Perda de abatimento dos concretos.	131
Figura 46 – Evolução da resistência à compressão.	133
Figura 47 – Resultados de teor de ar incorporado e taxa de exsudação.	136
Figura 48 – Resistência à compressão e a/c (fornecido pela central) dos caminhões avaliados.	141

RESUMO

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco que apresentam maiores dificuldades de controle, a principal é a perda de fluidez, potencializada no caso de concreto dosado em central. O principal problema quando o abatimento do concreto, no momento do lançamento, está aquém do solicitado é o procedimento usualmente adotado para sua correção, que é a adição indiscriminada de água, resultando no não-atendimento da resistência de projeto. Portanto, a melhor solução, nesse caso, é o emprego de aditivos, uma vez que estes materiais não prejudicam propriedades importantes do concreto, como resistência à compressão e durabilidade, se utilizados adequadamente. Diante disto, este trabalho teve por objetivo propor um método para otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central (CDC), visando reduzir a perda de trabalhabilidade, bem como recuperá-la no momento do lançamento do concreto, a um custo economicamente viável. Foram estudados, em laboratório, os aditivos plastificante, plastificante polifuncional, plastificante retardador e superplastificante e diferentes métodos de adição, primeiramente em argamassas e, depois de uma pré-seleção, em concretos. Foram variadas nas misturas a relação água/cimento, a consistência inicial e a temperatura ambiente. Ao final, um dos métodos propostos foi aplicado na central de concreto em estudo, analisando-se a viabilidade operacional e econômica de sua implantação definitiva. Chegou-se à conclusão que o estudo de dosagem para CDC deve levar em consideração a perda de trabalhabilidade. Também se verificou que o aditivo plastificante adicionado após 10 minutos do contato entre cimento e água aumenta a fluidez inicial e diminui a taxa de enrijecimento da mistura e que a adição de aditivo superplastificante é um excelente método para recuperar a trabalhabilidade em obra.

ABSTRACT

Among the properties of concrete in the fresh state that show more difficult to control, the main is the slump loss, which is more significant in the case of ready mixed concrete. The main problem when the concrete slump at the moment of placing is below the specified, is the procedure usually adopted to correct it, which is the addition of water over the specified, resulting in the no-attainment of the project strength. Therefore, the best solution, in this case, is the use of chemical admixtures, once these products don't damage important properties of concrete, such as compressive strength and durability, if properly used. According to this, this work aimed at proposing one method for optimization of mix proportioning study and batching processes of ready mixed concrete, intending to reduce the fluidity loss, as well as to recover it at the moment of concrete placing, with an economically viable cost. There were studied, in laboratory, the water-reducer, mid-range water-reducer, retarder water-reducer and high-range water-reducer admixtures and different methods of addition, first on mortars and, after one pre-selection, on concretes. There were varied in the mixtures the water to cement relation, the initial consistency and the ambient temperature. Finally, one of the proposed methods was applied in the studied concrete batch plant, analyzing the operational and economic viability of its definitive implementation. It was came to the conclusion that the mix proportioning study for ready mixed concrete must take the slump loss into account. Also was verified that the addition of water-reducer admixture after 10 minutes from the contact of cement and water increases the initial fluidity and decreases the stiffening rate and that the addition of high-range water-reducer admixture is an excellent way to recover the fluidity at the construction site.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Há alguns anos, percebe-se uma tendência mundial de empregar-se concreto dosado em central (CDC) para a execução de estruturas de edifícios, pavimentação de vias urbanas e rodovias, construção de barragens, pontes, túneis, entre outros. Diversos tipos de concretos podem ser executados em centrais, tais como: convencional, bombeado, de alto desempenho, projetado, auto-adensável, colorido e resfriado.

A utilização do CDC possibilita a racionalização do processo construtivo, maior produtividade no canteiro de obras, melhores condições para garantia da qualidade através de programas implantados nas centrais, além da redução de custos por metro cúbico de concreto lançado, entre outras vantagens.

Em razão disso, a utilização dos serviços de concretagem é cada vez maior, independente do crescimento vegetativo do próprio mercado. Nos Estados Unidos, por exemplo, há mais de 5.000 companhias responsáveis por mais de 10.000 centrais de dosagem de concreto, que respondem por cerca de 2/3 de todo o concreto consumido no país (GAYNOR, 1979 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No Brasil, esse índice ainda não é tão significativo: apenas 13% de todo o concreto consumido no país é dosado em central (ABESC, 2003). Todavia, existem claras perspectivas de expansão do mercado. Atualmente, o país atravessa uma fase de substituição dos processos elementares de preparo do concreto em obra pela utilização dos serviços especializados de concretagem, os quais representam um processo evolutivo da construção civil em todo mundo.

Nos últimos anos, principalmente em grandes ou importantes obras, tem havido uma gradual mudança na forma de especificar a resistência ou o desempenho do concreto. Por exemplo, em estruturas de edifícios, houve um leve aumento na resistência à compressão especificada, que há alguns anos não passava de 15 a 20 MPa e hoje já alcança níveis entre 25 e 45 MPa na maioria dos casos. Como consequência, as empresas prestadoras de serviços de concretagem passaram a ter responsabilidades muito maiores com a dosagem e o controle da qualidade do produto fornecido, visando atender, com segurança, as características especificadas pelo cliente, tanto no

estado fresco, quando são realizadas as operações de lançamento, adensamento e acabamento, quanto no estado endurecido, conferindo resistência mecânica e durabilidade à estrutura.

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco que apresentam maiores dificuldades de controle, a principal é a perda de abatimento, potencializada no caso do CDC em virtude do período de transporte do concreto em caminhões-betoneira, da central dosadora até a obra. Por este motivo, o transporte deve ser feito o mais rápido possível, bem como as operações de lançamento, adensamento e acabamento do concreto, visando minimizar os efeitos de enrijecimento que, nos casos críticos, podem até tornar impraticáveis estas operações.

Sabe-se que misturas de concreto normalmente apresentam uma perda de abatimento nos primeiros 30 minutos após a mistura do cimento com a água, momento no qual se inicia a hidratação. Entretanto, sob algumas condições específicas (por exemplo, temperatura ambiente elevada) essa perda pode ser fortemente acelerada.

O principal problema quando o abatimento do concreto no momento do lançamento não está de acordo com o solicitado é o procedimento adotado para sua correção. Na maioria das obras, é prática comum a adição de água e remistura até que o abatimento esteja adequado ao lançamento, ultrapassando, muitas vezes, a quantidade limite de água especificada no traço. Como resultado, tem-se uma resistência aquém da discriminada no projeto.

A execução de CDC deve atender às prescrições da NBR 7212:1984. Esta norma recomenda que ao ser adotado o procedimento de mistura parcial do concreto na central e complemento na obra (adição da água restante do traço na obra), "...deve-se estabelecer um sistema rigoroso de controle da quantidade de água adicionada na central e a ser complementada na obra, para evitar ultrapassar a quantidade prevista no traço". No entanto, a norma não propõe soluções alternativas para o caso de se adicionar toda a água do traço e ainda não ser atingida a consistência desejada. Apenas permite a adição de uma pequena quantidade de água, supostamente perdida por evaporação, sendo que o aumento do abatimento não deve ser maior do que 25 mm.

Uma solução que vem sendo adotada em diversas concreteiras é a dosagem de concretos com consumos de cimento além do necessário, de forma a compensar a perda de resistência decorrente da alteração da relação a/c como fruto da correção do abatimento com água.

Entretanto, essa solução está longe de ser a melhor por duas razões principais: em primeiro lugar, o significativo aumento no custo de produção, uma vez que o cimento é o insumo mais caro

dentre os materiais constituintes do concreto, e, em segundo, a dificuldade de controle da qualidade do produto final, pois a quantidade de água adicionada, muitas vezes, não é monitorada. Mesmo que esta seja conhecida, haverá sempre uma variabilidade natural na quantidade necessária à correção do abatimento, o que refletirá em maior desvio-padrão de produção, aumentando, conseqüentemente, a resistência de dosagem necessária para uma determinada resistência característica.

A melhor forma de amenizar uma acentuada taxa de perda de abatimento ou de recuperar o abatimento no canteiro de obras, é o uso de aditivos químicos. Este procedimento é recomendado por diversos pesquisadores (ACI 305R-91; AİTCIN, 2000b; AİTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; CHAN, FENG E TSANG, 1996; COLLEPARDI, M., 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984), principalmente em função destes produtos não alterarem significativamente propriedades importantes do concreto, como resistência à compressão e durabilidade, podendo até melhorá-las se utilizados corretamente. Dentre os aditivos normalmente empregados nestes casos, destacam-se os fluidificantes (plastificantes e superplastificantes) e os retardadores de pega.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em estudo realizado pelo Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à base de Cimento Portland – GTec, da UFSC, em parceria com uma central de concreto da Grande Florianópolis, percebeu-se que a perda de abatimento dos concretos produzidos nesta central, durante o período de transporte até a obra, era bastante acentuada (MARTINS et al, 2004).

Para agravar a situação, a correção da trabalhabilidade era feita por meio de adição de água, geralmente, sem atentar para a quantidade limite prevista no traço. Vale ressaltar que estas observações foram feitas durante o verão, quando o efeito de enrijecimento da mistura é bastante intensificado. A queda de resistência verificada devido à alteração da relação a/c para recuperar a trabalhabilidade perdida também foi significativa.

Em virtude dos resultados obtidos neste estudo piloto, sentiu-se a necessidade de se pesquisar soluções alternativas para corrigir o abatimento perdido entre a central de concreto e a obra, ou, até mesmo, reduzir a taxa de perda de abatimento neste período, sem prejudicar outras

propriedades importantes em construções de edifícios, como tempo de endurecimento (necessário para a desfôrma) e resistência à compressão do concreto.

Verificou-se, ainda, no mesmo estudo que, com o emprego de aditivo superplastificante no processo de ajuste da consistência do concreto, houve um acréscimo da resistência à compressão que possibilitou um corte no consumo de cimento de 6,7%. Além disso, constatou-se que o desvio-padrão de produção pode ser reduzido em função da menor variabilidade da quantidade de água total adicionada à mistura. Ao final, uma redução de 1 MPa no desvio-padrão viabilizaria um corte no consumo de cimento de 10,5%.

Como se sabe, o cimento é o insumo mais caro dentre os materiais constituintes do concreto. Portanto, qualquer redução no consumo deste material representa uma economia importante para as centrais de concreto, principalmente nos dias atuais, quando a margem de lucro praticada pelas empresas é muito limitada. Soma-se a isso o fato de se ter maior garantia da qualidade em virtude do controle mais rigoroso da relação a/c do concreto.

Por fim, outro forte incentivo para realização deste estudo foi a necessidade de minimização do impacto ambiental provocado pelo descarte de um caminhão de concreto (7 m³ de material, em média) quando o abatimento na chegada à obra está fora do intervalo especificado pelo cliente. Ao se proceder à correção da consistência com aditivo superplastificante, a possibilidade de rejeição do concreto é eliminada, uma vez que sua adição não prejudica a resistência à compressão do material, mesmo com abatimento muito acima do especificado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Frente à situação apresentada, este trabalho tem como objetivo propor um método para otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do CDC, através de um estudo de caso, visando reduzir a perda de trabalhabilidade que ocorre no período de transporte entre a central e a obra, bem como recuperá-la no momento do lançamento do concreto, com a utilização de aditivos, a um custo economicamente viável.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Adaptar um método de dosagem do concreto, de forma que se leve em consideração as peculiaridades da produção em central;
- 2) propor um método para minimizar a perda de abatimento do CDC, bem como para corrigi-lo quando necessário, em função da relação a/c, consistência inicial e temperatura ambiente;
- 3) verificar a adequação do método proposto em uma central dosadora de concreto e verificar o seu desempenho na prática; e, por fim,
- 4) fazer uma análise da viabilidade operacional e econômica de implantação definitiva do método proposto na central dosadora de concreto em estudo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está organizada em capítulos, como segue:

O capítulo 1 faz uma introdução ao tema da pesquisa, apresentando um quadro geral do CDC no mundo e no Brasil, bem como a motivação para o trabalho por meio da justificativa e dos objetivos geral e específicos a serem alcançados.

O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica sobre o concreto de cimento portland, incluindo sua evolução nos últimos anos, definição, materiais constituintes, propriedades dos estados fresco e endurecido, estudo de dosagem e o CDC.

O capítulo 3 discorre sobre os aditivos, com enfoque para o plastificante, o superplastificante e o retardador de pega, apresentando um panorama do que se encontra na bibliografia relacionada ao assunto.

O capítulo 4 descreve detalhadamente o programa experimental, executado em cinco etapas. São apresentados os materiais e os métodos utilizados, bem como as variáveis analisadas.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos em cada etapa e uma análise dos dados de forma a se apontar o(s) melhor(es) método(s) para prolongar o período trabalhável do concreto, bem como para recuperar sua fluidez após um intervalo de tempo.

O capítulo 6 traz as considerações finais, apontando as principais conclusões tiradas na pesquisa. Também são feitas sugestões quanto a trabalhos futuros relacionados ao tema.

2 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com Aïtcin (2000), a produção mundial total de cimento em 1900 era de 10 milhões de toneladas, enquanto que em 1998 era de 1,6 bilhões de toneladas. Supondo um consumo médio de 250 kg de cimento por m³ de concreto, em 1900 apenas 40 milhões de m³ de concreto foram produzidos, enquanto que em 1998 esse volume passou para 6,4 bilhões de m³. Isso representa pouco mais de 1 m³ de concreto por pessoa por ano. Malhotra e Mehta (2002) estimam que a demanda total de cimento irá ultrapassar 2 bilhões de toneladas em 2010.

Segundo Brunauer e Copeland (1964 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994), o homem não consome nenhum outro material em tão grande quantidade, a não ser a água. Os autores relatam ainda que, em 1963, o consumo de concreto nos Estados Unidos foi de 5 vezes o consumo de aço, podendo esta proporção chegar a 10 vezes em alguns países.

Os edifícios e toda a infra-estrutura necessários às áreas industriais e urbanas requerem obviamente grandes quantidades de materiais de construção. Na maioria das aplicações estruturais, o concreto é o material escolhido devido principalmente ao seu baixo custo, grande disponibilidade, versatilidade e propriedades adequadas à engenharia (MALHOTRA e MEHTA, 2002).

Durante os últimos 30 anos, a ciência do concreto se desenvolveu acentuadamente. O concreto é, na verdade, fruto de uma tecnologia simples e uma ciência complexa que já começou a ser desvendada, mas ainda não em todos os seus detalhes. Atualmente, estudos em concreto são feitos utilizando técnicas sofisticadas de observação e medidas, de forma que o entendimento e o controle da tecnologia do concreto continuam se aperfeiçoando (AÏTCIN, 2000).

Como fruto das inúmeras pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nessa área e, apesar do desempenho satisfatório do concreto convencional como elemento estrutural, na maioria dos países desenvolvidos já estão sendo amplamente utilizados o concreto de alta resistência (CAR) e o concreto de alto desempenho (CAD). Este último, além de maior resistência à compressão

axial, pode apresentar, de acordo com a finalidade de aplicação, melhorias em outras características, tais como: módulo de deformação, resistência ao impacto e permeabilidade.

A tendência mundial é de que as estruturas se tornem cada vez maiores e mais complexas e os materiais terão que satisfazer as especificações de desempenho ainda mais rigorosas que as atuais. Inúmeras pesquisas estão em andamento para definir e desenvolver misturas de CAD que apresentem, além de elevada trabalhabilidade, alta estabilidade dimensional, alta resistência e alta durabilidade em serviço (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Esse grande avanço no campo do concreto não se deve apenas às melhorias no processo de fabricação do cimento ou às adições minerais que vêm sendo utilizadas como parte do material aglomerante, mas sim, e principalmente, aos avanços alcançados pela indústria dos aditivos químicos.

Entretanto, esse quadro é o atualmente encontrado apenas em países desenvolvidos e que dispõem de tecnologia mais avançada. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, o concreto convencional, isto é, aquele com resistências entre 20 e 50 MPa, continua, e provavelmente continuará por mais alguns anos, sendo utilizado em obras correntes.

Diante disso, existe ainda uma grande necessidade do meio técnico de se preocupar com o concreto usual e buscar o aperfeiçoamento das técnicas de preparo e aplicação deste material.

2.2 DEFINIÇÃO

O concreto de cimento portland é, por definição, um material composto de duas fases distintas: a pasta de cimento, constituída de cimento portland e água, e os agregados. O cimento, ao entrar em contato com a água, desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação, ou seja, reação química entre os minerais do cimento e a água e, após algumas horas, a mistura se solidifica e endurece tornando-se uma massa resistente.

Entretanto, o concreto moderno é mais do que uma simples mistura de cimento, água e agregados. Cada vez mais são utilizados componentes minerais, que conferem características específicas aos concretos, e aditivos químicos, que têm efeitos ainda mais específicos (AÏTCIN, 2000). Esses materiais podem trazer uma série de benefícios ao concreto se corretamente

utilizados como, por exemplo, alteração da taxa de hidratação do cimento e melhoria da trabalhabilidade do concreto fresco.

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

2.3.1 Cimento Portland

O cimento é um material finamente pulverizado que é chamado hidráulico quando os produtos de hidratação são estáveis em meio aquoso. O cimento hidráulico normalmente utilizado para fazer concreto é o cimento portland, produzido pela moagem do clínquer, constituído basicamente de silicatos de cálcio hidráulicos, normalmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio em adição, com a finalidade de controlar as reações iniciais de pega e endurecimento. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro obtidos a partir da sinterização de uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Composição química

No interior do forno de produção do cimento, a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o óxido de cálcio presentes nas matérias-primas, reagem dando origem ao clínquer, cujos compostos principais são os seguintes:

- 1) silicato tricálcico: $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S);
- 2) silicato dicálcico: $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S);
- 3) aluminato tricálcico: $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A);
- 4) ferro aluminato tetracálcico: $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Esses compostos se formam no interior do forno quando a temperatura se eleva a ponto de transformar a "mistura crua" num líquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas, como ocorre com os três primeiros produtos citados acima, a um material intersticial amorfo, o C_4AF , e a outros óxidos, compostos alcalinos e sulfatos. Todos esses compostos têm a propriedade de reagir em presença de água, por hidrólise, dando origem então a compostos hidratados (AÏTCIN, 2000b).

A seguir serão descritas brevemente as características dos principais compostos do cimento portland:

- 1) C_3S - é o principal composto do cimento portland. Reage em poucas horas em contato com a água, liberando grande quantidade de calor na hidratação. Os cimentos de alta resistência inicial, em geral, são ricos em C_3S ;
- 2) C_2S - tem pega lenta e desenvolve pouca resistência até os 28 dias, que então aumenta rapidamente chegando a equivaler com a do C_3S no primeiro ano. Este composto desenvolve baixo calor de hidratação;
- 3) C_3A - tem pega instantânea desenvolvendo altíssimo calor de hidratação. Tem baixa resistência e não resiste à ação de águas sulfatadas. Sua quantidade, normalmente, é pequena devido aos inconvenientes citados. No entanto, a presença da alumina é importante na fase de produção do cimento, pois ela age como fundente, facilitando, desta forma, a formação do clínquer a temperaturas mais baixas;
- 4) C_4AF - tem pega rápida, porém não instantânea como o C_3A . Tem baixa resistência, mas possui a vantagem do Fe_2O_3 trabalhar como fundente e também fixar parte da alumina melhorando o desempenho do cimento ao ataque de águas sulfatadas como, por exemplo, a água do mar.

Em geral, pode-se dizer que as reações de hidratação dos aluminatos são responsáveis pelo enrijecimento (perda de consistência) e pela pega (solidificação) da pasta de cimento, enquanto que os silicatos, que compõem aproximadamente 75 % do cimento comum, são fundamentais no processo de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Finura

Além da composição, a finura do cimento também influencia grandemente a sua reação com a água. Uma vez que a hidratação se inicia na superfície das partículas, é a área total da superfície do cimento que representa o material disponível para hidratação. Conseqüentemente, quanto maior a finura do cimento maior a velocidade de hidratação e mais rápida a evolução da resistência, sem, no entanto, alterar a resistência a idades mais avançadas (NEVILLE, 1997).

Hidratação do cimento

As reações químicas que envolvem a hidratação do cimento portland são bastante complexas e, apesar da vasta literatura que existe sobre o assunto, seus pormenores ainda não são totalmente compreendidos.

A seguir se tem uma descrição bastante simplificada do mecanismo de hidratação do cimento portland dada por Vernet (1995 apud AÏTCIN, 2000b), esquematizada nos seus cinco estágios iniciais:

1) Estágio 1 – período da mistura:

Diferentes íons, liberados por diversas fases, entram em solução. Essa dissolução é muito rápida e de natureza exotérmica. A superfície dos grãos de cimento é parcialmente coberta com silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado a partir dos íons originados da fase silicato do clínquer, e, em quantidade maior, com etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), formado pela combinação de íons da fase aluminato e das diferentes formas de sulfato de cálcio presentes no cimento.

2) Estágio 2 – período dormente:

Redução da velocidade de dissolução da fase do clínquer devido ao aumento do pH e do teor de íons Ca^{++} na água de mistura. Grande desaceleração do fluxo térmico, mas sem parar. Forma-se pouca quantidade de C-S-H e, caso exista equilíbrio entre os íons de alumínio e sulfato, forma-se também, em pouca quantidade, etringita e aluminato de cálcio hidratado. A fase aquosa torna-se saturada em Ca^{++} , mas não existe precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, provavelmente pela sua baixa velocidade de formação. Alguns grãos de cimento se floculam nesse período.

3) Estágio 3 – início da pega:

A precipitação do óxido de cálcio, devido à falta de silicato na fase aquosa, ativa a reação de hidratação. O súbito consumo de íons Ca^{++} e OH^- acelera a dissolução de todos os componentes do cimento portland. O fluxo térmico cresce vagarosamente no princípio (pois a precipitação do CH é endotérmica) e acelera nos estágios finais. Normalmente, o início da pega se dá nesse período, a menos que ocorra algum endurecimento da pasta devido ao desenvolvimento de agulhas de etringita e de algum C-S-H. As fases silicatos e aluminatos hidratados começam a criar ligações interpartículas, levando ao endurecimento progressivo da pasta.

4) Estágio 4 – endurecimento:

Na maioria dos cimentos portland, a quantidade de sulfato de cálcio presente não é suficiente para reagir com a fase aluminato, de tal maneira que, durante a pega, íons SO_4^- são totalmente consumidos na formação da etringita. Isso ocorre normalmente entre 9 e 15 horas após o início da mistura, quando a etringita torna-se uma fonte de sulfato para formar o monossulfoaluminato com a fase aluminato remanescente. Essa reação gera calor e acelera a hidratação das fases silicato.

Nota: nesses primeiros estágios, os produtos de hidratação formados são chamados de produtos externos, pois crescem fora dos grãos de cimento, na fase intersticial aquosa.

5) Estágio 5 – redução da velocidade:

Nesse estágio, os grãos de cimento estão cobertos por uma camada de hidratos, que vai se tornando cada vez mais espessa, dificultando a chegada das moléculas de água às partes não hidratadas das partículas de cimento. A hidratação vai então se reduzindo, pois é controlada predominantemente pela difusão das moléculas de água através das camadas de hidratos, e a pasta de cimento hidratada se parece com uma compacta pasta “amorfa”, conhecida como produto interno.

A hidratação do cimento portland pára quando não há mais fase anidra (concreto de alta relação água/materiais cimentícios ($a/(c+s)$) bem curado) ou quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas (sistemas muito densos e defloculados) ou, ainda, quando não existe mais água disponível (relação $a/(c+s)$ muito baixa).

Tipos de cimento

Existem no Brasil vários tipos de cimento portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Quase a totalidade dos cimentos comercialmente disponíveis possui um ou mais tipos de adição. São denominados adições, os materiais que, misturados aos cimentos ou concretos em quantidades apreciáveis (maior do que 5% em massa), alteram as propriedades que o aglomerante confere ao concreto. Este procedimento se explica principalmente pela redução de custo do cimento e por questões ambientais, pois a maioria destas adições é sub-produto industrial. No item 2.3.4 as adições minerais serão apresentadas com maiores detalhes.

Todos os tipos de cimento nacionais são regidos por normas da ABNT e os principais estão designados na Tabela 1. Além destes tipos, existem no mercado nacional o cimento portland branco, o cimento portland de baixo calor de hidratação e o cimento para poços petrolíferos.

Tabela 1 – Tipos de cimento portland nacionais e respectivas normas.

Denominação	Sigla	Classe	Norma ABNT
Cimento Portland Comum	CP I	25, 32, 40	NBR 5732:1991
Cimento Portland Comum com Adição	CP I-S	25, 32, 40	
Cimento Portland Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	NBR 11578:1991
Cimento Portland Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	
Cimento Portland Composto com Filler	CP II-F	25, 32, 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	NBR 5735:1991
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	25, 32	NBR 5736:1991
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI		NBR 5733:1991
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	CP I RS	25, 32, 40	NBR 5737:1992
	CP I-S RS		
	CP II-E RS		
	CP II-Z RS		
	CP II-F RS		
	CP III RS		
	CP IV RS		
CP V-ARI RS			

2.3.2 Agregados

Até pouco tempo atrás, o agregado era tido como um material granular inerte, disperso na pasta de cimento, utilizado principalmente por razões econômicas. Porém, esse conceito vem sendo reformulado e hoje se pode considerar o agregado como um material de construção ligado em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento. Na verdade, não se pode considerar o agregado um material inerte, pois suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, também químicas têm influência no desempenho do concreto (NEVILLE, 1997).

São agregados, as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas (areias). São classificados como naturais, aqueles que já são encontrados na natureza sob a forma de agregados (ex: areias e seixos) ou artificiais os que necessitam de um trabalho de afeiçoamento pela ação do homem a fim de chegar à situação de uso como agregado (ex: britas e pós-de-pedra). Contudo, existem autores que classificam todos os tipos anteriormente citados como naturais e denominam

artificiais aqueles obtidos a partir de materiais sintéticos tais como produtos ou rejeitos industriais (ex: argila expandida e escória moída) (PRUDÊNCIO JR., 2004).

Quanto à dimensão das partículas, classifica-se o agregado como miúdo quando contém partículas que ficam retidas na peneira ABNT 75 μm (peneira n° 200) e passam na peneira ABNT 4,8 mm e como gráudo quando as partículas ficam retidas na peneira ABNT 4,8 mm e passam na peneira ABNT 152 mm (NBR 7211:1983).

Dentre as propriedades dos agregados, pode-se destacar:

- 1) Composição granulométrica e dimensão máxima;
- 2) massa específica aparente;
- 3) massa unitária;
- 4) absorção e umidade superficial;
- 5) presença de substâncias deletérias; e,
- 6) forma e textura das partículas.

2.3.3 Água

Para Neville (1997), a água desempenha um papel de fundamental importância na resistência do concreto, não apenas em função de sua quantidade, mas também devido a sua qualidade. Impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchamento da sua superfície ou, ainda, resultar em corrosão da armadura.

De acordo com Recena (2002), a água de mistura não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substâncias inorgânicas em teores excessivos. Em muitas especificações de obras, a qualidade da água é coberta por uma cláusula dizendo que a água deve ser potável, uma vez que esta raramente contém altos teores de sólidos inorgânicos dissolvidos. Por outro lado, algumas águas não adequadas para beber podem ser satisfatoriamente usadas para o preparo de concreto mesmo apresentando cor escura ou cheiro desagradável, pois não significam, necessariamente, que estão presentes substâncias deletérias.

2.3.4 Adições Minerais

Malhotra (2002) relata que a fabricação de cimento portland é um processo que consome uma grande quantidade de energia, algo em torno de 4 GJ por tonelada do produto final, ficando atrás apenas do alumínio e do aço. Além disso, a produção de cada tonelada de cimento portland libera aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono, o principal contribuinte para o aquecimento global. O autor comenta, ainda, que muitos cientistas acreditam que o aquecimento global seja atualmente o principal problema ambiental gerado pelo homem.

Por conseguinte, esforços consideráveis têm sido feitos com o intuito de encontrar substitutos parciais do cimento no concreto, os chamados materiais cimentícios suplementares. Os materiais que proporcionam economia potencial de energia são os sub-produtos industriais uma vez que são facilmente disponíveis em depósitos naturais, requerem pouco ou nenhum processamento e alguns possuem propriedades cimentantes.

Outro forte incentivo para a busca de materiais que substituam o cimento, é o elevado custo deste material quando comparado aos demais constituintes do concreto. Essa é a principal preocupação da indústria mundial do concreto pré-misturado, pois em alguns locais, como a América do Norte, o preço da tonelada do cimento pode chegar a 100 dólares (MALHOTRA, 1993).

Malhotra e Mehta (1996), salientam que os benefícios a serem atingidos com o uso de sub-produtos industriais como materiais cimentícios suplementares são enormes. Do ponto de vista técnico, tomando-se como exemplo a sílica ativa, tem-se o aumento da resistência final, da impermeabilidade e da durabilidade e um material mais resistente à tração e à fissuração térmica. Benefícios expressivos também podem ser obtidos dos pontos de vista econômico, pois os materiais cimentícios suplementares irão substituir o cimento, cujo custo é o maior dentre os componentes do concreto, e ecológico, pois, além de seu aproveitamento no concreto ser um veículo de descarte dos sub-produtos industriais, ainda contribuirá para a diminuição da poluição causada pela fabricação do cimento.

Cincotto e Kaupatez (1988 apud WEBER, 2001) comentam que a construção civil é o ramo da atividade tecnológica com melhores condições de absorver resíduos sólidos. O consumo destes resíduos em combinação com o cimento portland e seus derivados é uma contribuição que a engenharia civil oferece à sociedade, não só pela preservação do meio-ambiente, mas também por propiciar construções mais duráveis e com menor custo econômico e social.

Por outro lado, Malhotra (1993) destaca que existem alguns fatores que têm limitado o uso destes materiais na indústria do concreto pré-misturado, como a falta de incentivos econômicos, especificações inadequadas e a variação na qualidade destes materiais. Além disso, a introdução de mais um ingrediente na produção requer capacidade adicional de silo para estocagem e ainda a implantação de medidas de controle da qualidade. Nos países desenvolvidos, esse quadro já vem mudando e, em muitos deles, já existem especificações para estas adições minerais.

Nos países em desenvolvimento, a situação é diferente e a solução encontrada foi a fabricação de cimentos compostos (cimento pozolânico, por exemplo). Assim, a cimenteira se torna responsável pela execução do controle da qualidade destas adições. Na maioria dos países, a produção de cimentos compostos já é bastante expressiva. No Brasil, praticamente todos os cimentos comercialmente disponíveis possuem um ou mais tipos de adições.

Conforme Aïtcin (2000b), a principal característica da maioria dos materiais cimentícios suplementares é que, apesar de não terem poder aglomerante, podem sofrer uma reação pozolânica, isto é, eles contêm alguma forma de sílica vítrea reativa que, na presença de água e à temperatura ambiente, pode combinar com a cal e formar C-S-H do mesmo tipo formado durante a hidratação do cimento, exceto pela menor relação CaO/SiO_2 , portanto menos básicos e mais estáveis aos meios agressivos.

A relevância dessa reação pozolânica pode ser justificada pela grande quantidade de cal liberada durante a reação de hidratação do cimento (em torno de 30% da massa de cimento anidro), sendo que este composto, além de praticamente não conferir resistência ao concreto, ainda pode ser carregado pela água resultando em problemas de durabilidade devido à maior porosidade da matriz da pasta de cimento (AÏTCIN, 2000b).

Os principais tipos de adições utilizadas nacionalmente são:

1) Sílica ativa:

A sílica ativa é o sub-produto de fornos de arco e de indução das indústrias de ferro-silício ou silício metálico. A redução de quartzo à silício em temperaturas de até 2.000°C produz vapor de SiO , que oxida e condensa, em zonas de baixa temperatura, gerando partículas esféricas minúsculas constituídas de sílica amorfa (MEHTA e MONTEIRO, 1994);

2) Cinza da casca de arroz:

A casca de arroz é a carapaça que recobre os grãos, separada durante o beneficiamento do cereal. Como é volumosa, esta casca constitui um problema de acúmulo para as centrais beneficiadoras. Por apresentar um elevado poder calorífico, este sub-produto é um grande atrativo para substituição do carvão na indústria energética. Como resultado da combustão da casca de arroz se tem 20% deste material em forma de uma cinza com alto teor de sílica (SANTOS, 1997; DAFICO, 2001; WEBER, 2001);

3) Escória de alto-forno:

A escória é o sub-produto da manufatura do ferro-guza num alto-forno. Se a escória é resfriada rapidamente com água ou com uma combinação água-ar, ao sair do alto-forno, ela solidifica numa forma vítrea e pode, então, desenvolver propriedades cimentícias, se adequadamente moída e ativada. O produto resfriado bruscamente é chamado escória granulada devido à formação de partículas de dimensão de areia (AÏTCIN, 2000b). As escórias básicas praticamente não exercem atividade pozolânica. Por si só, não apresentam reatividade significativa, isto é, reagem com água formando compostos hidratados similares aos da hidratação do cimento portland (C-S-H), mas numa velocidade muito lenta. Essas reações podem ser aceleradas em um ambiente fortemente alcalino e, por este motivo, na presença de cimento portland, reagem com água devido ao alto pH da solução dos poros do concreto em função da hidratação deste material;

4) Fílers:

O fíler é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento portland, mas que, devido às suas características físicas e um efeito lubrificante, promove benefícios às propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade e exsudação (ABCP, 2002). Usualmente, os fílers são inertes, entretanto, podem ativar a hidratação do cimento portland atuando como pontos de nucleação (NEVILLE, 1997);

Maiores detalhes sobre as adições minerais citadas acima podem ser encontrados na bibliografia referente ao assunto (MALHOTRA, 1993; MALHOTRA e MEHTA, 1996; SANTOS, 1997; GAVA, 1999; DAFICO, 2001; WEBER, 2001; AÏTCIN, 2000b). Apenas a cinza volante será apresentada a seguir de forma mais aprofundada em virtude do cimento utilizado na presente pesquisa ser pozolânico e conter este tipo de adição.

5) Cinza volante:

Cinzas volantes são pequenas partículas coletadas pelos sistemas anti-pó das usinas de energia que queimam carvão. As partículas de cinza volante são geralmente esféricas e com uma finura da mesma ordem de grandeza dos cimentos portland (250 a $600 \text{ m}^2/\text{kg}$) com diâmetros entre 1 e $100 \text{ }\mu\text{m}$, dispensando a necessidade de maior moagem para poder reagir com o Ca(OH)_2 (NEVILLE, 1997).

Do ponto de vista químico, devido às diferenças significativas de composição mineralógica, a ASTM C 618-94a divide as cinzas volantes em duas categorias que diferem entre si principalmente quanto ao teor de cálcio. A cinza volante de baixo teor de cálcio é produzida pela queima de antracito ou de carvão betuminoso e contém menos de 10% de CaO total. Já a cinza volante de alto teor de cálcio é usualmente produzida em usinas de energia queimando lignito ou carvão sub-betuminoso extraído e contém normalmente entre 15 e 30% de CaO total (MEHTA e MONTEIRO, 1994; AİTCIN, 2000b).

Neville (1997) ressalta que a cinza volante pode alterar a cor do concreto tornando-o mais escuro pela presença do carvão, podendo ser um fator limitante à aplicação do concreto produzido com este material.

Malhotra (1993) cita os principais efeitos que a cinza volante confere às propriedades do concreto:

- 1) Melhora da trabalhabilidade do concreto e redução da demanda de água em quase todos os casos;
- 2) redução do calor de hidratação e, conseqüentemente, do aumento de temperatura;
- 3) cinzas volantes com baixo teor de cálcio, quando adicionadas ao concreto em substituição parcial ao cimento, apresentam incremento de resistência mais lento nas idades menores; já as cinzas com alto teor de cálcio geralmente não influenciam a resistência nas diversas idades; e,
- 4) melhora da resistência frente ao ataque de sulfatos, cloretos e água do mar devido à redução do diâmetro dos poros maiores do concreto.

2.3.5 Aditivos

Uma revisão sobre alguns dos aditivos químicos usualmente utilizados em concretos convencionais será apresentada no Capítulo 3 deste trabalho.

2.4 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o período no qual o concreto se encontra nas primeiras idades não é claramente definido em termos quantitativos. Porém, pode-se considerar que um concreto está nas primeiras idades até 1 ou 2 dias do momento de mistura, o que inclui um período de consistência plástica (primeiras horas), ocorrendo a pega do concreto ao final, e o restante do tempo, onde a mistura já endurecida vai ganhando resistência até que as fôrmas possam ser removidas.

O período em que a mistura apresenta consistência plástica é definido como estado fresco do concreto. Existem duas razões principais que revelam a importância de se controlar as propriedades do concreto neste estado. Uma delas é que o concreto deve ser facilmente lançado e a outra é que, quando as propriedades no estado fresco estão sob controle, provavelmente no estado endurecido se terá um material com as propriedades também de acordo com o desejado (AÏTCIN, 2000b).

Esse período é extremamente curto se comparado à expectativa de vida útil de uma estrutura de concreto, mas o comportamento do material no estado fresco exerce efeitos significativos no seu desempenho a longo prazo e deve, por este motivo, ser controlado.

2.4.1 Trabalhabilidade

A ASTM C 125-97 define trabalhabilidade como “a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém-misturado com uma perda mínima de homogeneidade”. Já a definição do ACI, apresentada no ACI 116R-90, é “a propriedade do concreto ou da argamassa recém-misturados que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual podem ser misturados, lançados, adensados e acabados”.

De forma simplificada, pode-se dizer que um concreto é trabalhável quando possui as características de fluidez e estabilidade que os meios de transporte, acabamento e adensamento disponíveis irão exigir. Essa propriedade é composta de no mínimo dois componentes principais: fluidez, que se refere à mobilidade da mistura, e coesão, que se refere à resistência à exsudação e à segregação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Um termo bastante relacionado à fluidez do concreto é consistência, definida pelo ACI 116R-90 como “mobilidade relativa ou capacidade de fluir do concreto ou argamassa”. Este é um dos principais fatores que influenciam a trabalhabilidade, mas não deve ser confundido com ela. A consistência é função da quantidade de água e/ou aditivo adicionada ao concreto e indica quão seco ou molhado está o material.

A trabalhabilidade almejada deve ser alcançada sem abalar a homogeneidade da mistura, ou seja, esta deve ser capaz de reter a água (o oposto de exsudação) e o agregado graúdo (o oposto de segregação) uniformemente distribuído na massa de concreto fresco. Essas características são englobadas pela propriedade denominada coesão, sendo que esta é função da quantidade de finos da mistura bem como da granulometria dos agregados graúdo e miúdo e da proporção relativa entre eles (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A trabalhabilidade do concreto é uma propriedade que se refere ao seu comportamento no estado fresco. Entretanto, sua influência não se restringe apenas a esse período de vida do material, pois dela vai depender a quantidade de energia necessária para adensar o material até o máximo de compactidade, o que, por sua vez, afetará a resistência final.

Para melhor ilustrar esse efeito, Neville (1997) cita o estudo de Glanville, Collins e Matthews (1947), que relaciona o grau de adensamento da mistura com a resistência resultante. A primeira é representada pela massa específica relativa, isto é, a relação entre a massa específica real de um concreto e a massa específica desse mesmo concreto plenamente adensado. Na mesma linha de raciocínio, resistência relativa representa a relação entre a resistência de um concreto parcialmente adensado e um concreto plenamente adensado. A Figura 1 mostra a relação obtida de onde se observa que a presença de vazios reduz em grau muito maior a resistência: apenas 2% de vazios podem significar 10% a menos de resistência, enquanto que 5% de vazios pode significar uma perda de até 30% de resistência.

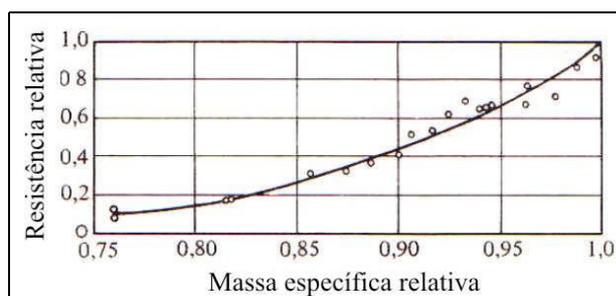


Figura 1 – Relação entre massa específica relativa e resistência relativa (GLANVILLE, COLLINS e MATTHEWS, 1947 apud NEVILLE, 1997).

Os vazios ou os grandes poros do concreto são constituídos por bolhas de ar aprisionado ou por espaços deixados pelo excesso de água após a evaporação. Em alguns casos, bolhas de ar podem ficar aprisionadas sob partículas maiores de agregado ou sob a armadura. Independente da causa do ar aprisionado é importante manter sua quantidade o mais baixa possível para se evitar qualquer perda de resistência, o que pode ser conseguido com o correto adensamento da mistura.

Infelizmente, não existe um método que determine diretamente a trabalhabilidade. A solução que vêm sendo adotada é a de correlacioná-la com alguma grandeza física fácil de ser avaliada. Para isso, o ensaio universalmente utilizado é o de abatimento do tronco de cone, para medição da fluidez (NBR NM 67:1998).

Esse ensaio não é o ideal para medição da trabalhabilidade uma vez que não mede a facilidade de adensamento do concreto e, como ocorre sob a ação do peso próprio do material ensaiado, não reflete o comportamento em condições dinâmicas como vibração, acabamento e bombeamento. Day (1995) sugere que se utilize este ensaio para limitar o abatimento do concreto em adição a uma especificação mais precisa do material que se deseja.

Shilstone (1988) alerta para os riscos de se tomar o abatimento do concreto como único indicador da quantidade total de água da mistura e, conseqüentemente, da resistência à compressão. O autor apresenta dados de coeficientes de correlação entre abatimento e resistência aos 28 dias correspondentes a três diferentes empreendimentos nos Estados Unidos: 0,29; 0,27 e 0,03. Estes resultados demonstram a pequena correlação existente entre abatimento e resistência à compressão do concreto. Outros fatores deveriam ser considerados em combinação com o abatimento para avaliação da resistência prevista: ar incorporado, temperatura de mistura e tempo decorrido entre a adição de água e o lançamento.

Apesar destas limitações, o ensaio de abatimento consiste em um método simples e de baixo custo para controlar a uniformidade da produção de concretos de diferentes betonadas e, por este motivo, continua sendo amplamente adotado (DAY, 1995). Valores muito destoantes do esperado podem indicar alterações no traço da mistura, aumento inesperado da umidade dos agregados ou variações na granulometria dos mesmos, permitindo assim ao operador da central de concreto verificar o que ocorreu e proceder à correção (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Pelo motivo exposto, serão discutidos a seguir os fatores que afetam a consistência e a coesão, ao invés da trabalhabilidade diretamente. Conforme Aïtcin (2000b), existem diversos fatores que

afetam a consistência do concreto. No entanto, do ponto de vista reológico, a consistência depende essencialmente dos fatores relacionados ao esqueleto dos agregados e do comportamento reológico da própria pasta de cimento.

Os principais fatores relacionados ao esqueleto dos agregados são a quantidade total de agregado do traço, as proporções relativas de agregado graúdo e miúdo, a respectiva granulometria e a forma das partículas. Por exemplo, Mehta e Monteiro (1994) comentam que, ao se utilizar areia artificial ao invés de natural, para se obter a mesma consistência e coesão similar, serão necessários de 2 a 3% a mais de areia por volume absoluto e de 5,9 a 8,9 kg a mais de água por m³ de concreto.

O comportamento reológico da pasta de cimento é essencialmente relacionado com a relação $a/(c+s)$. Quanto mais alta for essa relação, mais diluídas em água estarão as partículas finas, de modo que a água desempenha fisicamente o papel principal na reologia da pasta de cimento em relações $a/(c+s)$ altas, isto é, maiores do que 0,50 (AÍTCIN, 2000b).

Em geral, para um dado consumo de água, ao se diminuir consideravelmente o consumo de cimento obtém-se uma mistura áspera e com pequeno abatimento. Já uma adição excessiva de cimento ou quando este é muito fino, a mistura apresenta boa coesão, mas torna-se muito viscosa.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o teor de ar incorporado, quando se utiliza aditivo com esta finalidade, também afeta significativamente o abatimento do concreto, pois aumenta o volume de pasta e a fluidez para uma dada quantidade de água. Aumenta também a coesão da mistura pela redução da segregação e da exsudação.

Usualmente, se utiliza aditivo plastificante em concretos convencionais, o que resulta em aumento do abatimento para uma certa quantidade de água, ou em uma diminuição da quantidade de água de mistura entre 8 e 10% para se obter um determinado abatimento, com a dosagem média normalmente adotada de 1 l/m³ de concreto.

Em muitos casos, já estão sendo utilizados aditivos superplastificantes em concretos convencionais, e alguns fabricantes já disponibilizam uma regra prática relacionando o aumento do abatimento, em milímetros, para o emprego de um determinado volume de aditivo por metro cúbico de concreto.

2.4.2 Perda de Abatimento

A perda de abatimento do concreto pode ser definida como a perda de fluidez com o passar do tempo. Essa propriedade do concreto é particularmente importante no caso de CDC, visto que o proporcionamento e o início da mistura dos materiais ocorre na central, enquanto que o lançamento e o adensamento somente serão feitos alguns minutos ou horas depois, quando o caminhão-betoneira chegar ao canteiro de obras.

Segundo Ravina e Soroka (2002), esta perda de abatimento é principalmente atribuída à hidratação do cimento, uma vez que a formação dos produtos de hidratação consome água da mistura. Isto é devido, por um lado, às reações de hidratação e, por outro, à adsorção física da água na superfície dos produtos hidratados. Além disso, a evaporação de parte da água de mistura e uma possível absorção pelos agregados podem contribuir para esta perda. Concretagens realizadas sob temperaturas elevadas, tanto do concreto, quanto do ambiente, podem potencializar estes efeitos (ACI 305R-91).

Mehta e Monteiro (1994) salientam que, sob condições normais, a perda de abatimento é insignificante durante a primeira meia hora após a mistura do cimento com a água devido ao pequeno volume dos produtos da hidratação. Logo após esse período inicial, a mistura começa a enrijecer a uma taxa maior que depende principalmente da hidratação, da temperatura, da composição do cimento e de aditivos presentes (ERLIN e HIME, 1979; MEYER e PERENCHIO, 1979; RAVINA e SOROKA, 1994; CHAN, FENG e TSANG, 1996; HANEHARA e YAMADA, 1999; KIRCA, TURANLI e ERDOGAN, 2002).

Em geral, a perda de abatimento é proporcional ao abatimento inicial: quanto maior a trabalhabilidade inicial, maior a perda de trabalhabilidade (NEVILLE, 1997; BASKOCA, OZKUL e ARTIRMA, 1998). Chan, Feng e Tsang (1996) apresentam resultados experimentais comprovando que quanto menor a relação a/c, maior a perda de abatimento para um mesmo abatimento inicial.

Segundo Collepardi, M. (1998), misturas com maior consumo de cimento tendem a ter maior velocidade de enrijecimento. O autor acrescenta outro fator que exerce grande influência: a composição do cimento, basicamente em função dos teores de C_3A , gipsita e álcalis, bem como do tipo de sulfato de cálcio adicionado para controlar a sua pega.

Mehta e Monteiro (1994) citam o estudo de Previte (1977) que avaliou misturas com consumo de cimento fixo e quantidade de água variável a fim de obter diferentes abatimentos iniciais. Foram avaliados dois cimentos: um com baixos teores de álcalis e C_3A e outro com altos teores destes compostos, sendo que ambos tinham o mesmo teor de sulfatos. Como resultado, o autor obteve que as maiores perdas de abatimento ocorreram para os mais altos abatimentos iniciais. Por exemplo, em um dos cimentos estudados, após 2 horas de ensaio a 21°C , a perda de abatimento para os abatimentos iniciais de 190, 125 e 90 mm, foi de 130, 90 e 55 mm, respectivamente. Quanto à composição do cimento, a taxa de perda de abatimento foi mais intensa para o cimento com maiores teores de C_3A e de álcalis. Por exemplo, a 21°C e abatimento inicial da ordem de 175 mm, após decorridos 30, 60 e 90 minutos, a mistura que continha o cimento com baixos teores de álcalis e C_3A perdeu 15, 45 e 95 mm, respectivamente, enquanto que a mistura contendo o cimento com altos teores destes compostos perdeu 65, 100 e 115 mm.

As temperaturas ambiente e do próprio concreto exercem grande influência na trabalhabilidade da mistura (ver item 2.4.5). Temperaturas ambientes elevadas aumentam a demanda de água do concreto e aumentam a temperatura do concreto fresco, o que resulta em uma perda mais rápida de abatimento (RAVINA e SOROKA, 1994). A Figura 2 mostra a influência da temperatura na perda de abatimento após 90 minutos, de um concreto com 306 kg de cimento por m^3 .

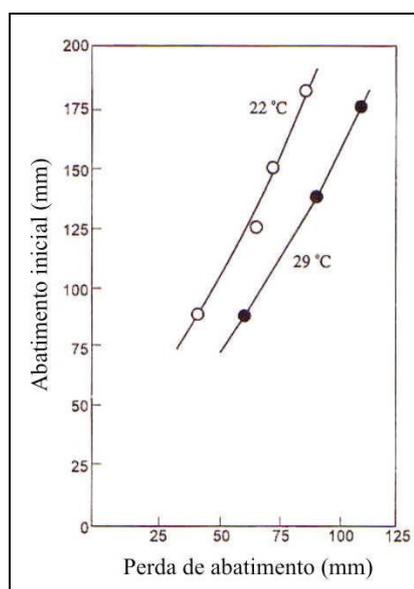


Figura 2 – Influência da temperatura sobre a perda de abatimento (DODSON, 1990 apud NEVILLE, 1997).

A condição de umidade do agregado também pode afetar a perda de abatimento. Concretos contendo agregados secos apresentam maior perda devido à absorção de água pelo agregado. Os

aditivos redutores de água de baixa eficiência, que normalmente retardam o tempo de pega, tendem a acelerar o enrijecimento da mistura durante esse período inicial (NEVILLE, 1997; RAMACHANDRAN et al, 1998).

Segundo Ravina e Soroka (2002), a cinza volante adicionada em substituição ao cimento, a temperaturas da ordem de 30°C, reduz a taxa de perda de abatimento, com efeito mais pronunciado quanto maior a percentagem de substituição (Figura 3). Para os autores, este efeito não deve ser atribuído ao menor consumo de cimento e menor desenvolvimento de calor de hidratação, pois a substituição de cimento por areia fina natural não altera a perda de abatimento. No entanto, as razões para este efeito da cinza volante ainda não estão completamente esclarecidas. Uma razão provável é a adsorção de sulfato na superfície das partículas de cinza volante e no interior das partículas não-queimadas de carbono. A Figura 3 mostra que este efeito da cinza volante pode estar relacionado à sua perda ao fogo, com uma maior perda ao fogo promovendo uma grande redução da taxa de perda de abatimento. Por outro lado, os autores alertam para o fato de que uma elevada perda ao fogo da cinza volante pode prejudicar outras propriedades do concreto.

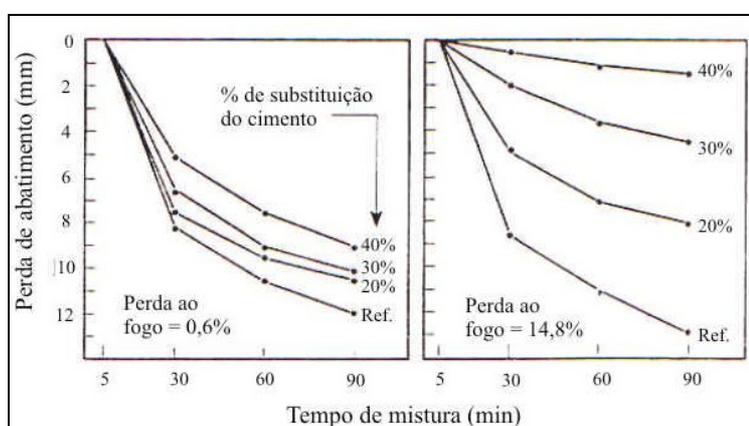


Figura 3 – Perda de abatimento para diferentes teores de cinza volante em substituição ao cimento Portland e para cinzas com diferentes percentuais de perda ao fogo (RAVINA e SOROKA, 2002).

Segundo Erlin e Hime (1979), o enrijecimento do concreto fresco pode ter diferentes significados ou importâncias dentre os vários profissionais que lidam com o concreto:

- 1) Para o responsável pela central de concreto, perda de abatimento representa aumento no torque no balão do caminhão-betoneira, no tempo de lançamento do concreto e na água de mistura;

- 2) para o motorista do caminhão-betoneira, necessidade de adição de água extra ou, em casos mais severos, endurecimento do concreto dentro do balão;
- 3) para o lançador do concreto, esforço extra na distribuição do material; e,
- 4) para o nivelador, fissuras na superfície do concreto.

Em obras onde não existe fiscalização, ou o controle da qualidade não é adequado, um procedimento muito comum adotado pelos operários é a adição extra de água, seja para correção do abatimento, quando necessário, ou até mesmo quando não há necessidade, mas se deseja obter uma mistura mais fluida para facilitar as operações de concretagem.

Segundo a NBR 7212:1984, a redosagem, isto é, a adição de água para correção do abatimento seguida de completa homogeneização da mistura no caminhão-betoneira, pode ser feita caso a quantidade limite de água prevista no traço ainda não tenha sido atingida. Apesar de não ser previsto na normalização referente ao assunto, uma alternativa para a correção do abatimento, indicada quando já se adicionou toda a água permitida pelo traço, é a colocação de aditivos fluidificantes, principalmente superplastificantes (AİTCIN, 2000b). Este procedimento será abordado mais adiante.

2.4.3 Segregação e Exsudação

Segregação é a separação dos constituintes do concreto fresco de modo que sua distribuição deixa de ser uniforme. As principais causas da segregação são as diferenças de tamanho das partículas e das massas específicas dos constituintes da mistura, além de métodos impróprios de manuseio e adensamento (RAMACHANDRAN e FELDMAN, 1984).

Em concreto convencional, a tendência à segregação aumenta com o abatimento e com a redução do consumo de cimento. Para controlar este problema, deve-se dar atenção especial à granulometria dos agregados. Uma redução na dimensão máxima do agregado graúdo ou o aumento do teor de areia ou ainda o uso de uma areia mais fina podem significar menor segregação (RAMACHANDRAN et al, 1998).

Devem ser evitados transportes a grandes distâncias e o concreto deve, sempre que possível, ser lançado diretamente no local onde irá permanecer. O excesso de vibração também pode promover a segregação, separando o agregado graúdo para o fundo da fôrma e a pasta de cimento para a parte superior.

Outra forma de segregação, a exsudação, é a separação da água, que tende a subir para a superfície de um concreto recém lançado e adensado. Neste caso, os materiais constituintes não têm capacidade de reter a água de mistura, que é o material com menor massa específica, enquanto tendem a se assentar (NEVILLE, 1997).

Um dos aspectos da exsudação é que apenas parte da água consegue chegar à superfície enquanto que uma grande parcela fica retida embaixo dos agregados maiores ou nas barras horizontais de armadura, reduzindo a aderência nessas regiões. Outra consequência da exsudação é a formação de uma nata na superfície do concreto, ocasionada pela percolação da água nos capilares internos do concreto e carregamento das partículas mais finas de cimento. Como resultado se tem uma camada com elevada relação a/c e, portanto, fraca e porosa. Esta superfície pode ainda prejudicar a aderência com a camada seguinte, caso esta seja uma camada intermediária. Assim, deve-se sempre remover essa nata por escovamento ou lavagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Por outro lado, a água que sobe à superfície por exsudação pode evitar a fissuração por retração plástica, desde que esta quantidade seja maior ou igual à quantidade de água perdida por unidade de área. Para reduzir a tendência à exsudação de uma mistura, usualmente se aumenta o consumo de cimento ou de finos e se utilizam adições minerais ou ar incorporado (RAMACHANDRAN et al, 1998).

Não existem ensaios normalizados para medida da segregação em concretos convencionais. Entretanto, pode-se avaliá-la qualitativamente, por exemplo, no ensaio de abatimento do tronco de cone. Após a retirada do cone e a medida do abatimento, aplicam-se golpes com a haste de adensamento nas bordas da base metálica, verificando-se a ocorrência de separação e queda das partículas de agregado, o que indica falta de coesão da mistura.

Existem alguns ensaios e aparatos propostos, porém ainda não normalizados, para avaliação da segregação em concreto auto-adensável, como o molde tipo M em conjunto com o aparato usado no ensaio do fator de compactação de concretos convencionais, molde tipo N em conjunto com a caixa L e aparato de penetração (PA) (BUI et al, 2002). Gomes (2002) cita o ensaio proposto por Ambroise et al (1999) e Hamada et al (2000) que consiste em despejar o concreto em uma coluna e, após o endurecimento, fatiar a amostra. De cada fatia são separados e pesados os agregados graúdos e, em seguida, pode-se determinar o teor presente em cada fatia. O mesmo autor apresenta o ensaio proposto por Sedran e De Larrard (1999) consistindo no preenchimento de um

cilindro com concreto que, depois de endurecido, é submetido ao ensaio de compressão diametral. A altura correspondente ao assentamento do agregado graúdo com dimensões maiores do que 8 mm é determinada na face de rompimento.

Já para medição da taxa de exsudação e da exsudação total de uma mistura, a ASTM C 232-92 prescreve um ensaio onde a água de exsudação, acumulada na superfície de um corpo-de-prova, é coletada e quantificada à intervalos de tempo determinados, expressando-se a exsudação em termos de quantidade de água acumulada na superfície em relação à quantidade total de água da amostra.

2.4.4 Tempo de Pega

Basicamente, a pega do concreto ocorre devido às reações entre o cimento e a água, conforme exposto anteriormente. O início de pega corresponde ao tempo a partir do qual o concreto fresco não pode mais ser misturado, lançado e compactado, devido a um aumento brusco de sua viscosidade. O fim de pega corresponde ao tempo após o qual se inicia o desenvolvimento da resistência a uma velocidade maior e a pasta cessa de ser deformável para pequenas cargas e se torna um bloco rígido. Em seguida, prossegue-se o aumento de resistência, caracterizando a fase de endurecimento do concreto. Todos esses tempos são muito úteis no planejamento das operações de concretagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo os mesmo autores, os principais fatores que influenciam a pega são a composição do cimento, a relação a/c, a temperatura e os aditivos. A relação a/c irá determinar a quantidade de espaços vazios que deverão ser preenchidos com os produtos de hidratação da pasta de cimento, afetando assim os tempos de pega e endurecimento que devem ser maiores para relações a/c mais altas.

Altas temperaturas, da ordem de 30°C, tendem a diminuir o tempo de pega, enquanto que o efeito contrário ocorre em baixas temperaturas, próximas de 10°C. Em temperaturas inferiores a -10°C, ocorre a paralisação das reações de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

O ensaio para medição do tempo de pega do concreto é preconizado pela NBR NM 9:2003 que consiste basicamente na avaliação da resistência à penetração de uma agulha em uma amostra de argamassa peneirada do concreto.

2.4.5 Temperatura do Concreto

O controle da temperatura do concreto fresco é muito importante pois a temperatura tem efeitos marcantes na reologia da mistura. Se a temperatura do concreto é muito alta logo após a mistura, acima de 25°C, a hidratação é acelerada e torna-se difícil assegurar uma trabalhabilidade adequada para transporte e lançamento. Além disso, essa temperatura inicial do concreto fresco exerce grande influência sobre a temperatura máxima atingida no interior do elemento estrutural moldado (AİTCIN, 2000b).

Por outro lado, temperaturas muito baixas do concreto fresco, abaixo de 10°C, reduzem a taxa de hidratação, diminuindo a resistência inicial do concreto e podendo gerar atrasos em todo o processo construtivo em virtude das fôrmas não poderem ser retiradas. Outra consequência de uma mistura muito fria é a menor eficiência dos aditivos superplastificantes líquidos, em função do aumento drástico de sua viscosidade (AİTCIN, 2000b).

O mesmo autor comenta que a faixa ideal de temperatura de um concreto é de 15 a 20°C, porém se estas temperaturas estiverem acima de 10°C ou abaixo de 25°C ainda podem ser aceitáveis. Entretanto, devem ser tomadas ações corretivas quando as temperaturas estiverem abaixo de 10°C ou acima de 25°C, para evitar problemas reológicos sérios.

No Brasil não existem normas específicas sobre concretagens em climas frios ou quentes. Apenas a NBR 7212:1984 prescreve que as temperaturas limites para lançamento do concreto são 10 e 32°C, sendo que cuidados especiais devem ser tomados fora desses limites.

Realmente, não se percebe tanto a necessidade de recomendações construtivas especiais para temperaturas muito baixas, visto que no Brasil dificilmente as temperaturas se aproximam de 0°C, exceto na região sul, durante o inverno. Por outro lado, como na maior parte do país se tem um clima tropical e as temperaturas podem alcançar valores próximos de 40°C, deveriam ser disponibilizadas recomendações para concretagens em clima quente, tanto para uma melhor avaliação e controle das propriedades do concreto no estado fresco, como para se conhecerem os efeitos de altas temperaturas de cura nas propriedades do concreto.

No presente trabalho, não serão enfocados os aspectos da concretagem em clima frio pelo motivo citado. No entanto, algumas considerações serão feitas a seguir sobre concretagens em clima quente, de acordo com o ACI 305R-91.

Concretagem em clima quente

O Comitê 305 do ACI define clima quente como “qualquer combinação das seguintes condições que tende a prejudicar a qualidade do concreto fresco ou endurecido, por aceleração da taxa de perda de umidade e da taxa de hidratação do cimento, ou que, de outra forma, levem a resultados prejudiciais: alta temperatura ambiente, alta temperatura do concreto, baixa umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar”.

Já o Departamento de Transporte da Flórida (FDOT), em suas especificações para concretagens em clima quente, acrescenta à definição do ACI 305R-91 que outra condição para se considerar um clima quente, é que as temperaturas estejam entre 29 e 38°C (BERGIN e SYED, 2002).

Alguns dos efeitos que podem ocorrer em climas muito quentes nas propriedades do estado fresco são:

- 1) Aumento da demanda de água para uma dada consistência (Figura 4);
- 2) maior taxa de perda de abatimento, aumentando a probabilidade de se adicionar água no canteiro de obras para sua correção;
- 3) redução do tempo de pega do concreto, resultando em dificuldades no lançamento, adensamento, acabamento e um maior risco de juntas frias;
- 4) maior tendência à fissuração por retração plástica; e,
- 5) maior dificuldade em se controlar o teor de ar incorporado (YAMAMOTO e KOBAYASHI, 1986; ACI 212.3R-91).

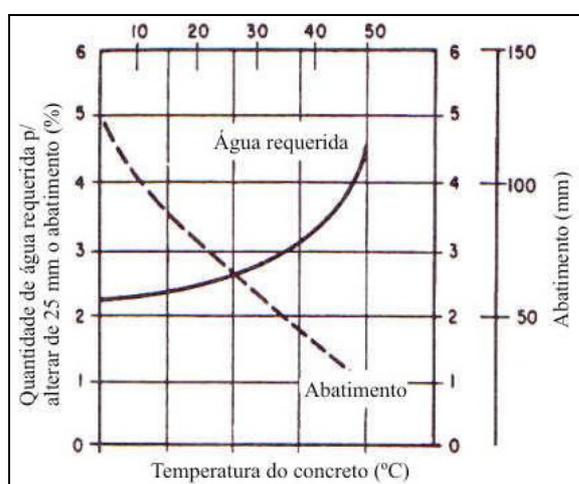


Figura 4 – Efeito da temperatura sobre o abatimento e a água necessária para alterá-lo (ACI 305R-91).

Alguns problemas também podem ocorrer no estado endurecido, como:

- 1) Redução da resistência aos 28 dias e a idades maiores. A queda aos 28 dias pode ser de aproximadamente 4% para temperaturas de mistura entre 32 e 38°C, podendo ultrapassar os 10% para temperaturas de mistura acima de 38°C (MAHBOUB e CUTSHAW, 2001);
- 2) maior tendência à retração por secagem ou fissuração pelos diferenciais térmicos;
- 3) maior permeabilidade e menor durabilidade, como resultado da fissuração;
- 4) maior variabilidade na aparência superficial como juntas frias e diferenças de cor.

Todos os problemas encontrados em concretagem em clima quente podem ser amenizados ou evitados por meio de:

- 1) Utilização de materiais e proporções que já tenham apresentado resultados satisfatórios em climas quentes;
- 2) resfriamento do concreto;
- 3) utilização de uma consistência que permita uma operação rápida de lançamento e adensamento;
- 4) transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto com o menor atraso possível;
- 5) planejamento de toda a operação para evitar exposição demasiada do concreto ao ambiente;
- 6) proteção do concreto contra a perda de umidade durante o período de lançamento e cura.

Com relação aos materiais, deve-se reduzir tanto quanto possível o conteúdo de cimento, de modo que o calor de hidratação não agrave os efeitos da temperatura ambiente elevada. Com o mesmo propósito, materiais cimentícios suplementares, como cinza volante, podem ser utilizados. Aditivos químicos, como redutores de água ou retardadores, ajudam na redução da demanda de água e na diminuição da perda de abatimento. Em alguns casos, pode ser necessário o resfriamento dos materiais constituintes, preferencialmente da água ou dos agregados.

Quanto à produção e entrega do concreto, deve-se diminuir ao mínimo o tempo de mistura no caminhão-betoneira. Pintar a parte externa do balão do caminhão-betoneira de branco ou outra cor clara também ajuda a amenizar o ganho de calor no seu interior (ACI 305R-91).

Outra recomendação do ACI 305R-91 é que exista uma boa comunicação entre a central de concreto e o canteiro de obras, evitando possíveis atrasos na operação e permanência do concreto por tempo demasiadamente longo no caminhão-betoneira. O mesmo comitê diz que baixos valores de abatimento não devem ser especificados, pois a taxa de lançamento do concreto é

reduzida e o material terá mais tempo para absorver calor do ambiente. Assim, a hidratação do cimento e a pega são aceleradas, intensificando os problemas decorrentes da perda de abatimento.

Altas temperaturas de cura são ainda mais prejudiciais do que altas temperaturas de lançamento. Apesar de aumentarem a resistência inicial, podem diminuí-la aos 28 dias e em idades posteriores.

2.5 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

Existe uma série de propriedades do concreto no estado endurecido que, dependendo do destino que será dado ao material, têm sua importância. No entanto, como no presente trabalho o principal objetivo é o estudo de aspectos voltados para o CDC, apenas aqueles de maior relevância neste caso serão abordados a seguir.

2.5.1 Resistência à Compressão Axial

Segundo Mehta (1996), na dosagem do concreto e no controle da qualidade, resistência é geralmente a única propriedade especificada porque sua determinação é relativamente simples e também porque se assume que as outras propriedades do concreto, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e durabilidade, estão diretamente relacionadas com a resistência e, portanto, podem ser deduzidas a partir desta. A resistência à compressão axial, por ser maior que os outros tipos de resistência, é aceita universalmente como um índice geral da resistência do concreto.

Os principais fatores que afetam a resistência à compressão do concreto são:

- 1) Relação a/c;
- 2) porosidade;
- 3) relação cimento/agregados;
- 4) natureza, granulometria e dosagem dos aglomerantes;
- 5) granulometria, dimensão máxima, forma, textura e mineralogia dos agregados;
- 6) qualidade da água de amassamento;
- 7) aditivos químicos, principalmente os retardadores e aceleradores;
- 8) idade;

- 9) condições de cura; e,
- 10) parâmetros de ensaio.

2.5.2 Módulo de Deformação

Sabe-se que toda tensão é acompanhada de uma deformação. Diz-se que um material tem comportamento perfeitamente elástico quando surgem e desaparecem deformações imediatamente após a aplicação e retirada de tensões, respectivamente, sem necessidade de linearidade entre as tensões e as deformações (NEVILLE, 1997).

O concreto não é considerado um material verdadeiramente elástico. A partir de curvas típicas de tensão *versus* deformação, percebe-se que nem a deformação é diretamente proporcional à tensão e nem a deformação é totalmente recuperada após o descarregamento. Entretanto, é necessário se fazer uma estimativa do módulo de deformação para se calcularem as tensões de projeto sob carga em elementos simples e sob momentos e deformações em estruturas complexas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O módulo de deformação é uma relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. Esse valor somente pode ser obtido da parte retilínea da curva tensão *versus* deformação. A NBR 8522:2003 prescreve a metodologia para determinação do módulo de deformação estático, do tipo corda, que é dado pela declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva.

Para Mehta e Monteiro (1994), os fatores que afetam o módulo de deformação do concreto são:

- 1) Quantidade, rigidez, dimensão máxima, forma, textura, granulometria e composição mineralógica dos agregados;
- 2) porosidade da matriz da pasta de cimento que, por sua vez, depende da relação a/c, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento;
- 3) densidade da zona de transição (pasta-agregado), além da presença de cristais orientados de hidróxido de cálcio; e,
- 4) parâmetros de ensaio.

Neville (1997) afirma que o módulo de deformação aumenta com a resistência do concreto mas não existe uma relação exata desta dependência, uma vez que o módulo de deformação do

concreto depende principalmente do módulo de deformação do agregado e da proporção em volume deste no concreto. Segundo o autor, o módulo de deformação apresenta uma razão de variação menor que a resistência à compressão do concreto.

2.6 ESTUDO DE DOSAGEM

O processo de dosagem do concreto consiste basicamente no estudo e obtenção da proporção mais adequada entre os materiais constituintes, de modo a se alcançarem os requisitos exigidos a um custo minimizado. Geralmente, as misturas de concreto são dosadas para se obter uma determinada consistência no estado fresco e uma resistência à compressão mínima no estado endurecido. A maioria dos métodos de dosagem disponíveis para concretos convencionais cobre abatimentos de 25 a 150 mm e resistências à compressão aos 28 dias de 15 a 40 MPa (MEHTA, 1996).

Mehta e Monteiro (1994) comentam que o processo de dosagem do concreto é considerado mais uma arte que uma ciência, apesar de ser governado por sólidos princípios técnicos. De fato, é difícil exprimir todas as variáveis que influenciam as propriedades do concreto em equações matemáticas e, por este motivo, tantos engenheiros oferecem resistência ao lidarem com este assunto. No entanto, com um pouco de prática e alguns conceitos básicos, a “arte” da dosagem do concreto pode ser dominada.

Alguns dos métodos de dosagem existentes apresentam equações ou curvas genéricas que fornecem respostas rápidas quanto ao proporcionamento de concretos. Entretanto, são raras as vezes em que não se necessita de uma comprovação ou ajuste experimental da trabalhabilidade e da resistência mecânica desses traços. Desta forma, mesmo os métodos ditos racionais, não descartam a necessidade de um estudo experimental de dosagem, ainda que seja para o ajuste final do traço. Por outro lado, existem métodos totalmente experimentais, onde são utilizados os materiais de uso efetivo na obra em questão, que fornecem resultados bastante confiáveis e dispensam a necessidade de confirmação experimental do traço, pelo menos a curto prazo.

Segundo Helene e Terzian (1993), a dosagem deve ser feita visando o atendimento de algumas condições principais:

- 1) Exigências de projeto;
- 2) condições de exposição e operação;

- 3) tipo de agregado disponível economicamente;
- 4) técnicas de execução; e,
- 5) custo.

Alguns dos principais métodos de dosagem de concretos convencionais utilizados no Brasil são: Método IPT / EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993), Método ABCP / ACI (RODRIGUES, 1995), Método do INT (PETRUCCI, 1993), Método do ITERS / CIENTEC (PETRUCCI, 1993) e Método Cubano (DIAZ, 1990).

A seguir será descrito, resumidamente, o Método IPT– Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo / EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (ou Método dos 4 Quadrantes), por ser este o método mais utilizado no Brasil e, conseqüentemente, adotado como referência para a confecção das curvas de dosagem neste trabalho. No entanto, algumas adaptações serão propostas, baseando-se nas considerações que serão apresentadas no item 2.6.2.

2.6.1 Método IPT / EPUSP

Este método baseia-se no ajuste de curvas de resistência e trabalhabilidade em função dos requisitos estruturais e de produção da estrutura no canteiro. A seguir serão apresentados os fundamentos, as informações básicas necessárias, os cálculos iniciais e o procedimento experimental proposto neste método.

Conceitos Fundamentais

- 1) Desde que o concreto apresente trabalhabilidade adequada, a resistência depende de dois parâmetros principais: tipo de cimento e relação a/c;
- 2) o teor ideal de argamassa da mistura depende do volume de vazios deixado pelo agregado graúdo (função da sua dimensão máxima) e da capacidade de lubrificação da argamassa (função das características do cimento e da areia) e independe da relação a/c. Esse teor ideal de argamassa deve ser determinado experimentalmente, por avaliação visual do concreto fresco no abatimento desejado;
- 3) o método assume que a Lei de Lyse se adapta bem aos concretos normais e utiliza regressão linear para obter uma reta de correlação entre m (traço) e a/c ($m = k_3.a/c + k_4$) e montar o diagrama de dosagem. Desta forma, assume-se que concretos com mesmo teor de argamassa,

porém com diferentes relações a/c, apresentarão relações água / materiais secos (H) muito próximas para o mesmo abatimento;

- 4) ao final do processo, um único diagrama de dosagem para um dado conjunto de materiais, onde se tem resistência à compressão (f_{cj}), traço (m) e consumo de cimento por metro cúbico de concreto (C) em função da relação a/c, fornecerá, de imediato, o proporcionamento ideal do concreto cuja resistência à compressão esteja contida no intervalo considerado pelo diagrama.

Informações básicas

- 1) Resistência característica à compressão do concreto;
- 2) desvio-padrão de dosagem;
- 3) espaçamento entre barras de aço;
- 4) dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- 5) definição dos elementos estruturais a serem concretados;
- 6) consistência do concreto (abatimento do tronco de cone);
- 7) relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- 8) uso de aditivo em condições especiais (plastificante ou retardador);
- 9) estimativa de perda de argamassa no lançamento do concreto;
- 10) tipo de cimento.

Cálculo da resistência de dosagem e da relação a/c

Adota-se a equação constante na NBR 12655:1996 para determinação da resistência de dosagem:

$$f_{cdj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot S_{dj} \quad (1)$$

Onde: $f_{cdj} = f_{cmj}$ = resistência à compressão de dosagem, a j dias de idade, em MPa;

S_{dj} = desvio-padrão de dosagem, a j dias de idade, em MPa.

Como desvio-padrão de dosagem, pode-se adotar um dos valores sugeridos pelo método ou um valor calculado diretamente dos resultados da obra em questão, desde que se tenha, no mínimo, 30 exemplares.

Os resultados dos ensaios de compressão, necessários para se estabelecer a correlação entre resistência à compressão e relação a/c, somente serão fornecidos, em geral, aos 28 dias.

Entretanto, normalmente, necessita-se da definição da relação a/c a ser utilizada no traço inicial do concreto antes desse período, para liberação dos serviços de concretagem de uma obra. Neste caso, o método propõe a utilização das correlações obtidas por Helene (1987), em estudo desenvolvido em nível nacional, para alguns tipos de cimento existentes.

Etapa experimental da dosagem

Primeiramente, com os materiais que serão efetivamente utilizados em obra, faz-se uma mistura de traço 1:5, com um baixo teor de argamassa (35% para agregados convencionais) acrescentando-se água aos poucos até se obter a consistência desejada. Avalia-se o teor de argamassa da mistura, verificando-se a coesão da massa e se há preenchimento dos espaços entre os agregados. Caso o teor de argamassa não esteja adequado, acrescenta-se cimento e areia para aumentá-lo, mantendo-se o traço 1:5, e acrescenta-se água até se obter novamente a consistência desejada. Avalia-se mais uma vez o teor de argamassa e, caso ainda não esteja adequado, repete-se o procedimento descrito até se obter o resultado desejado. A relação água/materiais secos (H) deste traço final passa a ser o valor estimado para todas as misturas e o teor de argamassa é fixado para todos os traços.

Acrescentando-se 2 a 4% ao teor ideal de argamassa (α) encontrado para compensar as perdas no sistema de transporte e lançamento, são confeccionados concretos com traços 1:3,5, 1:5 e 1:6,5, acrescentando-se água aos poucos para obter o abatimento desejado (especificado para o lançamento). Moldam-se corpos-de-prova para ruptura à compressão nas idades estabelecidas para controle.

Com os resultados dos ensaios de ruptura à compressão dos corpos-de-prova e com os valores de m em função da relação a/c, plotam-se as curvas do diagrama de dosagem. A curva do consumo de cimento em função do traço é obtida a partir da massa específica do concreto fresco ou do teor de ar incorporado e das massas específicas do cimento e dos agregados. A Figura 5 mostra um diagrama de dosagem genérico para se visualizar o modelo de comportamento do concreto. Um fluxograma representativo da fase experimental do estudo de dosagem é apresentado na Figura 6.

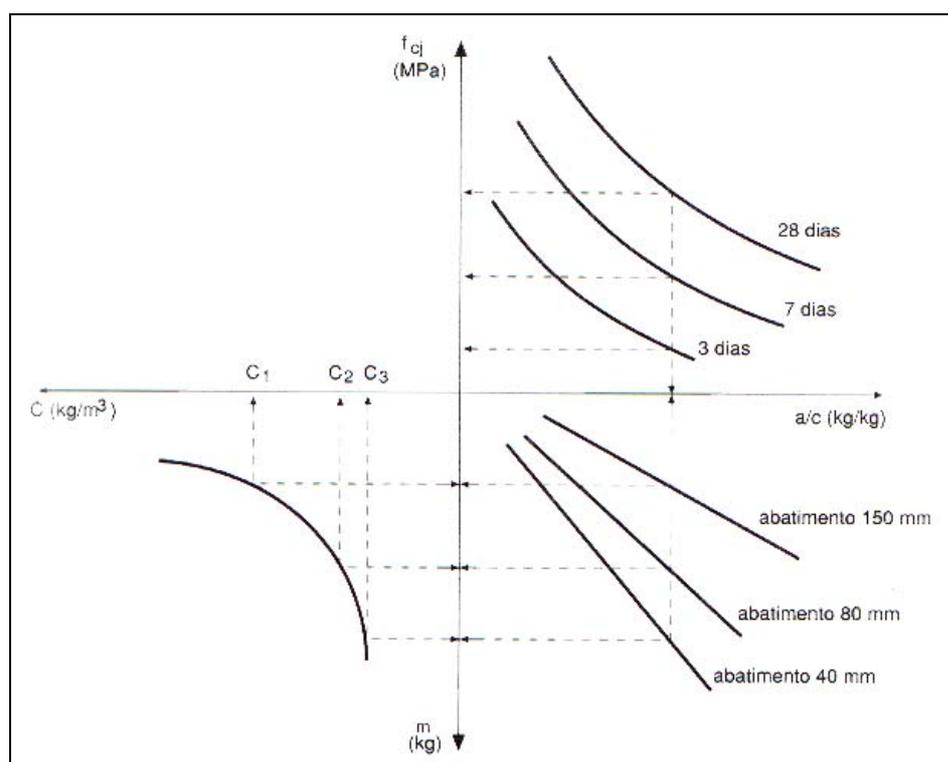


Figura 5 – Diagrama de dosagem, método IPT/ EPUSP – modelo de comportamento (HELENE e TERZIAN, 1993).

2.6.2 Considerações Sobre o Método IPT / EPUSP

Este método de dosagem é bastante utilizado nacionalmente, principalmente, por ser prático e rápido de se executar, desde que o tecnologista tenha alguma experiência em dosagem de concreto.

Uma das grandes vantagens é que o teor de argamassa é determinado experimentalmente, evitando-se dosar um concreto com deficiência ou excesso de argamassa. A deficiência acarreta porosidade ou falhas de concretagem e o excesso proporciona um concreto de melhor aparência, mas aumenta a segregação e o custo por metro cúbico de concreto, além de aumentar o risco de fissuração de origem térmica e de retração por secagem.

Soma-se a isso o fato de, ao final do processo, obter-se um diagrama que serve para qualquer resistência de concreto convencional, eliminando-se a necessidade de produzir novas misturas para acerto de dosagem.

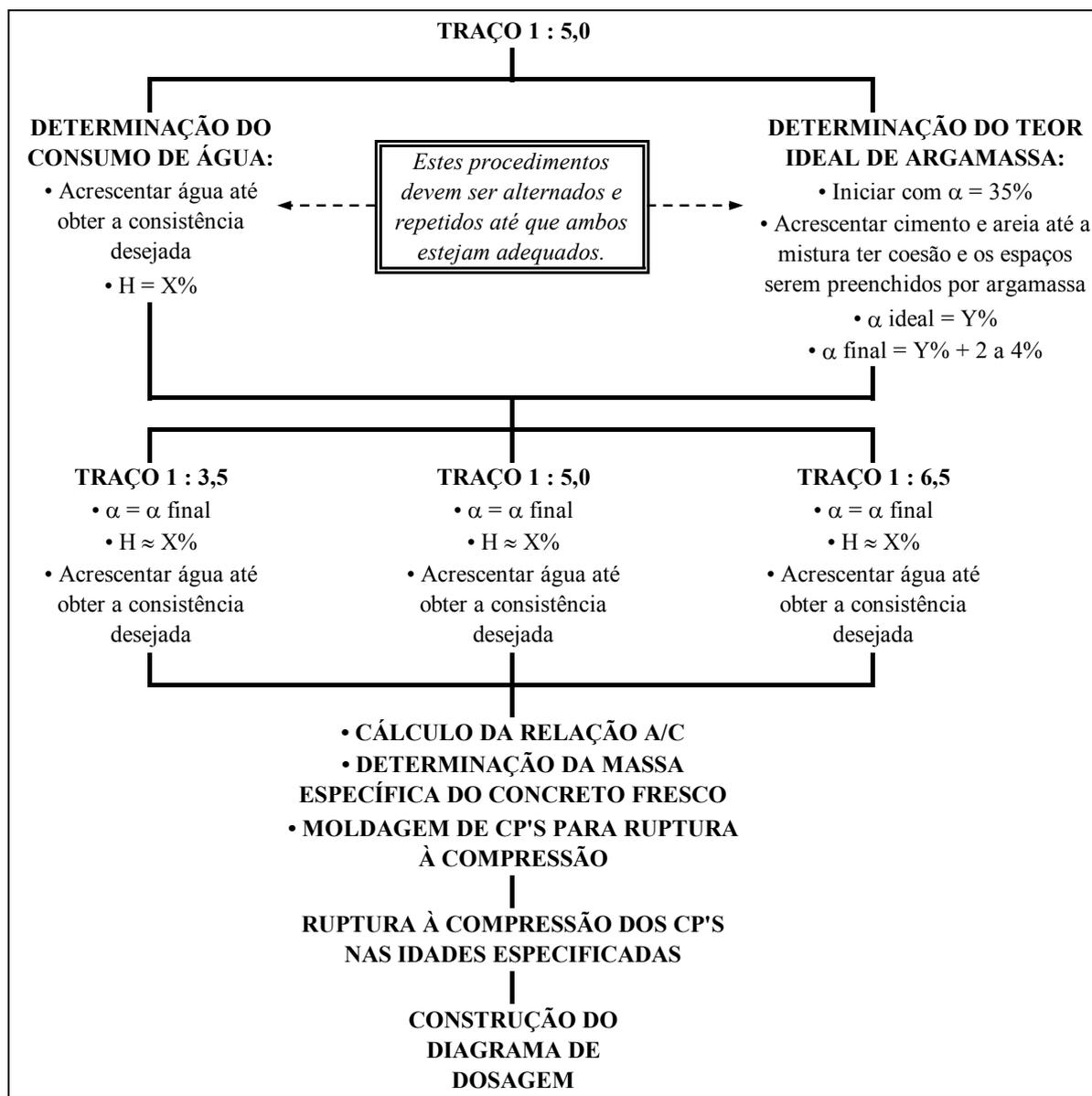


Figura 6 – Fluxograma representativo do estudo experimental do Método IPT / EPUSP.

Já com relação às curvas médias de correlação entre relação a/c e resistência à compressão propostas por Helene (1987), observa-se que estas não mais refletem os tipos e qualidade dos cimentos atualmente utilizados. Ao longo do tempo, houve alterações no processo produtivo que resultaram, por exemplo, em cimentos mais finos e com maiores teores de C_3S ou, ainda, com diferentes teores de adições minerais, fatores que alteram consideravelmente a taxa de evolução da resistência do concreto. Além disso, essas curvas foram obtidas a partir de uma média de valores provenientes de estudos desenvolvidos em diversas regiões do país, ou seja, utilizando-se uma gama muito grande de materiais, o que as torna não-representativas do concreto produzido em uma determinada região. Como consequência, o uso das curvas existentes pode levar a

composições anti-econômicas ou, em certos casos, contra a segurança estrutural (MELO et al, 2004).

O método IPT / EPUSP estabelece procedimentos básicos para a produção de concreto e apesar de não definir claramente se o método pode ser aplicado tanto para concreto virado em obra como para concreto dosado em central, em geral, é mais direcionado para o primeiro caso. Entretanto, como será exposto no item 2.7, o processo de produção do CDC apresenta algumas peculiaridades que devem ser consideradas já no momento da dosagem.

Uma delas é o tempo que se passa entre o início da mistura na central e o lançamento do concreto na obra. O método propõe a construção do diagrama de dosagem para o abatimento especificado para o lançamento, pois, no caso de concreto virado em obra, o material é misturado e, quase que imediatamente após, lançado, não havendo praticamente perda de trabalhabilidade. Já no caso do CDC, que após a mistura será transportado até a obra por um período que pode ser superior à uma hora, essa perda pode tornar inviável o lançamento do concreto. Portanto, este fenômeno deveria ser considerado no estudo de dosagem para CDC, bem como a eventual alteração das demais propriedades do concreto após o período de transporte.

Nas centrais dosadoras, os agregados miúdos são proporcionados no estado úmido devido à dificuldade que se teria para secagem destes materiais. Este detalhe do proporcionamento deveria ser levado em consideração na dosagem para evitar qualquer distorção dos resultados obtidos em laboratório quando aplicados em campo. Os agregados miúdos, quando no estado seco, podem absorver uma parcela da água de mistura, alterando a quantidade de água livre para promover sua fluidez, o que intensificará a perda de trabalhabilidade ao longo do tempo. Ao contrário do que o método propõe (utilizar areia seca), o ideal seria a utilização de areia úmida na dosagem para simular o procedimento de proporcionamento adotado nas centrais, feitas, evidentemente, as devidas correções nas quantidades de areia e água do traço. Nesta correção é fundamental que seja utilizado o método de determinação da umidade empregado na central pois métodos distintos (ex: frasco de Chapman e secagem ao fogo) conduzem a valores discrepantes.

Outro fator limitante do método é a utilização de aditivos químicos que, apesar de alguns serem previstos pelo método (aditivos plastificante e retardador de pega), este não especifica claramente os procedimentos para determinação do teor ideal, seqüência de adição, entre outros. Além disso, a presença de aditivos influencia outras propriedades importantes do concreto, como perda de trabalhabilidade, fundamental na definição do proporcionamento ideal para um CDC.

Diante do exposto, no presente estudo será desenvolvida uma adaptação ao Método IPT / EPUSP, levando-se em consideração estas peculiaridades existentes no processo de produção do CDC.

2.7 CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

2.7.1 Definição

A NBR 7212:1984 define o CDC como “...concreto dosado, misturado em equipamento estacionário ou em caminhão-betoneira, transportado por caminhão-betoneira ou outro tipo de equipamento, dotado ou não de agitação, para entrega antes do início de pega do concreto, em local e tempo determinados, para que se processem as operações subseqüentes à entrega, necessárias à obtenção de um concreto endurecido com as propriedades pretendidas”.

Alguns fatores são apontados como vantagens deste serviço em relação ao concreto produzido em obra e têm impulsionado o crescimento da indústria do CDC no mundo (PRUDÊNCIO JR., 2004):

- 1) Menor custo, em função do preço reduzido que as centrais têm ao comprar os insumos, além de se gastar menos no canteiro com manutenção de equipamentos, cuidados com o armazenamento dos insumos, energia elétrica, etc;
- 2) maior produtividade na obra em função do menor tempo gasto e menor equipe de concretagem;
- 3) capacidade para se misturar qualquer volume e em intervalos de tempo regulares de acordo com o andamento da obra;
- 4) maior uniformidade das características dos insumos, que são adquiridos de fornecedores específicos;
- 5) melhores condições de armazenamento do cimento, que é guardado em silos metálicos, por períodos geralmente inferiores a 3 dias, preservando sua resistência potencial;
- 6) redução de desperdício e perda de materiais na obra, entre outros.

Entretanto, apesar de todas essas vantagens e do crescimento a um ritmo acelerado, existe uma série de limitações que impedem que o CDC atinja seu nível ótimo. Esses fatores, que podem comprometer a qualidade do produto final, serão relatados nos itens 2.7.4 e 2.7.5.

2.7.2 Breve Histórico no Brasil

As primeiras centrais dosadoras de concreto se instalaram no Brasil nos anos 50, quando as cidades brasileiras começavam a crescer e a indústria nacional estava sendo fortemente impulsionada pela chegada das primeiras montadoras de automóveis e das fábricas de autopeças. Esta década foi marcada pelo entusiasmo do desenvolvimento, com a construção de grandes edifícios e novas ruas e avenidas em São Paulo para a comemoração do seu IV Centenário em 1954, culminando com a construção de Brasília, a capital do país, no final deste período (ABESC, 2003).

A primeira central de concreto nasceu em 1950, a partir da necessidade de uma empreiteira da capital paulista que iria construir um trecho de rodovia ligando São Paulo a Jundiaí. Na ocasião, os donos da empreiteira compraram dos Estados Unidos uma central dosadora, do tipo manual, com caminhão-betoneira, que chamaram de Usina Central de Concreto S/A (UCC). Inicialmente, todo o concreto produzido era apenas para uso próprio da empresa, mas logo passou a ser comercializado com outras empreiteiras. Devido à grande demanda, a UCC abriu mais três filiais na capital paulista. Não demorou muito para que novas empresas de serviços de concretagem abrissem suas portas e se espalhassem por alguns estados brasileiros, como Rio de Janeiro, Minas Gerais e Rio Grande do Sul (ABESC, 2003).

A partir dos anos 60, o setor de CDC tem sua importância firmada definitivamente na construção civil, em função da racionalidade, facilidade e qualidade oferecidas. Este material tornou-se imprescindível nas obras que deram suporte ao desenvolvimento do país e ao longo dos anos vem evoluindo, se aperfeiçoando e tornando possível a realização dos mais importantes desafios de engenharia de concreto (ABESC, 2003).

Em 1978, foi fundada a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem - ABESC, justamente na época em que se vivia o chamado “Milagre Brasileiro”, quando grandes obras foram executadas, como a ponte Rio-Niterói e a gigantesca hidrelétrica de Itaipú, e o ramo imobiliário apresentou um intenso crescimento, gerando uma grande expansão das indústrias cimenteira e concreteira (REZENDE, CREPALDI e DJANIKIAN, 1996). Para se ter uma idéia da expansão do CDC nessa época, o setor entrou nos anos 80 registrando um aumento de 100% (ABESC, 2003).

Nos anos 80, o país já contava com 50 empresas de serviços de concretagem, algumas de abrangência nacional, quando começaram a ser sentidos os reflexos da crise do petróleo. Em virtude disso, houve uma estagnação na produção de cimento, que tem se mantido desde então. Além disso, como fruto dessa crise econômica, se observa a grande concentração das centrais dosadoras na região sudeste do país (cerca de 55% do setor), a elevada ociosidade na capacidade instalada e a pequena fração do consumo de cimento pelo setor, comparada a dos países desenvolvidos (REZENDE, CREPALDI e DJANIKIAN, 1996).

Segundo a ABESC (2003), nos países desenvolvidos o CDC é responsável pelo consumo de 60% da produção mundial de cimento. No Brasil, a média do consumo de grandes cidades, como Rio de Janeiro e São Paulo, é superior a 30%, mas a nível nacional o uso ainda é baixo, ficando em torno de 13%.

Cerca de 80% da produção do cimento brasileiro é comercializada em sacos, o que significa que a maior parte do cimento nacional é utilizado em obras de pequeno porte. Já nos Estados Unidos e em países da Europa, esse consumo é de apenas 10%. Como fatores que dificultam o crescimento do CDC no país, podem ser apontados: a ausência ou a deficiência de uma política de incentivo à construção de moradias para a população de baixa renda, a grande extensão territorial, com muitas áreas ainda não urbanizadas e a grande quantidade de mão-de-obra desqualificada, que propicia o uso de sistemas construtivos arcaicos (ABESC, 2003).

A despeito disso, o setor do CDC vem apresentando um bom desenvolvimento que, traduzindo-se em números, já totalizavam, em 1997, mais de 100 empresas, cerca de 550 centrais dosadoras e 4.800 caminhões-betoneira, sendo que essas centrais atendiam mais de 1.600 municípios e ofereciam 10.000 empregos diretos (ABESC, 2004).

2.7.3 Centrais de Concreto e Seus Equipamentos

Central de concreto é um conjunto de instalações e equipamentos necessários para o armazenamento, manuseio, proporcionamento e carregamento dos materiais constituintes, homogeneização da mistura, transporte e lançamento do concreto, que assegurem a qualidade exigida (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990). Essas instalações e procedimentos devem atender no mínimo ao que é estabelecido pela NBR 7212:1984.

Uma central de concreto abrange serviços de administração, vendas, faturamento, cobrança, programação, controle de qualidade, assessoria técnica, treinamento e aperfeiçoamento profissional.

Existem diversos tipos de centrais de concreto, classificadas de acordo com sua disposição (vertical, horizontal ou mista), tipo de controle do proporcionamento (manual ou automático), equipamento de mistura (apenas dosadora ou dosadora e misturadora) e, ainda, tipo de mistura no caminhão-betoneira, quando do tipo dosadora apenas (completa na central ou parcial na central e complementação na obra). A seguir serão descritos os tipos de centrais existentes, bem como alguns dos seus equipamentos.

Disposição das centrais

A disposição dos equipamentos de uma central deve oferecer a melhor rentabilidade operacional e financeira. Conforme esta disposição podem-se classificar as centrais em (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990):

1) Verticais:

Também chamadas de centrais de gravidade, têm-se destacado pela simplicidade dos acionamentos que envolve: a motorização elétrica é mínima, os elementos estruturais e de manuseio de material são mais robustos e menos sujeitos a desgaste (não se usam correias transportadoras, a não ser quando necessário para carregamento dos materiais componentes às caixas de agregado). A compactidade de grandes sistemas é mais viável, tornando as áreas ocupadas menores e as transmissões das balanças dosadoras mais simples. O inconveniente principal é a falta de mobilidade do equipamento. São instalações definitivas ou semi-permanentes, para obras de longa duração ou mercados definidos (Figura 7);

2) Horizontais:

Exigem acionamentos motorizados em maior quantidade. Fundamentam-se no manuseio dos materiais por correias transportadoras. Estruturalmente são mais simples e as transmissões para as balanças dosadoras são mais trabalhosas. A mobilidade e as pequenas obras de fundação para sua instalação são seus maiores argumentos. O investimento inicial é normalmente inferior ao de uma usina gravimétrica (Figura 8);

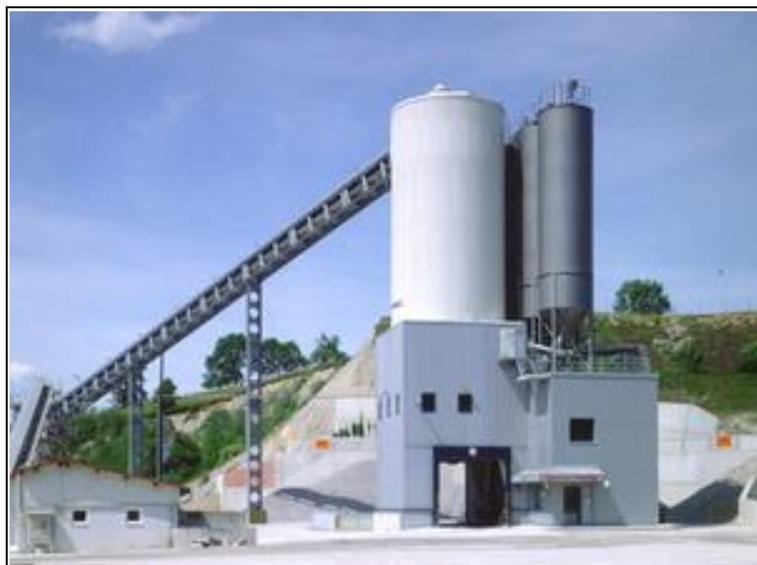


Figura 7 – Central vertical (LIEBHERR, 2005).



Figura 8 – Central horizontal (LIEBHERR, 2005).

3) Mistas:

Podem apresentar melhor eficiência que as usinas clássicas, em função dos critérios de utilização do usuário.

Tipos de controles

A precisão das dosagens depende, sem dúvida, dos controles das centrais (operações e dispositivos que transmitem os comandos). Genericamente podem ser classificados em (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990):

1) Manual:

Implica na presença de um operador que, de acordo com alguma regra (como operar uma chave, válvula ou alavanca), executa os comandos necessários (Figura 9);



Figura 9 – Controle manual.

2) Automático:

Nesse caso, parte ou totalidade das funções do operador é realizado por um equipamento freqüentemente eletrônico. Assim, por exemplo, o acionamento de válvulas, o controle de pesagem, detalhes operacionais, introdução dos materiais na betoneira e outras etapas podem ficar por conta de um computador (Figura 10).



Figura 10 – Controle automático (LIEBHERR, 2005).

Tipos de mistura

Segundo a NBR 7212:1984 podem ter três tipos de misturas:

1) Mistura completa em equipamento estacionário:

Os materiais componentes, devidamente dosados, são colocados no equipamento e depois de obtida uma mistura completa e homogênea, descarregados em veículos para transporte até a obra;

2) Mistura completa em caminhão-betoneira na central:

Os materiais componentes são colocados no caminhão-betoneira na ordem conveniente. Essa ordem e a velocidade de rotação para mistura devem obedecer às especificações do equipamento ou conforme indicado por experiência;

3) Mistura parcial na central e complementação na obra:

Os componentes são colocados no caminhão-betoneira, com parte da água, que é complementada na obra, antes da mistura final e descarga. Neste caso, deve ser estabelecido um sistema rigoroso de controle da quantidade de água adicionada na central e a ser completada na obra, para não ultrapassar a prevista no traço.

Quanto ao equipamento de mistura, podemos classificar as centrais em:

- 1) Dosadoras (a mistura se dá no caminhão-betoneira);
- 2) dosadoras e misturadoras (mistura em equipamento estacionário).

Caminhões-betoneira

Os caminhões-betoneira são providos de um balão rotativo com o eixo inclinado em relação a horizontal. No interior do balão, há um par de lâminas, ou barbatanas, que contornam o balão em uma configuração helicoidal (espiral) no sentido da “cabine” para a parte aberta (Figura 11.a). Esta configuração permite que o concreto seja misturado quando o balão gira em uma direção e descarregado quando a direção é revertida (NRMCA, 2004).

A Figura 11.b apresenta um caminhão-betoneira com suas diversas partes: cabine do motorista, reservatório de água (que também pode estar localizado sobre o redutor do balão), balão rotativo,

reductor do balão (que promove sua rotação), hidrômetro, funil (por onde são carregados os materiais) e calha de descarga do concreto.

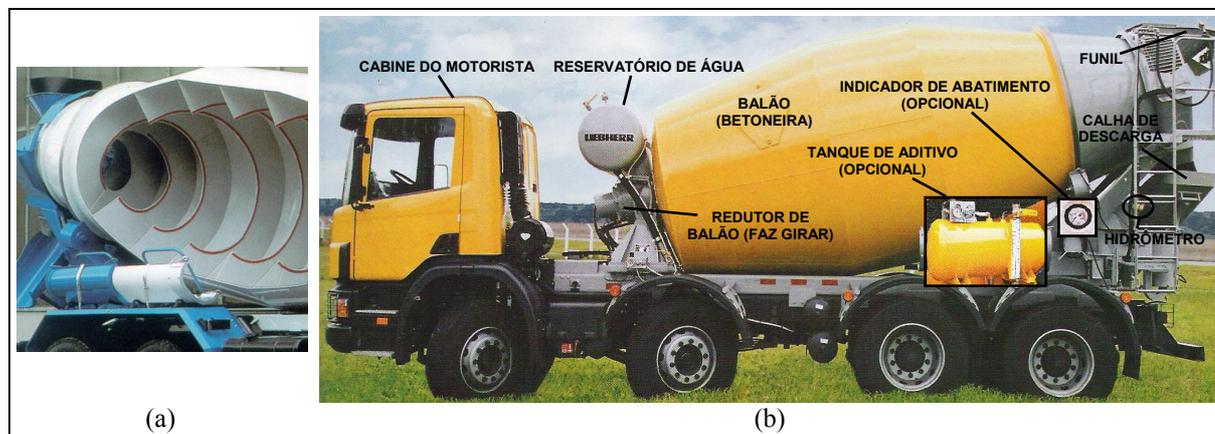


Figura 11 – (a) Interior de um balão com seus helicóides (LIEBHERR, 2005); (b) caminhão-betoneira com suas diversas partes.

Bombas de lançamento de concreto

Atualmente, na maioria das construções, o transporte do concreto do caminhão-betoneira até o ponto de lançamento é feito por um sistema de bombeamento. As principais vantagens do concreto bombeado são: pode-se atingir pontos de difícil acesso ou a longas distâncias, como, 1.400 m horizontalmente ou 430 m verticalmente; grandes velocidades de lançamento, podendo chegar até a 130 m³ por hora; a tubulação ocupa pouco espaço e pode ser facilmente ampliada; e, o lançamento pode ser feito de forma contínua (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

O sistema de bombeamento consiste basicamente de um coxo (ou moega), no qual o concreto é descarregado do caminhão-betoneira, uma bomba de concreto (que será abordada a seguir) e tubos através dos quais o concreto é bombeado.

As bombas de concreto são classificadas em três tipos:

1) Estacionária:

O equipamento deve ser acoplado a um caminhão ou carreta para ser locomovido e os tubos de lançamento devem ser instalados no local da concretagem, de acordo com a distância entre o caminhão-betoneira e o ponto de descarga;

2) Auto-bomba:

O equipamento é montado sobre um caminhão e os tubos de lançamento devem ser instalados no local da concretagem, de acordo com a distância entre o caminhão-betoneira e o ponto de descarga;

3) Auto-bomba com mastro de distribuição:

O equipamento é montado sobre um caminhão e é dotado de uma lança retrátil que alcança longas distâncias horizontais e verticais.

Quanto ao sistema de bombeamento, tem-se (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990):

1) Válvulas múltiplas ou barras corredeiras:

Consistem em quatro pistões hidráulicos, que acionam quatro pás conjugadas ou duas barras corredeiras, conhecidas como comportas ou gavetas (Figura 12);

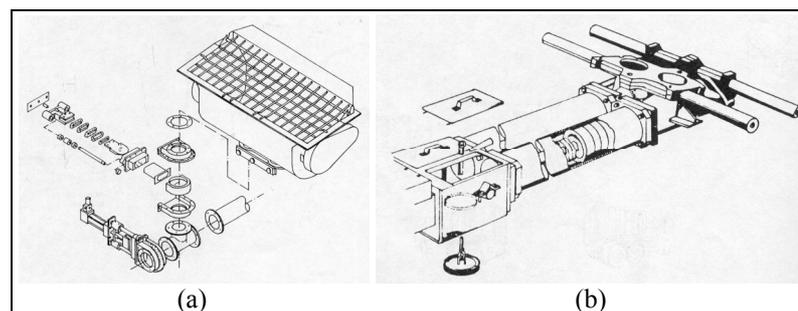


Figura 12 – (a) Válvulas múltiplas; (b) válvulas múltiplas – barras corredeiras (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).

2) Válvula tipo borboleta ou Flaper:

Os pistões de transporte aspiram o concreto que se encontra no coxo para o cilindro de transporte e é empurrado para a tubulação. Os dois pistões trabalham com movimentos alternados, isto é, enquanto um pistão está aspirando o concreto do coxo, enchendo de concreto o cilindro, o pistão que sai na frente empurra o concreto aspirado no movimento anterior para a tubulação de transporte. As duas comportas estão dispostas de tal forma que o cilindro do pistão que está aspirando permanece ligado com o coxo e isolado da tubulação de transporte. O acionamento dos pistões de empuxe e dos pistões de comando das comportas é feito hidráulicamente, por meio de válvulas de comando, também hidráulicas, que permitem o acionamento sincronizado e automático dos movimentos de aspiração e empuxe (Figura 13);

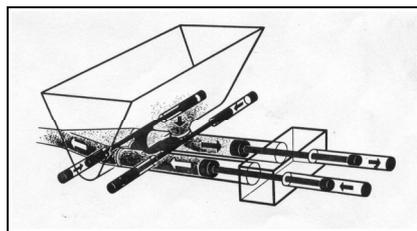


Figura 13 – Válvula tipo borboleta ou Flaper (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).

3) Fluxo direto – sistemas tromba, "S" e Rockschieber:

Consiste em um tubo de redução que se movimenta dentro do coxo, produzindo um fluxo direto (Figura 14);

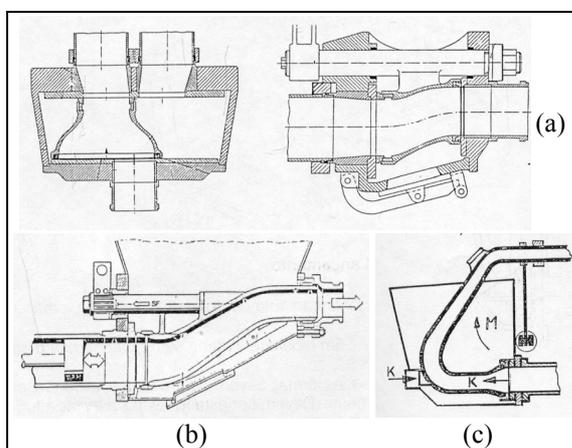


Figura 14 – Válvula de fluxo direto – sistemas: (a) Rockschieber; (b) "S"; (c) tromba (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).

4) Via direta do concreto para o mastro distribuidor (Figura 15):

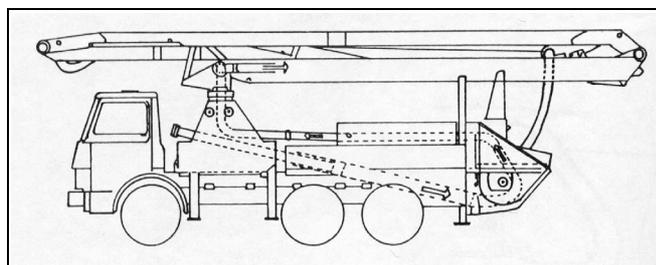


Figura 15 – Via direta para o mastro distribuidor (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).

2.7.4 Processo de Produção

Nos itens a seguir, serão descritas as diferentes etapas do processo de execução do CDC, em uma central de concreto do tipo horizontal, que efetua apenas a dosagem, sendo a mistura do concreto

feita no caminhão-betoneira. O controle do proporcionamento é do tipo manual, com os comandos efetuados por meio de um painel digital. A mistura é feita parcialmente na central com complementação de água na obra.

Será abordado o processo para este tipo de central de concreto no presente trabalho, por ser o mais encontrado na região da Grande Florianópolis, onde está sendo desenvolvido o estudo. Além disso, uma das etapas do programa experimental dessa pesquisa, inclui a execução de concreto em uma central dosadora, e a central selecionada apresenta as características descritas.

Recebimento e armazenamento dos materiais

Pode-se dizer que o início do processo de produção do concreto se dá no recebimento dos seus materiais constituintes. Portanto, esta deve ser uma etapa controlada, pois a qualidade destes materiais é de fundamental importância para que se atinjam as características especificadas para o concreto a ser dosado na central.

De acordo com a NBR 12654:1992, todos os materiais utilizados na fabricação do concreto devem passar por ensaios de qualificação antes de ser iniciado o fornecimento, em função dos requisitos necessários.

Durante o recebimento dos materiais, segundo a mesma norma, devem ser coletadas amostras de todos os lotes recebidos para realização de ensaios de qualificação. A única exceção é a água de amassamento, que deve ser ensaiada para qualificação apenas quando houver indício de alteração da sua qualidade.

No entanto, a execução de ensaios de qualificação em todos os lotes de materiais recebidos em uma concreteira se torna inviável, pois o fluxo de chegada de materiais é muito grande. Portanto, uma solução alternativa, por exemplo, no caso dos agregados é a coleta de amostras em períodos regulares para realização dos ensaios de qualificação e, no caso do cimento, o controle pode ser efetuado através dos laudos técnicos emitidos pelo fabricante mensalmente. Outro cuidado que pode ser tomado com o cimento, é a retirada de uma amostra de cada lote recebido, armazenando-a na central por um período de 2 ou 3 meses, para uma eventual contraprova. Este procedimento se justifica em função do cimento ser a principal matéria-prima do concreto e estar diretamente ligado à sua resistência e durabilidade.

Quanto ao armazenamento dos materiais, segundo a NBR 7212:1984, deve-se fazê-lo em locais ou recipientes apropriados, de modo a não permitir a contaminação por elementos indesejáveis.

Os agregados devem ser estocados separadamente por granulometria e depositados sobre uma base que permita o escoamento da água livre, segundo a NBR 12655:1996. Já o cimento, normalmente, é estocado em silos que devem ser estanques, providos de respiradouros com filtro para reter a poeira, tubulação de carga e descarga e janela para inspeção, como recomenda a mesma norma.

O aditivo, quando fornecido em tonéis, deve permanecer em sua embalagem original até o momento do uso, quando então pode ser transferido para um recipiente estanque e tampado. Antes do carregamento, o aditivo deve ser homogeneizado energeticamente para evitar a decantação dos sólidos. No caso de fornecimento em caminhões-pipa e armazenamento em reservatórios que alimentam diretamente o caminhão-betoneira, o aditivo também deve ser agitado antes do uso (NBR 12655:1996).

A água deve ser convenientemente armazenada em recipiente estanque e tampado, impedindo a contaminação por substâncias estranhas (NBR 12655:1996).

Proporcionamento dos materiais

Um ponto que merece bastante atenção no proporcionamento dos materiais é a aferição das balanças, tanto dos agregados, quanto do cimento, e, ainda, dos materiais cimentícios suplementares, quando utilizados. Este procedimento deve ser periódico e regular. As balanças de pesagem dos agregados e do cimento, de acordo com a NBR 7212:1984, devem ser aferidas a cada 5.000 m³ de concreto produzido. A mesma norma estabelece alguns limites de desvios nas pesagens, para todos os materiais, além de que cimento e agregados devem ser pesados separadamente.

O proporcionamento dos materiais constituintes é comandado pelo balanceiro, que opera o painel de controle da balança. Normalmente, já estão disponíveis na cabine de dosagem os traços mais solicitados pelos clientes, com as devidas correções para vários teores de umidade dos agregados miúdos e para os diversos volumes de concreto possíveis de serem entregues pela central. Assim, o balanceiro procura o traço solicitado, encontra a umidade adotada para a areia e o volume de concreto a ser entregue e comanda a pesagem dos materiais de acordo com a tabela.

Um ponto crucial do proporcionamento é a adição de água. A NBR 7212:1984 recomenda que a água presente na forma de umidade dos agregados seja descontada do traço, porém, em muitas centrais, esse ensaio sequer é realizado, sendo, normalmente, feita apenas uma estimativa visual da umidade dos agregados. O ACI 305R-91 salienta que uma mudança de apenas 0,5% na umidade dos agregados pode alterar o abatimento em 2,5 a 5,0 cm. Este procedimento, somado à não homogeneização dos montes de agregados antes do abastecimento dos silos ou da balança, pode alterar consideravelmente a relação a/c do traço dosado, além de se estar dosando uma quantidade de agregados desconhecida, pois parte desta, na realidade, é água.

Há ainda que ser lembrado que todas as outras formas de adição de água, como a água acrescentada pelo motorista para lavagem externa do caminhão-betoneira, ou para lavagem das facas e do funil após o carregamento dos materiais, ou, ainda, a água deixada no balão do caminhão-betoneira ao final da concretagem anterior, devem ser controladas e descontadas da água de amassamento total, para evitar alterações da relação a/c definida para o traço.

Em geral, não existem regras para a ordem de carregamento dos materiais, pois isso depende das propriedades dos componentes do concreto e do equipamento de mistura. O principal objetivo ao se estabelecer uma seqüência de mistura deve ser a completa mistura de todos os materiais componentes, de forma a se obter uma massa homogênea, com facilidade de produção. A NBR 7212:1984 não especifica uma seqüência de colocação dos materiais no caminhão-betoneira, apenas recomenda que “...deve estar de acordo com as especificações do equipamento ou conforme indicado por experiência”.

Para exemplificar, na central dosadora de concreto onde foi realizado este estudo de caso, os materiais são colocados no caminhão na seguinte ordem, de forma contínua:

- 1) 70% da água corrigida em função da umidade dos agregados miúdos;
- 2) durante o carregamento da água, agregados e cimento devem ser colocados simultaneamente. Não se recomenda a colocação do cimento antes ou depois dos agregados para evitar um contato direto do cimento com as facas (pás) e as paredes internas do balão (cuba), o que dificultaria o processo de mistura;
- 3) logo após, aditivo plastificante, juntamente com 10% da água corrigida em função da umidade do agregado.

O restante da água é adicionado em duas etapas. Uma parcela é adicionada no “ponto de redosagem” ou “força”, que é um local separado do ponto de carregamento dos materiais sólidos, provido de hidrômetro, onde a água é acrescentada até se atingir o abatimento de saída desejado. A maioria das centrais possui esse local próprio para adição final de água com o objetivo de evitar que o processo de proporcionamento dos materiais no ponto de carregamento seja muito demorado e diminua a produtividade. Desta forma, o caminhão-betoneira é carregado com todos os materiais sólidos, o aditivo e a maior parte da água neste local e, em seguida, prossegue para o ponto de redosagem, liberando o ponto de carregamento para outro caminhão-betoneira encostar. No ponto de redosagem, acrescenta-se água e permite-se que o concreto seja misturado por um tempo maior após esta adição, o que não seria possível no ponto de carregamento. A parcela restante de água é adicionada na obra, antes do lançamento do concreto, até alcançar o abatimento especificado.

De acordo com o Comitê 363 do ACI (ACI 363R-92), carregar simultaneamente agregados, cimento e água, é a melhor opção quando não se deseja proceder novamente à mistura dos materiais. Para minimizar os problemas com perda de abatimento, o mesmo Comitê propõe um procedimento alternativo, que envolve a parada de rotação do balão do caminhão após todos os agregados e $\frac{3}{4}$ da água serem carregados e antes do cimento ser carregado, não reiniciando a rotação do balão até se chegar à obra, onde deve ser adicionado o restante da água. Porém, esse não parece ser um procedimento muito eficiente visto que, mesmo sem a agitação do balão, uma parte do cimento estará em contato com a água e iniciará a reação de hidratação, ocorrendo enrijecimento da mistura durante o transporte.

Já a ASTM C 94-94 (apud NEVILLE, 1997) recomenda carregar apenas o cimento e os agregados na central, adicionando a água e misturando completamente apenas no momento do lançamento do concreto. Entretanto, devido ao contato do cimento com os agregados úmidos, pode ocorrer alguma hidratação das partículas de cimento, sendo, portanto, necessário se fixar o tempo máximo de contato entre estes materiais, como, por exemplo, os 90 minutos especificados por esta norma, podendo esse período ser aumentado em alguns casos pela adição de mais cimento ou com o uso de aditivos retardadores.

Este último método foi aplicado recentemente durante a concretagem de um túnel, em São Paulo, e se observou que o cimento já chegava à obra parcialmente hidratado, pelo contato com a umidade dos agregados, não resolvendo os problemas com a perda de abatimento. Para agravar a

situação, a resistência à compressão teve uma queda brusca em relação aos resultados anteriores, o que pode ter ocorrido devido a uma hidratação acelerada das partículas de cimento, que tinham que “disputar” a pequena quantidade de água disponível no balão do caminhão-betoneira.

Outras considerações devem ser feitas quanto ao uso de aditivos superplastificantes, quando se opta pelo seu uso, porém estas não serão aqui expostas uma vez que diversos aspectos sobre os métodos de adição destes aditivos serão discutidos no próximo capítulo deste trabalho.

Mistura e transporte do concreto no caminhão-betoneira

A mistura dos materiais constituintes do concreto se dá no próprio caminhão-betoneira, durante a operação de carregamento dos materiais, no interior de sua cuba, até se obter uma mistura homogênea. Novamente, a NBR 7212:1984 não estabelece velocidade e número de revoluções, bem como tempo de mistura, recomendando apenas que sejam obedecidas as especificações do equipamento.

Geralmente, o processo de mistura ocorre conforme descrito a seguir: no momento do proporcionamento dos materiais, a velocidade de rotação deve ser a de mistura, ou seja, de 14 a 16 rotações por minuto (rpm), por aproximadamente 50 revoluções, ou, no mínimo, 3 minutos; após a colocação de todos os materiais e mistura são feitas as verificações necessárias e, em seguida, o caminhão segue rumo à obra, com o balão girando à velocidade de agitação, ou seja, de 2 a 4 rpm.

Algumas especificações quanto ao número total de revoluções do balão, fixam um limite de 300 revoluções para caminhões-betoneira. Entretanto, esse limite pode ser ultrapassado em casos especiais, como a adição de água ou aditivo superplastificante na obra, para correção do abatimento quando sua perda é muito acentuada. Neste caso, são necessárias mais 30 revoluções, à rotação de mistura, antes da descarga do concreto (ACI 305R-91; ACI 363R-92).

Para a obtenção de um concreto homogêneo, o equipamento de mistura deve estar em boas condições. As condições exigíveis para o equipamento são: balão limpo, facas inteiras e comando e sistema hidráulico do balão em ordem.

O tempo de transporte é contado a partir do início do carregamento até a chegada à obra e não deve exceder 1 hora e 30 minutos, sendo que o tempo total até a descarga de todo o volume do caminhão não deve exceder 2 horas e 30 minutos. Esses prazos podem ser alterados em função

do uso de aditivos retardadores, do tipo de cimento, das condições ambientais, de peculiaridades da obra e de refrigeração, entre outros (NBR 7212:1984).

Alguns estudos mostram que o tempo de duração da mistura afeta algumas características do concreto. Sua temperatura aumenta quanto maior o tempo de mistura e em elevadas temperaturas, o aditivo plastificante tem sua eficiência diminuída quando misturado por longos períodos (RAVINA e SOROKA, 1994; MAHBOUB e CUTSHAW, 2001).

Em contrapartida, alguns benefícios foram encontrados para períodos prolongados de mistura, como o aumento da resistência à compressão (RAVINA e SOROKA, 1994; BASKOCA, OZKUL e ARTIRMA, 1998; KIRCA, TURANLI e ERDOGAN, 2002). Beaufait e Hoadley (1973) encontraram resistências à compressão aos 28 dias iguais ou até maiores para concretos misturados por até três horas do que aquelas obtidas para concretos moldados logo após a mistura inicial.

Gaynor (1963 apud MAHBOUB e CUTSHAW, 2001) afirma que a resistência aumenta 8% por hora de mistura. Segundo Beaufait e Hoadley (1973) e Kirca, Turanli e Erdogan (2002), o quadro se reverte apenas quando se adiciona água para recuperar o abatimento perdido. Neste caso, a queda de resistência pode ser de 15% por hora de mistura (GAYNOR, 1963 apud MAHBOUB e CUTSHAW, 2001).

Entrega do concreto na obra

Ao chegar à obra, deve-se realizar o ensaio de abatimento do tronco de cone - *slump test*, conforme a NBR NM 67:1998. Caso o abatimento não esteja de acordo com o especificado, procede-se a sua correção adicionando-se água ou aditivos plastificante ou superplastificante, de acordo com as especificações de cada central.

O lançamento, na maioria dos casos, é feito com o auxílio de bombas de concreto, por apresentarem uma série de vantagens já expostas no item 2.7.3. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados para que o processo de bombeamento ocorra sem maiores transtornos e o concreto lançado apresente as características adequadas: o concreto não deve ser segregável; o bombeamento deve ser contínuo para evitar que a mistura presente no interior da tubulação dificulte a retomada da operação depois de determinado período; devem ser evitados trechos verticais, com muitas curvas, pois podem reduzir consideravelmente a distância de transporte; e,

a tubulação deve ser limpa de forma adequada ao final da concretagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ao se atingir aproximadamente metade do volume de material do caminhão, são moldados corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão aos 28 dias e demais idades eventualmente especificadas, de acordo com a NBR 5738:2003. Após a moldagem, os corpos-de-prova devem permanecer por no mínimo um dia no mesmo local, sem sofrer perturbações. Após este prazo, os corpos-de-prova são recolhidos e armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio ou em câmara úmida, onde permanecem sendo curados até a data especificada para ruptura. Nesta ocasião, os corpos-de-prova são ensaiados de acordo com a NBR 5739:1994.

Ao término de toda a operação de descarga, as atividades de concretagem com responsabilidade da central, para um determinado caminhão, estão encerradas.

2.7.5 Controle da Qualidade

O concreto é um produto manufaturado e, como tal, ensaios e avaliações específicos de controle são necessários para assegurar um produto de alta qualidade. O comprador do CDC poderá querer verificar se o concreto entregue está de acordo com as especificações. Algumas das propriedades do concreto que são medidas em ensaios básicos de controle da qualidade são resistência à compressão, abatimento do tronco de cone, teor de ar e massa unitária.

São diversos os fatores que podem afetar as propriedades citadas. Segundo Coutinho (1974 apud DAFICO, 1997), esses fatores podem ser divididos em três grandes grupos:

- 1) Variações nas características dos componentes:
 - a) na qualidade do cimento;
 - b) na granulometria dos agregados;
 - c) nos teores de impurezas dos agregados (pó, matéria orgânica...);
 - d) na temperatura dos componentes;
- 2) variações oriundas dos equipamentos e do pessoal que os opera:
 - a) nas quantidades de cimento, agregados, água e aditivos;
 - b) no tempo de mistura;
 - c) na seqüência de carregamento do caminhão-betoneira;

3) erros de amostragem e ensaios:

- a) variações no grau de uniformidade da amostra nas dosagens de cimento e água e nas proporções entre agregado graúdo e argamassa;
- b) variações no grau de compactação dos corpos-de-prova moldados;
- c) problemas na cura: ocorrência de secagem inicial, variações no grau de umidade durante o período de cura, período inferior ao recomendado e variações na temperatura de conservação;
- d) problemas na determinação da tensão de ruptura: irregularidades nos moldes, planicidade das faces em contato com os pratos da prensa, material de capeamento, excentricidade da carga aplicada, aferição da prensa, erros de leitura, etc.

O número de amostras que será tomado para medição dessas propriedades, assim como a frequência de amostragem, deve ser definido caso a caso, dependendo da importância da obra e da disponibilidade de tempo e de pessoal para a execução dos ensaios.

Os resultados obtidos a partir dessas amostras podem ser usados para melhorar a qualidade geral da produção e para otimizar a composição das misturas. Consideráveis informações podem ser obtidas por meio de um programa bem planejado de ensaios, se os resultados forem corretamente interpretados, usando-se formulários de controle da qualidade e a análise estatística correspondente (AÏTCIN, 2000b).

Avaliação da qualidade

Para um sistema de controle da qualidade ser realmente efetivo e econômico, deve estar baseado em métodos estatísticos. Sabe-se que o controle de uma produção de concreto se baseia na resistência à compressão. Entretanto, apenas a média dos resultados de resistência à compressão não seria suficiente para definir e qualificar uma produção. Deve-se considerar a dispersão dos resultados medida através do desvio-padrão ou do coeficiente de variação do processo de produção e ensaio. Os métodos estatísticos se baseiam nas leis da probabilidade cujo pré-requisito é que os resultados dos ensaios de resistência à compressão sigam uma curva de distribuição normal, o que se verifica em concretos convencionais.

A NBR 12655:1996 prescreve o cálculo do desvio-padrão para um mínimo de 20 resultados em um intervalo não inferior a 30 dias, não devendo ser adotado, para cálculos de resistência de dosagem, valor inferior a 2,0 MPa.

Para análise estatística do controle de preparo dos concretos produzidos em central, a NBR 7212:1984 estabelece um procedimento a partir dos resultados de resistência obtidos para diversas resistências características e especifica o número mínimo de exemplares em função do desvio-padrão da amostra. A Tabela 2 apresenta a classificação do controle da produção.

Tabela 2 – Classificação do controle da qualidade do concreto em termos de desvio-padrão (NBR 7212:1984).

Classificação	Desvio-padrão (MPa)	
	Central	Laboratório
Nível 1	< 3,0	< 1,5
Nível 2	3,0 a 4,0	1,5 a 2,0
Nível 3	4,0 a 5,0	2,0 a 2,5
Nível 4	> 5,0	> 2,5

Apesar de não ser previsto em norma, o procedimento ideal para avaliação da qualidade dos concretos produzidos em uma central, por meio do desvio-padrão, consiste na análise por f_{ck} . Desta forma, sabe-se exatamente quais níveis de resistência à compressão necessitam de um controle da qualidade maior e quais já atingiram um patamar satisfatório na variabilidade da produção. Como se sabe, o desvio-padrão é maior quanto maior a resistência à compressão e, por este motivo, concretos com resistências mais altas exigem medidas de controle mais rigorosas.

Alguns autores defendem o coeficiente de variação como um meio mais útil para comparações práticas da dispersão da resistência do concreto. Segundo eles, o coeficiente de variação é um parâmetro mais adequado, pois é menos influenciado pela magnitude das resistências obtidas e é mais útil para comparar os graus de controle para uma larga faixa de níveis de resistência (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000b).

A Tabela 3 apresenta os limites gerais de controle da qualidade para concretos convencionais, em termos de coeficiente de variação, segundo o ACI 214-93 citado por Aïtcin (2000b).

Tabela 3 – Classificação do controle da qualidade do concreto em termos de coeficiente de variação (ACI 214-93 apud AÏTCIN, 2000b).

Classificação	Coeficiente de variação (%)	
	Campo	Laboratório
Excelente	< 8	< 4
Muito bom	8 a 10	4 a 6
Bom	10 a 12	6 a 8
Razoável	12 a 15	8 a 10
Ruim	> 15	> 10

3 ADITIVOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao contrário do que muitos pensam, a idéia de adicionar aditivos ao concreto não é nova. Os pedreiros Romanos costumavam adicionar ovos brancos ou sangue ao concreto, e hoje já se sabe que a hemoglobina é um excelente dispersante das partículas de cimento portland (VENUAT, 1984 apud AÍTCIN, 2000b).

Não há dúvida que o uso de aditivos proporcionou um dos mais revolucionários desenvolvimentos tecnológicos do concreto (PAGÉ, NKINAMUBANZI e AÍTCIN, 2003). Atualmente, é difícil se pensar em produzi-lo sem a utilização destes materiais, uma vez que proporcionam excelentes melhorias nas principais propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto endurecido. Diante da alta resistência e durabilidade requeridas para os concretos atuais, bastante pronunciada pelo CAD, o uso de aditivos torna-se extremamente necessário, promovendo uma importante propagação desta indústria.

Ainda que os aditivos não sejam materiais baratos, seu emprego nem sempre representa um maior custo de produção do concreto, pois podem promover economias, tais como menor custo de adensamento, possibilidade de redução do teor de cimento e aumento da vida útil (NEVILLE, 1997).

Para Hanehara e Yamada (1999) a importância dos aditivos tem crescido a cada ano. No caso do CAR, por exemplo, a contribuição do desenvolvimento e melhorias dos aditivos é muito superior à do cimento; conseqüentemente, aditivos novos e avançados operam o papel principal no concreto ao invés do cimento. Como decorrência do considerável aumento na utilização desses aditivos em CAR, o custo desse material pode, em alguns casos, ser comparável ao do cimento.

Mehta e Monteiro (1994) expressam em números o grande e acelerado avanço obtido na indústria de aditivos: nos 20 anos seguidos ao início do desenvolvimento destes materiais, nos anos 40, aproximadamente 275 produtos diferentes foram comercializados na Inglaterra e 340 na Alemanha. Os mesmos autores comentam que, nos dias de hoje, a maior parte do concreto produzido em diversos países contém um ou mais tipos de aditivos, chegando a 88% do concreto lançado no Canadá, 85% na Austrália e 71% nos Estados Unidos.

No Brasil, ainda observa-se uma grande resistência à utilização de aditivos por parte dos produtores de concreto. Algumas razões para essa lenta disseminação do uso de aditivos no país são: elevado custo de alguns tipos; grande variedade de tipos de cimento disponíveis no mercado, o que exerce um papel fundamental no desempenho dos aditivos quando estes são combinados; necessidade da realização de testes preliminares para verificar seu desempenho nas condições de produção; além da prudência natural em se adotarem “novidades” que podem interferir na principal característica do concreto, isto é, sua resistência mecânica.

Apesar de todos esses fatores limitantes, já se percebe um crescimento na utilização de aditivos, principalmente os plastificantes e superplastificantes, essenciais na execução do CAR e do CAD.

3.2 DEFINIÇÃO

A NBR 11768:1992 define os aditivos como “produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

A ação dos aditivos é controlada pelas complexas leis da física, da química e da termodinâmica e, segundo Dodson (1990 apud AÍTCIN, 2000), existem apenas quatro tipos de aditivos químicos, classificados de acordo com sua ação: os que promovem a dispersão das partículas de cimento, os que modificam a cinética da hidratação do cimento, os que reagem com um dos produtos da hidratação e os que têm apenas uma ação “física”.

De acordo com o Comitê 212 do ACI (ACI 212.3R-91), algumas das principais razões para a utilização de aditivos em concreto são as modificações obtidas no estado fresco, tais como maior trabalhabilidade sem alteração da quantidade de água ou menor quantidade de água para uma determinada trabalhabilidade, menor ou maior tempo de início de pega, menor segregação, melhor bombeabilidade, entre outras, e no estado endurecido, tais como retardo ou menor evolução do calor de hidratação, maior desenvolvimento de resistência a baixas idades, menor permeabilidade, inibição da corrosão, entre outras.

3.3 CLASSIFICAÇÃO

Os aditivos podem ser orgânicos ou inorgânicos, mas a natureza química é sua principal característica. A classificação é feita com base na sua principal função no concreto, pois, algumas vezes, os aditivos apresentam mais de uma função.

A NBR 11768:1992 classifica os aditivos para concreto e argamassa da seguinte forma:

- 1) P – plastificante;
- 2) R – retardador;
- 3) A – acelerador;
- 4) PR – plastificante retardador;
- 5) PA – plastificante acelerador;
- 6) IAR – incorporador de ar;
- 7) SP – superplastificante;
- 8) SPR – superplastificante retardador;
- 9) SPA – superplastificante acelerador.

A norma brasileira diferencia os aditivos plastificante e superplastificante por meio da redução possibilitada de água de amassamento para se atingir determinado abatimento, sendo de, no mínimo, 6% no primeiro caso e, no mínimo, 12% no segundo caso.

A ASTM C 494-92 divide os produtos químicos redutores de água e modificadores de pega nos seguintes tipos:

- 1) Tipo A – redutor de água;
- 2) tipo B – retardador;
- 3) tipo C – acelerador;
- 4) tipo D – redutor de água e retardador;
- 5) tipo E – redutor de água e acelerador;
- 6) tipo F – redutor de água de alta eficiência;
- 7) tipo G – redutor de água de alta eficiência e retardador.

A diferença entre os redutores de água normais (Tipos A, D e E) e os redutores de alta eficiência (Tipos F e G) é que, comparados a uma mistura de concreto de referência com uma dada consistência, o primeiro deve ser capaz de promover uma redução mínima no consumo de água de 5% e o segundo, de 12%.

Os materiais normalmente utilizados como aditivos redutores de água ou controladores de pega são distribuídos em oito classes principais, podendo ser usados isoladamente ou em combinação com outras substâncias orgânicas ou inorgânicas, ativas ou inertes (ACI 212.3R-91):

- 1) Ácidos lignossulfônicos e seus sais;
- 2) modificações e derivações dos ácidos lignossulfônicos e seus sais;
- 3) ácidos hidroxí-carboxílicos e seus sais;
- 4) modificações e derivações dos ácidos hidroxí-carboxílicos e seus sais;
- 5) sais dos policondensados sulfonados de melamina-formaldeído;
- 6) sais dos policondensados de alto peso molecular de ácido sulfônico naftaleno;
- 7) compostos condensados de naftaleno ou melamina com outros materiais redutores de água ou controladores de pega, ou ambos;
- 8) outros materiais, incluindo: (a) materiais inorgânicos, como sais de zinco, boratos, fosfatos, cloretos; (b) aminas e seus derivados; (c) carboidratos, polisacarídeos, e ácidos de açúcar; e (d) certos compostos poliméricos, como éter-celulose, derivações de melamina, derivações de naftaleno, silicones e hidrocarbonos sulfonados.

3.4 ADITIVOS PLASTIFICANTES

É conhecido que as propriedades mecânicas do concreto estão diretamente relacionadas com a porosidade (porosidade total e estrutura de poros) da matriz de cimento. Quando esses poros são conectados, a permeabilidade da água e outras substâncias no interior do concreto é muito facilitada, reduzindo a durabilidade do material.

Para a hidratação do cimento portland se completar são necessários aproximadamente 30% em massa de água (JOLICOEUR et al, 2003). Toda a água que excede esse teor resultará em correspondente porosidade na matriz do concreto. Portanto, a importância do uso de aditivos redutores de água torna-se evidente, uma vez que permite o alcance da trabalhabilidade desejada, sem alterar a porosidade da matriz do concreto pelo excesso de água.

3.4.1 Definição

Os primeiros materiais utilizados como redutores de água foram os polímeros derivados da lignina ou lignossulfonatos. São chamados plastificantes e apresentam uma capacidade de

redução de água de 5 a 12% e um baixo custo por ser derivado de um sub-produto da indústria da celulose e papel. Alguns aditivos plastificantes também são fabricados a partir de ácidos hidroxicarboxílicos e gluconatos, porém em menor escala. A Figura 16 ilustra esquematicamente a estrutura química do gluconato e do lignossulfonato (JOLICOEUR et al, 2003).

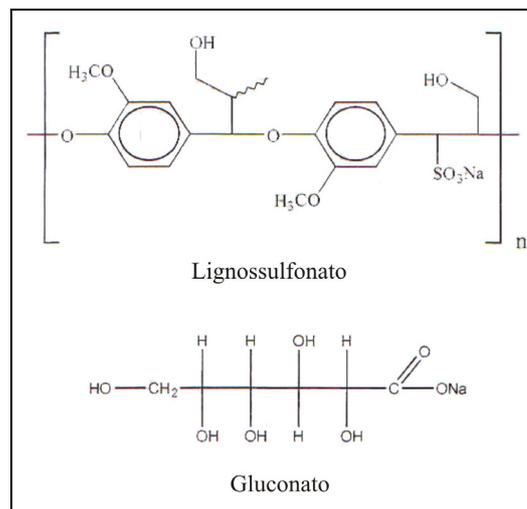


Figura 16 – Ilustração esquemática dos redutores de água à base de lignossulfonato e gluconato (JOLICOEUR et al, 2003).

Os aditivos plastificantes são polímeros orgânicos usados para: produzir concretos com maior resistência por meio da redução no teor de água; obter uma resistência específica para um consumo de cimento menor; ou, aumentar o abatimento sem alterar o conteúdo de água. São muito úteis quando o lançamento é feito por bomba de concreto (ACI 212.3R-91).

Normalmente, os plastificantes são comercializados na forma líquida com teor de sólidos variando de 30 a 40%, com o intuito de facilitar e tornar mais precisa a dosagem automática do aditivo nas centrais de concreto (COLLEPARDI, M., 1998).

Devido a alguns efeitos colaterais, que serão relatados no item 3.4.3, como retardo de pega e incorporação de ar, a dosagem destes aditivos deve ser limitada. Geralmente, na literatura internacional a dosagem ótima gira em torno de 0,2 a 0,5% de material sólido em relação à massa de cimento. Já os fabricantes nacionais recomendam esta mesma faixa de dosagem do aditivo, porém de material líquido ao invés de material sólido. A utilização dos aditivos disponíveis no mercado brasileiro nos teores citados em material sólido, certamente provocaria um retardo de pega do concreto, o que poderia ocorrer em virtude de uma qualidade inferior dos aditivos nacionais (maior quantidade de impurezas).

Segundo os fabricantes, alguns aditivos plastificantes podem ter como base química lignossulfonatos com menor teor de impurezas ou, ainda, ter em sua formulação uma combinação destes sub-produtos com outros agentes químicos. Estes aditivos são chamados de polifuncionais e sua base química, geralmente, não é padronizada e nem muito clara. São classificados como de médio desempenho, ficando entre os plastificantes convencionais e os superplastificantes. Este desempenho é alcançado em função de se poder utilizar um teor maior de aditivo, sem provocar retardo de pega e incorporação de ar excessivos, uma vez que não possui tantas impurezas.

3.4.2 Modo de Ação

As partículas de cimento têm uma forte tendência a flocularem quando misturadas com água. Essa tendência decorre de diversos tipos de interações: forças de van der Waals entre as partículas, interações eletrostáticas entre partes carregadas com cargas opostas e fortes interações envolvendo moléculas de água ou hidratos (AÏTCIN et al, 1994).

Os principais componentes ativos dos plastificantes são tensoativos que se concentram na interface entre duas fases não miscíveis, alterando as forças físico-químicas atuantes nessa interface. Essas moléculas se adsorvem nas superfícies dos grãos de cimento, conferindo a eles uma carga elétrica negativa, pela presença dos grupos SO_3^- . Esta carga gera uma repulsão eletrostática entre partículas vizinhas de cimento, promovendo defloculação e dispersão destas partículas (JOLICOEUR e SIMARD, 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; COLLEPARDI, M., 2003).

Quando as partículas de cimento se encontram em estado floculado, existem partes que, por estarem em contato, não estão disponíveis para serem hidratadas, além de que parte da água de mistura fica aprisionada no interior desses flocos. Como resultado da ação dispersiva e defloculante do aditivo plastificante, se tem maior superfície livre de cimento e maior quantidade de água disponível para hidratação (AÏTCIN, 1992 apud SPONHOLZ, 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998).

Além disso, substâncias tensoativas reduzem a tensão superficial da água, contribuindo para a fluidez da mistura (AÏTCIN et al, 1994; RAMACHANDRAN et al, 1998). Na Figura 17 pode-se visualizar as estruturas floculada e dispersa da pasta de cimento.

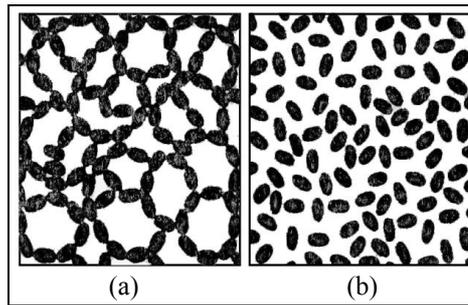


Figura 17 - Estrutura floculada da pasta de cimento (a) e das partículas dispersas (b) (AÏTCIN et al, 1994).

A ação do aditivo plastificante tem, também, algum efeito na dispersão do ar na água, o que pode levar a um efeito secundário de incorporação de ar, principalmente os que têm lignossulfonato como agente (NEVILLE, 1997; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; COLLEPARDI, M., 2003).

O período de eficiência dos plastificantes é limitado, pois logo após o início das reações de hidratação começam a se formar grandes quantidades de produtos hidratados, tais como etringita, e estes hidratos aprisionam a pequena quantidade de aditivo presente no sistema. Assim, a temperatura ambiente, a finura e a composição do cimento, principalmente, os teores de C_3A , SO_3 e álcalis, que comandam a evolução da formação de etringita, exercem influência sobre as interações cimento-aditivo. Em geral, a eficiência do aditivo é maior quando usado com cimento com baixo teor de álcalis ou baixo teor de C_3A (COLLEPARDI, M., 1984).

Para se determinar qual o tipo e o teor ideal de aditivo necessários para se otimizarem as propriedades do concreto, devem ser feitas misturas experimentais com os materiais que serão efetivamente utilizados na obra uma vez que a eficiência do aditivo está diretamente relacionada ao tipo e teor de cimento, teor de água, tipo e teor de agregado, presença de materiais cimentícios suplementares e temperatura (MAILVAGANAM, 1999).

3.4.3 Efeitos no Concreto

Os efeitos dos aditivos plastificantes na redução do teor de água, na melhora da trabalhabilidade e na combinação destes dois efeitos já foram comentados.

Os lignossulfonatos e os ácidos hidroxí-carboxílicos, em dosagens elevadas, podem retardar o tempo de pega em 1 a 3 horas quando usados em temperaturas entre 18 e 38°C (ACI 212.3R-91). Esse efeito decorre da variação na composição destes aditivos, principalmente dos

lignossulfonatos, que, por serem sub-produtos, se torna difícil a remoção completa de açúcares e outras impurezas e estes compostos interferem no processo de hidratação do cimento, inibindo a nucleação e o crescimento dos produtos de hidratação (JOLICOEUR et al, 2003).

Outro efeito, também difícil de ser evitado pelo mesmo motivo, é a incorporação de ar que, normalmente, está entre 2 e 6%, podendo ser ainda maior em alguns casos (ACI 212.3R-91). Esse ar incorporado consiste de grandes bolhas de ar instáveis que podem, por um lado, reduzir a resistência do concreto, mas, por outro, aumentar a trabalhabilidade. Para conter este problema, muitos aditivos redutores de água à base de lignina contêm agentes de-aerantes em sua formulação (COLLEPARDI, M., 1984).

Comparando-se concretos com e sem aditivos plastificantes, com mesmo abatimento e mesmo teor de ar, observa-se que o concreto que contém aditivo geralmente é menos segregável. Durante a operação de adensamento, utilizando-se vibradores, nota-se que o concreto com aditivo tem melhor fluidez, facilitando a operação. A exsudação também é reduzida, em parte devido à incorporação de ar (ACI 212.3R-91; COLLEPARDI, M., 1984).

O aditivo plastificante retarda o momento da rápida evolução de calor da hidratação do cimento. Ainda, se o uso de aditivo permite que o consumo de cimento seja reduzido, há, portanto, uma redução do calor de hidratação gerado (COLLEPARDI, M., 1984).

A taxa de perda de abatimento pode não ser reduzida e, geralmente, é acelerada. Uma possível explicação dada por Ranc (1990 apud AİTCIN et al, 1994) e por Hanehara e Yamada (1999) consiste na influência que o aditivo exerce na disponibilidade de íons Ca^{2+} , OH^- e SO_4^{2-} , alterando o processo de hidratação, especialmente na fase inicial, provocando um enrijecimento mais rápido que o normal. Meyer e Perenchio (1979) e Mailvaganam (1999) explicam este efeito como uma alteração na taxa de reação entre o aluminato tricálcico e o sulfato.

Como a dispersão dos grãos de cimento expõe maior superfície à hidratação, a velocidade de reação é acelerada nas primeiras idades e existe alteração da natureza dos produtos hidratados (COLLEPARDI, M., 1984; MAILVAGANAM, 1999). Devido à melhoria do processo de hidratação, há um aumento da resistência quando se utiliza aditivo plastificante, independente da melhora obtida pela redução da relação a/c (ACI 212.3R-91). Segundo Blick, Peterson e Winter (1974) citados por Aİtcin (2000b), é possível produzir concretos com resistência à compressão de cerca de 50 a 60 MPa usando-se aditivo à base de lignossulfonatos.

3.4.4 Método de Adição

Hanehara e Yamada (1999) e Uchikawa, Sawaki e Hanehara (1995) afirmam que qualquer aditivo é menos adsorvido quando adicionado com atraso em relação ao contato do cimento com a água e assim promove maior fluidez da mistura. A mesma afirmação é feita por Jiang e Roy (1997).

Neville (1997) diz que, para aditivo plastificante, um atraso de apenas 29 segundos após o contato entre a água e o cimento melhora seu desempenho. Já Meyer e Perenchio (1979) sugerem um atraso de 1 ou 2 minutos para adição do aditivo. Collepardi, M. (1984) diz que bons resultados podem ser obtidos com a adição do aditivo ao final do período de mistura do cimento, agregados e água, ou, caso este procedimento seja difícil de se adotar na prática, a adição após 30 segundos também é uma boa opção.

No caso do CDC, usualmente o aditivo plastificante é completamente adicionado na central, nos minutos intermediários do processo de carregamento dos materiais, correspondendo, por exemplo, à aproximadamente 3 a 4 minutos após o contato inicial do cimento com a água na central em estudo.

3.5 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

3.5.1 Definição

Os objetivos do uso de aditivos superplastificantes são basicamente os mesmos dos plastificantes. De acordo com Collepardi, M. (1998), a distinção entre os aditivos plastificantes e os superplastificantes se dá muito mais na intensidade do que no tipo de performance. Enquanto que, para uma determinada mistura, o primeiro promove um aumento no abatimento de 50 a 70 mm, o segundo pode aumentá-lo em 150 a 200 mm. Além disso, a redução de água alcançada com os superplastificantes pode chegar a 30%.

O mesmo autor comenta ainda que, do ponto de vista prático, a principal diferença entre os dois aditivos redutores de água está na dosagem ótima que, no caso dos superplastificantes, está, geralmente, entre 1 e 2% de sólidos em relação à massa de cimento. Essa é a grande vantagem destes aditivos em relação aos plastificantes, cujos teores não ultrapassam 0,5% de sólidos em

relação à massa de cimento devido aos efeitos secundários indesejáveis citados anteriormente, como retardo de pega e incorporação de ar. Já os superplastificantes, por serem produtos sintéticos, feitos de matérias-primas que não contêm açúcares ou impurezas, não apresentam estes efeitos.

O primeiro aditivo superplastificante foi patenteado já nos anos 30, no Japão, quando descobriu-se que moléculas do policondensado de formaldeído naftaleno sulfonados eram excelentes agentes dispersantes do cimento. Todavia, naquela época, não havia muito interesse nestes compostos, uma vez que as resistências requeridas eram baixas e podia-se perfeitamente ajustar a trabalhabilidade com água. Além disso, o cimento tinha um custo muito baixo, não havendo, portanto, incentivo econômico para a redução do seu consumo no concreto. Nos anos seguintes, a indústria do concreto se contentou com os benefícios limitados dos aditivos plastificantes, como os lignossulfonatos (AÏTCIN et al, 1994; AÏTCIN, 2000b).

Apenas nos anos 60, as vantagens dos polímeros sintéticos começaram a ser exploradas, quando, quase que simultaneamente, foi redescoberto o naftaleno no Japão e na Alemanha foi desenvolvida e patenteada uma nova família de polímeros sintéticos, baseada em policondensados de formaldeído melamina sulfonados (AÏTCIN et al, 1994; AÏTCIN, 2000b).

Estes dois polímeros, usualmente chamados naftaleno (N) e melamina (M), são, atualmente, os mais utilizados como superplastificantes, com destaque para o primeiro. Também são utilizados superplastificantes à base de lignossulfonatos modificados, isto é, lignossulfonatos dos quais foram retirados os açúcares, reduzindo, assim, os efeitos retardantes da pega (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984). Entretanto, uma das maiores dificuldades destes superplastificantes de primeira geração é a duração muito curta de sua ação fluidificante: em torno de 15 a 30 minutos apenas (YOUNG, 1983 e RAMACHANDRAN, BEAUDOIN, e SHILUA, 1989 apud AÏTCIN, 2000b).

Nos últimos anos, alguns polímeros acrílicos (PA) também passaram a ser utilizados com a grande vantagem de retardarem a perda de abatimento, possibilitando sua manutenção por períodos de 45 a 90 minutos (AÏTCIN, 2000b). O sub-grupo principal destes polímeros engloba uma variedade de moléculas denominadas ésteres poliácridatos ou, simplesmente, poliácridatos. Estes polímeros possuem massa molecular significativamente maior do que os sulfonados (JOLICOEUR et al, 2003). A Figura 18 ilustra esquematicamente a estrutura química das principais moléculas de polímeros sulfonados e acrílicos.

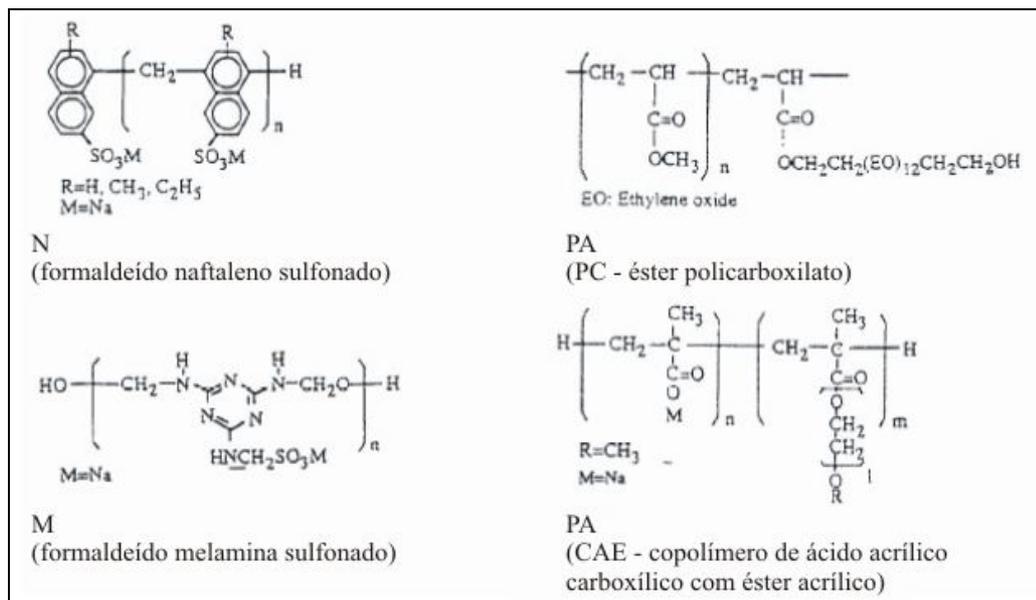


Figura 18 – Estrutura química dos polímeros: naftaleno (N), melamina (M) e poliacrilato (PA) (COLLEPARDI, M., 2003)

Estes aditivos, assim com os plastificantes, são comercializados em forma de pó ou em solução aquosa, entretanto, o segundo tipo é o mais indicado. O teor de sólidos destes aditivos em forma líquida pode estar entre 20 e 40%. Quando da utilização de aditivo em pó, é recomendável sua diluição em água antes de adicioná-lo ao concreto para facilitar sua dispersão.

Um fator importante a ser observado em relação ao uso de aditivos superplastificantes é a dosagem a ser empregada. Através de ensaios de laboratório, pode-se determinar a máxima dosagem a partir da qual não se observam melhorias na fluidez da pasta de cimento, sendo este teor conhecido como ponto de saturação. Acima deste ponto, podem-se encontrar efeitos negativos, como perda de fluidez com o tempo, retardo de pega e endurecimento e segregação excessiva (RAMACHANDRAN et al, 1998).

Hover (1998) expressa a importância de se usar a menor dosagem possível de aditivo, justificando a vantagem dos superplastificantes em relação aos redutores de água de menor eficiência, já que estes exigem uma quantidade maior para garantir melhor trabalhabilidade.

3.5.2 Modo de Ação

As interações dos aditivos superplastificantes com sistemas cimentícios podem ser físicas ou químicas. O fenômeno físico compreende as interações que podem ser observadas em qualquer mistura aquosa de materiais relativamente inertes (SiO₂, CaCO₃, etc.). Estas interações incluem

adsorção física, repulsão eletrostática, repulsão estérica e outras. As interações químicas são aquelas que dependem da natureza reativa das partículas de cimento. Incluem adsorção preferencial, adsorção química e reações químicas para formar novas fases hidratadas (RAMACHANDRAN et al, 1998).

Interação física

Os mecanismos de dispersão dos superplastificantes podem ser oriundos basicamente de dois efeitos:

- 1) Repulsão eletrostática;
- 2) repulsão estérica.

Os superplastificantes sulfonados, como naftaleno, melamina e lignossulfonato modificado, promovem a dispersão e a defloculação das partículas de cimento pelo mesmo efeito de repulsão eletrostática descrito para os plastificantes (JIANG e ROY, 1997; COLLEPARDI, S. et al, 1999; COLLEPARDI, M., 2003).

Os superplastificantes à base de polímeros acrílicos não necessariamente melhoram a fluidez da mistura pelo efeito de repulsão eletrostática. Collepardi, M. (1998) cita diversos estudos (COLLEPARDI, M. et al, 1993; COLLEPARDI, M., 1994; UCHIKAWA, 1995; TANAKA, 1996) que mostram que, apesar do menor potencial zeta, isto é, medida diretamente relacionada à repulsão eletrostática (Figura 19.a), a adsorção das moléculas de polímero acrílico é maior que as moléculas de naftaleno (Figura 19.b). A Figura 19.c mostra os resultados de ensaio na mesa de consistência (*flow-table*), como percentuais de uma argamassa de referência sem aditivo, para argamassas com naftaleno e um polímero acrílico. Percebe-se que, para uma mesma dosagem, a fluidez promovida pelo segundo aditivo é consideravelmente maior que a promovida pelo primeiro.

Conclui-se que, no caso dos aditivos à base de polímero acrílico, a dispersão dos grandes aglomerados de partículas de cimento decorre principalmente da adsorção do polímero por si só e não apenas por repulsão eletrostática (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

Este efeito, chamado de barreira estérica, é produzido pela presença de longas ramificações de cadeias poliméricas, que se adsorvem nas superfícies de partículas cimentícias, impedindo que estas se aglomerem. Este mecanismo é confirmado pelo número relativamente menor de grupos

aniônicos negativos (COO^-) no copolímero de ácido carboxílico em comparação aos presentes no naftaleno e na melamina (SO^{3-}) (COLLEPARDI, S. et al, 1999).

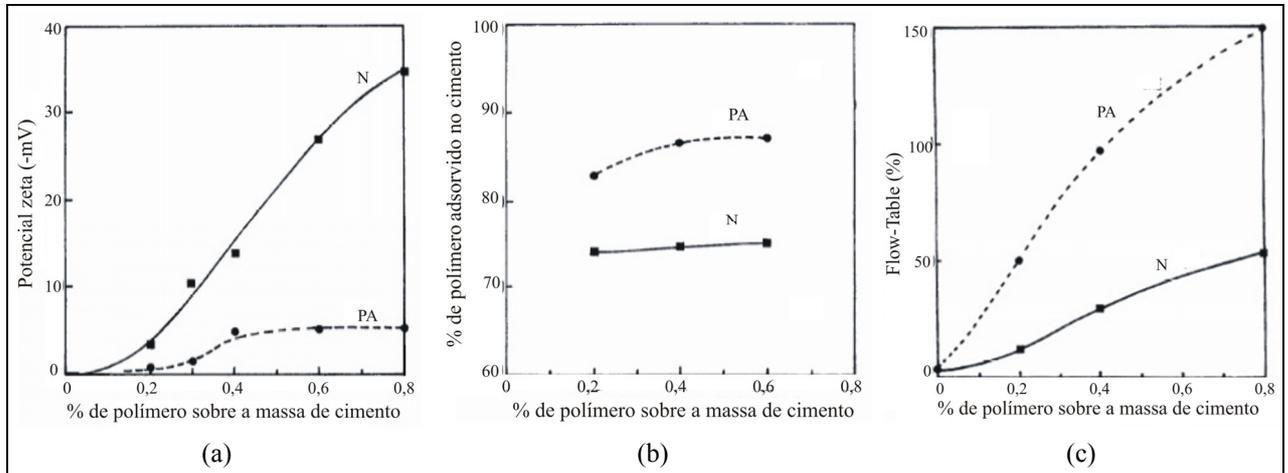


Figura 19 – (a) Potencial zeta de pastas de cimento com polímero acrílico (PA) e polímero sulfonado (N) em função da sua dosagem; (b) Adsorção de PA e N na superfície do cimento em função da dosagem destes polímeros; (c) Influência dos polímeros PA e N na fluidez de argamassas de cimento com $a/c = 0,4$ (COLLEPARDI, M., 1998).

Uchikawa, Hanehara e Sawaki (1997) e Uchikawa, Hanehara, Sawaki e Onoda (1997) afirmam que a repulsão estérica é a força mais importante contribuindo para a fluidez da pasta de cimento, no caso de polímeros acrílicos, e que sua magnitude está diretamente relacionada à estrutura molecular do aditivo.

A Figura 20 ilustra esquematicamente o efeito de repulsão eletrostática e um polímero sulfonado e a Figura 21, o efeito de repulsão estérica e um polímero acrílico.

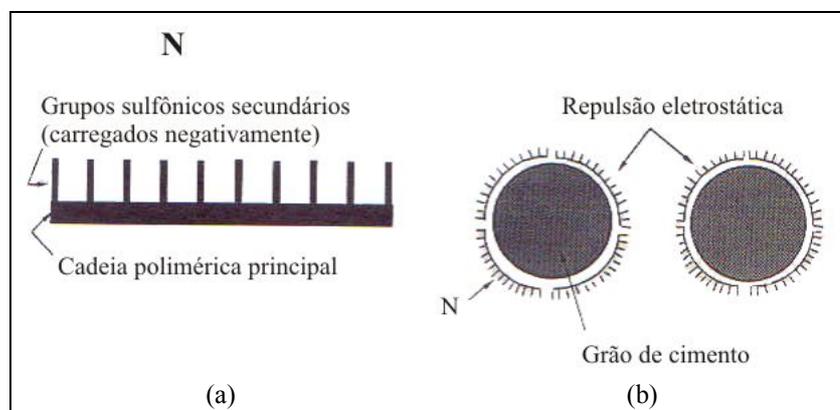


Figura 20 – Representação esquemática de: (a) efeito de repulsão eletrostática; (b) polímero sulfonado (naftaleno - N) e seu efeito eletrostático na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).

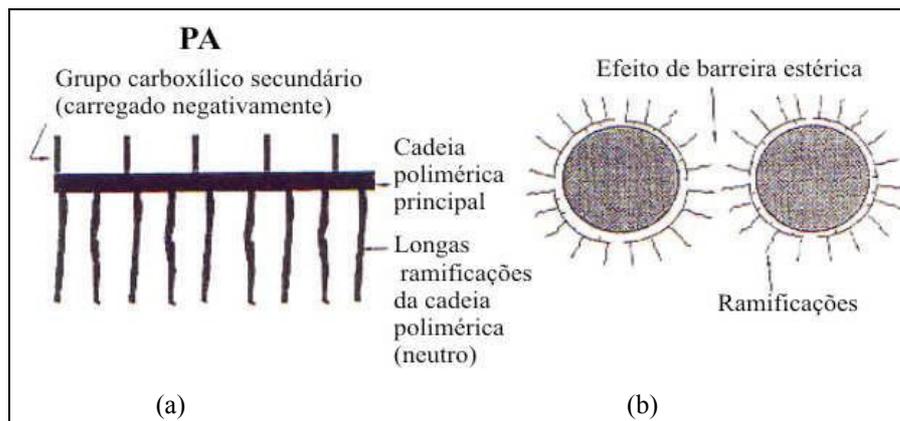


Figura 21 – Representação esquemática de: (a) efeito de repulsão estérica; (b) polímero acrílico (PA) e seu efeito estérico na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).

Existem ainda outros mecanismos que explicam os efeitos de dispersão e fluidificação promovidos pelos superplastificantes, como redução da tensão superficial da água, formação de um filme lubrificante entre estes grãos de cimento, liberação da água presa nos flocos de cimento, entre outros (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; JOLICOEUR e SIMARD, 1998). Entretanto, os dois efeitos explicados anteriormente são, indubitavelmente, dominantes.

Interação química

Devido à alta reatividade das diversas fases minerais do cimento, os aditivos podem participar ou interferir com fenômenos químicos distintos, como mudanças na composição da solução aquosa e na morfologia dos hidratos formados (BONEN e SARKAR, 1995; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984; RONCERO, 2000).

Primeiramente, reações em superfícies específicas podem ocorrer em partes mais reativas da superfície da partícula de cimento. As moléculas de superplastificante são fixadas preferencialmente (adsorção preferencial) pela fase intersticial (C_3A e C_4AF), embora também possam ser adsorvidas pelo C_3S e C_2S em menor proporção. Sabe-se que o C_3A é o primeiro composto do cimento a se hidratar, tendo sua reação controlada pela adição de sulfato de cálcio. Assim, os superplastificantes sulfonados irão competir com os íons SO_4^{2-} na hidratação do C_3A (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; MAILVAGANAM, 1999; RONCERO, 2000).

Para se obter a fluidez esperada, bem como sua manutenção, é interessante que uma parte dos íons não seja adsorvida, ou seja, permaneça livre na solução intersticial da pasta de cimento. Se ocorrer a fixação completa do aditivo, é porque o sulfato de cálcio adicionado ao cimento não libera íons sulfato na velocidade necessária para reagir com o C₃A. Este fato demonstra a influência do superplastificante na taxa de hidratação do cimento no estágio inicial do processo (NEVILLE, 1997; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; HANEHARA e YAMADA, 1999; JIANG, KIM e AİTCIN, 1999; KIM et al, 2000;).

Outra interação é a formação de íons complexos entre o superplastificante e o íon Ca²⁺ que leva a uma redução da concentração de Ca²⁺ na solução (UCHIKAWA et al, 1992; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998). Assim, há uma inibição da nucleação homogênea, necessitando maiores níveis de supersaturação da fase em solução antes que os produtos de hidratação comecem a se precipitar, o que contribui para o retardo da pega e, conseqüentemente, para a retenção da fluidez. Quando os núcleos formados conseguem atingir o tamanho crítico para formação dos hidratos, as moléculas poliméricas de superplastificante podem alterar ainda a taxa de crescimento e a morfologia dos produtos finais (JOLICOEUR e SIMARD, 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998; MAILVAGANAM, 1999).

3.5.3 Efeitos no Concreto

Normalmente em concretos, onde o aditivo superplastificante foi utilizado como redutor de água, se observa redução de segregação e exsudação, exceto quando são utilizadas dosagens excessivas de aditivo (YAMAMOTO e KOBAYASHI, 1986; ACI 214.4R-93; MAILVAGANAM, 1999).

O teor de ar incorporado em misturas com superplastificante é, geralmente, maior que em concretos sem o aditivo, mas a maioria deste ar é perdida durante as operações de transporte e lançamento (RAMACHANDRAN et al, 1998; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984).

Geralmente, os superplastificantes retardam os tempos de início e fim de pega (JIANG e ROY, 1997; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984; MAILVAGANAM, 1999; JOLICOEUR et al, 2003). A norma ASTM C 494-92 permite que o período de pega seja antecipado em 1 hora ou atrasado em 1 hora e meia em relação à mistura de referência, tanto no início, quanto no fim de

pega. Ramachandran et al (1998) afirmam que a intensidade do retardo depende do tipo e da dosagem do aditivo, do tipo de cimento e das temperaturas do concreto e do meio ambiente.

Um dos maiores benefícios do uso de superplastificantes em concreto é a melhora das suas características de fluidez. No entanto, o aumento no abatimento alcançado inicialmente é perdido em um período relativamente curto, aproximadamente 30 a 60 minutos e, em seguida, a consistência da mistura volta à original (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984; COLLEPARDI, M., 2003). Collepardi, M. (2003) comenta que o ideal seria uma mistura de concreto sem perda de abatimento por, pelo menos, 1 hora.

Em geral, a perda de abatimento é maior em misturas contendo superplastificantes tradicionais, à base de naftaleno e melamina, do que em misturas correspondentes, sem aditivos (MEYER e PERENCHIO, 1979; BONEN e SARKAR, 1995; CHAN, FENG e TSANG, 1996; COLLEPARDI, M., 2003), como mostra a Figura 22.

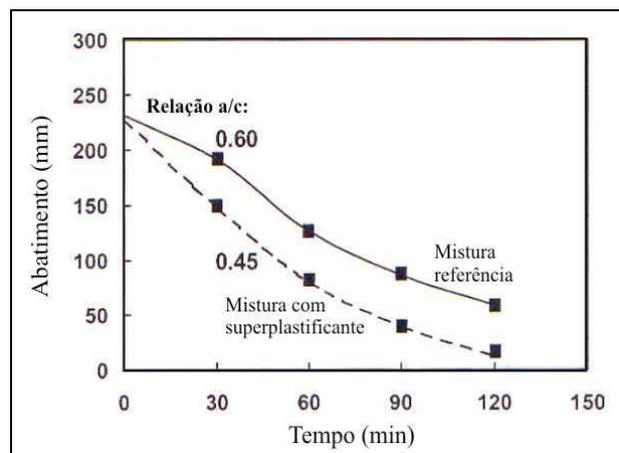


Figura 22 – Perda de abatimento a 20°C em misturas sem e com superplastificante, para o mesmo abatimento inicial. Superplastificante: 0,4% de sólidos de naftaleno em relação à massa de cimento (COLLEPARDI, M., 2003).

Os principais fatores que comandam o mecanismo de perda de abatimento são: tipo de superplastificante, sua dosagem e momento de colocação na mistura, tipo e consumo de cimento, relação a/c, condições climáticas, procedimento de mistura (tempo de mistura, tipo de betoneira e velocidade de mistura), consistência inicial e presença de outros aditivos químicos ou adições minerais (BONEN e SARKAR, 1995; SPONHOLZ, 1998; MAILVAGANAM, 1999).

Quanto às características do superplastificante, pode-se afirmar que a eficiência deste será melhorada com o aumento da massa molecular (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994;

PAGÉ, NKINAMUBANZI e AİTCIN, 2003). Já foi dito no item 3.5.2 que, quanto maior a dosagem de aditivo e maior a quantidade de aditivo livre, ou seja, não adsorvido nas partículas de cimento, maior sua eficiência em termos de manutenção da trabalhabilidade.

Com relação ao cimento, quanto maior sua finura, necessita-se de maior quantidade de aditivo para melhorar a fluidez. Quanto aos parâmetros químicos do cimento que influenciam o desempenho dos superplastificantes, destaca-se o conteúdo de C_3A , conteúdo de álcalis e forma de sulfato de cálcio adicionado ao clínquer. Os álcalis aceleram as reações de hidratação e, portanto, a perda de trabalhabilidade. O ponto crítico dos sulfatos não é seu conteúdo total, mas sua disponibilidade ou a taxa de dissolução dos íons SO_4^{2-} , que devem ser balanceados com a reatividade química do C_3A (AİTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; JIANG, KIM e AİTCIN, 1999).

A relação a/c desempenha um papel importante apenas em níveis mais baixos, isto é, inferiores a 0,35, quando a dosagem ótima de diversos superplastificantes é aumentada (CHAN, FENG e TSANG, 1996). Dal Molin (1995 apud SPONHOLZ, 1998) comenta sobre estudos que indicam a tendência de se ter maior perda de fluidez quanto maior o abatimento inicial.

Outra possível solução para atenuar a perda de fluidez com o tempo é o uso de aditivos retardadores de pega. Este procedimento será comentado especificamente no item 3.6 deste trabalho.

A temperatura exerce um efeito marcante em concretos com superplastificantes, tanto na consistência inicial quanto na sua manutenção. Em estudo realizado por Yamamoto e Kobayashi (1986), os resultados mostram que a perda de abatimento, medida aos 30 minutos após a adição do aditivo, quando a temperatura é de 7 ou 20°C é pequena. Já para a temperatura de 35°C, uma perda considerável de abatimento foi verificada (Figura 23).

Em geral, os efeitos dos superplastificantes no estado endurecido são os mesmos exercidos pelos plastificantes, mudando apenas em intensidade. Mantendo-se fixo o teor de cimento, a resistência aos 28 dias pode aumentar em 20% ou mais, o que permite uma redução no consumo de cimento, sem alterar a resistência mecânica do concreto. Quando se deseja reduzir a relação a/c, a resistência à compressão aos 28 dias pode aumentar 25% ou mais (ACI 212.3R-91).

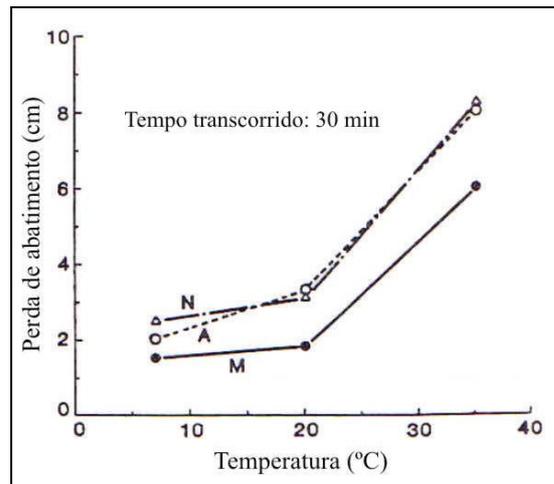


Figura 23 – Perda de abatimento de concretos com superplastificantes de base naftaleno (N), melamina (M) e aril alquila (A), em várias temperaturas, medida 30 minutos depois da mistura (YAMAMOTO e KOBAYASHI, 1986).

Os superplastificantes são indicados na produção de concretos com resistência à compressão aos 28 dias maior que 41 MPa e são essenciais quando se requer uma resistência mínima de 69 MPa nessa idade, em condições de campo (ACI 212.4R-93).

3.5.4 Método de Adição

O ideal seria que toda a dosagem de aditivo superplastificante fosse adicionada à mistura na central de concreto e que esta apresentasse um elevado abatimento que se mantivesse por um longo período de tempo, independente da temperatura ou do tipo e consumo de cimento. Entretanto, está claro que este não é o desempenho que se verifica na prática. Portanto, para a ação do superplastificante ser potencializada em termos de abatimento inicial e se atenuarem os efeitos da perda de abatimento, alguns métodos alternativos de adição do superplastificante são sugeridos.

A adição de moléculas poliméricas de naftaleno e de melamina juntamente com a água causa forte incorporação das moléculas poliméricas no sistema C_3A -gesso, restando pouca quantidade de polímeros para a dispersão do C_3S e do C_2S . Com a adição um pouco atrasada, as moléculas de água são rapidamente adsorvidas pelas partículas reativas de cimento e a capa hidratada destes elementos é formada de ante-mão, assim, o C_3S e o C_2S podem adsorver moléculas de superplastificante suficientes para sua dispersão (UCHIKAWA, SAWAKI e HANEHARA, 1995; COLLEPARDI, M., 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; FLATT e HOUST, 2001; AIAD, 2003).

De acordo com Chiocchio e Paolini (1985 apud AIAD, 2003), considera-se que o tempo ótimo de adição do naftaleno e da melamina deve estar no início do período de dormência. Uchikawa, Sawaki e Hanehara (1995) realizaram estudos com atraso na adição do aditivo de apenas 30 segundos e encontraram bons resultados, principalmente, no caso do naftaleno.

Zakka, Carrasquillo e Farbiarz (1989 apud AIAD, 2003) recomendam um atraso de 5 a 15 minutos em relação à mistura do cimento com a água. Já Aiad, El-Aleem e El-Didamony (2002) e Aiad (2003) obtiveram melhores resultados em seus experimentos para atrasos de 10 a 15 minutos, observando melhoras nas propriedades reológicas de pastas de cimento por períodos de tempo de até duas horas. A Figura 24 mostra o efeito do método de adição do superplastificante à base de naftaleno sobre o abatimento inicial do concreto.

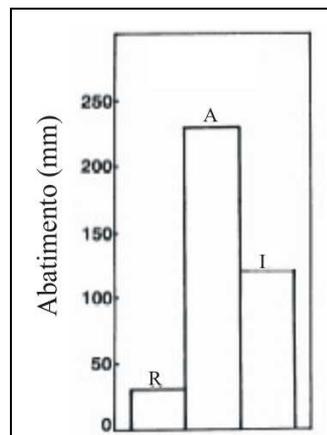


Figura 24 – Efeito do método de adição do superplastificante à base de naftaleno no abatimento inicial, para mesmo a/c. R = mistura de referência, sem aditivo ($a/c=0,45$); A = mistura com aditivo - adição atrasada (1 minuto após a mistura do cimento com a água); I = mistura com aditivo - adição imediata (COLLEPARDI, M., 1998).

Outro procedimento de adição do aditivo superplastificante para evitar a sua perda de eficiência é a adição de parte do aditivo na central de concreto e parte no canteiro de obras (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994). Entretanto, este procedimento requer cuidados especiais uma vez que a quantidade de aditivo acrescentada na obra deve ser corretamente dosada, o aditivo deve ser lançado diretamente sobre a mistura para evitar perdas, a mistura deve ter um abatimento mínimo (50 a 75 mm) e o concreto deve ser completamente homogeneizado após a adição (ACI 212.4R-93).

É procedimento usual em algumas centrais dosadoras de concreto, a adição de um redutor de água à base de lignossulfonato no começo da seqüência de mistura e o superplastificante ao final

dela. AİTCIN (2000b) explica os benefícios deste procedimento em função do bloqueio inicial do C₃A pelo sulfato de cálcio presente no cimento. Quando se adicionam as moléculas de superplastificante de forma retardada, estas não estão mais competindo com o sulfato de cálcio para combinar com o C₃A e, assim, praticamente todas irão contribuir na fluidificação da pasta de cimento.

Alguns autores (ACI 212.3R-91; ACI 212.4R-93; AİTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; COLLEPARDI, M., 1998; RAMACHANDRAN et al, 1998; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984) recomendam adições múltiplas de superplastificante para lidar com a perda de abatimento. Hattori e Malhotra (1979 e 1980 apud RAMACHANDRAN et al, 1998) mostraram que sensíveis aumentos de abatimento podem ser mantidos por diversas horas com a adição da segunda e da terceira dosagem de superplastificante, em quantidades correspondentes à dosagem inicial. Por outro lado, Malhotra (1980 apud RAMACHANDRAN et al, 1998) alerta para o fato de que com a terceira dosagem, apesar de se manter a consistência do concreto, este se torna difícil de trabalhar.

Chan, Feng e Tsang (1996) desenvolveram estudos onde novas quantidades de superplastificante eram adicionadas a intervalos de tempo pré-determinados para recuperar o abatimento original (Figura 25). Chegaram à conclusão que a dosagem necessária em cada redosagem é similar para cada período de redosagem. No entanto, a dosagem cumulativa é dependente do intervalo decorrido entre as consecutivas redosagens: quanto maior o intervalo de tempo entre as redosagens, menor a dosagem cumulativa para retornar ao abatimento inicial.

Hattori (1979 apud RAMACHANDRAN et al, 1998) realizou estudo semelhante visando avaliar o efeito de repetidas dosagens de superplastificante à base de naftaleno para manter o abatimento em torno de 200 mm. As redosagens adotadas correspondiam a 20% da dosagem inicial e foram obtidos resultados muito satisfatórios (Figura 26).

Aİtcin, Jolicoeur e MacGregor (1994) ressaltam que esta técnica tem apresentado bons resultados em laboratório, mas não é fácil de ser implantada na prática. A dificuldade de se fracionar a introdução do aditivo superplastificante em concretos dosados em centrais, além da necessidade de controle apurado das diversas dosagens, são alguns dos motivos limitantes deste procedimento.

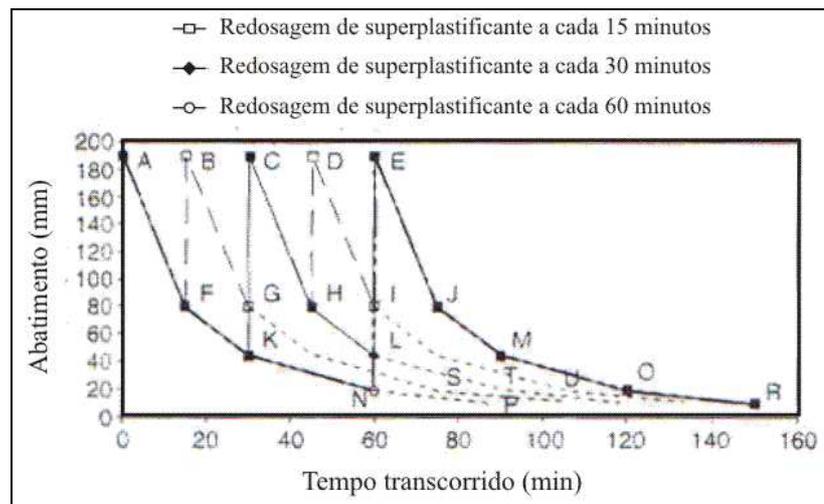


Figura 25 – Retenção da trabalhabilidade com dosagens repetidas (CHAN, FENG e TSANG, 1996).

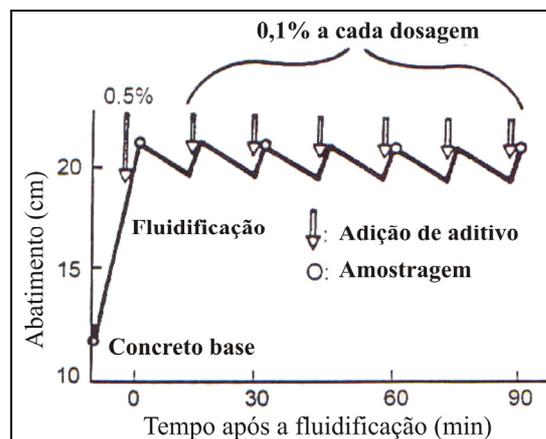


Figura 26 – Dosagens repetidas para manter o abatimento em 200 mm (HATTORI, 1979 apud RAMACHANDRAN et al, 1998).

3.6 ADITIVOS RETARDADORES DE PEGA

3.6.1 Definição

Os aditivos retardadores de pega são utilizados para promover um atraso na pega e/ou um endurecimento mais lento em concretos.

Segundo Neville (1997), estes aditivos são úteis em concretagens em tempo quente, quando há redução do tempo de pega normal pela temperatura mais alta, e para evitar juntas frias. Em geral, aumentam o tempo durante o qual o concreto pode ser transportado, lançado e adensado. Podem também ser vantajosos para se fazer concretagens contínuas de concreto-massa, com

retardamento controlado das diversas partes que estão sendo concretadas, ao invés de se fazerem interrupções na concretagem.

3.6.2 Modo de Ação

De acordo com Neville (1997), o mecanismo de ação dos aditivos retardadores ainda não está completamente estabelecido. É possível que eles modifiquem o crescimento dos cristais ou sua morfologia, sendo adsorvidos sobre a camada de cimento hidratado que se forma rapidamente, tornando mais lento o crescimento dos núcleos de hidróxido de cálcio e assim desacelerando as reações de hidratação. Por fim, os aditivos são removidos da solução incorporando-se ao material hidratado, sem necessariamente formar complexos hidratados diferentes.

De acordo com Joisel (1973 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994) a ação dos modificadores de pega do cimento pode ser atribuída mais à ação sobre a dissolução dos constituintes anidros do que sobre a cristalização dos compostos hidratados. Considerando-se que grande parte dos aditivos ionizam em água, adicionando-os ao sistema cimento-água é possível alterar o tipo e concentração de constituintes iônicos da solução aquosa, influenciando assim a dissolução dos compostos do cimento. Desta forma, o aditivo retardador promove este efeito por impedir a dissolução dos cátions (íons de cálcio) e ânions do cimento, de preferência o ânion que tem a maior velocidade de dissolução durante o período inicial de hidratação (p. ex., íons aluminato).

A presença de pequenas concentrações de cátions monovalentes em solução (K^+ ou Na^+) diminui a solubilidade dos íons cálcio, enquanto que a presença de pequenas concentrações de certos ânions monovalentes em solução (Cl^- , NO_3^-) ou SO_4^{2-} , reduz a solubilidade de silicatos e aluminatos. Em ambos os casos a precipitação dos compostos é retardada e, conseqüentemente, também a pega (JOISEL, 1973 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A ação retardante é promovida por gluconatos, açúcares, carboidratos derivados, metanol, sais solúveis de zinco, boratos solúveis e outros sais (NEVILLE, 1997). É importante ressaltar que algumas substâncias agem como retardadores quando adicionadas em pequenas quantidades (p. ex., 0,3% em massa de cimento), mas em dosagens elevadas (p. ex., 1% em massa de cimento) agem como aceleradores (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3.6.3 Efeitos no Concreto

Deve-se tomar cuidado com as dosagens destes aditivos, pois algumas substâncias agem como retardadores em pequenas quantidades (ex: 0,3% da massa de cimento) e como aceleradores em dosagens elevadas (ex: 1% da massa de cimento) (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Por outro lado, retardadores contendo açúcares, se usados em dosagens excessivas, podem inibir completamente a pega e o endurecimento do concreto (NEVILLE, 1997).

É importante frisar que o efeito retardante no início de pega é maior a temperaturas mais altas (MEHTA e MONTEIRO, 1994) e alguns retardadores podem não atuar a temperaturas ambiente extremas, como 60°C (MASSAZA e TESTOLIN, 1980 apud NEVILLE, 1997).

O tempo de trabalho do concreto pode ser aumentado com o uso correto de aditivos retardadores, mesmo a temperaturas mais altas (ACI 212.3R-91). Yamamoto e Kobayashi (1986) realizaram estudos com superplastificantes retardadores em temperaturas de 7, 20 e 35°C. Encontraram resultados benéficos para a manutenção da trabalhabilidade apenas à 35°C, quando o período trabalhável do concreto foi aumentado em 30 a 45 minutos.

Bazkoca, Ozkul e Artirma (1998) mostraram que um retardador à base de gluconato, adicionado em teor de 2% em relação à massa de cimento, promoveu redução da perda de abatimento, em relação à mistura sem aditivo, mantendo o concreto trabalhável por seis horas. Já o mesmo aditivo adicionado em teor de 1% apresentou efeito contrário, isto é, acelerou a perda de abatimento.

Ravina e Soroka (2002) desenvolveram estudos para verificar se realmente os retardadores de pega reduzem a taxa de perda de abatimento. Os resultados obtidos foram completamente opostos aos esperados, com maior perda de abatimento para misturas que continham estes aditivos. Os autores explicam o fato da seguinte forma: quando o concreto é agitado e, particularmente, quando a agitação é contínua e por longos períodos, a camada que impede a hidratação do cimento e retarda a sua pega é removida, acelerando as reações de hidratação e, conseqüentemente, o enrijecimento da mistura.

Para dosagens adequadas, os retardadores de pega aumentam a resistência à compressão à 24 horas, enquanto que esta é reduzida em idades inferiores (ACI 212.3R-91). A melhora da

resistência à 1 dia pode estar associada ao fato de que uma pega retardada resulta em um gel de cimento hidratado mais compacto (NEVILLE, 1997).

3.6.4 Método de Adição

A eficiência dos retardadores de pega depende do momento em que é adicionado à mistura: um atraso de dois minutos em relação à mistura entre cimento e água, aumenta o retardamento. Este efeito é acentuado quando se utilizam cimentos com elevados teores de C_3A . Isto provavelmente ocorre pois, em virtude da reação do C_3A com o gesso, parte dele não adsorve o aditivo, restando mais produto para retardar os silicatos de cálcio, o que se faz por adsorção nos núcleos de hidróxido de cálcio (YOUNG, 1972 apud NEVILLE, 1997).

Alguns autores (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; RAMACHANDRAN et al, 1998; COLLEPARDI, M., 1998; COLLEPARDI, S. et al, 1999; COSTENARO e ISA, 2000) recomendam o uso de retardadores de pega juntamente com redutores de água de modo a prolongar a retenção da trabalhabilidade. Aïtcin (2000b) verificou em um CAD, com relação a/c igual a 0,35, que a adição de uma pequena quantidade deste aditivo possibilitou uma redução de 50% no ponto de saturação do superplastificante.

Outra opção é a adição de aditivo plastificante na central de concreto e aditivo retardador na obra, no caso de CDC. Em estudo realizado por Bazkoca, Ozkul e Artirma (1998), verificou-se que se adicionando aditivo plastificante à base de lignossulfonato (0,4% da massa de cimento) no início da mistura e aditivo retardador à base de gluconato (2% da massa de cimento) aos 90 minutos de mistura, obtém-se um concreto trabalhável por um longo período, sendo esta a melhor dentre todas as misturas avaliadas pelos autores.

3.7 COMPATIBILIDADE

Como foi visto, as interações entre cimento e aditivo são, muitas vezes, problemáticas já que se tratam de dois sistemas químicos complexos. Esses problemas podem ser agravados ao se combinarem dois ou mais aditivos, como superplastificantes, incorporadores de ar, redutores de retração, retardadores de pega, entre outros, uma vez que cada um deles foi elaborado para ação individual e otimizada no concreto, o que geralmente não se verifica quando utilizados em conjunto.

Para evitar os problemas de incompatibilidade, deve-se investigar sua origem de forma a tirar-se o máximo proveito do potencial dos aditivos. A verificação da ocorrência de problemas de incompatibilidade exige uma avaliação de cada combinação cimento-aditivo disponível para uso, já que não existe um procedimento que assegure o comportamento destes materiais quando estudados individualmente, ou seja, um aditivo pode agir de diferentes formas dependendo do tipo de cimento da mistura.

No caso das interações entre cimento e aditivos fluidificantes, as principais manifestações de incompatibilidade são o enrijecimento prematuro da mistura ou a rápida perda de abatimento e o retardo excessivo do início de pega. Devido à complexidade dos fenômenos químicos envolvidos, a única forma de se conhecer o comportamento reológico de uma combinação cimento-aditivo é experimentá-la e avaliar seu desempenho na prática.

Para isso, deve ser feito um estudo em laboratório com as diversas combinações cimento-aditivo disponíveis e avaliar as propriedades de maior interesse, de acordo com o objetivo a ser alcançado. Para reduzir a quantidade de material utilizado e a mão-de-obra na fase experimental, usualmente, ao invés de fazê-lo todo em concreto, faz-se uma primeira etapa em pasta de cimento (métodos do mini-abatimento ou do funil de Marsh) ou em argamassa (método da mesa para índice de consistência (*flow-table*)) (DACZKO, 1999). Conhecidas as combinações eficientes para estes métodos, parte-se para o estudo final em concreto, de onde se obtém a melhor combinação para a finalidade desejada.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para cumprir com o objetivo de propor um procedimento para otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do CDC, visando reduzir a perda de trabalhabilidade, bem como recuperá-la no momento do lançamento do concreto, por meio da utilização de aditivos, foi desenvolvido um programa experimental, dividido em cinco etapas, como será apresentado de forma resumida a seguir e detalhado ao longo deste capítulo.

Em um primeiro momento, foram construídas curvas de dosagem para concreto, baseando-se nos traços utilizados na central em estudo, a fim de avaliar previamente as misturas estudadas, além de se ter maior confiança nos dados adotados como referência no trabalho. Para o estudo de dosagem foi adotado o método IPT / EPUSP, porém, como se trata de CDC, foi feita uma adaptação ao método, com base nas considerações apresentadas na revisão de literatura (item 2.6.2), visando sua otimização.

Em seguida, os traços foram reproduzidos em argamassas, com a finalidade de se verificar a existência de relação entre ambos os materiais, principalmente, em termos de consistência e resistência à compressão.

A partir daí, foi feito o estudo com diversos aditivos e métodos de adição, visando, em especial, maior fluidez inicial e manutenção da trabalhabilidade, ao menor custo. Primeiramente, constituindo a terceira etapa, foram realizados ensaios em argamassas, com o propósito de pré-selecionar as melhores misturas, dentre todas as avaliadas e, assim, poupar material, tempo e mão-de-obra no estudo em concretos, que, neste caso, são consumidos em quantidades consideravelmente maiores.

A quarta etapa, então, foi o estudo em concretos, em escala de laboratório, baseando-se nas misturas com melhores desempenhos nas argamassas. Nesta etapa, também, se avaliou o impacto do procedimento usualmente adotado para correção do abatimento em obra, isto é, adição de água de forma indiscriminada até se atingir o valor desejado, em algumas das principais propriedades do concreto.

Como quinta e última etapa, um dos procedimentos que promoveram os melhores resultados nas propriedades avaliadas em laboratório foi aplicado em CDC, produzido em uma concreteira da

Grande Florianópolis, e verificou-se a aplicabilidade deste em campo, tanto em termos técnicos, quanto econômicos.

Todo o programa laboratorial foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da UFSC, utilizando-se os equipamentos disponíveis no mesmo.

A Figura 27 apresenta um fluxograma com as etapas descritas acima e os procedimentos realizados em cada etapa com o intuito de facilitar o entendimento do programa experimental.

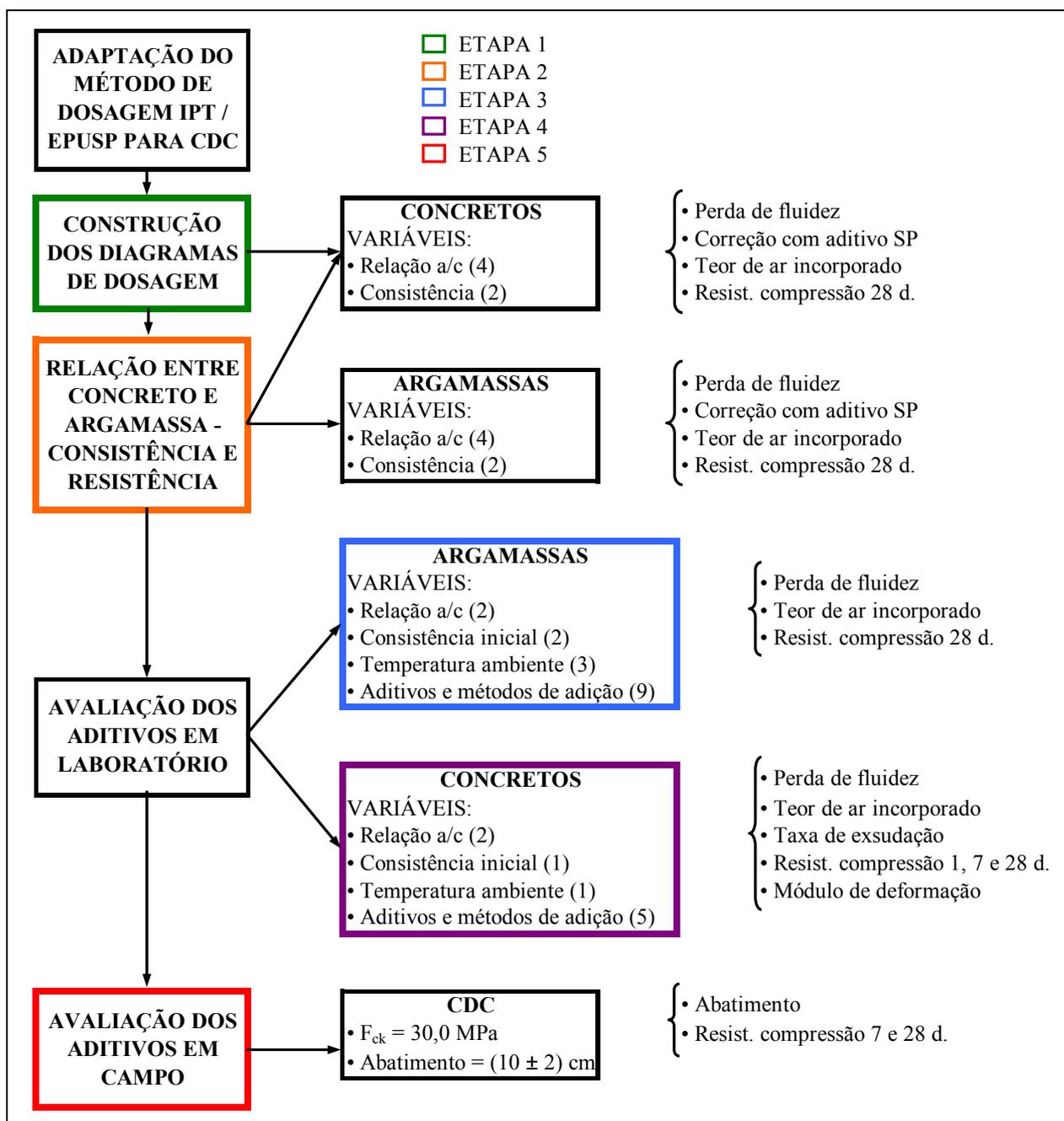


Figura 27 – Fluxograma representativo do programa experimental.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Todos os materiais utilizados nesta pesquisa são os mesmos empregados pela central de concreto onde se realizou a última etapa deste estudo, sendo estes provenientes do estoque da central, com exceção da água e dos aditivos.

O cimento empregado foi o cimento portland pozolânico – CP IV, cujas características físicas, químicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 4. Estes resultados foram fornecidos em laudo técnico emitido pelo fabricante no mês de maio de 2004.

Tabela 4 – Resultados das análises física, química e mecânica do cimento portland CP IV.

Análise física		Análise química		Análise mecânica	
Ensaio	Teor	Ensaio	Teor	Idade (dias)	Resistência (MPa)
peneira # 0,075 mm (%)	0,24	perda ao fogo (%)	3,18	1	-
peneira # 0,045 mm (%)	2,08	SiO ₂ (%)	29,39	3	26,64
água da pasta de consistência normal (%)	30,35	Al ₂ O ₃ (%)	10,32	7	31,07
massa específica (g/cm ³)	2,93	Fe ₂ O ₃ (%)	3,60	28	43,24
Blaine (cm ² /g)	4439	CaO (%)	44,25		
início de pega (h)	04:32	MgO (%)	5,01		
fim de pega (h)	05:42	SO ₃ (%)	2,93		
		resíduo insolúvel (%)	24,74		
		equivalente alcalino (%)	1,12		

É importante ressaltar que, apesar deste cimento ser pozolânico, suas características são atípicas em relação à maioria dos cimentos CP IV fabricados no país, podendo-se dizer que apresenta desempenho superior para uso em estruturas convencionais, como se percebe pela sua maior finura (Blaine) e menor teor de resíduo insolúvel, isto é, menor quantidade de cinza volante.

Como agregados miúdos, foram utilizados areia fina de duna, proveniente de Imbituba, SC, e areia média de rio, proveniente de Tijucas, SC. Foram empregados como agregados graúdos: brita 0 (pedrisco) e brita ¾" (brita de uso comum na região, com diâmetro máximo igual a 12,5 mm), ambos de origem granítica e provenientes de São José, SC. Os resultados da caracterização dos agregados constam na Tabela 5.

Para a produção dos concretos referentes à etapa 4 deste programa, foi necessária a utilização de uma nova remessa de agregados provenientes da central de concreto, pois a quantidade residual das etapas anteriores não era mais suficiente. Foram utilizados os mesmos agregados descritos acima, com exceção da areia fina. Durante a realização das primeiras etapas, a mineradora que

fornevia este material foi proibida pela justiça, temporariamente, de extrair areia de duna por questões ambientais. Por consequência, a concreteira passou a utilizar uma areia fina de cava, proveniente de Palhoça, SC. A caracterização destes novos materiais é apresentada na Tabela 6.

Tabela 5 – Caracterização dos agregados utilizados nas etapas 1, 2 e 3.

		Areia fina	Areia média	Brita 0	Brita ¾"	
Granulometria (% ret. acumulada)	Abertura das peneiras (mm)	38	0	0	0	
		25	0	0	0	
		19	0	0	0	2,67
		12,5	0	0	0	52,45
		9,5	0	0	2,49	84,45
		6,3	0	0,02	46,92	99,54
		4,8	0	0,38	80,36	100,00
		2,4	0	7,38	98,31	100,00
		1,2	0	28,10	99,34	100,00
		0,6	0,02	58,96	100,00	100,00
		0,3	7,77	80,98	100,00	100,00
		0,15	96,04	92,87	100,00	100,00
		Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00
Diâmetro máximo característico (mm)		> 0,3	4,8	9,5	19,0	
Módulo de finura		1,04	2,69	5,81	6,88	
Classificação		Não se enquadra	Zona 3 (média)	Graduação 0	Graduação 1	
Massa específica - estado seco (kg/dm ³)		2,65	2,60	2,68	2,68	
Massa específica - estado úmido (kg/dm ³)		2,66	2,64	-	-	
Massa unitária (kg/dm ³)		1,52	1,38	1,49	1,52	
Massa unitária compactada (kg/dm ³)		1,65	1,57	1,55	1,57	
Material pulverulento (%)		0,14	2,35	0,54	0,12	

Tabela 6 – Caracterização dos agregados utilizados na etapa 4.

		Areia fina	Areia média	Brita 0	Brita ¾"	
Granulometria (% ret. acumulada)	Abertura das peneiras (mm)	38	0	0	0	
		25	0	0	0	
		19	0	0	0	0
		12,5	0	0	0	40,00
		9,5	0	0	1,00	77,00
		6,3	0	0	47,00	97,00
		4,8	0	0	82,00	98,00
		2,4	0	5,00	99,00	99,00
		1,2	0	34,00	100,00	99,00
		0,6	0	53,00	100,00	99,00
		0,3	4,00	70,00	100,00	99,00
		0,15	85,00	89,00	100,00	99,00
		Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00
Diâmetro máximo característico (mm)		0,3	2,4	9,5	19,0	
Módulo de finura		0,89	2,51	5,82	6,70	
Classificação		Não se enquadra	Zona 3 (média)	Graduação 0	Graduação 1	
Massa específica - estado seco (kg/dm ³)		2,64	2,63	2,68	2,68	
Massa específica - estado úmido (kg/dm ³)		2,65	2,65	-	-	
Massa unitária (kg/dm ³)		1,41	1,51	1,39	1,40	
Material pulverulento (%)		1,01	2,35	0,40	0,61	

Foram avaliados diferentes tipos de aditivos de um único fabricante, que já fornece o aditivo plastificante à central de concreto em estudo. Os aditivos avaliados foram: 1 plastificante (P), 1 plastificante polifuncional (PP), 1 plastificante retardador de pega (PR) e 1 superplastificante (SP), todos na forma líquida. As principais características destes materiais, de acordo com o fabricante, são encontradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características dos aditivos.

	Tipo de aditivo			
	P	PP	PR	SP
Base química	lignossulfonato	lignossulfonato	lignossulfonato e carboidrato	naftaleno sulfonado de sódio
Dosagem recomendada (% sobre a massa de cimento)	0,25 a 0,40	0,30 a 1,00	0,15 a 0,40	0,80 a 2,00
Massa específica (g/cm ³)	1,18	1,19	1,20	1,20
Teor de sólidos (%)	38 - 40	39 - 42	37 - 41	37 - 41

A água utilizada na produção das argamassas e concretos no laboratório era potável, proveniente da rede pública de abastecimento. Já na central de concreto, a água era proveniente de uma fonte localizada em Palhoça, SC, sendo fornecida em caminhões-pipa.

4.3 ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM IPT / EPUSP PARA CDC

Como já foi dito, um dos objetivos deste trabalho era propor uma otimização do processo de dosagem do CDC. Para cumprir com este objetivo, foi adotado no presente trabalho o método IPT / EPUSP adaptado, baseando-se nas considerações feitas a este respeito no item 2.6.2, como será detalhado a seguir.

Uma das alterações realizadas foi a adição do agregado miúdo – areias fina e média – na condição úmida (saturado) sendo que, antes de cada mistura de concreto ser produzida, era determinada a umidade deste material pelo método da frigideira (diferença de massa nos estados seco e úmido). A quantidade de água correspondente à umidade era descontada do total discriminado no traço e a quantidade de cada areia era corrigida. É importante lembrar que, para a determinação da umidade das areias na central de concreto, deve ser utilizado o mesmo método adotado no estudo de dosagem em laboratório.

Ao se dosar a água na mistura inicial do concreto, esta era adicionada até se atingir o abatimento correspondente ao limite superior do intervalo especificado, com variação de ± 1 cm. Por exemplo, para o abatimento de (10 ± 2) cm, era adicionada água até se atingir o abatimento de (12 ± 1) cm. Optou-se por ter esta folga no abatimento para evitar que o valor obtido, depois de decorrido um determinado intervalo de tempo, fosse muito baixo, o que exigiria uma quantidade muito elevada de aditivo SP para sua correção. Por outro lado, se fosse adotado um valor muito superior como abatimento de partida, poderia se ter o efeito contrário em épocas mais frias, quando a perda de trabalhabilidade é significativamente menor.

Não só o abatimento inicial era determinado no estudo de dosagem, mas, também, a perda de abatimento por um período de 90 minutos, já que, no caso do CDC, a mistura será transportada da central até a obra por um período que pode ser superior à uma hora e a perda de fluidez ocorrida pode tornar inviável o lançamento do concreto. As medições de abatimento eram realizadas a cada 30 minutos, remisturando-se o concreto por 1 minuto a cada 10 minutos. Este período de 90 minutos corresponde, aproximadamente, ao tempo decorrido entre a mistura inicial dos materiais em uma central de concreto e o início do lançamento do concreto na obra.

Após este período, era avaliada a perda total de abatimento ocorrida e procedia-se à sua correção com adição de aditivo SP, ao invés de água. É importante verificar se há alteração da resistência do concreto passado o período de 90 minutos e remisturado com aditivo SP. Desse modo, para efeito de comparação, eram moldados corpos-de-prova para ruptura à compressão logo após a mistura inicial e, também, após a adição do aditivo SP.

Em função da utilização do agregado miúdo no estado saturado, para a determinação da massa específica teórica do concreto, necessária para o cálculo do teor de ar incorporado, foram adotadas no cálculo as massas específicas das areias ensaiadas no estado úmido (Tabelas 5 e 6). Na determinação destas massas específicas, foi descontada a água externa dos grãos e considerou-se apenas a água interna, ou seja, absorvida pelos grãos. Assim, as massas específicas das areias ensaiadas no estado úmido representam de forma mais próxima o que acontece na prática.

Como um dos objetivos deste trabalho é prolongar o período de manutenção da trabalhabilidade e promover a recuperação do abatimento perdido no momento do lançamento do concreto, utilizando aditivos para isso, estes materiais tiveram que ser inseridos no estudo de dosagem.

Para isto, após a construção das curvas de dosagem utilizando-se aditivo plastificante, material usualmente utilizado em centrais de concreto, foram realizados estudos mais extensos, em laboratório, primeiramente em argamassas, como um processo de triagem, e, em seguida, em concretos, a fim de determinar quais os melhores aditivos, teores e métodos de adição para se atingirem os resultados desejados, tanto do ponto de vista técnico, como econômico.

4.4 CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE DOSAGEM – ETAPA 1

Como ponto de partida da pesquisa experimental, foram construídas curvas de dosagem para 2 níveis de abatimento do tronco de cone - *slump test*: (10 ± 2) e (14 ± 2) cm. Para isso, foram adotados como referência os traços utilizados na central em estudo, alterando-se apenas a quantidade de água adicionada, como será descrito a seguir. Foram produzidos concretos com resistências características (f_{ck} 's) de 20,0; 25,0; 30,0 e 35,0 MPa, para cada abatimento. As composições dos traços são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Composições dos traços estudados.

Traço	Resistência característica - f_{ck} (MPa)	Abatimento (cm)	Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Brita ¾" (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Plastificante (kg/m ³)
F20S10	20,0	(10 ± 2)	311,1	311,1	560,0	248,9	715,5	205,3	1,089
F25S10	25,0		352,0	281,6	563,2	246,4	704,0	207,7	1,232
F30S10	30,0		396,6	277,6	515,6	238,0	713,9	210,2	1,388
F35S10	35,0		424,0	254,4	508,8	254,4	720,8	203,5	1,484
F20S14	20,0	(14 ± 2)	326,3	293,7	554,7	228,4	717,9	215,4	1,142
F25S14	25,0		359,8	287,8	539,7	215,9	719,6	215,9	1,259
F30S14	30,0		401,0	280,7	481,2	240,6	721,8	216,5	1,404
F35S14	35,0		451,2	270,7	496,3	225,6	721,9	203,0	1,579

A nomenclatura adotada para os traços de concretos e argamassas avaliados neste trabalho é a seguinte: os números que seguem a letra “F” indicam a resistência característica do concreto (f_{ck}) e os que seguem a letra “S” indicam o abatimento do tronco de cone (*slump*).

O aditivo plastificante foi adicionado aos concretos no teor de 0,35% de material líquido, considerando os sólidos e a água, em relação à massa de cimento. A quantidade de água presente no aditivo não foi descontada da quantidade total de água do traço em virtude deste procedimento não ser adotado na central de concreto em estudo. O mesmo procedimento se repetiu ao longo de todo o trabalho.

Devido à dificuldade de se dispor no laboratório de um local onde os concretos pudessem ser produzidos à temperatura controlada, as misturas foram confeccionadas no seu interior, à temperatura de $22 \pm 4^\circ\text{C}$, monitorada durante todo o processo de produção.

Os concretos foram produzidos em betoneira intermitente, com capacidade de cuba de 120 litros, eixo inclinado e pás solidárias a cuba e velocidade de rotação de 29 rpm. O tempo de mistura era de 4 minutos e a seqüência de colocação dos materiais foi mantida constante, de acordo com a seguinte ordem:

- 1) Agregado graúdo e 50 % da água;
- 2) cimento e 20% da água;
- 3) agregado miúdo e 10% da água;
- 4) aditivo plastificante diluído em 10% da água;
- 5) água até se atingir o abatimento desejado - *slump test*.

A água era adicionada ao concreto em quantidade suficiente para atingir um abatimento de (12 ± 1) cm, no caso do abatimento especificado de (10 ± 2) cm, e (16 ± 1) cm, no caso do abatimento especificado de (14 ± 2) cm, pelo motivo exposto no item anterior.

Tão logo o abatimento era atingido, procedia-se à moldagem de 3 corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões (10 x 20) cm, de acordo com a NBR 5738:2003, para determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias. O processo de adensamento era mecânico, com vibrador de imersão, e o preenchimento do molde era feito em camada única (NBR 5738:2003). Os corpos-de-prova permaneciam nos moldes metálicos, cobertos com chapas de vidro, por um período de 24 horas, em ambiente de laboratório.

A fim de simular o período de transporte do concreto em caminhão-betoneira, o material restante, após a moldagem dos corpos-de-prova, permanecia na betoneira por 90 minutos (contados a partir do momento de colocação do cimento na mistura). A betoneira permanecia coberta e a cada 10 minutos era ligada por 1 minuto, simulando as condições de mistura no caminhão.

Passado o tempo estabelecido, o ensaio de abatimento era novamente realizado, de forma a medir a perda de fluidez ocorrida. Em seguida era feita a adição de aditivo SP até se atingirem os

abatimentos especificados, isto é, (10 ± 2) e (14 ± 2) cm, medidos por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Neste momento, era realizado o ensaio para determinação da massa específica do concreto fresco, utilizado no cálculo do teor de ar incorporado à mistura. O recipiente utilizado para o ensaio foi uma caixa metálica com volume de 15,3 L, cujo preenchimento era feito em duas camadas iguais, adensadas com vibrador de imersão. Após o rasamento, procedia-se à pesagem do conjunto (recipiente + concreto), descontando-se a massa do recipiente para a determinação da massa do concreto fresco. A divisão desta massa pelo volume do recipiente corresponde à massa específica real do concreto fresco.

A massa específica teórica do concreto foi calculada a partir do traço e das massas específicas de cada material. Cabe lembrar que, em função da adição do agregado miúdo no estado úmido ao concreto, foram utilizadas neste cálculo as massas específicas das areias fina e média no estado úmido. O teor de ar incorporado foi determinado pela equação a seguir:

$$\text{Teor de ar (\%)} = \left(1 - \frac{\gamma_{real}}{\gamma_{teór.}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde: γ_{real} = massa específica real do concreto fresco

$\gamma_{teór.}$ = massa específica teórica

Logo após, eram moldados mais 3 corpos-de-prova, seguindo-se o procedimento já descrito. Todos os corpos-de-prova eram desmoldados após 24 horas de sua produção e seguiam para cura imersa, em água saturada de cal, até a idade de ensaio.

Com o intuito de assegurar o nivelamento das faces planas dos corpos-de-prova, estes tiveram seus topos capeados com pasta de enxofre e cimento, em proporção 3:1, respectivamente. Em seguida, os corpos-de-prova eram novamente imersos em água saturada de cal, onde permaneciam até a idade de ensaio.

Os ensaios de ruptura à compressão axial foram executados conforme a NBR 5739:1994, em uma prensa eletrônica, da marca Shimadzu (Figura 28). Esta máquina executa ensaios nas escalas de 40, 100, 200, 400, 1000 e 2000 KN, com velocidade de carregamento constante.



Figura 28 – Prensa eletrônica utilizada na execução dos ensaios de ruptura à compressão.

Com os resultados de resistência à compressão obtidos aos 28 dias, foram construídas curvas de dosagem, para ambos os abatimentos avaliados, conforme o Método IPT / EPUSP. Estas curvas foram tomadas como base para a obtenção dos traços das argamassas e concretos confeccionados no programa experimental, conforme descrito no item 4.6.

4.5 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS E ARGAMASSAS QUANTO À CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA – ETAPA 2

Para verificar a existência de correlação entre os resultados obtidos em concreto e argamassa, em termos de fluidez e resistência à compressão aos 28 dias, um procedimento similar ao realizado em concreto foi aplicado em argamassa. Foram adotados os mesmos traços (Tabela 8), excetuando-se os agregados graúdos, e as relações a/c adotadas foram aquelas encontradas em concreto para os abatimentos iniciais de (12 ± 1) cm e (16 ± 1) cm, como descrito no item anterior.

Utilizou-se um misturador mecânico para produção das argamassas com 2 velocidades de rotação da pá: baixa - (140 ± 5) rpm - e alta - (285 ± 10) rpm; e 2 velocidades de rotação do planetário: baixa - (62 ± 5) rpm - e alta - (125 ± 10) rpm.

Com a finalidade de se terem as mesmas condições de exposição dos concretos, as argamassas foram produzidas paralelamente aos concretos, isto é, imediatamente após a mistura inicial do

concreto e determinação da relação a/c para o abatimento desejado, era feita a mistura da argamassa respectiva.

O procedimento de mistura era o seguinte:

- 1) Colocava-se na cuba o cimento e 90% da água;
- 2) misturava-se em velocidade baixa por 30 segundos;
- 3) colocava-se as areias úmidas, sem paralisar a operação de mistura, em 30 segundos;
- 4) misturava-se em velocidade alta por 30 segundos;
- 5) desligava-se o misturador por 1,5 minutos: nos primeiros 30 segundos, retirava-se, com o auxílio de uma espátula, a argamassa aderida às paredes da cuba e à pá e colocava-se no interior da cuba; no tempo restante, deixava-se a mistura em repouso, coberta com um pano úmido;
- 6) ligava-se o misturador em velocidade alta e colocava-se o aditivo plastificante com o restante da água, deixando misturar por 1 minuto.

Logo após a mistura, media-se a consistência por meio do ensaio da mesa para índice de consistência – *flow-table*, segundo procedimento descrito na NBR 7215:1996, porém de forma um pouco alterada. Após o preenchimento do tronco de cone com argamassa, como recomenda a norma, o mesmo era içado verticalmente e realizava-se a medição de dois diâmetros da argamassa espalhada em direções opostas (abertura inicial), a fim de se fazer uma avaliação do comportamento estático da mistura. Em seguida, eram aplicados 30 golpes em 30 segundos, procedendo-se à medição da abertura após 15 golpes (abertura com 15 golpes) e após 30 golpes (abertura com 30 golpes). Este procedimento visa à avaliação da fluidez da argamassa em ensaio dinâmico. Como valor final de abertura da argamassa em cada situação, adotou-se a média das duas medidas de diâmetro realizadas.

Eram moldados neste momento 3 corpos-de-prova de dimensões (5 x 10) cm, para ruptura à compressão aos 28 dias. A moldagem era feita em 2 camadas, com a aplicação de 10 golpes em cada. Não foi adotado o procedimento recomendado pela NBR 7215:1996 (4 camadas com 30 golpes em cada) pois as misturas eram muito fluidas e, ao se aplicarem muitos golpes, ocorreria segregação.

Da mesma forma que os concretos, as argamassas permaneciam no misturador por 90 minutos, sendo remisturadas por 1 minuto a cada 10 minutos e a cuba permanecia coberta com um pano

úmido nos intervalos. Ao final, eram realizadas novamente as leituras na mesa de consistência e procedia-se à correção da consistência adicionando-se o mesmo teor de superplastificante (em relação à massa de cimento) adicionado ao respectivo concreto, determinando-se a abertura na mesa de consistência ao final da mistura.

Foi realizado o ensaio de massa específica real da argamassa para o cálculo do teor de ar incorporado. O procedimento era o mesmo descrito para concreto, alterando-se apenas o recipiente e o método de adensamento: utilizou-se um recipiente com volume de 486 ml e o preenchimento era feito em 3 camadas, adensadas com a aplicação de 20 golpes de espátula (NBR 13278:1995).

Em seguida, eram moldados mais 3 corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão à idade de 28 dias. Os corpos-de-prova permaneciam nos moldes metálicos, cobertos com uma chapa de vidro para evitar a evaporação da água, por 24 horas. Ao final deste período, eram desmoldados e imersos em água saturada de cal, onde permaneciam até a idade de ensaio.

O capeamento dos corpos-de-prova também foi feito com pasta de enxofre e cimento, como descrito para os concretos. Os ensaios de ruptura à compressão axial foram realizados na mesma prensa utilizada para o ensaio dos concretos.

Com os resultados obtidos nos ensaios de consistência e resistência à compressão aos 28 dias em concretos e argamassas, verificou-se se havia relação entre eles, a fim de validar o estudo preliminar em argamassas como um processo de triagem para o estudo em concretos.

4.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM LABORATÓRIO – ETAPAS 3 E 4

4.6.1 Variáveis Analisadas

Além de diferentes tipos de aditivos e métodos de dosagem, foram analisadas 3 variáveis na presente etapa. São elas:

- 1) Relação a/c: foram avaliados 2 traços, definidos a partir das curvas de dosagem confeccionadas na primeira etapa deste programa experimental (item 4.4). Foram estudados os f_{ck} 's 25,0 e 35,0 MPa que, adotando-se um desvio-padrão (S_d) de 3 MPa, resultam em

resistências de dosagem (f_{cj}) de 30,0 e 40,0 MPa, calculadas através da equação (1) (item 2.6.1). Foi adotado o desvio-padrão de 3 MPa no cálculo com base nos resultados obtidos por Martins, Sousa e Prudêncio Jr. (2004) que realizaram um estudo desse parâmetro em uma central de concreto e verificaram que este é um valor razoável para o nível de resistência à compressão avaliado na presente pesquisa;

- 2) Consistência inicial: foram avaliados os traços correspondentes a 2 níveis de abatimento, determinados pelo método de abatimento do tronco de cone, correspondendo a (10 ± 2) e (14 ± 2) cm, também de acordo com os resultados obtidos no item 4.4;
- 3) Temperatura ambiente: foram analisadas as propriedades propostas para temperaturas de 12, 23 e 34°C, com variação de $\pm 1^\circ\text{C}$.

4.6.2 Argamassas – Etapa 3

Para a confecção das diversas misturas, foram adotadas como referência as argamassas correspondentes aos traços citados no item 4.6.1, apenas excluindo-se o agregado graúdo. A adição do aditivo plastificante se deu na mistura inicial, com teor de 0,35% da massa de cimento. A Tabela 9 apresenta as composições das argamassas de referência, em kg/m^3 . Cabe lembrar que, nas demais argamassas, apenas o tipo de aditivo, seu teor e o momento de adição eram alterados.

Tabela 9 – Composições das argamassas de referência.

Traço	Resistência característica - f_{ck} (MPa)	Abatimento (cm)	Cimento (kg/m^3)	Areia fina (kg/m^3)	Areia média (kg/m^3)	Água (kg/m^3)	Plastificante (kg/m^3)
F25S10	25,0	(10 ± 2)	502,6	467,5	868,1	318,2	1,759
F35S10	35,0		599,7	434,2	806,0	321,5	2,099
F25S14	25,0	(14 ± 2)	496,5	459,3	853,0	329,2	1,738
F35S14	35,0		596,4	425,8	790,8	331,6	2,087

Primeiramente, todas as misturas foram produzidas em uma sala climatizada, com temperatura ambiente de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Os materiais (cimento, agregado miúdo, água e aditivos) e a cuba do misturador eram mantidos nesta sala antes do procedimento de mistura, assim como os corpos-de-prova após a moldagem das argamassas.

O misturador e o procedimento de mistura das argamassas de referência foram aqueles já descritos anteriormente. Logo após a mistura, era medida a consistência pelo ensaio da mesa de consistência, repetindo-se o procedimento também já descrito (item 4.5), porém foram aplicados

apenas 15 golpes à mesa de consistência. Optou-se por não realizar medições para a aplicação de 30 golpes em função de a mistura apresentar um comportamento bastante similar quando aplicados 15 ou 30 golpes, como será exposto no capítulo 5.

O mesmo procedimento de mistura das argamassas de referência foi adotado para os aditivos plastificante polifuncional e plastificante retardador. No primeiro caso, foi utilizada a dosagem de 0,50%, por ser próxima da média recomendada pelo fabricante para este aditivo e, também, por se obter uma abertura inicial na mesa de consistência semelhante à obtida com a argamassa de referência (plastificante). Em apenas duas das misturas com este aditivo foi adicionado o teor de 0,60%. No segundo caso, foi selecionada a menor dosagem possível, para evitar um excessivo retardo de endurecimento da argamassa, mas que proporcionasse uma consistência satisfatória. Por este motivo, esse aditivo foi adicionado em teor variável para os diferentes traços e temperaturas.

Também foram confeccionadas argamassas com os aditivos plastificante, plastificante polifuncional e plastificante retardador, procedendo-se à adição do aditivo depois de decorridos 10 minutos do momento de contato entre o cimento e a água. Adotou-se, para cada aditivo, o mesmo teor das argamassas correspondentes onde este foi adicionado no início da mistura. Este método visa simular a colocação do aditivo no ponto de redosagem da central, onde é adicionada uma parcela de água para lavagem das facas e pás do balão do caminhão-betoneira.

A seqüência de mistura das argamassas era a mesma descrita anteriormente com exceção da água, que era adicionada completamente no início da mistura com o cimento. Logo após a mistura inicial, sem o aditivo, procediam-se às medições na mesa de consistência conforme descrito anteriormente. No momento da colocação do aditivo, após 10 minutos, o misturador era ligado em velocidade alta durante 1 minuto e, em seguida, eram feitas, novamente, as medições na mesa de consistência.

Além destes métodos, foram avaliadas argamassas sem a adição de aditivos. Os passos seguintes eram os mesmos descritos para as argamassas de referência, independente da abertura inicial obtida na mesa de consistência.

Para avaliação da perda de fluidez das argamassas, eram feitas medições de abertura na mesa de consistência para os tempos de 30, 60 e 90 minutos. A cada 15 minutos (ou imediatamente antes de cada medição) as argamassas eram remisturadas manualmente durante 1 minuto.

Após o período de 90 minutos, era efetuada a adição de aditivo superplastificante em cada uma das argamassas produzidas, inclusive as de referência, de forma a se atingir novamente a abertura inicial obtida na mesa de consistência para a primeira determinação, isto é, logo após a mistura, ou a abertura obtida aos 10 minutos, quando este era o momento de adição do aditivo.

A mistura do aditivo superplastificante era feita no misturador mecânico, em velocidade alta, durante 1 minuto. O acompanhamento da perda de fluidez prosseguia, então, até os 120 minutos, da mesma forma descrita para o período anterior aos 90 minutos.

No caso das argamassas onde não foi acrescentado aditivo durante a mistura inicial, o aditivo superplastificante era adicionado até se obter as mesmas aberturas iniciais das argamassas de referência correspondentes a cada caso, isto é, aquelas onde se adicionou aditivo plastificante no início da mistura.

Foram produzidas novamente as argamassas onde se adicionou aditivo plastificante no início da mistura e se redosou com aditivo superplastificante aos 90 minutos, porém foram efetuadas novas redosagens com aditivo superplastificante aos 120 minutos. O procedimento foi o mesmo descrito para a adição destes aditivos aos 90 minutos e o teor adotado foi aquele que promoveu a mesma fluidez apresentada por essas argamassas aos 90 minutos. Neste caso específico, a perda de fluidez foi acompanhada até os 150 minutos.

Outro procedimento de correção da fluidez, no caso das argamassas de referência, foi a adição de novas quantidades de aditivo plastificante aos 90 minutos de mistura. Nestes casos, era adicionado o aditivo em teor o mais próximo possível do máximo recomendado pelo fabricante (somando-se ao teor adicionado inicialmente), prosseguindo com as medições até os 120 minutos.

Também foi avaliado o teor de ar incorporado nestas argamassas, pelo mesmo método descrito anteriormente (item 4.3).

Foram moldados 3 corpos-de-prova de dimensões (5 x 10) cm para ensaio de ruptura à compressão axial à idade de 28 dias. Os momentos de moldagem dos corpos-de-prova estão designados na Tabela 10, que apresenta um resumo de todos os procedimentos realizados após a mistura inicial de cada argamassa (tempo igual a 0 minutos).

Tabela 10 – Resumo dos procedimentos realizados nas diversas argamassas em cada momento.

Argamassa		Tempo decorrido a partir da mistura entre o cimento e a água (minutos)					
		0	30	60	90	120	150
P + SP	Tipo de aditivo adicionado	P	-	-	SP	-	-
	Procedimentos*	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
P + P	Tipo de aditivo adicionado	P	-	-	P	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
P ₁₀ + SP	Tipo de aditivo adicionado	P (aos 10 minutos)	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
P + SP + SP	Tipo de aditivo adicionado	P	-	-	SP	SP	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 1, 2	2, 3, 4
PP + SP	Tipo de aditivo adicionado	PP	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
PP ₁₀ + SP	Tipo de aditivo adicionado	PP (aos 10 minutos)	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
PR + SP	Tipo de aditivo adicionado	PR	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
PR ₁₀ + SP	Tipo de aditivo adicionado	PR (aos 10 minutos)	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-
∅ + SP	Tipo de aditivo adicionado	-	-	-	SP	-	-
	Procedimentos	2	2	2	2, 1, 2	2, 3, 4	-

* Procedimentos adotados:

- 1: Adição do aditivo
- 2: Ensaio de fluidez na mesa de consistência
- 3: Ensaio de teor de ar incorporado
- 4: Moldagem de corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova já foi descrita no item 4.5. Os corpos-de-prova permaneciam nos moldes metálicos, cobertos com uma chapa de vidro para evitar a evaporação da água, até 24 horas após a moldagem. Neste momento, os corpos-de-prova eram desmoldados e imersos em água saturada de cal. O capeamento dos topos dos corpos-de-prova foi feito com pasta de enxofre e cimento, conforme descrito no item 4.4.

Como já foi dito, para avaliação da influência da temperatura ambiente na perda de fluidez, as mesmas argamassas foram produzidas em temperaturas de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ e $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, simulando inverno e verão, respectivamente. Para isso, foi utilizada uma caixa de poliestireno expandido, onde por meio, ora de aquecimento, ora de resfriamento de uma lâmina d'água contida nesta caixa, a temperatura do ar no seu interior foi mantida constante, no valor determinado, com o auxílio de um termostato digital.

Para o aquecimento da lâmina d'água, foi utilizado um aquecedor de aquário com 200 watts de potência. Já para o resfriamento, foi necessário um aparato externo acoplado à caixa. Por meio de uma bomba de água, retirava-se água da caixa com uma mangueira cristal e esta passava por uma serpentina de cobre envolta em gelo, retornando à caixa gelada. A serpentina ficava dentro de um balde com gelo, armazenado em uma geladeira, para evitar que o gelo derretesse rapidamente.

Para circulação e homogeneização da temperatura da água em toda a caixa, foram utilizadas 2 bombinhas de aquário que jogavam água de um canto da caixa ao outro, em diagonal. Também foi acoplado um cooler de computador à parede interna da caixa, no centro e bem próximo à tampa, para promover a circulação do ar no seu interior. As Figuras 29 e 30 apresentam, respectivamente, um esquema do aparato montado para o aquecimento do ar da caixa e uma fotografia do aparato montado para o resfriamento do mesmo.

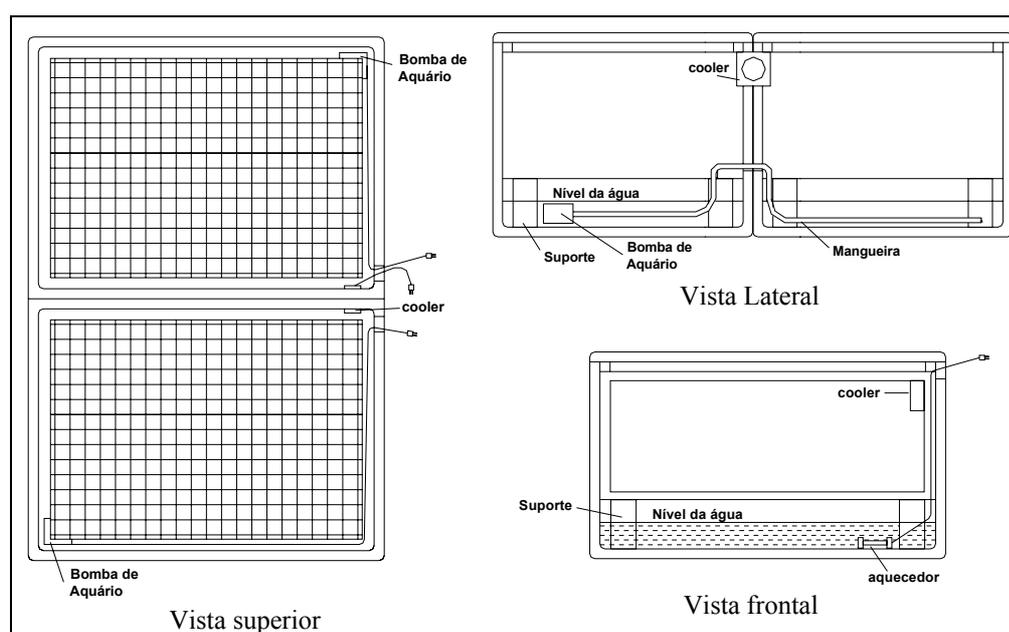


Figura 29 – Esquema do aparato montado para aquecimento do ar (CALÇADA, 2004).

Com exceção dos aditivos, todos os materiais (cimento, agregado miúdo e água) utilizados na produção das argamassas eram mantidos à temperatura desejada por, no mínimo, 24 horas antes do procedimento de mistura. A cuba do misturador também era colocada na caixa, porém apenas alguns minutos antes da mistura, uma vez que o metal da cuba é um bom condutor térmico e logo estava à temperatura desejada. Após a produção das argamassas e entre a realização dos ensaios, as misturas eram recolocadas na caixa. Ao final dos ensaios de cada mistura, os corpos-

de-prova moldados também permaneciam dentro da caixa até o momento da desmoldagem. A Figura 31 mostra algumas fotografias tiradas da caixa com os materiais e os corpos-de-prova.



Figura 30 – Fotografias do aparato montado para resfriamento do ar.



Figura 31 – Caixa com os materiais utilizados e corpos-de-prova moldados.

4.6.3 Concretos – Etapa 4

Após a análise dos resultados obtidos no estudo em argamassa, foram selecionados os aditivos e os respectivos métodos de adição que apresentaram os melhores desempenhos nas propriedades avaliadas.

Em virtude da dificuldade de se produzir os concretos em diferentes temperaturas ambientes, devido ao maior volume de material em relação à argamassa, o estudo em concreto foi realizado apenas à temperatura ambiente, sendo que esta foi monitorada em todo o período de avaliação da mistura. Para evitar grandes gradientes térmicos, fixou-se a faixa de temperatura para realização

dos ensaios em $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$. Para definição dos aditivos e dos métodos de adição utilizados em cada traço, foram selecionados dentre as argamassas estudadas, os resultados obtidos para a temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

A Tabela 11 apresenta as composições de cada traço avaliado nesta etapa, com abatimento de (14 ± 2) cm. Os traços foram obtidos a partir das curvas de dosagem construídas na primeira etapa deste programa.

Tabela 11 – Composições dos concretos de referência.

Traço	Resistência característica - f_{ck} (MPa)	Abatimento (cm)	Cimento (kg/m^3)	Areia fina (kg/m^3)	Areia média (kg/m^3)	Brita 0 (kg/m^3)	Brita $\frac{3}{4}$ " (kg/m^3)	Água (l/m^3)	Plastificante (kg/m^3)
F25S14	25,0	(14 ± 2)	320,0	296,0	549,8	235,2	705,9	212,2	1,120
F35S14	35,0		384,0	274,2	509,2	235,8	706,9	213,5	1,344

Optou-se por realizar esta etapa do estudo apenas para o abatimento de (14 ± 2) cm, pois, com base nos resultados obtidos no estudo em argamassa, acredita-se que não haverá distinção significativa de desempenho dos diferentes aditivos e métodos de adição entre os abatimentos de (10 ± 2) cm e (14 ± 2) cm.

Primeiramente foram produzidos concretos simulando o procedimento usual de mistura das centrais de concreto: misturavam-se todos os materiais sólidos, o aditivo plastificante e uma quantidade de água suficiente para atingir o abatimento de (8 ± 1) cm. O procedimento de mistura descrito no item 4.4 foi repetido nesta etapa.

Similarmente ao acompanhamento da perda de fluidez realizado em argamassa, o ensaio de abatimento do tronco de cone era realizado a cada 30 minutos, sendo que, a cada 15 minutos, a betoneira era ligada por um período de 1 minuto. Durante o período de descanso, a betoneira permanecia coberta.

Aos 90 minutos, o concreto era misturado por 1 minuto e, logo após, o ensaio de abatimento era novamente realizado, verificando-se a perda de abatimento ocorrida. A correção do abatimento nestes concretos foi feita acrescentando-se água até atingir o abatimento especificado, isto é, (14 ± 2) cm.

Tão logo o abatimento era atingido, realizava-se o ensaio para determinação da massa específica dos concretos frescos. O procedimento para a realização do ensaio a para o cálculo do teor de ar

incorporado já foi descrito no item 4.4. Apenas o recipiente utilizado no ensaio foi alterado: utilizou-se uma caixa metálica cúbica com volume de 8 L.

O mesmo recipiente preenchido com concreto para determinação do teor de ar incorporado, foi utilizado para determinação da taxa de exsudação das misturas, com base no procedimento descrito na ASTM C 232-92. Logo após a pesagem do conjunto (molde + concreto), a caixa era colocada na sala climatizada, à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, onde permanecia coberta por um filme plástico por 2,5 horas.

Passado este período, a água exsudada, ou seja, aquela acumulada na superfície do corpo-de-prova, era medida. Para isto, utilizava-se papel absorvente, que era tarado numa balança com precisão de 0,1 g, e, depois, colocado sobre a superfície do concreto para absorver a água. Em seguida, o papel era novamente pesado, determinando-se, por diferença de massa, a quantidade de água exsudada. Este procedimento era repetido até que toda a água da superfície fosse quantificada, realizando a soma ao final. A taxa de exsudação da mistura foi obtida dividindo-se a água exsudada pela água total da amostra, dada em percentual, e esta dividida pelas horas que o material permaneceu em repouso na caixa.

Logo após o preenchimento da caixa para realização dos ensaios descritos acima, com o material restante na betoneira, eram moldados 10 corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões (10 x 20) cm. Deste total, 7 corpos-de-prova eram destinados ao ensaio de ruptura à compressão axial, dos quais 2 eram rompidos à idade de 1 dia, 2 à idade de 7 dias e 3 à idade de 28 dias, e os outros 3 corpos-de-prova eram destinados ao ensaio de módulo de deformação estática do concreto, realizado à idade de 28 dias.

O processo de adensamento era mecânico, com vibrador de imersão, preenchendo-se o molde em camada única. Os corpos-de-prova permaneciam nos moldes metálicos, em uma sala climatizada, com temperatura ambiente de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, cobertos com chapas de vidro por um período de 24 horas.

Para a ruptura à compressão à idade de 1 dia, não era possível a execução de capeamento para regularização das superfícies, visto que os corpos-de-prova eram desmoldados no momento do ensaio. Entretanto, para amenizar qualquer irregularidade, executou-se nestes corpos-de-prova o seguinte procedimento: algumas horas após a moldagem (entre 8 e 12 horas), raspava-se o topo superior do corpo-de-prova com uma espátula, retirando-se aproximadamente 0,5 cm de

material, bem como os agregados graúdos localizados próximos à superfície. Para substituir o material retirado, aplicava-se uma pasta de cimento preparada com cimento portland CPV ARI-RS e relação a/c 0,40. Ao final, era feita a rasadura e o nivelamento do mesmo.

Os demais corpos-de-prova eram desmoldados após 24 horas de sua produção e seguiam para cura em uma câmara úmida, até a idade de ensaio. Para regularização das superfícies desses corpos-de-prova, estes foram retirados da cura por alguns minutos e seus topos foram retificados por um equipamento especialmente adaptado para este fim, por meio de ferramentas abrasivas que removem uma fina camada das superfícies planas (fresa). Assim que possível, os corpos-de-prova eram recolocados na câmara úmida, onde permaneciam até a idade de ensaio.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na prensa citada anteriormente, de acordo com a NBR 5739:1994.

Os ensaios de módulo de deformação foram executados com o auxílio de um computador conectado à prensa hidráulica, o qual possui um programa dotado de todas as configurações para realização do ensaio, como velocidade de aplicação da carga, intervalos de leitura, escala de carregamento e dimensões do corpo-de-prova. Durante a aplicação de carga da prensa, este programa registra as leituras de deformação feitas por dois LVDT's acoplados ao corpo-de-prova, dispostos a 180° um do outro. Os LVDT's são instalados em dois anéis de alumínio, fixados ao corpo-de-prova por três parafusos levemente apertados contra ele, paralelos entre si e distanciados em 100 mm, ou seja, metade da altura do corpo-de-prova (Figura 32). Para o cálculo do módulo de deformação, utilizou-se o procedimento descrito pela NBR 8522:2003 para cálculo de módulo secante, isto é, com os valores contidos no intervalo de tensão entre 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura. O módulo de deformação é obtido pela relação entre a diferença dessas tensões e a diferença das respectivas deformações.

Todo o procedimento descrito para os concretos de referência foi repetido para as demais misturas produzidas com os tipos de aditivos e métodos de adição selecionados no estudo em argamassa. Nestes casos, foi adicionada na mistura inicial toda a água especificada no traço, visando-se atingir um abatimento de (16 ± 1) cm. Os aditivos, seus teores e momentos de adição avaliados em cada traço foram os seguintes:



Figura 32 – Aparato acoplado ao corpo-de-prova para ensaio de módulo de deformação.

- 1) Plastificante (P) no início da mistura, em quantidade discriminada na Tabela 11 (0,35% em relação à massa de cimento), e superplastificante (SP) para correção do abatimento ((14 ± 2) cm), aos 90 minutos, em teor variável;
- 2) plastificante (P) aos 10 minutos do contato entre cimento e água, em quantidade discriminada na Tabela 11 (0,35% em relação à massa de cimento), e superplastificante (SP) para correção do abatimento, aos 90 minutos, em teor variável;
- 3) plastificante polifuncional (PP) aos 10 minutos do contato entre cimento e água, em teor variável, visando-se atingir o abatimento de (16 ± 1) cm, e superplastificante (SP) para correção do abatimento, aos 90 minutos, em teor variável;
- 4) plastificante (P) aos 10 minutos do contato entre cimento e água, em quantidade discriminada na Tabela 11 (0,35% em relação à massa de cimento), superplastificante (SP) para correção do abatimento, aos 90 minutos, em teor variável, e redosagem de superplastificante (SP) para nova correção do abatimento, aos 120 minutos, também em teor variável.

No caso da quarta mistura descrita acima, todo o procedimento executado nos demais concretos após 90 minutos de mistura (ensaios e moldagem dos corpos-de-prova), foi executado aos 120 minutos. A Tabela 12 apresenta um resumo dos procedimentos realizados na etapa 4.

4.7 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM CAMPO (CDC) – ETAPA 5

Inicialmente, nesta etapa pretendia-se aplicar em uma central de concreto o método com melhor desempenho nas propriedades avaliadas em laboratório, uma vez que esta etapa seria executada

depois da análise dos resultados da etapa anterior, finalizando o programa experimental desta pesquisa. Entretanto, a execução desta etapa teve que ser adiantada e realizada simultaneamente à terceira etapa (item 4.6.2). Este fato ocorreu pois, para a realização desta etapa, havia mais três partes envolvidas: a central de concreto, o fornecedor de aditivos e a obra onde o CDC experimental seria lançado, de forma que todas deveriam estar de acordo e apoiando a execução deste estudo.

Tabela 12 – Resumo dos procedimentos realizados nos concretos em cada momento.

Concreto		Tempo decorrido a partir do contato entre cimento e água (minutos)				
		0	30	60	90	120
P + ÁGUA	Tipo de aditivo adicionado/água	P	-	-	ÁGUA	-
	Procedimentos*	1, 2	2	2	2, 1, 2, 3, 4, 5	-
P + SP	Tipo de aditivo adicionado	P	-	-	SP	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2, 3, 4, 5	-
P ₁₀ + SP	Tipo de aditivo adicionado	P (aos 10 minutos)	-	-	SP	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2, 3, 4, 5	-
PP ₁₀ + SP	Tipo de aditivo adicionado	PP (aos 10 minutos)	-	-	SP	-
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2, 3, 4, 5	-
P ₁₀ + SP + SP	Tipo de aditivo adicionado	P (aos 10 minutos)	-	-	SP	SP
	Procedimentos	1, 2	2	2	2, 1, 2	2, 1, 2, 3, 4, 5

* Procedimentos adotados:

- 1: Adição do aditivo ou água
- 2: Ensaio de abatimento de tronco de cone
- 3: Ensaio de teor de ar incorporado
- 4: Ensaio de exsudação
- 5: Moldagem de corpos-de-prova

Durante a realização da terceira etapa, surgiu uma boa oportunidade para avaliação dos aditivos em campo. Uma das construtoras clientes da central de concreto em estudo comprou aditivo superplastificante para produção de um concreto especial com fibras. Devido a problemas com a empresa que estava elaborando o traço deste concreto, a construtora resolveu não mais utilizar este concreto especial. Porém, como a construtora já havia comprado uma grande quantidade de aditivo superplastificante, material este com custo bastante elevado, foi feito um acordo entre a concreteira e a construtora de forma a amenizar os gastos dispendidos na compra do aditivo. Para isto, a concreteira se propôs a reformular o traço usualmente solicitado pela construtora, diminuindo o consumo de cimento e, assim, reduzindo o preço do concreto.

Além disso, a antecipação da quinta etapa, que, de acordo com o cronograma, seria realizada no verão, possibilitaria a realização do estudo em campo quando a temperatura ambiente média era muito próxima da temperatura ambiente fixada para o estudo em laboratório, favorecendo a comparação dos resultados obtidos em ambos os casos.

Pelo exposto, esta que seria a última etapa, foi realizada juntamente com a terceira etapa. Conseqüentemente, não foi possível implantar o método com melhor desempenho nesta pesquisa (o resultado ainda não era conhecido) e também não havia tempo para realizar alterações no procedimento de mistura da central de concreto. De qualquer forma, o método implantado foi um dos que se destacaram no estudo em laboratório, além de ser um procedimento que já havia sido aplicado no estudo piloto que motivou esta pesquisa (MARTINS et al, 2004), conforme a justificativa apresentada no início deste trabalho.

Nesta etapa, foi utilizado como base o traço de concreto com resistência característica de 30 MPa e abatimento de (10 ± 2) cm. Entretanto, como já foi dito, fez-se um corte no consumo de cimento de 14 kg/m³ de concreto. Para garantir o alcance da resistência desejada, a relação a/c do traço foi mantida, ou seja, a partir do novo consumo de cimento, calculou-se a quantidade de água necessária. As quantidades de materiais do CDC são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidades de materiais do CDC (kg/m³).

Cimento	Areia fina	Areia média	Brita 0	Brita ¾"	Água	Plastificante
368	279	518	238	713	195	1,289

Este concreto foi produzido primeiramente em laboratório, a fim de verificar sua consistência. Para a mistura dos materiais, foi adotada a mesma seqüência descrita no item 4.4, com adição de toda a água do traço na mistura inicial. O abatimento do tronco de cone medido foi de 6,5 cm. O concreto permaneceu na betoneira por 90 minutos, sendo remisturado por 1 minuto a cada 10 minutos. Ao final desse período, o abatimento medido foi de 4,5 cm. Em seguida adicionou-se aditivo superplastificante à mistura, em quantidade correspondente a 0,9% da massa de cimento, resultando em um abatimento de 13,0 cm. Cabe ressaltar que os aditivos utilizados no CDC foram os mesmos avaliados em laboratório. Com base neste estudo preliminar realizado em laboratório, foi estabelecida a estratégia para a utilização do aditivo superplastificante em obra.

A avaliação do desempenho do método implantado foi feita durante a concretagem de duas lajes do tipo nervurada com capa, sendo que cada laje foi concretada em duas sub-etapas. Cabe

ressaltar que a construtora, responsável pela obra onde foi realizado o estudo e também dona do aditivo superplastificante, é uma das maiores clientes da concreteira, participa do PBQP-H (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade Habitacional) e, portanto realiza um controle rigoroso do processo de produção.

O concreto era dosado na central, segundo procedimento de rotina, porém, com o novo traço obtido em laboratório, deixando-se parte da água para ser adicionada na obra. O momento de colocação do aditivo plastificante na central era de aproximadamente 2 a 3 minutos após o contato entre cimento e água.

Assim que o caminhão-betoneira chegava à obra, procedia-se à adição da água restante do traço ou até se atingir o abatimento de (8 ± 1) cm. Logo após, era adicionado aditivo superplastificante ao concreto, deixando o balão do caminhão-betoneira girar por 5 minutos, em velocidade de mistura. O aditivo era dosado em volume, em baldes, e adicionados ao concreto por meio do funil do caminhão-betoneira.

Devido à dificuldade de adensamento do concreto, lançado em lajes nervuradas com capas de apenas 4 cm, a construtora solicitou que o concreto fosse lançado com um abatimento bastante alto, em torno de 18,0 cm. Após a completa mistura do concreto com aditivo, era novamente realizado o ensaio de abatimento e, caso a consistência estivesse adequada, iniciava-se o lançamento.

A temperatura ambiente era monitorada ao longo de todo o período de concretagem. Também foram monitorados os tempos decorridos a partir da mistura dos materiais na central até a chegada à obra, a redosagem da água e a adição de aditivo SP, bem como o período de lançamento do material de cada caminhão-betoneira.

Tão logo o abatimento era atingido após a adição de aditivo SP, moldavam-se 4 corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões (10 x 20) cm, para ruptura à compressão axial, sendo 2 para a idade de 7 dias e 2 para a idade de 28 dias. Com 24 horas de idade, os corpos-de-prova eram desmoldados e levados para a central de concreto, onde seguiam para cura imersa em água saturada de cal até a idade do ensaio. Para nivelamento dos topos, as superfícies foram capeadas com pasta de cimento e enxofre.

Os ensaios de ruptura à compressão axial foram realizados na prensa hidráulica do laboratório da central de concreto, de marca Pavitest e capacidade nominal de 100 tf. Foi adotado como resultado de resistência do concreto o maior valor obtido para o par rompido em cada idade.

Para finalizar, foi feita uma análise da viabilidade técnica (proporcionamento de aditivo no canteiro de obras, tempo gasto para correção do abatimento na obra, treinamento dos funcionários para emprego adequado do método, etc.) e econômica (custos do aditivo, redução do desvio-padrão da central, reformulação dos traços, economia de cimento, etc.) da implantação do método avaliado na central de concreto.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados conforme descrito no programa experimental. Os resultados serão expostos em ordem diferente do exposto no capítulo anterior para facilitar a apresentação e a análise dos dados.

5.1 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS E ARGAMASSAS QUANTO À CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA

Todos os dados e resultados obtidos nas etapas 1 e 2 do programa encontram-se no Apêndice A. Neste item, os resultados serão apresentados esporadicamente em tabelas, mas, principalmente, em gráficos para simplificar a apresentação e a análise dos mesmos.

As características finais dos concretos produzidos na primeira etapa do programa experimental são apresentadas na Tabela 14. Percebe-se que, na maioria dos casos, a relação a/c encontrada para alcançar o abatimento pré-estabelecido foi menor do que a discriminada no traço original, com exceção dos concretos com f_{ck} 35,0 MPa, que resultaram em uma relação a/c maior. Cabe lembrar que, para o abatimento de (10 ± 2) cm, dosou-se o concreto para atingir inicialmente um abatimento de (12 ± 1) cm, e para o abatimento de (14 ± 2) cm, dosou-se para atingir um abatimento inicial de (16 ± 1) cm.

É provável que o excesso de água existente nos traços originais já levasse em consideração a perda de abatimento que ocorre entre a mistura inicial e o lançamento do concreto, resultando em um abatimento adequado nesse momento e na resistência de dosagem esperada. Entretanto, para estas condições serem atingidas, o concreto deve ter um alto consumo de cimento, fato comprovado pelas elevadas resistências à compressão apresentadas por estes concretos aos 28 dias, muito acima das resistências características.

As relações água / materiais secos (H) obtidas se mantiveram muito próximas para cada abatimento avaliado, obedecendo o que estabelece a lei de Lyse. Este pesquisador demonstrou que, dentro de certos limites, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do material fresco, qualquer que seja a

proporção dos demais materiais da mistura (LYSE, 1932 apud DAFICO, 1997). Desta forma, os resultados obtidos favorecem a construção do diagrama de dosagem conforme o Método IPT / EPUSP uma vez que os dados se ajustam bem à reta de correlação entre o traço (m) e a relação a/c, como será apresentado posteriormente.

A Tabela 14 mostra, ainda, a perda de abatimento ocorrida ao longo de 90 minutos, o teor de aditivo SP (% em relação à massa de cimento) adicionado após este período e a recuperação de abatimento promovida pelo aditivo em cada mistura. Como se vê, os teores de aditivo superplastificante necessários para recuperar a fluidez dos concretos não foram muito variáveis: entre 0,33 e 0,50% da massa de cimento. Entretanto, é interessante notar que, quando o abatimento a ser recuperado era muito pequeno, o teor de aditivo para cada 1 cm de abatimento recuperado foi maior. Como mostra a Tabela 14, para a recuperação de 3 cm de abatimento, o teor de aditivo foi de 0,16 e 0,12% para cada 1 cm, enquanto que as maiores recuperações de abatimento (9,0 e 8,5 cm) foram alcançadas com os menores teores, isto é, 0,06 e 0,05% para cada 1 cm. Estes resultados demonstram que, após a adição de uma determinada quantidade de aditivo SP à mistura, o ganho de fluidez é acelerado e para menores quantidades de aditivo, passa-se a ter maiores aumentos de fluidez.

Tabela 14 - Características dos concretos produzidos.

Traço	a/c tabelado	a/c real	H (%)	Abatimento inicial (cm)	Perda de abatimento (cm)	% aditivo aos 90 minutos	Recuperação de abatimento (cm)	% aditivo / 1 cm de abatimento
F20S10	0,66	0,66	9,80	11,5	4,5	0,47	3,0	0,16
F25S10	0,59	0,59	9,63	11,0	4,5	0,48	6,5	0,07
F30S10	0,53	0,52	9,67	13,0	6,0	0,50	9,0	0,06
F35S10	0,48	0,50	9,57	11,0	5,5	0,42	5,5	0,08
F20S14	0,66	0,66	10,42	16,0	6,0	0,36	3,0	0,12
F25S14	0,60	0,59	9,91	16,0	6,0	0,36	5,0	0,07
F30S14	0,54	0,53	10,00	15,5	6,0	0,33	4,5	0,07
F35S14	0,45	0,50	10,15	15,0	6,5	0,44	8,5	0,05

Observou-se que nos concretos com abatimento especificado de (14 ± 2) cm, a perda de abatimento (em valor absoluto) foi maior do que a perda dos concretos com abatimento especificado de (10 ± 2) cm, o que está de acordo com o comentado no item 2.4.2. Cabe ressaltar que no segundo caso, a maior perda de abatimento (6,0 cm) corresponde ao maior abatimento inicial dentre eles (13,0 cm).

Outra consideração a ser feita com relação aos concretos confeccionados é quanto à variação no abatimento final após a adição de aditivo SP. Encontrou-se dificuldade para se dosar o aditivo a fim de atingir determinado abatimento. Com teores praticamente iguais de aditivo e os mesmos abatimentos de saída, eram obtidos abatimentos distintos. Esta característica do aditivo SP torna difícil a elaboração de tabelas para correção do abatimento do CDC em obra com o uso de aditivo superplastificante, como normalmente é feito para correção com água (tantos litros de água para tantos cm de aumento no abatimento).

Como descrito no programa experimental, todo o procedimento executado em concreto foi repetido em argamassa com vistas a obter a correlação entre os ensaios de consistência e resistência de ambos os materiais. Assim, a Figura 33 apresenta os gráficos dos abatimentos dos concretos produzidos e as aberturas das respectivas argamassas na mesa de consistência, em função do tempo. São apresentados os gráficos para abertura inicial, com aplicação de 15 golpes e com aplicação de 30 golpes correspondentes aos ensaios realizados em argamassas na mesa de consistência. Na legenda, a última letra de cada traço discrimina se é concreto (C) ou argamassa (A). No Apêndice A constam gráficos onde foram plotados os dados de abatimento do concreto e aberturas inicial, com 15 golpes e com 30 golpes da respectiva argamassa, todos em função do tempo, para cada traço individualmente.

Da Figura 33 constata-se que, tanto concretos, como argamassas, sofreram uma grande perda de fluidez ao longo de 90 minutos, em proporções muito semelhantes. Da mesma forma, após a adição do aditivo superplastificante, o aumento na fluidez apresentado por ambos os materiais segue a mesma tendência.

As aberturas iniciais das argamassas (sem golpes) apresentam uma distinção maior de comportamento entre as misturas avaliadas, aproximando-se mais do comportamento dos concretos. Quando são aplicados golpes, tanto 15, quanto 30, as argamassas parecem se comportar todas de forma muito semelhante, como se nota pelos pontos mais aglomerados no gráfico. Conseqüentemente, perde-se um pouco da precisão necessária para se prever o comportamento de um concreto a partir de uma argamassa.

Em virtude de não se observar diferença significativa de comportamento quando são aplicados 15 ou 30 golpes na mesa de consistência, optou-se por prosseguir apenas com a determinação da abertura inicial e com a aplicação de 15 golpes nas argamassas avaliadas na etapa seguinte.

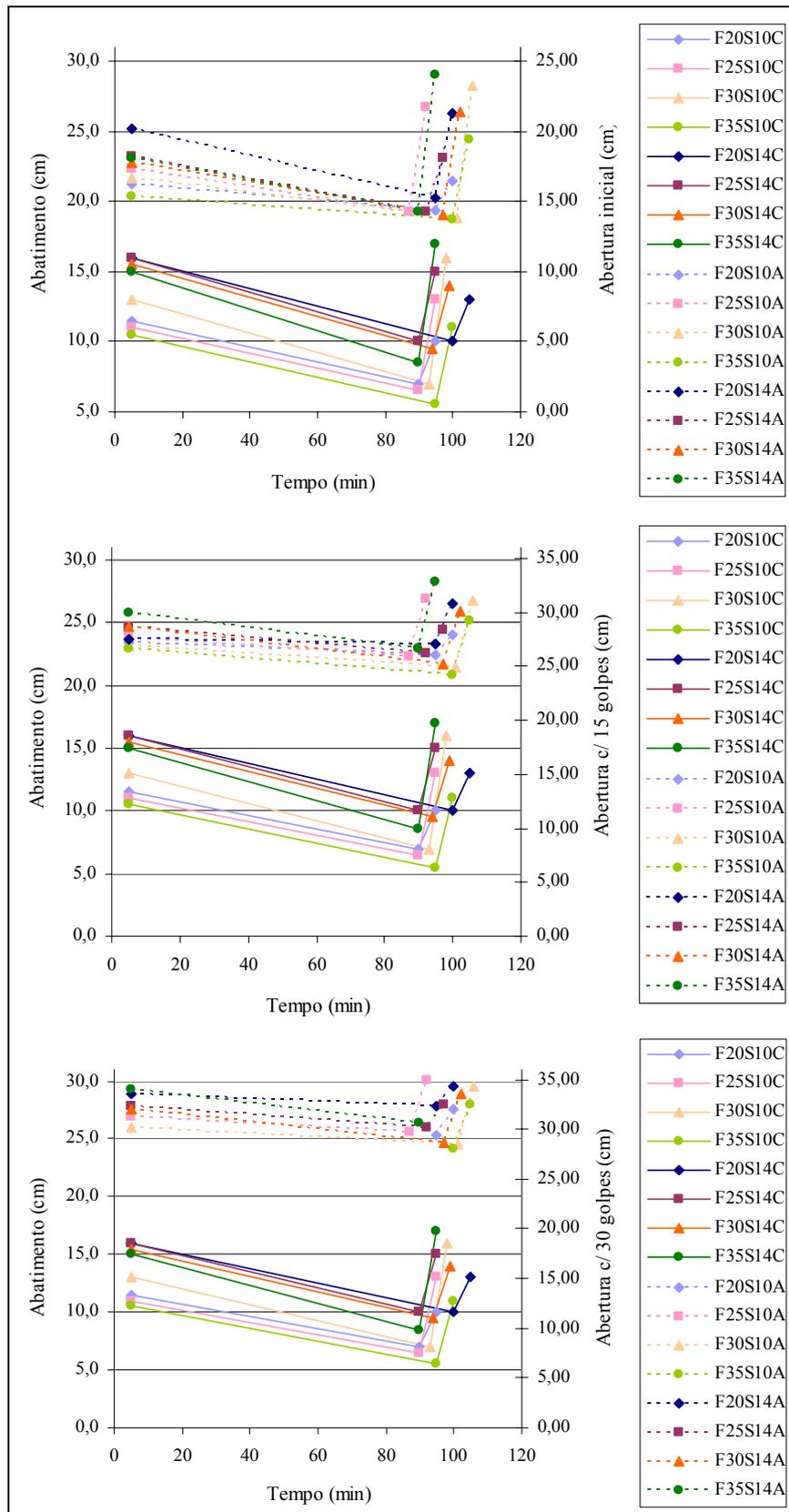


Figura 33 – Abatimento dos concretos e aberturas inicial, com 15 golpes e com 30 golpes das argamassas em função do tempo e após a adição de aditivo SP.

Para uma melhor avaliação da existência ou não de relação entre a consistência de concretos, avaliada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, e de argamassas, avaliada pelo ensaio da mesa de consistência para abertura inicial, com 15 golpes e com 30 golpes, os dados obtidos foram plotados em gráficos que constam na Figura 34.

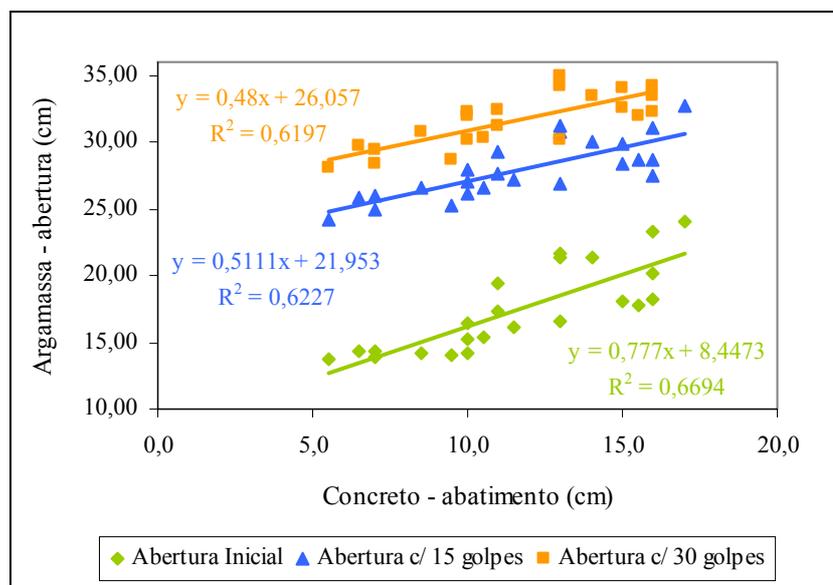


Figura 34 – Relação entre abatimento de concreto e abertura de argamassa.

Percebe-se pela Figura 34 que os pontos são dispersos, mas é possível estabelecer relações entre as variáveis. Os coeficientes de correlação obtidos, apesar de não atenderem ao que os estatísticos julgam significar boa correlação, isto é, acima de 0,90, podem ser considerados satisfatórios quando tratam de propriedades de concretos e argamassas. Segundo Shilstone (1988), concretos e argamassas são materiais tão heterogêneos que um coeficiente de correlação acima de 0,60 pode ser considerado significativo.

A relação obtida entre os dados de abertura inicial das argamassas e abatimento dos concretos foi a que apresentou maior coeficiente de correlação, o que era de se esperar uma vez que ambos os ensaios avaliam o comportamento estático das misturas. Já para a relação entre abertura com 15 golpes e abatimento e abertura com 30 golpes e abatimento (ensaios dinâmicos), os coeficientes de correlação são menores, sendo que o coeficiente da primeira relação é um pouco maior do que o da segunda.

Para uma análise mais apurada, os dados correspondentes à abertura inicial das argamassas foram divididos em “sem adição de superplastificante” e “com adição de superplastificante” com o objetivo de se analisar a influência do aditivo na relação entre a consistência de concretos e

argamassas. Os dados já separados estão plotados no gráfico apresentado na Figura 35, que também mostra os coeficientes de correlação entre as variáveis.

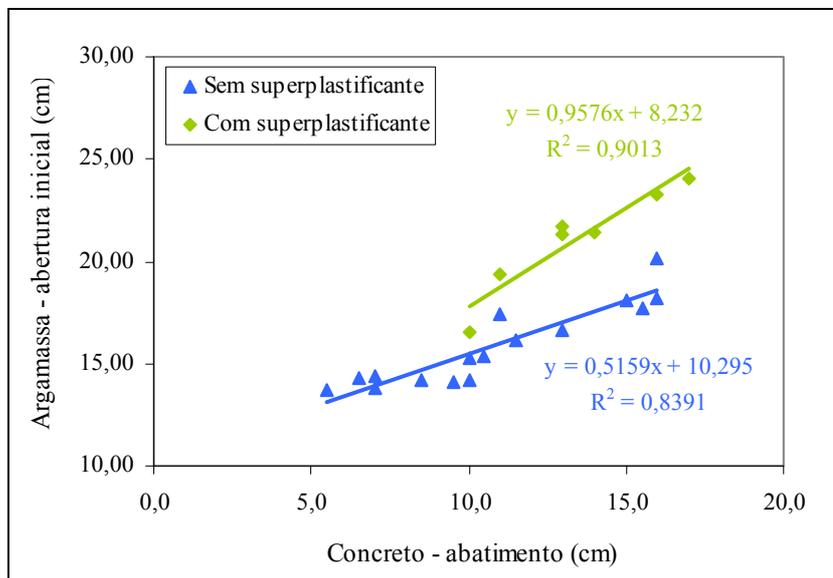


Figura 35 – Relação entre abatimento de concreto e abertura inicial de argamassa.

Os coeficientes de correlação obtidos para a relação entre abertura inicial de argamassa e abatimento de concreto quando são separados os resultados, são bem superiores aos obtidos quando estes são analisados em conjunto. Estes resultados comprovam que é possível realizar um estudo preliminar em argamassa, em termos de consistência, para prever o comportamento em concreto e que as curvas apresentadas na Figura 35 podem ser adotadas para estimar o abatimento em concreto, dada uma abertura inicial em argamassa. Deve-se salientar que estas curvas valem para os mesmos agregados e tipo de cimento adotados neste estudo. Para materiais diferentes, novas curvas de correlação devem ser construídas.

Nota-se, na Figura 35, que, com a adição de aditivo SP, a fluidez resultante em argamassa tende a ser maior do que quando este não é adicionado, para um mesmo abatimento de concreto, mostrando que o aditivo exerce um efeito maior de fluidificação na argamassa do que no concreto. Neste caso, o coeficiente de correlação obtido foi maior do que para misturas sem a adição do aditivo. É sempre importante atentar para essa distinção de comportamento quando se realizar um estudo prévio em argamassa.

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias e teor de ar incorporado dos concretos e argamassas produzidos constam na Figura 36. Os resultados de resistência correspondem aos tempos de 0 minutos, quando foram moldados corpos-de-prova logo após a mistura inicial, e de

90 minutos, quando foram moldados corpos-de-prova logo após a adição de aditivo SP para correção da consistência. Foram adotados como resultados de resistência, os valores potenciais, isto é, o maior dentre os três dados obtidos nos ensaios, tanto para concretos, como para argamassas, em função destes valores apresentarem uma grande dispersão. Os resultados de teor de ar incorporado correspondem apenas ao tempo de 90 minutos, quando o ensaio para determinação da massa específica real do material foi realizado.

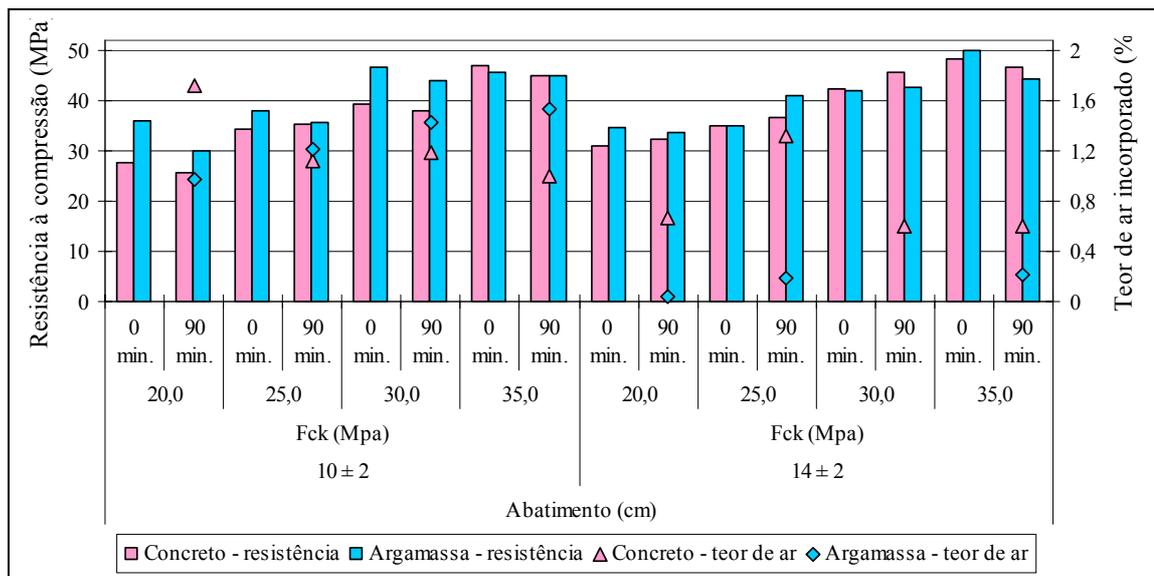


Figura 36 – Resistência à compressão aos 28 dias e teor de ar incorporado em função do tempo de mistura, f_{ck} e abatimento do concreto.

Na maioria dos traços a resistência à compressão da argamassa foi maior do que a do respectivo concreto, o que era esperado em função, principalmente, da argamassa não possuir zona de transição entre agregado graúdo e pasta de cimento. Além disso, há maior probabilidade de existirem falhas localizadas em um corpo-de-prova de concreto (dimensões 10 x 20 cm) do que em um corpo-de-prova de argamassa (dimensões 5 x 10 cm), o que contribuiria para a propagação mais rápida de fissuras em concreto, diminuindo sua resistência. Outra possível causa é a maior incorporação de ar em concreto, também em função das maiores dimensões do corpo-de-prova ou pela presença do agregado graúdo, apesar deste efeito não ter sido pronunciado nos resultados de teor de ar incorporado obtidos nessa pesquisa.

As resistências apresentadas pelos materiais nos diferentes tempos de mistura (0 e 90 minutos) não diferem significativamente entre si, sendo que em alguns casos a resistência aos 0 minutos é maior e em outros a resistência aos 90 minutos é maior.

Com relação aos teores de ar incorporado, foram obtidos valores muito variáveis entre si, porém todos abaixo de 1,7% para concretos e 1,5% para argamassas. Estes resultados estão dentro do esperado e de acordo com a determinação da NBR 11768:1992, de que os aditivos fluidificantes não devem causar uma incorporação de ar maior do que 3,0%. O cálculo do teor de ar da argamassa de f_{ck} de 30,0 MPa e abatimento de (14 ± 2) cm resultou em valor negativo, provavelmente, por erro no ensaio de massa específica real do material.

Como já foi dito, também se tentou relacionar as resistências de concreto e argamassa. A Figura 37 mostra o gráfico onde foram plotados todos os resultados de resistência, bem como o coeficiente de correlação obtido. Percebe-se que, apesar da dispersão dos dados, existe relação entre as variáveis, demonstrada pelo coeficiente de correlação de 0,79, que pode ser considerado satisfatório para estes materiais.

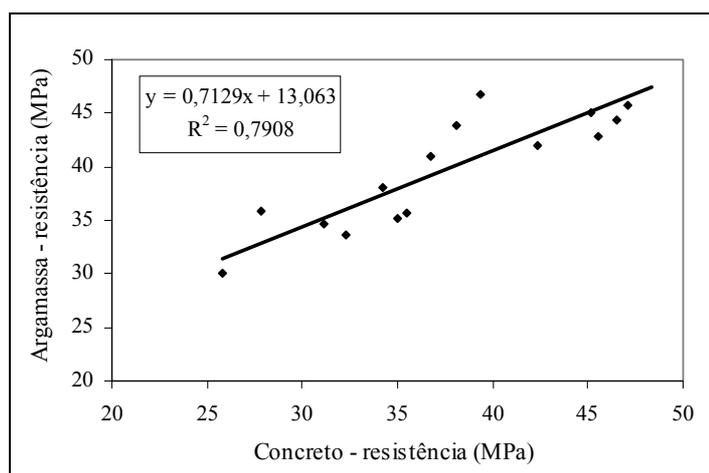


Figura 37 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de concretos e argamassas.

A partir dos resultados obtidos e apresentados até aqui, verificou-se que era possível a realização de estudos preliminares em argamassas como previsão do comportamento em concretos, principalmente, quando se trata de avaliação da consistência, pelos ensaios de abatimento do tronco de cone em concretos e abertura na mesa de consistência para argamassas, e da resistência à compressão.

5.2 CURVAS DE DOSAGEM

Com os dados obtidos em concretos, apresentados no item anterior, foi montado o diagrama de dosagem conforme o Método IPT / EPUSP. Para montagem do diagrama foram utilizados os

resultados de resistência correspondentes ao tempo de 0 minutos (logo após a mistura inicial).

Na Tabela 15 constam as equações obtidas pelo método de regressão linear para cada quadrante do digrama, a partir dos quatro traços avaliados para cada abatimento. Os pontos experimentais se ajustaram muito bem às equações obtidas como se pode ver na Figura 38. Os resultados das regressões lineares podem ser vistos no Apêndice B.

Tabela 15 – Equações do diagrama de dosagem.

Abatimento (cm)	Lei de Abrams	Lei de Lyse	Lei de Molinari
(10 ± 2)	$f_c = \frac{198,49}{19,81^{a/c}}$	$m = -1,37 + 11,01.a/c$	$C = \frac{1000}{0,41 + 0,48.m}$
(14 ± 2)	$f_c = \frac{177,53}{14,60^{a/c}}$	$m = -1,15 + 10,16.a/c$	$C = \frac{1000}{0,46 + 0,48.m}$

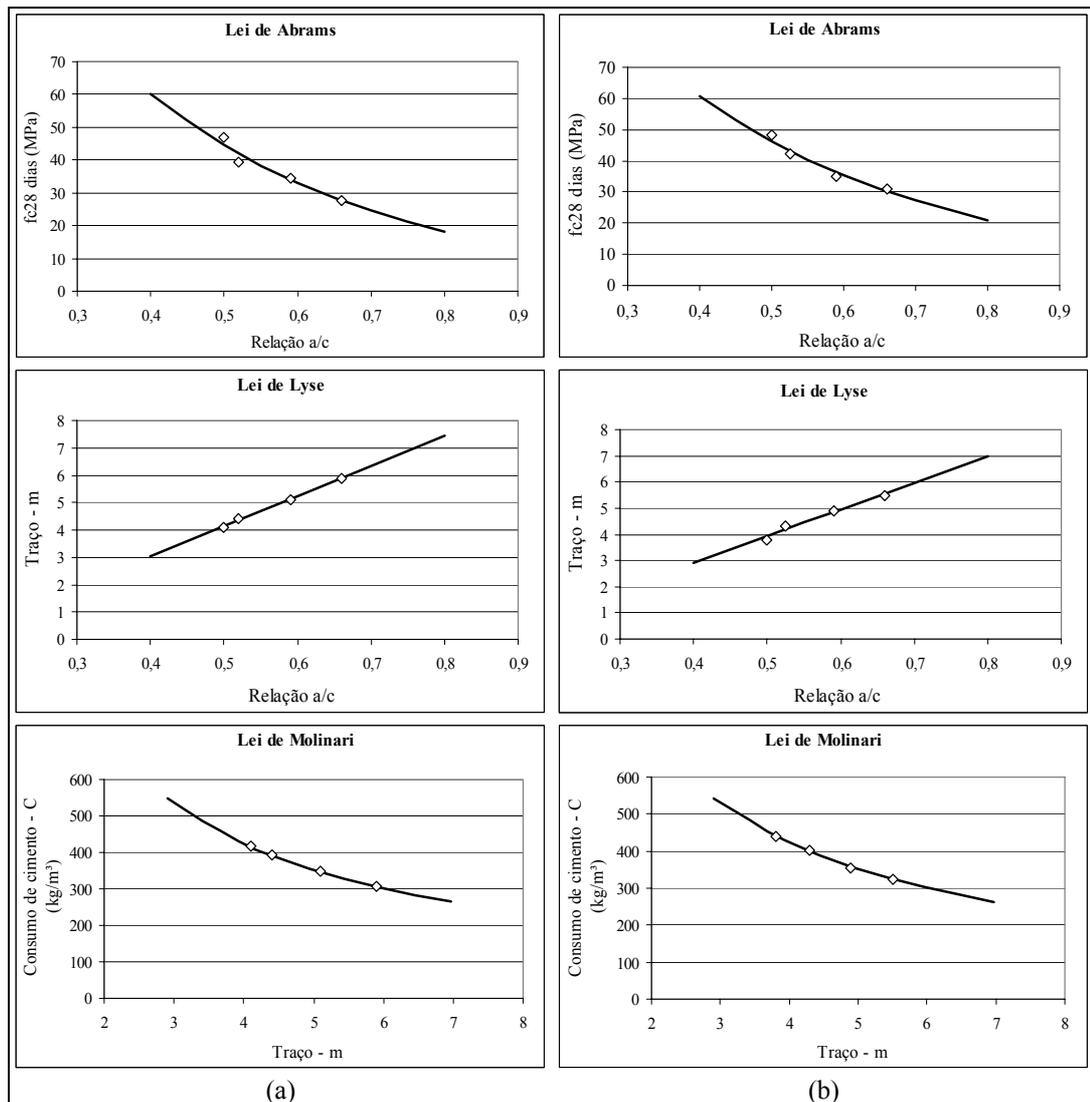


Figura 38 – Relações obtidas em cada quadrante a partir dos pontos experimentais para os abatimentos de: (a) (10 ± 2) cm e (b) (14 ± 2) cm.

O diagrama de dosagem é apresentado na Figura 39, de onde foram obtidos os parâmetros para o cálculo da composição das misturas produzidas nas etapas seguintes. Na Tabela 16, são mostrados estes parâmetros e a composição das misturas já foi apresentada nos itens 4.6.2 e 4.6.3.

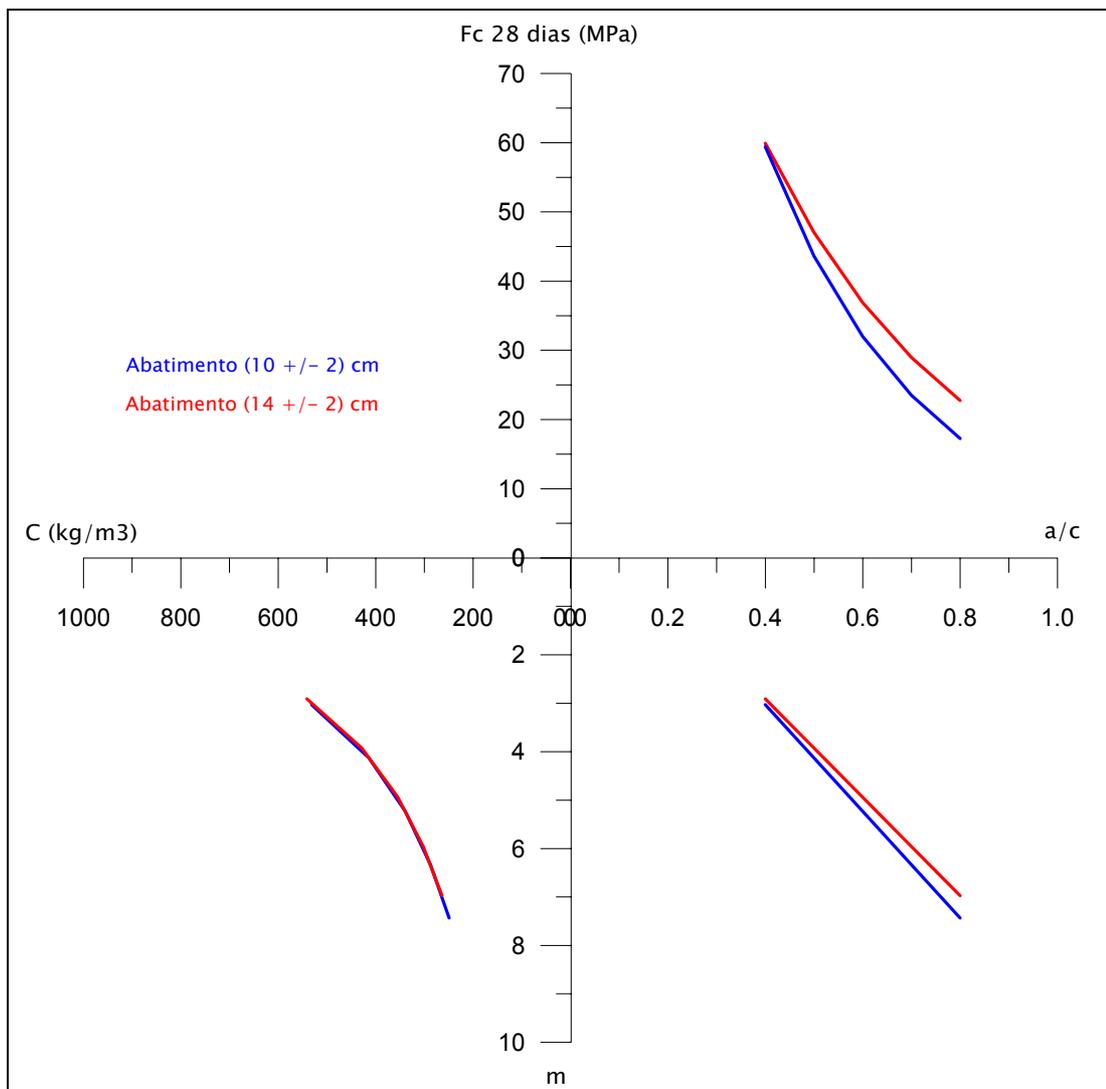


Figura 39 – Diagrama de dosagem.

Tabela 16 – Parâmetros obtidos a partir do diagrama de dosagem.

Traço	Resistência característica - f_{ck} (MPa)	Resistência de dosagem - f_{cj} (MPa)	Abatimento (cm)	Relação a/c	Traço - m	Consumo de cimento - C (kg/m ³)
F25S10	25,0	30,0	(10 ± 2)	0,63	5,59	320
F35S10	35,0	40,0		0,54	4,53	383
F25S14	25,0	30,0	(14 ± 2)	0,66	5,58	320
F35S14	35,0	40,0		0,56	4,49	384

Como se vê na Tabela 16, os consumos de cimento obtidos pelas curvas de dosagem para os abatimentos de (10 ± 2) cm e (14 ± 2) cm, foram praticamente iguais, ao contrário do esperado, que era um consumo maior para o abatimento de (14 ± 2) cm. Isto aconteceu em virtude de os concretos com abatimento de (14 ± 2) cm terem apresentado maiores resistências à compressão do que os concretos com abatimento de (10 ± 2) cm. Estes resultados são opostos aos apresentados por Mehta e Monteiro (1994), que citam um estudo onde se verificou que, para uma dada relação a/c, o aumento do abatimento leva à redução da resistência à compressão, pois misturas com abatimentos elevados tendem a exsudar. Já o método de dosagem IPT / EPUSP tem como uma de suas premissas o seguinte: “definida a relação a/c e definidos certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas.” Cabe ressaltar que, no presente estudo, a relação a/c de cada traço foi a mesma para ambas as consistências (com exceção de um dos traços, onde a relação a/c diferiu em 0,01), assim como o teor de argamassa. De acordo com estes resultados, a resistência à compressão não depende apenas da relação a/c, mas, também, da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto. Neste estudo de caso, o maior consumo de cimento permitiu uma maior compactação das misturas ou expulsão do ar aprisionado e aumentou a resistência à compressão.

5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM LABORATÓRIO

5.3.1 Argamassas

Todos os dados obtidos na etapa 3 constam no Apêndice C. Neste sub-item, os resultados serão apresentados em gráficos para melhor analisá-los.

Nas Figuras 40, 41, 42 e 43 são apresentados os gráficos de consistência em função do tempo para os traços F25S10, F35S10, F25S14 e F35S14, respectivamente. Cada Figura mostra os gráficos para as três temperaturas avaliadas: (12 ± 1) , (23 ± 1) e $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$. São apresentados aqui apenas os gráficos correspondentes à abertura inicial, pois não se verificou mudança significativa de comportamento quando aplicados os 15 golpes às argamassas. Os gráficos correspondentes à abertura com 15 golpes podem ser vistos no Apêndice C.

As legendas das Figuras 40 à 43 indicam os teores adicionados de cada aditivo, em % da massa de cimento. Apenas o aditivo plastificante retardador foi adicionado em teor variável, definido em função da consistência inicial e do tempo de endurecimento da argamassa. No primeiro traço

de cada temperatura avaliada, eram testados dois teores deste aditivo, sendo que o que apresentasse melhor desempenho, era adotado nas demais misturas. Para a temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ adicionou-se, primeiramente, 0,15% de aditivo, porém a abertura obtida na mesa de consistência foi muito pequena. Então, se adotou o teor de 0,25% nas demais misturas, exceto em uma delas, que se adicionou 0,20%. Para a temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, foram testados os teores de 0,25 e 0,35%, mantendo-se o segundo nas demais misturas por apresentar melhor resultado. Apenas para a temperatura de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ não foi adotado este procedimento. Neste caso, devido à baixa temperatura, adotou-se um teor muito próximo ao mínimo para evitar um retardo excessivo de pega e endurecimento, sendo este igual a 0,20%.

De forma geral, não se observa alteração na escala de desempenho dos aditivos e métodos de adição em função do traço ou da consistência inicial para uma determinada temperatura, isto é, para os quatro traços avaliados em cada temperatura, é possível definir uma única classificação de desempenho dos aditivos em termos de fluidez inicial e manutenção. O mesmo não ocorre quando são variadas as temperaturas, já que alguns aditivos apresentaram bom desempenho em determinadas temperaturas e em outras, o pior desempenho dentre as misturas avaliadas.

Nesta etapa, as primeiras misturas foram produzidas à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, por se tratar de uma temperatura ambiente média, podendo, assim, ser tomada como referência para as outras duas avaliadas. Nesta temperatura, os aditivos que promoveram maior fluidez inicial e menor perda de fluidez foram os P e PP, quando adicionados aos 10 minutos de mistura. O aditivo PP adicionado aos 10 minutos promoveu uma fluidez inicial um pouco maior, mas, também, perdeu mais rapidamente. A mistura com aditivo PP adicionado no início apresentou uma boa fluidez inicial, mas uma rápida perda de fluidez, sendo uma das maiores dentre todas as misturas avaliadas. O aditivo P, quando adicionado no início da mistura, promoveu uma consistência inicial intermediária, porém, perdeu rapidamente sua fluidez em comparação aos primeiros. Cabe salientar que, de acordo com a seqüência de mistura dos materiais apresentada no capítulo anterior (item 4.5), a adição do aditivo aqui chamada de inicial, corresponde à adição após 3 minutos do contato entre cimento e água.

O aditivo PR (no teor de 0,25%), adicionado aos 10 minutos, apresenta um comportamento muito semelhante ao aditivo P adicionado no início da mistura. Porém, quando este aditivo é adicionado no início da mistura é o de pior desempenho dentre os aditivos avaliados.

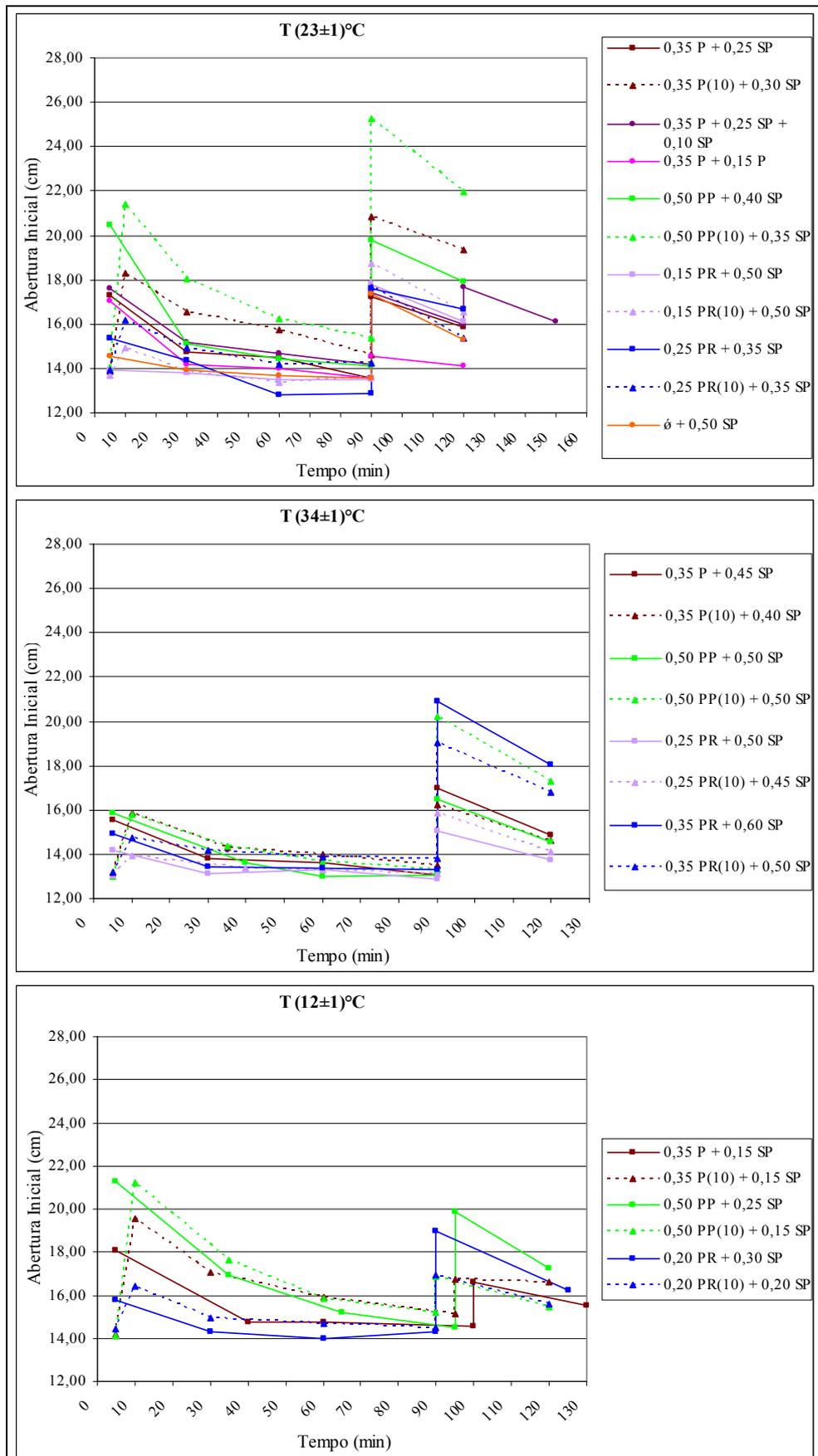


Figura 40 – Consistência em função do tempo para o traço F25S10 em diferentes temperaturas.

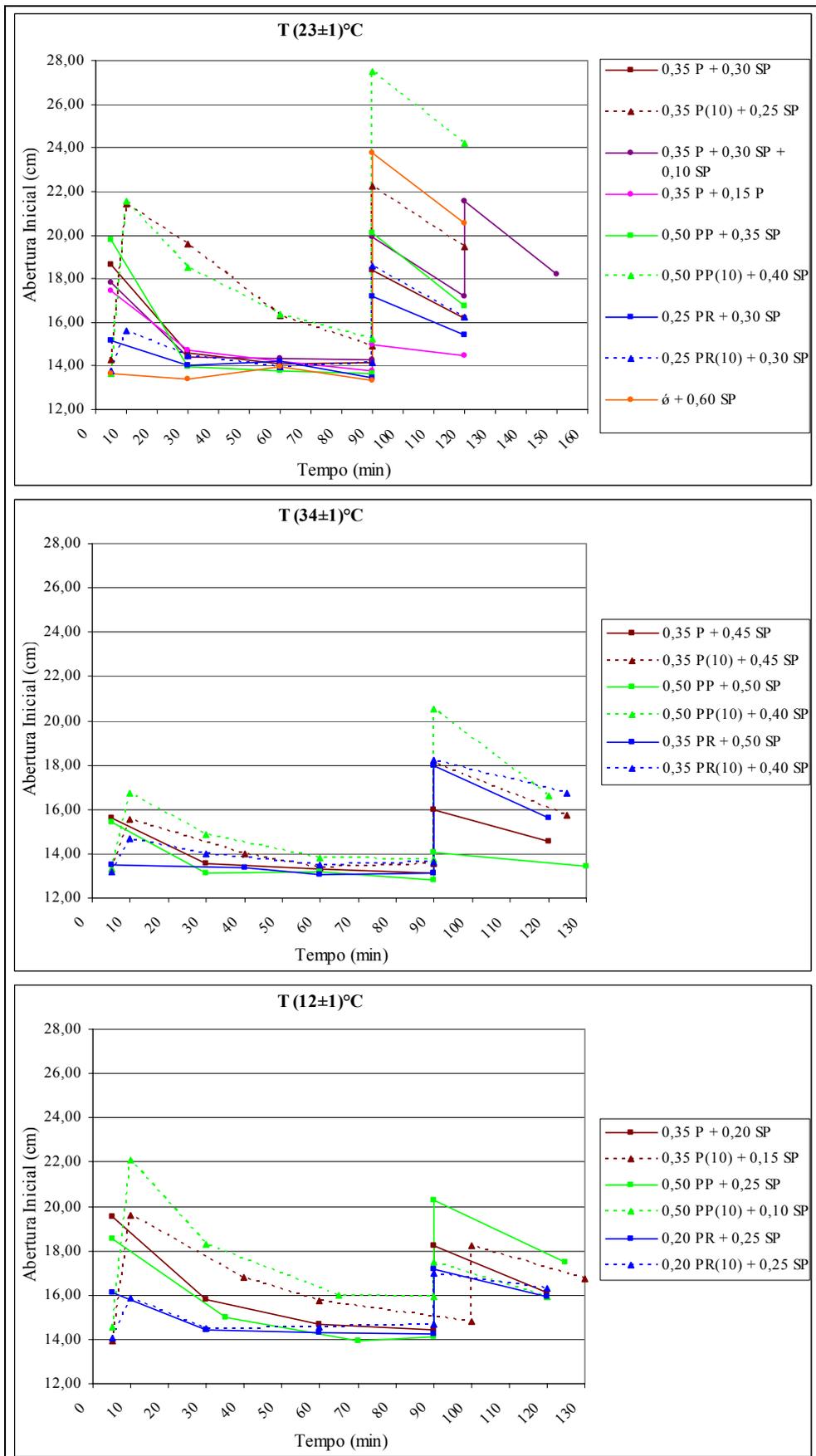


Figura 41 – Consistência em função do tempo para o traço F35S10 em diferentes temperaturas.

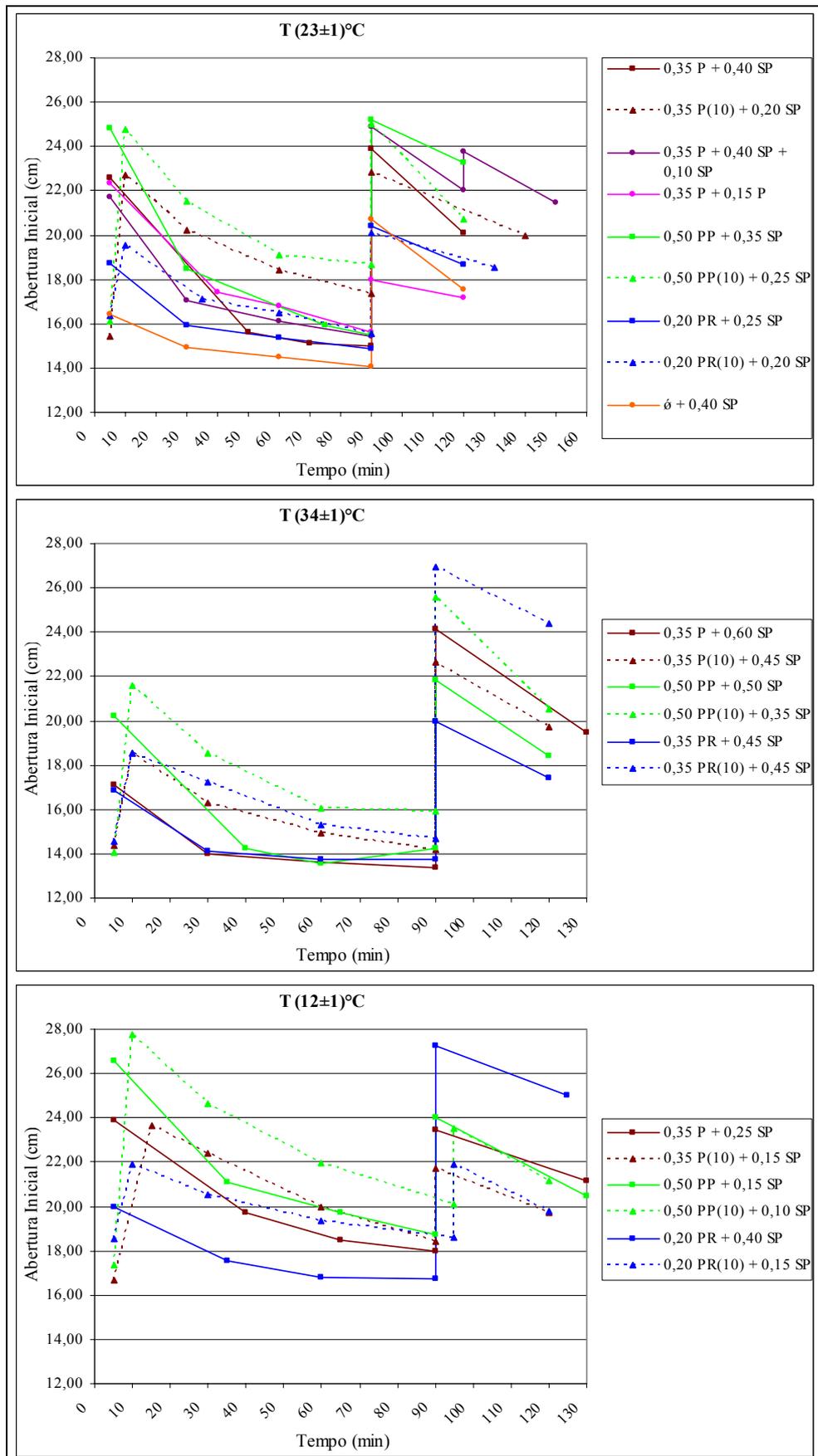


Figura 42 – Consistência em função do tempo para o traço F25S14 em diferentes temperaturas.

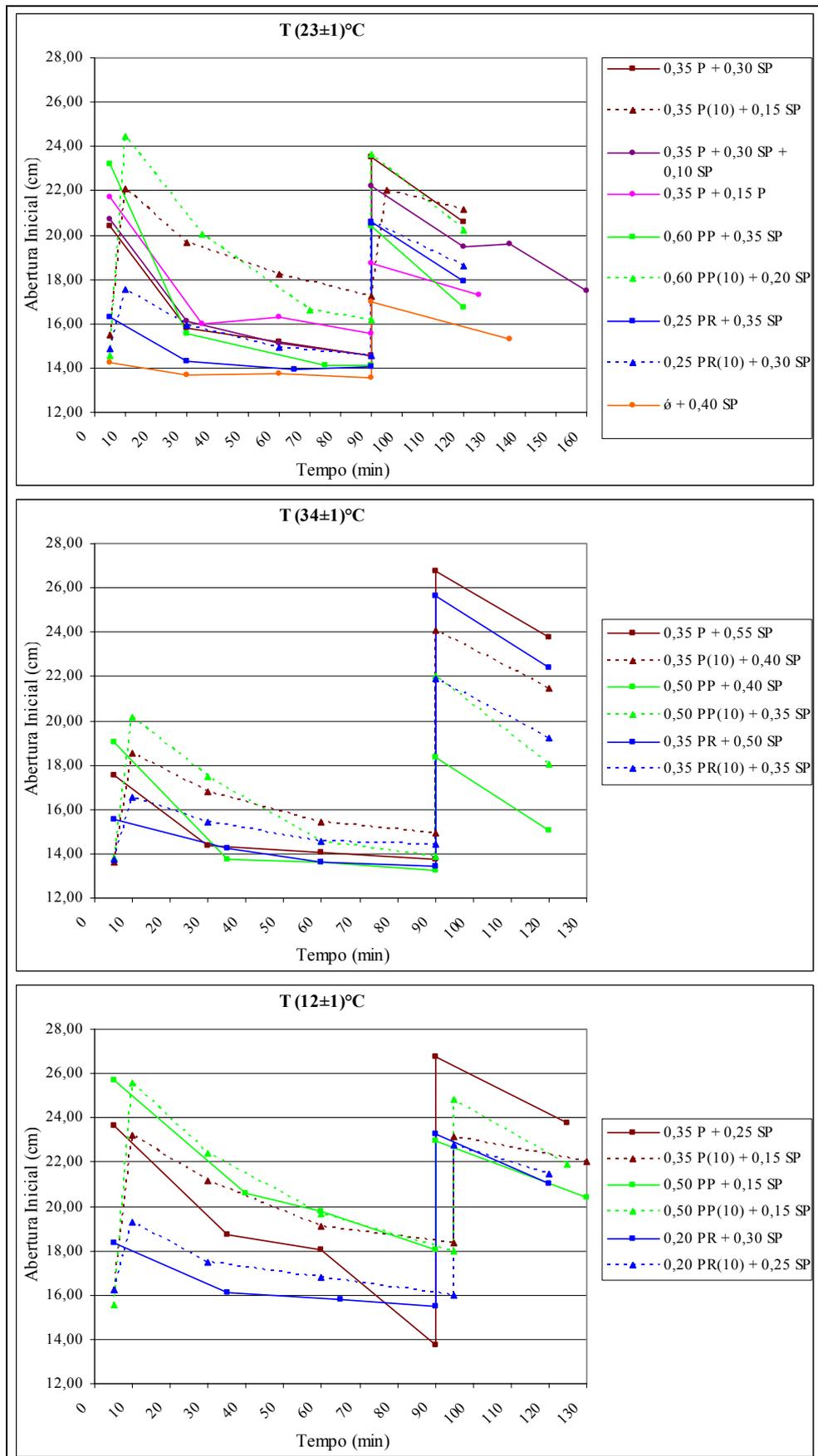


Figura 43 – Consistência em função do tempo para o traço F35S14 em diferentes temperaturas.

Quando a consistência da mistura com aditivo P foi corrigida aos 90 minutos com uma nova adição de aditivo P, em função de haver um limite de dosagem para evitar retardo excessivo de pega, a fluidez apresentada foi muito pequena, inviabilizando seu uso como aditivo para recuperação de fluidez.

Já o aditivo SP se mostrou um excelente meio para recuperação da fluidez aos 90 minutos de mistura, visando à obtenção da mesma consistência inicial das argamassas de referência, isto é, aquelas onde se adicionou aditivo P no início da mistura. Foi adicionado o teor máximo de 0,40% de SP em misturas aditivadas inicialmente, porém o teor de 0,35% se mostrou o mais adequado para a fluidificação das misturas mais consistentes. As maiores quantidades foram adicionadas às misturas que se apresentavam mais consistentes aos 90 minutos, sendo que menores quantidades foram necessárias quando os aditivos eram adicionados aos 10 minutos de mistura em relação à adição imediata.

Já para o aumento da fluidez das misturas onde não se adicionou aditivo inicialmente, o teor ideal de SP foi de 0,50% para atingir a consistência desejada. Entretanto, este procedimento não é adequado para CDC, uma vez que uma mistura muito seca prejudica a rotação do balão do caminhão-betoneira, que tem seu torque muito aumentado. Para o concreto poder ser transportado até a obra, deve ter uma fluidez mínima para o perfeito funcionamento do caminhão-betoneira.

O aditivo SP também se mostrou muito eficiente na redosagem aos 120 minutos, quando apenas 0,10% foram suficientes para retornar à consistência obtida aos 90 minutos. Entretanto, percebe-se nas Figuras 40 à 43 que, após a adição do aditivo SP, tanto aos 90 minutos, quanto as 120 minutos, as misturas apresentam uma grande perda de fluidez nos 30 minutos seguintes. Assim, devido à curta duração do efeito de fluidificação do SP, após a adição deste aditivo em obra, a operação de concretagem deve ser acelerada, ou será necessária uma redosagem do aditivo.

Algumas das misturas produzidas à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ apresentaram um pequeno retardo de endurecimento, observado no momento da desmoldagem. Em média, um retardo de 1 a 2 horas foi observado nas misturas com adição do aditivo aos 10 minutos e para as misturas com redosagem de SP aos 120 minutos, enquanto que as demais estavam em condições razoáveis para serem desmoldadas com 24 horas de idade.

Pelos motivos já expostos, para a confecção das argamassas nas demais temperaturas avaliadas, as misturas P + P e Ø + SP foram excluídas. Igualmente, a mistura P + SP + SP foi eliminada por já se ter uma avaliação da redosagem de aditivo SP aos 120 minutos e não ser este o objetivo principal do trabalho.

Com relação à temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, analisando-se as Figuras 40 à 43 percebe-se logo a diferença entre a consistência inicial e a perda de fluidez das misturas nesta temperatura e à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Todas as misturas apresentam menor fluidez inicial e maior perda de trabalhabilidade.

Para se analisarem os dados desta temperatura para os traços F25S10 e F35S10, deve-se tomar como base os gráficos de abertura com 15 golpes em função do tempo (Apêndice C), uma vez que nos gráficos de abertura inicial, apresentados nas Figuras 40 e 41, não existe uma distinção clara de comportamento entre as misturas, pois todas apresentam fluidez muito pequena. Já para análise dos traços F25S14 e F35S14, os gráficos apresentados nas Figuras 42 e 43 estão adequados.

As melhores misturas, em termos de fluidez inicial e manutenção, foram aquelas onde se adicionaram os aditivos P, PP e PR após 10 minutos do contato entre cimento e água. Dentre as três, a adição com atraso do aditivo PR foi a que promoveu a menor perda de trabalhabilidade ao longo do tempo. Para os traços F25S14 e F35S14, a mistura com aditivo PP adicionado aos 10 minutos foi a que apresentou maior fluidez inicial, porém, também, maior perda de fluidez com o tempo. Já para os traços F25S10 e F35S10, o comportamento das três misturas foi muito semelhante.

Dentre as misturas com adição imediata de aditivo, a adição de aditivo PP, apesar de promover a maior fluidez inicial, levou à maior taxa de enrijecimento da mistura. As outras duas misturas, com aditivos P e PR, apresentaram comportamentos muito semelhantes.

Quanto à recuperação da fluidez com adição de aditivo SP aos 90 minutos, tomando-se como referência a abertura inicial média apresentada pelas misturas com adição de aditivo P no início da mistura e à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, foram necessárias dosagens um pouco maiores para sua obtenção. Como se observa nos gráficos das Figuras 40 à 43, a dosagem ideal ficou entre 0,45 e 0,50% de SP para se atingir a consistência desejada aos 90 minutos de mistura.

À temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, todas as misturas estavam em boas condições para desmoldagem com 24 horas de idade, à exceção das misturas com aditivo PR, que apresentaram um pequeno retardo de endurecimento, em maior intensidade quando o aditivo foi adicionado com atraso.

Como se observa nas Figuras 40 à 43, as misturas preparadas à temperatura de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ são as que apresentam maior fluidez inicial e menor velocidade de enrijecimento dentre as temperaturas avaliadas. Os aditivos com melhor desempenho foram o P e o PP, ambos adicionados aos 10 minutos. Apesar de as misturas com aditivo PP adicionado no início da mistura terem apresentado alta fluidez inicial, acabavam enrijecendo mais do que as primeiras até os 90 minutos. A adição imediata de aditivo P promoveu misturas com desempenho intermediário, tanto em termos de fluidez inicial, como de manutenção. Os piores resultados foram obtidos com a adição de aditivo PR, quando adicionados imediatamente ou aos 10 minutos de mistura.

Para a recuperação da fluidez aos 90 minutos de mistura, foram necessárias quantidades menores de aditivo SP em relação à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, tomando como referência a consistência inicial da mistura com aditivo P e adição imediata do aditivo para essa temperatura. Neste caso, a dosagem ideal para se alcançar a consistência desejada ficou entre 0,20 e 0,25% de aditivo SP.

Ao contrário da temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, todas as argamassas produzidas à temperatura de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ apresentaram retardo de endurecimento, sendo que algumas misturas chegaram a atrasar a desmoldagem em até 7 horas.

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas produzidas às temperaturas de (23 ± 1) , (34 ± 1) e $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ são apresentados na Figura 44. Foi adotado como resultado de resistência o maior valor dentre os três dados obtidos nos ensaios de cada argamassa. Cabe ressaltar que as misturas com aditivo PR referem-se ao teor definido no primeiro traço de cada temperatura e adotado para as demais misturas.

Como se vê pelos gráficos da Figura 44, não há diferença significativa de resistência entre as argamassas produzidas às temperaturas de (23 ± 1) e $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$. Entretanto, as argamassas correspondentes à temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, resultaram em resistências mais baixas do que as demais, sendo que metade destas não alcançaram a resistência de dosagem especificada e duas delas ficaram abaixo da resistência característica. Este fato ocorreu, provavelmente, devido à hidratação acelerada do cimento durante as 24 horas em que os corpos-de-prova permaneceram à temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, formando produtos com estrutura física mais pobre e porosa.

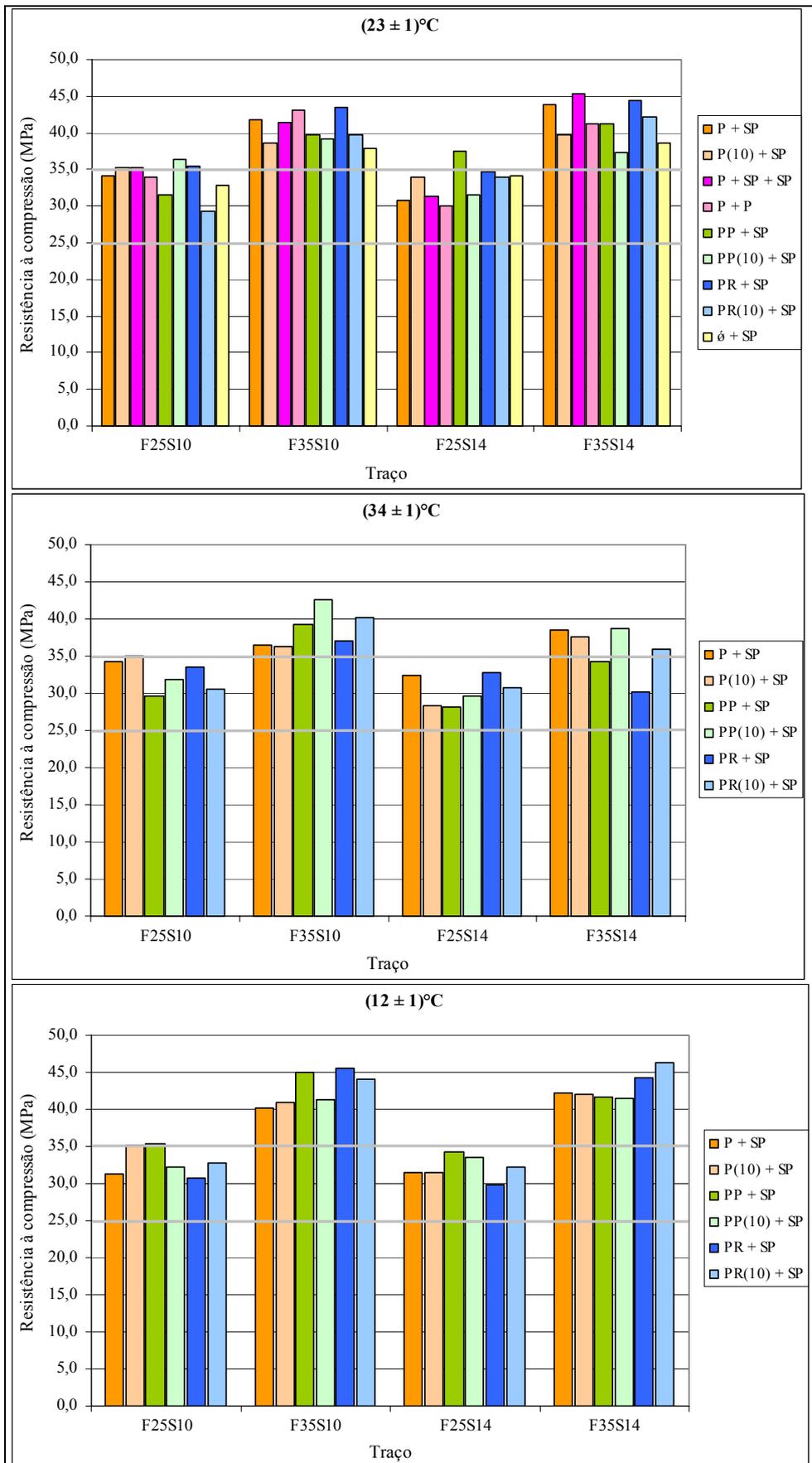


Figura 44 – Resistência à compressão das argamassas produzidas a diferentes temperaturas.

Em geral, não foi constatada ação prejudicial dos aditivos à resistência à compressão aos 28 dias. Para cada traço e temperatura, as argamassas apresentam resistências muito similares. Apenas algumas argamassas da temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ não atingiram a resistência de dosagem: PR₁₀ + SP, do traço F25S10; P₁₀ + SP, PP₁₀ + SP e Ø + SP, do traço F35S10; e, PP₁₀ + SP e Ø + SP, do traço F35S14. No caso da temperatura de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$, todas as argamassas atingiram as resistências de dosagem especificadas. Já para a temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$, como já foi dito, metade das argamassas produzidas não atingiram a resistência de dosagem. São elas: P + SP, P₁₀ + SP, PP + SP e PR + SP, do traço F35S10; P₁₀ + SP e PP + SP, do traço F25S14; e, P + SP, P₁₀ + SP, PP + SP, PP₁₀ + SP, PR + SP e PR₁₀ + SP, do traço F35S14. Destas argamassas, duas não atingiram, também, a resistência característica: PP + SP e PR + SP, do traço F35S14.

Com relação ao teor de ar incorporado das misturas, houve, provavelmente, algum problema na execução do ensaio ou nos equipamentos utilizados, pois os resultados obtidos não se mostraram de acordo com o esperado. Por este motivo, não foi possível se fazer uma análise conclusiva a este respeito e, portanto, os dados não serão apresentados.

5.3.2 Concretos

Os aditivos e métodos de adição adotados na etapa 4 foram selecionados a partir dos resultados apresentados no item anterior para a temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, conforme descrito no programa experimental. Todos os resultados obtidos nesta etapa constam no Apêndice D.

A Figura 45 apresenta os gráficos de perda de abatimento dos concretos, cujas legendas indicam os teores de aditivos adicionados em cada momento. Como se pode ver, os concretos com adição de aditivo P no início da mistura e de toda a água especificada para estes traços, não atingiram o abatimento esperado de (16 ± 1) cm.

Este fato pode ter ocorrido em função da utilização de uma areia fina diferente da utilizada para a construção das curvas de dosagem no início do programa experimental. A areia fina de cava utilizada nesta etapa tinha módulo de finura menor, indicando que era uma areia mais fina, e massa unitária também menor do que a primeira areia utilizada, o que pode significar uma areia com grãos mais angulosos.

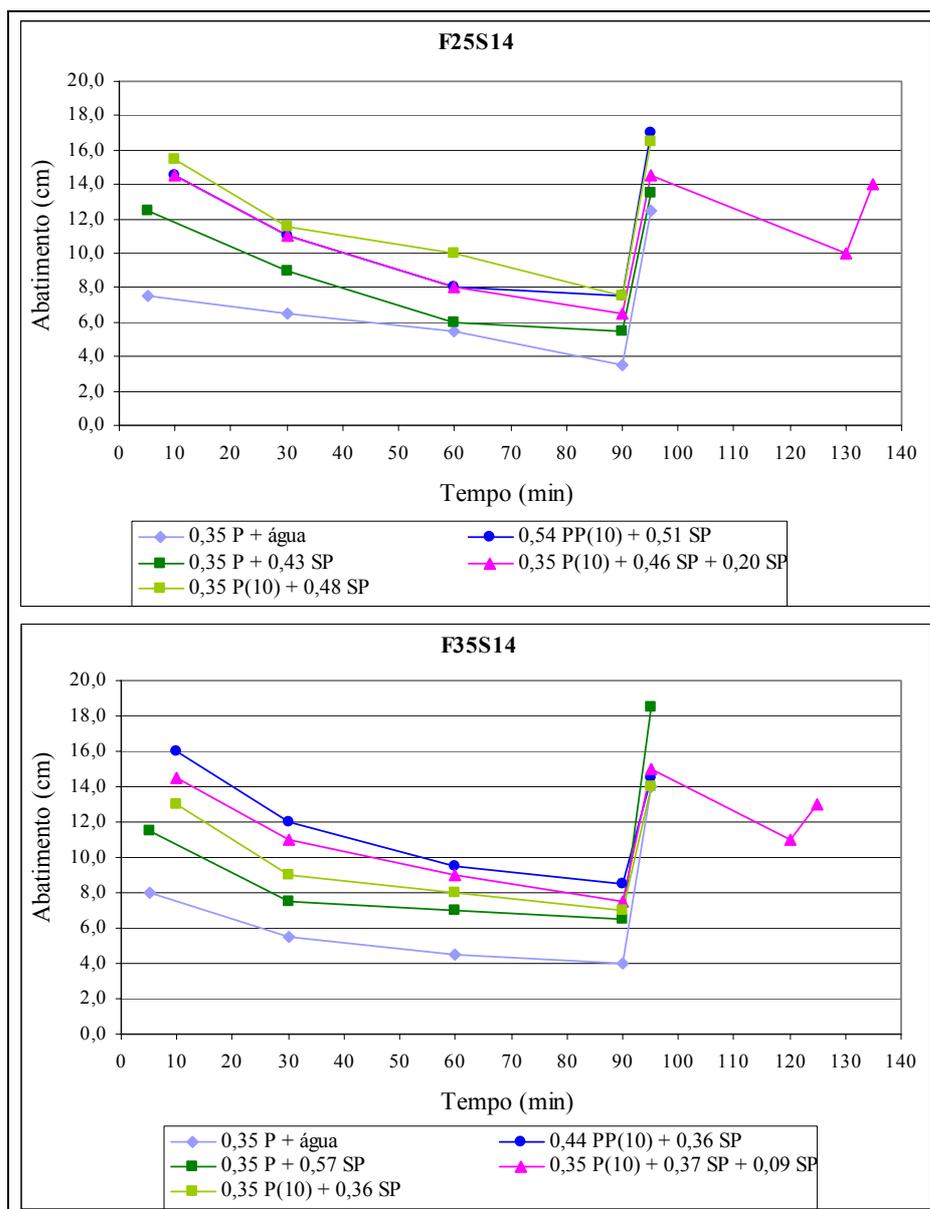


Figura 45 – Perda de abatimento dos concretos.

É sabido que a areia fina, por apresentar elevada superfície específica, tende a consumir mais água para envolver todos os grãos, quando adicionada em substituição à areia média, diminuindo, assim, a fluidez da mistura, para uma determinada quantidade de água. Já a areia fina proveniente de duna, ao contrário, promove um aumento da fluidez da mistura, devido à sua forma bastante arredondada e sua granulometria muito uniforme, como verificado em estudos anteriores por pesquisadores do GTec / UFSC. Essas características conferem à areia de duna a capacidade de diminuir o atrito entre os grãos, facilitando seu deslizamento. Esse efeito também exerce influência sobre a resistência à compressão do concreto, como será visto mais adiante.

Além do citado acima, a areia fina utilizada nesta etapa apresentou maior teor de material pulverulento, o que intensifica o consumo de água, causando, conseqüentemente, o enrijecimento da mistura. Somado a tudo isso, a areia média utilizada nesta etapa também possuía um módulo de finura inferior ao da utilizada na construção das curvas de dosagem (ver Tabelas 5 e 6). Acredita-se que, pelos motivos expostos, os concretos nesta etapa se apresentaram um pouco mais consistentes do que na primeira etapa do programa experimental.

Os concretos com adição parcial de água no início da mistura, cujo abatimento de partida foi fixado em (8 ± 1) cm (simulando o procedimento usual do CDC), se comportaram de forma muito semelhante para os dois traços estudados, como se vê na Figura 45. Estes concretos apresentaram menor perda de fluidez do que os demais, comprovando, novamente, que as maiores perdas ocorrem para maiores abatimentos iniciais.

Esses concretos foram redosados com água para a obtenção do abatimento especificado ((14 ± 2) cm), sendo que as quantidades necessárias para isto foram grandes. Para o traço F25S14, a relação a/c passou de 0,656 inicialmente, para 0,740 após a redosagem, enquanto que os demais concretos mantiveram a relação a/c de 0,663. Para o traço F35S14, a relação a/c passou de 0,553 inicialmente, para 0,609 após a redosagem, enquanto que os demais concretos mantiveram a relação a/c de 0,556.

Os concretos com adição de aditivo P aos 10 minutos de mistura apresentaram maior fluidez inicial do que com adição imediata do aditivo, apesar de terem enrijecido um pouco mais rapidamente. Entretanto, aos 90 minutos ainda tinham abatimento maior do que esses.

Com relação ao aditivo PP adicionado aos 10 minutos, tiveram que ser adicionadas quantidades maiores em comparação às misturas com aditivo P para atingir o abatimento especificado. Para o traço F25S14, essas misturas apresentaram perda de fluidez muito similar às demais. Já para o traço F35S14, a perda de fluidez foi a maior dentre as misturas avaliadas.

Não se observou grande distinção nas quantidades de aditivo SP adicionadas para recuperação do abatimento dos concretos. Em média, foi necessário um teor de 0,054% de SP em relação à massa de cimento para um aumento de 1 cm no abatimento, com um desvio-padrão de 0,004%.

Nos concretos onde se prosseguiu com a avaliação da consistência até os 120 minutos, ocorreu uma acentuada perda de abatimento nos 30 minutos finais, como se pode observar na Figura 45.

A maior velocidade de enrijecimento nesse período é um fenômeno natural, pois, além do efeito de plastificação do aditivo SP à base de naftaleno possuir um curto período de duração, o concreto já está se aproximando de duas horas de vida, quando o período de dormência está terminando, as reações de hidratação começam a se acelerar e o início de pega se aproxima.

Para a redosagem dos concretos com aditivo SP aos 120 minutos, constatou-se que o teor necessário para aumentar o abatimento em 1 cm é muito próximo do teor adicionado aos 90 minutos: 0,048%, com desvio-padrão de 0,004%.

Ao contrário das argamassas, todos os corpos-de-prova puderam ser desmoldados normalmente 24 horas após a mistura do cimento com a água. Entretanto, as resistências à compressão dos concretos rompidos à esta idade foram baixas, equivalendo, em média, a apenas 6,0% da resistência aos 28 dias, com desvio-padrão de 3,3%. Estes resultados indicam que, muito provavelmente, houve um retardo de pega e endurecimento dos concretos devido à adição dos diferentes aditivos, somado ao tipo de cimento utilizado, isto é, um cimento pozolânico, que desenvolve sua resistência lentamente. Na Figura 46 consta o gráfico com a evolução da resistência à compressão dos diversos concretos produzidos. Os resultados apresentados correspondem à resistência potencial de cada idade, isto é, o maior valor dentre os dois corpos-de-prova moldados para ruptura às idades de 1 e 7 dias, e o maior valor dentre os três corpos-de-prova moldados para ruptura à idade de 28 dias.

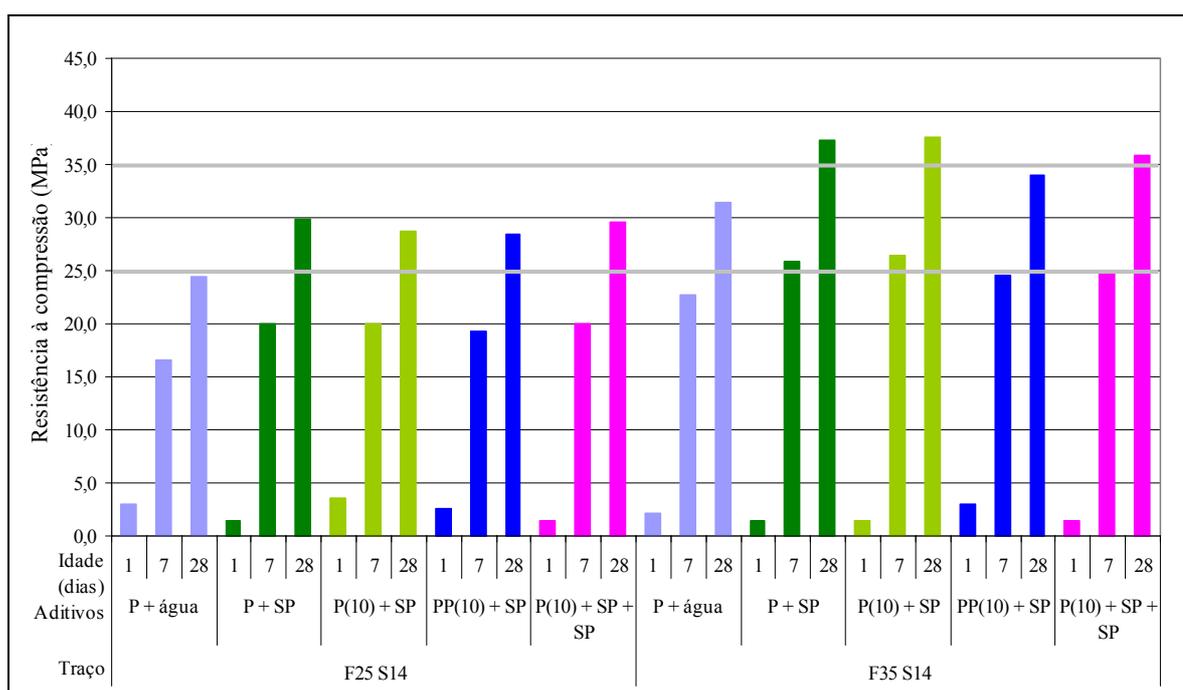


Figura 46 – Evolução da resistência à compressão.

O desenvolvimento da resistência à compressão até a idade de 7 dias condiz com a literatura quando relacionado à idade de 28 dias (HELENE e TERZIAN, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os resultados obtidos aos 7 dias atingiram, em média, 69,0% da resistência aos 28 dias, com desvio-padrão de 1,8%.

Com relação à resistência à compressão aos 28 dias, acredita-se que pelo motivo exposto no início deste sub-item, isto é, utilização de areia fina de cava ao invés de areia fina de duna, os resultados obtidos ficaram aquém do esperado, principalmente, para o traço F35S14. Como a areia fina de cava torna a mistura mais viscosa do que a areia fina de duna, aliado ao formato dos grãos mais angulosos, há uma dificuldade maior de adensá-la e como resultado se tem uma estrutura menos compacta e, por este motivo, menos resistente. Outra possibilidade para justificar este fato é uma queda de resistência do cimento devido ao tempo de armazenagem (5 meses) apesar de todos os cuidados de estocagem. Este efeito foi observado em maior escala para o traço F35S14 em função de concretos mais resistentes serem mais suscetíveis a variações nos materiais e nas condições de lançamento e adensamento. Como se observa na Figura 46, os concretos do traço F25S14 alcançaram resistências muito próximas à de dosagem (30,0 MPa). Já os concretos do traço F35S14 ficaram mais distantes da resistência de dosagem (40,0 MPa), sendo que o concreto com adição de aditivo PP aos 10 minutos não atingiu a resistência característica de 35,0 MPa.

Observou-se uma acentuada queda na resistência aos 28 dias quando se procedeu à correção do abatimento aos 90 minutos com água em relação à correção com aditivo SP. Para o traço F25S14, a resistência do concreto corrigido com água corresponde a aproximadamente 82% da resistência do mesmo concreto, porém corrigido com aditivo SP, enquanto que para o traço F35S14 essa proporção é de aproximadamente 85%. Em nenhum dos dois traços estes concretos atingiram a resistência característica, como se observa na Figura 46. Estes resultados mostram o quão prejudicial pode ser a correção do abatimento com água, no caso de CDC, quando adicionada em excesso.

Os resultados dos ensaios de módulo de deformação estático são muito próximos aos valores obtidos utilizando-se a equação proposta pelo ACI Building Code 318 (1992 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994) para estimativa do módulo de deformação em função da resistência à compressão e da massa específica do concreto. A equação sugerida pelo ACI é a seguinte:

$$E_c = \gamma_c^{1,5} \cdot 0,0428 \cdot f_c^{1/2} \quad (3)$$

A Tabela 17 apresenta os dados de entrada na equação, os resultados estimados pela expressão (3) e os resultados experimentais para os concretos confeccionados. Percebe-se que os resultados experimentais de módulo de deformação sofrem um leve aumento quando a resistência característica passa de 25,0 para 35,0 MPa. Para o traço F25S14, a redosagem do concreto com água aos 90 minutos resultou em módulo de deformação um pouco menor do que os demais, enquanto que para o traço F35S14, esse concreto apresentou o segundo maior resultado. Estes resultados demonstram que o módulo de deformação do concreto sofre maior influência do traço do que da relação a/c.

Tabela 17 – Resultados teóricos e experimentais de módulo de deformação estático.

Traço	Aditivos	γ real (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	ACI Building Code (GPa)	Resultados experimentais (GPa)
F25S14	P + água	2283	24,5	23,1	24,4
	P + SP	2298	29,9	25,8	25,8
	P ₁₀ + SP	2299	28,7	25,3	26,1
	PP ₁₀ + SP	2299	28,5	25,2	27,6
	P ₁₀ + SP + SP	2301	29,5	25,7	26,4
F35S14	P + água	2288	31,5	26,3	29,9
	P + SP	2298	37,3	28,8	29,8
	P ₁₀ + SP	2311	37,6	29,2	30,9
	PP ₁₀ + SP	2318	34,0	27,9	28,9
	P ₁₀ + SP + SP	2313	35,8	28,5	28,2

A Figura 47 apresenta o gráfico de teor de ar incorporado e taxa de exsudação para cada concreto produzido. Os concretos redosados com água aos 90 minutos resultaram em maior incorporação de ar do que os demais, correspondendo a 2,4% para o traço F25S14 e a 2,3% para o traço F35S14. Os outros concretos apresentaram teor médio de ar incorporado igual a 1,6%, com desvio-padrão de 0,3%. Quanto à taxa de exsudação, não parece haver qualquer relação entre esta e o tipo, teor ou momento de adição dos aditivos e nem mesmo com o traço do concreto. Entretanto, como se pode observar na Figura 47, os resultados obtidos, em geral, foram baixos e, portanto, não afetam de forma significativa as demais propriedades do concreto, como resistência e durabilidade.

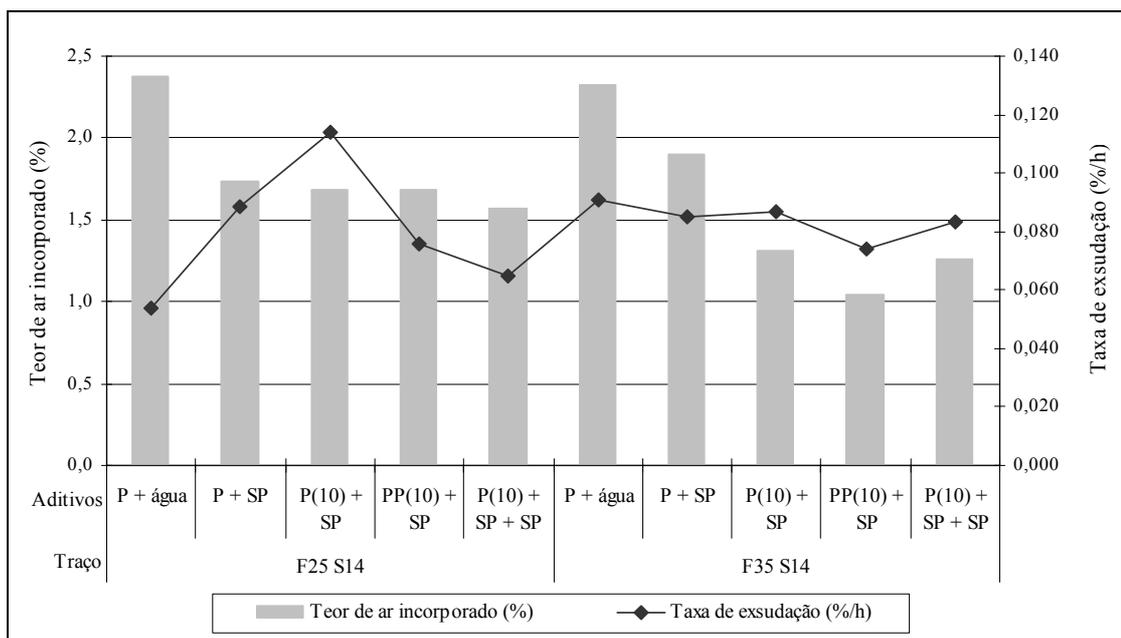


Figura 47 – Resultados de teor de ar incorporado e taxa de exsudação.

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS EM CAMPO (CDC)

Todos os resultados obtidos na etapa 5 constam no Apêndice E. A seguir será feita a análise desses resultados, apresentando-se os dados considerados mais relevantes de acordo com os objetivos desse estudo.

Apesar de, na etapa anterior, o aditivo P adicionado após 10 minutos do contato entre cimento e água ter proporcionado melhor desempenho, em termos de fluidez, do que a sua adição no início da mistura, não foi possível implantar este método na central de concreto para a realização dessa etapa. Conforme exposto no item 4.7 do capítulo anterior, essa etapa teve que ser adiada e, portanto, não houve tempo para a realização de testes preliminares com os aditivos na central de concreto. Para a adição do aditivo P aos 10 minutos de mistura, seria necessária a alteração do dispositivo para proporcionamento desse material. Uma possível solução seria a adição do aditivo no ponto de redosagem, também chamado de forca, que a central já possui para a adição do restante da água do traço e remistura até que o concreto atinja um abatimento mais próximo do especificado. O momento em que o caminhão encosta neste ponto corresponde à aproximadamente 10 minutos após o contato entre cimento e água. No entanto, seria necessária uma alteração no dispositivo que conduz o aditivo da cabine de controle até o caminhão, alterando seu ponto de descarga, atualmente no ponto de carregamento dos materiais, para o

ponto de redosagem. Por esse motivo, esse procedimento não foi adotado, mas pretende-se realizar esse teste futuramente.

Com relação à utilização de aditivo PP ao invés de aditivo P, de acordo com os resultados obtidos nas etapas 3 e 4, não parece ser uma alteração vantajosa, uma vez que apenas em alguns casos se observou um melhor desempenho deste aditivo, sendo que para isso era necessária uma dosagem maior do que o aditivo P. Além disso, o preço do aditivo PP é um pouco mais alto, por ser um aditivo de desempenho intermediário entre os aditivos P e SP, do ponto de vista comercial.

Foi encontrada uma grande dificuldade em se atingir o abatimento pré-estabelecido de (8 ± 1) cm com a adição de água logo após a chegada do caminhão-betoneira à obra. Observou-se uma grande variação do abatimento atingido com a adição de toda a água do traço, provavelmente, devido ao controle precário da umidade dos agregados (falta de sensor de umidade no silo de agregados da balança ou, pelo menos, homogeneização periódica da areia antes do abastecimento do silo, com correspondente determinação de umidade). A umidade era determinada apenas antes do primeiro caminhão ser carregado e adotada até o final da concretagem de cada etapa.

Apesar disso, o uso de aditivo SP em obra mostrou-se bastante vantajoso, uma vez que o lançamento e o adensamento do concreto em laje nervurada com capa de pequena espessura são processos que dispendem muito tempo e mão-de-obra caso sua consistência não esteja adequada. Este tipo de laje, com ou sem capa, tem sido bastante utilizado em Santa Catarina e, por este motivo, percebe-se um grande interesse do mercado da construção civil no aperfeiçoamento do processo de produção deste elemento estrutural.

Com o uso de aditivo na obra foi possível se obter concreto com abatimento de até 24,0 cm, sem a ocorrência de segregação. Apesar de os operários terem comentado que o concreto estava mais coeso do que o normal, não encontraram dificuldades para adensá-lo com o vibrador de agulha.

Em média, foi utilizado um teor de 0,69% de aditivo SP em relação à massa de cimento para um ganho médio de 10,5 cm no abatimento do concreto, sendo que, em casos isolados, um teor menor do que 1,00% promoveu um aumento no abatimento de até 20,5 cm. Em média, foi adicionado o teor de 0,061% para aumentar em 1 cm o abatimento, com desvio-padrão de 0,021%.

Partindo-se de um abatimento inicial de (8 ± 2) cm para se chegar ao abatimento de (12 ± 2) cm, foi necessária, em média, a adição de 0,087% de aditivo SP para aumentar em 1 cm o abatimento ou um teor total médio de 0,42% de aditivo em relação à massa de cimento. Já para se alcançar um abatimento de (18 ± 3) cm, foi adicionado, em média, 0,061% de aditivo SP para aumentar em 1 cm o abatimento ou um teor total médio de 0,65% de aditivo em relação à massa de cimento. Este resultado indica que a partir de um determinado nível de abatimento, torna-se mais fácil o aumento da fluidez do concreto com a adição de aditivo SP, ou seja, a curva *aumento do abatimento x teor de aditivo SP* não é linear. A Tabela 18 apresenta um resumo dos resultados obtidos nessa etapa da pesquisa.

Tabela 18 – Resumo dos resultados médios obtidos na etapa 5.

	Sub-etapa				Geral
	1	2	3	4	
Temperatura ambiente (° C)	23	23	29	22	23
Tempo decorrido entre a mistura na central e a adição do aditivo SP na obra (min)	85	83	55	61	71
Teor de aditivo SP adicionado em cada caminhão (% da massa de cimento)	0,42	0,67	0,75	0,82	0,69
Aumento do abatimento com adição de SP (cm)	8,0	9,5	12,0	14,0	10,5
Teor de SP para aumentar em 1 cm o abatimento (%/cm)	0,059	0,073	0,061	0,056	0,061
Teor de SP para aumentar o abatimento de (8 ± 2) cm para (12 ± 2) cm (%)	-	-	-	-	0,42
Teor de SP para aumentar em 1 cm o abatimento partindo do abatimento (8 ± 2) cm para (12 ± 2) cm (%/cm)	-	-	-	-	0,087
Teor de SP para aumentar o abatimento de (8 ± 2) cm para (18 ± 3) cm (%/cm)	-	-	-	-	0,65
Teor de SP para aumentar em 1 cm o abatimento partindo do abatimento (8 ± 2) cm para (18 ± 3) cm (%/cm)	-	-	-	-	0,061

Observou-se ainda uma dificuldade maior de homogeneização da mistura após a colocação do aditivo SP quando o abatimento inicial era muito baixo, isto é, em torno de 5,0 cm ou menos. Para abatimentos iniciais acima desse valor, o tempo de mistura de 5 minutos era suficiente para completa homogeneização.

A adição de aditivo em baldes, por meio do funil, é um processo um tanto impreciso e que torna muito difícil a completa homogeneização da mistura com o novo material adicionado, pois este entra em contato inicialmente com uma pequena parte do material em relação ao todo que está no balão. Para implantação definitiva do método, deveriam ser instalados tanques de aditivo nos caminhões-betoneira, que também realizam sua dosagem em volume, porém de forma mais precisa. Além disso, o aditivo é lançado por meio de um bico injetor no meio de toda a mistura, facilitando a sua homogeneização.

Outra dificuldade encontrada em alguns casos foi a grande variação do abatimento obtido após a adição do aditivo SP, isto é, caminhões com as mesmas condições de preparo e transporte, onde se adicionaram quantidades iguais de aditivo, apresentaram abatimentos muito distintos. Este comportamento do aditivo torna difícil a determinação da quantidade a ser adicionada ao concreto para obtenção de determinado abatimento, prática esta essencial para que o uso de aditivo em obra se torne rotineiro. Para tanto, são fundamentais algumas repetições deste estudo em campo a fim de fornecer maior segurança tanto à equipe da concreteira, quanto à da obra onde o produto será utilizado.

O tempo consumido em obra, desde a chegada do caminhão até o início do lançamento, foi, muitas vezes, longo, devido à dificuldade que se tinha em atingir o abatimento especificado com a adição da água do traço e, posteriormente, do aditivo SP. Entretanto, este tempo pode ser consideravelmente reduzido se houver um controle rigoroso de toda a água adicionada ao concreto na central, principalmente, da água adicionada na forma de umidade dos agregados.

Obviamente, a consistência do concreto é função, também, de uma série de outros fatores que dificilmente podem ser dominados ou controlados por completo como, por exemplo, a forma dos agregados, pequenas variações na constituição química e temperatura do cimento, temperatura ambiente e do concreto, entre outros. Entretanto, existem alguns procedimentos simples que devem ser adotados, como, por exemplo, evitar o acúmulo de água no monte de britas, homogeneização das areias antes da determinação da umidade e do carregamento, etc., de maneira que, com a adição da água total discriminada no traço, se obtenha, realmente, a relação a/c muito próxima do estabelecido. Caso isso ocorra, não há a necessidade de se conferir o abatimento do concreto após a adição do restante da água do traço na obra.

Com relação à adição do aditivo SP, mais testes desse tipo são necessários para que se possa conhecer o comportamento do aditivo SP em caminhão-betoneira e prever com maior exatidão o

teor necessário para aumentar em tantos centímetros o abatimento. Assim, o tempo para acerto do abatimento com a adição de aditivo SP será, também, reduzido e não prejudicará a produtividade da concretagem.

É importante salientar que, mesmo com intervalos de até 90 minutos entre o lançamento do concreto de dois caminhões consecutivos, não houve entupimento da tubulação da bomba e nem dificuldade para recomeçar o lançamento após a pausa. Acredita-se que um leve retardo de pega, devido ao uso de aditivo SP, possa ter ocorrido permitindo um maior tempo de permanência do concreto na tubulação sem causar danos ao equipamento.

Um grande problema encontrado em lajes nervuradas com tijolos cerâmicos é a rápida absorção da água do concreto pelo tijolo, o que dificulta bastante o adensamento. Com a utilização de aditivo SP e, conseqüentemente, menor quantidade de água / m³ de concreto, esse efeito de perda de fluidez do concreto ao entrar em contato com o tijolo é reduzido.

Segundo observação do engenheiro responsável pela obra, houve um pequeno retardo no fim de pega do concreto em relação ao verificado para o concreto usual, ou seja, sem aditivo superplastificante, mas sem prejuízo significativo ao andamento da construção.

Com relação à resistência à compressão, a resistência média obtida nas últimas concretagens realizadas na obra em estudo sem a adição do aditivo SP foi de 35,7 MPa e o desvio-padrão foi de 3,2 MPa. Já com a adição do aditivo, a resistência média passou para 38,6 MPa e o desvio-padrão caiu para 3,0 MPa. Estes resultados demonstram que o aditivo possibilita um ganho de resistência, por melhorar a microestrutura da pasta de cimento devido à sua ação dispersante, e pode promover, ainda, uma redução no desvio-padrão (menor variação da relação a/c), o que irá resultar em menor resistência de dosagem.

Acredita-se que o desvio-padrão possa ser reduzido ainda mais com o uso progressivo do aditivo SP, uma vez que a correção da consistência seria feita com aditivo e não mais com água, reduzindo a variação da relação a/c e, por conseqüência, da resistência. Com o aumento da resistência alcançado com o uso de aditivo SP, novos cortes no consumo de cimento poderiam ser feitos, aproximando a resistência média da mínima desejada.

A Figura 48 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, correspondendo ao maior valor do par rompido à cada idade, bem como a relação a/c final para cada caminhão, de acordo com a central.

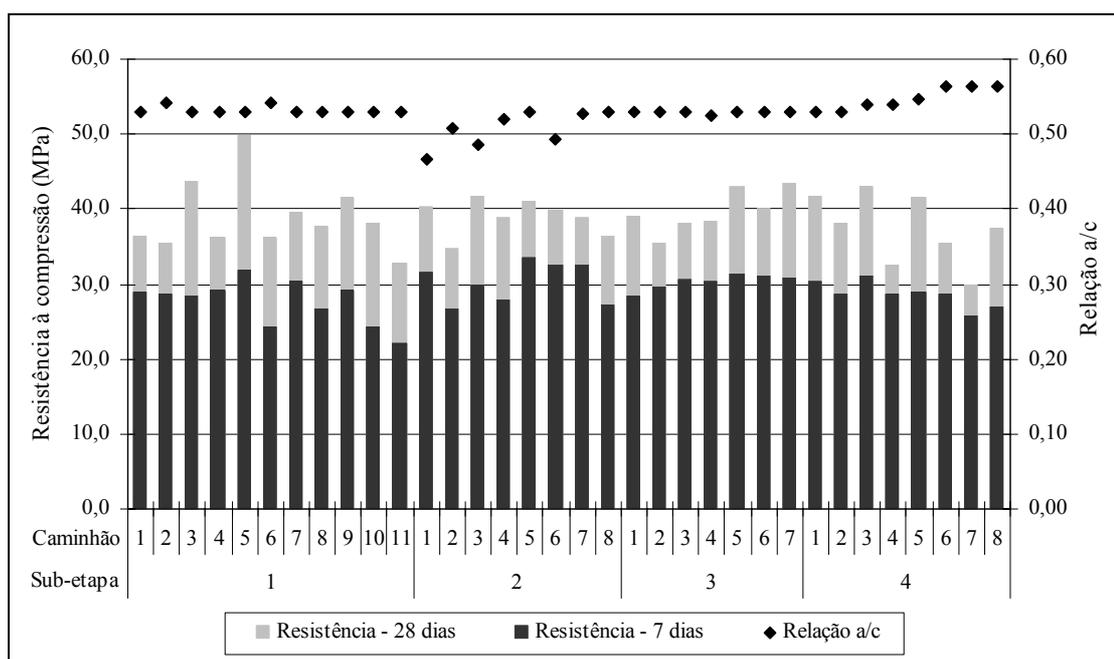


Figura 48 – Resistência à compressão e a/c (fornecido pela central) dos caminhões avaliados.

Além das vantagens já apresentadas, provenientes do uso de aditivo superplastificante em CDC, há ainda que ser analisado o fator econômico, muitas vezes determinante na avaliação de uma proposta de alteração do processo produtivo como, neste caso, a inserção de um novo material.

Com relação ao custo para a central de concreto, deve ser feita a seguinte análise. A utilização de aditivo permite uma redução no consumo de cimento do concreto, uma vez que o aumento da fluidez do material será conseguido com o aditivo e não mais com cimento. Neste estudo, por exemplo, fez-se um corte no consumo de cimento de 14 kg/m^3 , reduzindo seu abatimento em 4 cm. De acordo com os resultados obtidos, é necessário o uso de aproximadamente 0,20 litros de aditivo SP / m^3 de concreto para um aumento de 1 cm no seu abatimento ou 0,80 litros para aumentar 4 cm. Considerando-se que o preço do cimento no mercado seja de R\$ 300,00/tonelada, obter-se-ia uma economia de R\$ 4,20/ m^3 de concreto, enquanto que o custo do aditivo seria de R\$ 2,80/ m^3 de concreto, considerando-se o preço de R\$ 3,50/litro de aditivo. Como resultado, se teria uma economia por metro cúbico de concreto de R\$ 1,40, ou, ainda, uma economia mensal, considerando-se uma produção de 3.500 m^3 de concreto, de aproximadamente R\$ 5.000,00, com um consumo médio mensal de 2800 litros de aditivo SP. Deve ser lembrado que uma redução ainda maior no consumo de cimento pode ser viabilizada pela queda do desvio-padrão da central, como fruto da maior uniformidade das resistências obtidas.

Outra análise a ser feita é com relação ao preço de venda do concreto pela central. Em média, para cada 1 cm de aumento no abatimento do material é cobrado 1% do preço do m³. Tomando-se como referência o valor de R\$ 200,00/m³ de concreto, o valor de venda de 1 cm a mais no abatimento seria R\$ 2,00. Já com o uso de aditivo superplastificante, para esta mesma variação no abatimento, o custo seria de aproximadamente R\$ 0,70.

A tudo isto, deve ser somada a vantagem ímpar de se evitar totalmente a chance de rejeição e descarte de concreto em obra por ser ultrapassado o valor limite do abatimento estabelecido na nota fiscal quando do acerto da consistência pelo motorista do caminhão (valor aproximado de R\$ 1.600,00 por caminhão de 8 m³ devolvido) (toda a análise realizada baseou-se em preços médios praticados no mercado local em janeiro de 2005).

Para implantação definitiva do método na central de concreto, os funcionários da central deveriam receber um treinamento, onde se ressaltasse a importância do uso de aditivo SP em CDC e fossem repassados os procedimentos a serem adotados em obra para sua utilização. Além disso, deveria ser feito um alerta sobre a necessidade de se controlar rigorosamente toda a água adicionada ao concreto de um caminhão-betoneira, mostrando os benefícios alcançados caso isso ocorra. A instalação de sensores de umidade nos silos de pesagem da areia poderia ser uma excelente opção para minimizar este problema.

Os custos desse treinamento e dos sensores de umidade, obviamente, devem ser contabilizados no custo total para análise da viabilidade de implantação do procedimento sugerido do ponto de vista econômico. Deve ser levado em consideração, ainda, o custo proveniente da instalação dos tanques de aditivo nos caminhões-betoneira. Este equipamento é essencial para que o procedimento de correção do abatimento em obra com aditivo SP atinja seu nível ótimo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão bibliográfica apresentada e nos resultados expostos e discutidos no capítulo anterior, serão apresentadas a seguir as conclusões desta pesquisa. Deve-se salientar que as conclusões apresentadas têm caráter apenas indicativo uma vez que foram utilizados materiais e técnicas específicas como descrito no programa experimental.

Ao final, serão sugeridos alguns novos trabalhos que venham complementar esta pesquisa e incentivar o aprimoramento das técnicas de execução do CDC.

6.1 CONCLUSÕES

Observou-se, na primeira etapa do programa experimental, que a perda de abatimento é maior para os mais altos abatimentos iniciais, o que está de acordo com o comentado no item 2.4.2.

Ainda com relação à etapa 1, os teores de aditivo SP para recuperação da fluidez dos concretos produzidos após 90 minutos de mistura ficaram entre 0,33 e 0,50% da massa de cimento. Constatou-se que o teor de aditivo para aumentar 1 cm no abatimento é menor quando o abatimento total a ser recuperado é maior. Conclui-se que, após a adição de uma determinada quantidade de aditivo SP à mistura, o ganho de fluidez passa a ser maior para determinado teor de aditivo.

Com relação à verificação da existência de relação entre os ensaios de consistência e de resistência em concretos e argamassas, chegou-se à conclusão que existe relação entre as variáveis, apesar da dispersão dos valores encontrados para ambas as propriedades.

Quanto aos ensaios de consistência em concretos (abatimento do tronco de cone) e em argamassas (abertura na mesa de consistência), os coeficientes de correlação obtidos para as aberturas inicial (sem aplicação de golpes), com 15 golpes e com 30 golpes foram, respectivamente, 0,67; 0,62 e 0,62. Apesar de baixos do ponto de vista estatístico, estes valores podem ser considerados satisfatórios quando tratam de propriedades de concretos e argamassas, por serem materiais muito heterogêneos. O maior coeficiente de correlação apresentado para a

relação entre abatimento em concreto e abertura inicial em argamassa é devido aos dois ensaios avaliarem o comportamento estático das misturas.

Para o abatimento inicial das argamassas, quando são separados os dados das misturas com e sem aditivo SP, os coeficientes de correlação obtidos para a relação com o abatimento dos concretos foram consideravelmente maiores, correspondendo a 0,90 e 0,84, respectivamente. Conclui-se que o aditivo exerce um efeito maior de fluidificação na argamassa do que no concreto, como se vê na Figura 35.

Já para a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de concretos e argamassas, o coeficiente de correlação obtido foi de 0,79, podendo-se dizer que existe relação entre as variáveis.

A partir dos resultados obtidos nas etapas 1 e 2, verificou-se que estudos preliminares em argamassas podem ser adotados como previsão do comportamento em concretos, principalmente, quando se trata de avaliação da consistência, pelos ensaios de abatimento do tronco de cone em concretos e abertura na mesa de consistência para argamassas, e da resistência à compressão.

Quanto ao estudo de dosagem realizado com os dados da etapa 1, ficou clara a importância de se avaliar a perda de abatimento dos concretos na fase experimental quando se trata de CDC. Outro fator extremamente relevante em um estudo de dosagem para CDC são os materiais constituintes e as condições às quais estão submetidos, que devem ser o mais próximo possível do encontrado na central de concreto. O comportamento dos aditivos utilizados, seus teores e influências nas propriedades do material devem ser estudados em laboratório ainda que seu comportamento em campo não seja exatamente o mesmo. O método IPT / EPUSP se mostrou eficiente em estudo de dosagem para CDC, porém algumas adaptações devem ser feitas, como dito acima.

Após a análise dos resultados da etapa 3 conclui-se que o comportamento dos aditivos e métodos de adição não é significativamente influenciado pelo traço ou pela consistência inicial para uma determinada temperatura. Foi possível definir uma única classificação de desempenho dos aditivos em termos de fluidez inicial e manutenção para os quatro traços avaliados em cada temperatura.

Já com relação á temperatura, verificou-se que os aditivos sofrem fortemente sua influência. As argamassas apresentaram maiores aberturas iniciais quanto menores as temperaturas ambientes.

A perda de fluidez foi menor para temperaturas menores, porém a influência não foi tão significativa nesta propriedade quanto na fluidez inicial.

Os aditivos e métodos de adição que promoveram melhores desempenhos com relação à fluidez inicial e perda de fluidez foram: aditivos P e PP adicionados aos 10 minutos do contato entre cimento e água para a temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$; aditivos PR, P e PP adicionados com atraso de 10 minutos para a temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$; e, aditivos P e PP adicionados aos 10 minutos de mistura para a temperatura de $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Não se verificou influência de nenhum aditivo ou método de adição sobre a resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados de resistência das argamassas produzidas às temperaturas de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ e $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ estavam de acordo com o esperado. No entanto, para a temperatura de $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$ os resultados de resistência foram mais baixos do que para as outras temperaturas, principalmente para os traços de resistência característica igual a 35,0 MPa, devido, provavelmente, à hidratação acelerada do cimento que formou produtos com estrutura física mais pobre e porosa.

Com relação aos resultados obtidos em concretos na etapa 4, uma das constatações foi que os concretos com abatimento de partida igual a (8 ± 1) cm apresentaram menor perda de fluidez do que os demais, com abatimentos de partida igual a (14 ± 2) cm, comprovando, novamente, que as maiores perdas ocorrem para maiores abatimentos iniciais.

O aditivo P adicionado com 10 minutos de atraso foi o que apresentou melhor desempenho em termos de abatimento inicial e perda de fluidez. Para que o aditivo PP apresentasse desempenho semelhante, tiveram que ser adicionados teores maiores do que os 0,35% em relação à massa de cimento adotado para o aditivo P.

O teor médio de aditivo SP para um aumento de 1 cm no abatimento aos 90 minutos de mistura foi de 0,054% em relação à massa de cimento. No entanto, o aditivo SP à base de naftaleno apresentou uma acelerada perda de abatimento após sua adição aos 90 minutos, o que pode ser decorrente de seu curto período de atuação ou da aproximação do término do período de dormência do processo de hidratação do cimento e aceleração da reação levando ao início de pega.

A correção do abatimento aos 120 minutos com uma nova dosagem de aditivo SP se mostrou um método adequado. Constatou-se que o teor necessário para aumentar o abatimento em 1 cm é muito próximo do teor adicionado aos 90 minutos: 0,048%.

As resistências à compressão dos corpos-de-prova de concreto rompidos à idade de 24 horas foram baixas, indicando que, muito provavelmente, houve um retardo de pega e endurecimento devido à adição dos diferentes aditivos, somado ao tipo de cimento utilizado, isto é, um cimento pozolânico, que desenvolve sua resistência lentamente.

A evolução da resistência à compressão até a idade de 7 dias ocorreu normalmente, com os resultados à esta idade correspondendo, em média, à 69,0% da resistência aos 28 dias. Já com relação à resistência à compressão aos 28 dias, acredita-se que devido à utilização de areia fina de cava na etapa 4 ao invés da areia fina de duna utilizada nas etapas anteriores, os resultados obtidos ficaram aquém do esperado, principalmente, para o traço F35S14.

Observou-se uma acentuada queda na resistência aos 28 dias quando se procedeu à correção do abatimento aos 90 minutos com água em relação à correção com aditivo SP. Pode-se concluir que este procedimento de correção do abatimento pode ser extremamente prejudicial ao CDC, quando é adicionada água em excesso na obra.

A adição dos aditivos não interferiu de forma negativa nas demais propriedades do concreto avaliadas: módulo de deformação estático, teor de ar incorporado e taxa de exsudação.

Com base nos resultados obtidos na quinta e última etapa do programa experimental, alguns comentários podem ser feitos. O primeiro deles é relacionado ao controle da quantidade total de água adicionada ao concreto, em todas as suas formas, mas, principalmente, na umidade dos agregados, que deve ser tão rigoroso quanto possível. Este procedimento é essencial para evitar a grande variação do abatimento com a adição de toda a água do traço verificada neste estudo, e, assim, poupar tempo para acerto do abatimento após a chegada do caminhão à obra.

A adição de aditivo SP em obra para correção do abatimento se mostrou bastante vantajoso neste estudo de caso. Com o seu uso, foi possível se obter concreto com abatimento de até 24,0 cm, sem a ocorrência de segregação. Em média, foi necessário um teor de 0,69% de aditivo SP em relação à massa de cimento para um ganho médio de 10,5 cm no abatimento do concreto, enquanto que o teor médio adicionado para aumentar em 1 cm o abatimento foi de 0,061%, valor próximo ao encontrado em laboratório.

Chegou-se à conclusão que o teor de aditivo SP necessário para promover um aumento de 1 cm no abatimento é menor quando a variação de abatimento almejada é maior. Os resultados indicam que, a partir de um determinado nível de abatimento, torna-se mais fácil o aumento da fluidez do concreto com a adição de aditivo SP.

Foi encontrada uma grande dificuldade para acerto do abatimento com adição de aditivo SP. Quantidades iguais de aditivo adicionadas em concretos sob as mesmas condições promoveram abatimentos diferentes. Este comportamento do aditivo SP torna difícil a determinação da quantidade a ser adicionada ao concreto para obtenção do abatimento desejado. Para que tal procedimento possa ser adotado em obra, outros estudos como esse devem ser realizados para que se tenha maior confiança nos resultados obtidos e o comportamento do aditivo SP seja conhecido de forma mais aprofundada.

A utilização de aditivos, principalmente quando combinados, pode promover um retardo de pega e endurecimento do concreto. Assim, estas propriedades devem ser avaliadas em laboratório antes da aplicação dos aditivos em obra para avaliar o quão prejudicial será esse retardo ao andamento da construção.

O uso de aditivo SP em obra levou ao aumento da resistência à compressão dos concretos e à queda do desvio-padrão em relação aos resultados obtidos para as concretagens realizadas na mesma obra, mas sem a adição do aditivo SP. Estes resultados foram alcançados mesmo com o corte no consumo de cimento realizado no traço. Conclui-se que o aditivo SP promove uma melhoria na microestrutura da pasta de cimento devido à sua ação dispersante e, ainda, contribui para a redução do desvio-padrão pelo fato de diminuir ou cessar a variação da relação a/c advinda da correção do abatimento com água.

O investimento necessário para a compra do aditivo SP por parte da central de concreto se torna viável a partir do momento que há uma redução no consumo de cimento dos concretos produzidos viabilizada pela queda do desvio-padrão da central. O aditivo SP não só promove essa queda como torna praticamente nula a possibilidade de rejeição e descarte de concreto em obra por este não apresentar o abatimento dentro da faixa especificada. Sabe-se que um caminhão-betoneira contendo concreto em sua capacidade máxima, quando rejeitado, traz um grande prejuízo à central de concreto, além de interferir negativamente na sua produtividade.

De forma geral pode-se concluir que a utilização de aditivos em CDC não é mais apenas uma alternativa, mas, sim, a única solução para que o nível de qualidade do serviço prestado e do produto final seja compatível com o nível de exigência atualmente praticado no mercado da construção civil. Cada vez mais, as empresas deste ramo se mostram ávidas por novos materiais e técnicas que otimizem a qualidade dos seus serviços e produtos. As centrais de concreto, que por muito tempo estiveram estagnadas em seu processo produtivo, têm despertado para esta necessidade de oferecer mais do que uma simples mistura de cimento, agregados e água.

A indústria dos aditivos vem apresentando um crescimento muito acelerado e a tecnologia envolvendo estes materiais tem surpreendido a cada dia. A facilidade de uso, seus preços em queda constante, o esclarecimento crescente quanto ao seu comportamento nos meios científicos e todas as vantagens proporcionadas às propriedades do concreto tornam os aditivos, nos dias atuais, tão essenciais na produção deste material quanto o cimento.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo, apesar de oferecer sua contribuição à otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do CDC, é um trabalho pontual e, portanto, as conclusões obtidas são muito limitadas. É necessário o desenvolvimento de novas pesquisas para complementar as conclusões aqui obtidas e para que, então, possam ser feitas afirmações conclusivas.

Apesar de ter-se verificado a existência de relação entre concretos e argamassas em termos de consistência e resistência à compressão, seria interessante que um estudo mais amplo, envolvendo outras propriedades destes materiais, fosse realizado. Para um maior grau de confiabilidade nos resultados, o número de amostras deve ser definido estatisticamente. Este estudo seria de grande contribuição ao meio científico uma vez que diversas pesquisas são desenvolvidas adotando-se o estudo preliminar em argamassas como previsão do comportamento em concretos, sem que se tenha ainda a certeza de que essa relação existe de forma significativa.

Sugere-se a avaliação do aditivo SP adicionado no início da mistura, tanto em laboratório, como na central de concreto, visando à análise de propriedades do concreto como consistência inicial, perda de fluidez, tempos de pega e endurecimento e resistência à compressão. Deve-se ainda determinar o teor ótimo deste aditivo a fim de verificar se sua utilização desta forma é vantajosa em termos econômicos.

Conforme sugerido no capítulo 5, um estudo a ser realizado na central de concreto é quanto à adição do aditivo P após 10 minutos do contato entre cimento e água, a fim de verificar se os benefícios encontrados em laboratório se repetem em campo.

Outra possibilidade é a avaliação do desempenho de diferentes aditivos e métodos de adição em concretos sujeitos a diferentes temperaturas em laboratório, sendo estas no mínimo três: uma simulando inverno, uma simulando verão e uma temperatura intermediária.

Também se sugere um estudo semelhante ao realizado em laboratório nesta pesquisa, porém com diferentes teores e diferentes momentos de adição para os aditivos avaliados e para outros aditivos disponíveis no mercado.

Como ficou claro no trabalho, uma maior quantidade de dados provenientes de estudos envolvendo a adição de aditivo SP em obra para aumento da fluidez de CDC é extremamente necessária. Para que o uso do aditivo SP se torne algo rotineiro, deve-se reduzir o tempo dispendido para sua adição, mistura e avaliação do abatimento alcançado. Para isto, é necessário que se disponibilize um método empírico para estimativa do teor de aditivo que deve ser adicionado para aumentar em tantos centímetros o abatimento, como atualmente é feito com a água.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAD, I., EL-ALEEM, S. A. e EL-DIDAMONY, H. Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1839-43, nov. 2002.

AIAD, I. Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1229-34, aug. 2003.

AÏTCIN, P.; JOLICOEUR, C. e MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, may 1994.

AÏTCIN, P. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349-59, sep. 2000.

_____. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000b. 666 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Comitêe 116R-90. **Cement and concrete terminology**. ACI Manual of Concrete Practice, Parts 1 and 2, Materials and general properties of concrete. Farmington Hills, Michigan, 1996. 68 p.

_____. Comitêe 212.3R-91. **Chemical admixtures for concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and general properties of concrete. Farmington Hills, Michigan, 1996. 31 p.

_____. Comitêe 212.4R-93. **Guide for the use of high-range water-reducing admixtures (superplasticizers) in concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and general properties of concrete. Farmington Hills, Michigan, 1996. 10 p.

_____. Comitêe 305R-91. Hot weather concreting. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 417-436, july/aug. 1991.

_____. Comitêe 363R-92. **State of the art Report on high-strength concrete**. ACI Manual of Concrete Practices, Part 1, Materials and general properties of concrete. Farmington Hills, Michigan, 1996. 55 p.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ASTM C 494. **Specifications for chemical admixtures for concrete**. In:... Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.

_____. ASTM C 125. **Definitions of terms relating to concrete and concrete aggregates**. In:... Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1997.

_____. ASTM C 232. **Standard test method for bleeding of concrete**. In:... Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.

_____. ASTM C 618. **Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete.** In:... Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1994a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Manual do concreto dosado em central.** São Paulo: SAG, out. 2000.

_____. **Concreto dosado em central – meio século de serviços ao Brasil.** 1. ed. São Paulo, dez. 2003. 140p.

_____. Apresenta informações sobre o CDC no Brasil e no mundo. Disponível em: <<http://www.abesc.org.br>>. Acesso em: 06 mai. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim Técnico (BT-106). **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7. ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento portland. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12654:** Controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR NM 9:** Concreto e argamassa – determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739:** Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7215:** Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 12655:** Concreto - preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5738:** Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8522:** Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

BASKOCA, A., OZKUL, M. H. e ARTIRMA, S. Effect of chemical admixtures on workability and strength properties of prolonged agitated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 737-47, may 1998.

BEAUFAIT, F. W. e HOADLEY, P. G. Mix time and retempering studies on ready-mixed concrete. **ACI Journal**, v. 70, p. 810-813, dec. 1973.

BERGIN, M e SYED, C. Florida's hot-weather concreting especification. **Concrete International**, v. 24, n. 5, p. 31-33, may 2002.

BONEN, D. e SARKAR, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parameters affecting flow loss. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 7, p. 1423-34, july 1995.

BUI, V. K.; MONTGOMERYB, D.; HINCZAKC, I.; TURNER, K. Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 9, p. 1489-1496, sep. 2002.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não-estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. 2004. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHANG, S. Y. N.; FENG, N. Q. e TSANG, M. K. C. Workability of high strength/superplasticized concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, p. 301-09, dec. 1996.

COLLEPARDI, M. Water Reducers/Retarders. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridges, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. p. 116-209.

_____. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 103-112, 1998.

_____. Advances in superplasticizing admixtures. In: New Spiratos Symposium on Superplasticizers. Proceedings of a Symposium Honouring... Bucharest, Romania: CANMET/ACI, june 2003. p. 13-36.

COLLEPARDI, S., et al. Mechanisms of action of different superplasticizers for high-performance concrete. In: 2nd CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1999, Gramado. Proceedings... Gramado: ACI SP-186, 1999. p. 503-523.

COSTENARO, F. L. e ISA, M. M. Compatibilidade de aditivos: influência do aditivo retardador na fluidez do concreto de alto desempenho. In: 8^o Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Salvador, Bahia, 2000. Anais... Salvador, 2000, v. 2. p. 956-961.

DAFICO, D. A. **Contribuição ao estudo de dosagem do concreto de cimento portland**. 1997.

117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

_____. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz.** 2001. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DACZKO, J. Mortar testing for estimating strength. **Concrete International**, p. 63-67, sep. 1999.

DAY, K. W. **Concrete mix design, quality control and specification.** 1. ed. London: E & FN SPON, 1995. 350 p.

DIAZ, V. A. O. **Métodos para dosificar mezclas de hormigón.** Ciudad de La Havana: Editorial Científico - Técnica, 1990. 100 p.

ERLIN, B. e HIME, W. G. Concrete slump loss and field examples of placement problems. **Concrete International**, p. 48-51, jan. 1979.

FLATT, R. J. e HOUST, Y. F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 8, p. 1169-76, aug. 2001.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica.** 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139 f. Tese – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Ctalúnya, 2002.

HANEHARA, S. e YAMADA, K. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behaviour of admixture and paste rheology. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1159-65, aug. 1999.

HELENE, P. R. L. e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

HOVER, K. C. Concrete mixture proportioning with water-reducing admixtures to enhance durability: a quantitative model. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 113-119, 1998.

JIANG, S.; KIM, B. G. e AİTCIN, P. C. Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 1, p. 71-78, jan. 1999.

JIANG, W. e ROY, D. M. Interaction mechanism of chemical admixtures and their influences on microstructure. In: 10th International Congress on the Chemistry of Cement, june 1997, Sweden. Proceedings... Gothenburg, Sweden, 1997. p. 495-502.

- JOLICOEUR, C. e SIMARD, M. A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 87-101, 1998.
- JOLICOEUR, C. et al. Chemical admixtures: essential components of quality concrete. In: New Spiratos Symposium on Superplasticizers. Proceedings of a Symposium Honouring... Bucharest, Romania: CANMET/ACI, june 2003. p. 37-68.
- KIM, B.-G. et al. The adsorption behaviour of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 6, p. 887-893, june 2000.
- KIRCA, Ö.; TURANLI, L. e ERDOGAN, T. Y. Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 3, p. 441-45, mar. 2002.
- LIEBHERR. Liebherr Brasil G. M. O. Ltda. Apresenta informações sobre a empresa, seus serviços e produtos. Disponível em: <<http://www.liebherr.com>>. Acesso em: 25 jan. 2005.
- MAHBOUB, K. C. e CUTSHAW, Q. A. Effects of fresh concrete temperature and mixing time on compressive strength of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 1, p. 59-62, jan./feb. 2001.
- MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. In: 2nd CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1999, Gramado. Proceedings... Gramado: ACI SP-186, 1999. p. 615-34.
- MALHOTRA, V. M. Fly-ash, slag, silica fume and rice husk ash in concrete: a review. **Concrete International**, p. 23-28, apr. 1993.
- MALHOTRA, V. M. e MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete Technology, v. 1. Edited by V. M. Malhotra, CANMET. Ottawa, Canada: Gordon and Breach Publishers, 1996.
- _____. **High-performance, high-volume fly ash concrete**: materials, mixture proportioning, properties, construction practice and case histories. Ottawa, Canada: Marquardt Printing Ltd., 2002.
- MARTINS, V. C.; SOUSA, G. G. e PRUDÊNCIO JR., L. R. Otimização da dosagem de concreto produzido em central - estudo de caso. Em: Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2004.
- MARTINS, V. C.; SOUSA, G. G.; SANTOS, S. e PRUDÊNCIO JR., L. R. Influência do procedimento de adição de água na resistência à compressão do concreto dosado em central. Em: Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2004.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MEHTA, P. K. High-performance concrete technology for the future. In: Proceedings of International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of

- Concrete Structures, 1996, Florianópolis. Proceedings... Florianópolis, Brasil: Rocha Ltda., 1996. p. 1-14.
- MELO, K. A.; MARTINS, V. C.; PRUDÊNCIO JR., L. R. e REPETTE, W. L. Curvas de Abrams para concretos produzidos com os principais tipos de cimento e agregados empregados na região de Florianópolis. Em: Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2004.
- MEYER, L. M. e PERENCHIO, W. F. Theory of concrete slump loss as related to the use of chemical admixtures. **Concrete International**, p. 36-43, jan. 1979.
- NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Apresenta informações sobre o CDC nos Estados Unidos, como processo produtivo e mercado. Disponível em: <<http://www.nrmca.org>>. Acesso em: 20 mar. 2004.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- PAGÉ, M.; NKINAMUBANZI, P.-C. e AİTCIN, P.-C. The cement/superplasticizer compatibility: a headache for superplasticizer manufacturers. In: New Spiratos Symposium on Superplasticizers. Proceedings of a Symposium Honouring... Bucharest, Romania: CANMET/ACI, june 2003. p. 107-16.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento portland**. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993. 295 p.
- PRUDENCIO JR., L. R. **Materiais de construção civil I**. Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. Notas de aula. Impresso.
- RAMACHANDRAN, V. S. e FELDMAN, R. F. Cement Science. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. p. 1-53.
- RAMACHANDRAN, V. S. e MALHOTRA, V. M. Superplasticizers. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. p. 211-68.
- RAMACHANDRAN, V. S. et al. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. 1. ed. Ottawa, Canada: CANMET, 1998. 404 p.
- RAVINA, D. e SOROKA, I. Slump loss and compressive strength of concrete made with WRR a HRWR admixtures and subjected to prolonged mixing. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1455-62, aug. 1994.
- _____. Admixture effects on hot-weather concrete. **Concrete International**, v. 24, n. 5, p. 34-38, may 2002.
- RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.
- REZENDE, L.V. S.; CREPALDI, A. A. P e DJANIKIAN, J. G. Resistência do concreto dosado

em central - classificação e aspectos de durabilidade. In: Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil, 1996, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 1996. p. 849-855.

RODRIGUES, P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1995. 23 p.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes**. 2000. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza da casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SHILSTONE, J. M. Interpreting the Slump Test. **Concrete International**, v. 10, n. 11, p. 68-70, nov. 1988.

SPONHOLZ, I. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. 1998. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

TARTUCE, R. e GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto de cimento portland**. São Paulo: Ibracon/Pini, 1990.

UCHIKAWA, H. et al. Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 6, p. 1115-1129, nov. 1992.

UCHIKAWA, H., HANEHARA, S. e SAWAKI, D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 37-50, jan. 1997.

UCHIKAWA, H., HANEHARA, S.; SAWAKI, D. e ONODA, S. Effect of electrostatic and steric repulsive force of organic admixture on the dispersion of cement particles in fresh cement paste. In: 10th International Congress on the Chemistry of Cement, June 1997, Sweden. Proceedings... Gothenburg, Sweden, 1997. p. 277-84.

UCHIKAWA, H., SAWAKI, D. e HANEHARA, S. Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 353-64, feb. 1995.

YAMAMOTO, Y. e KOBAYASHI, S. Effect of temperature on the properties of superplasticized concrete. **ACI Journal**, v. 83, n. 1, p. 80-88, jan./feb. 1986.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

APÊNDICE A

RESULTADOS GERAIS DAS ETAPAS 1 E 2

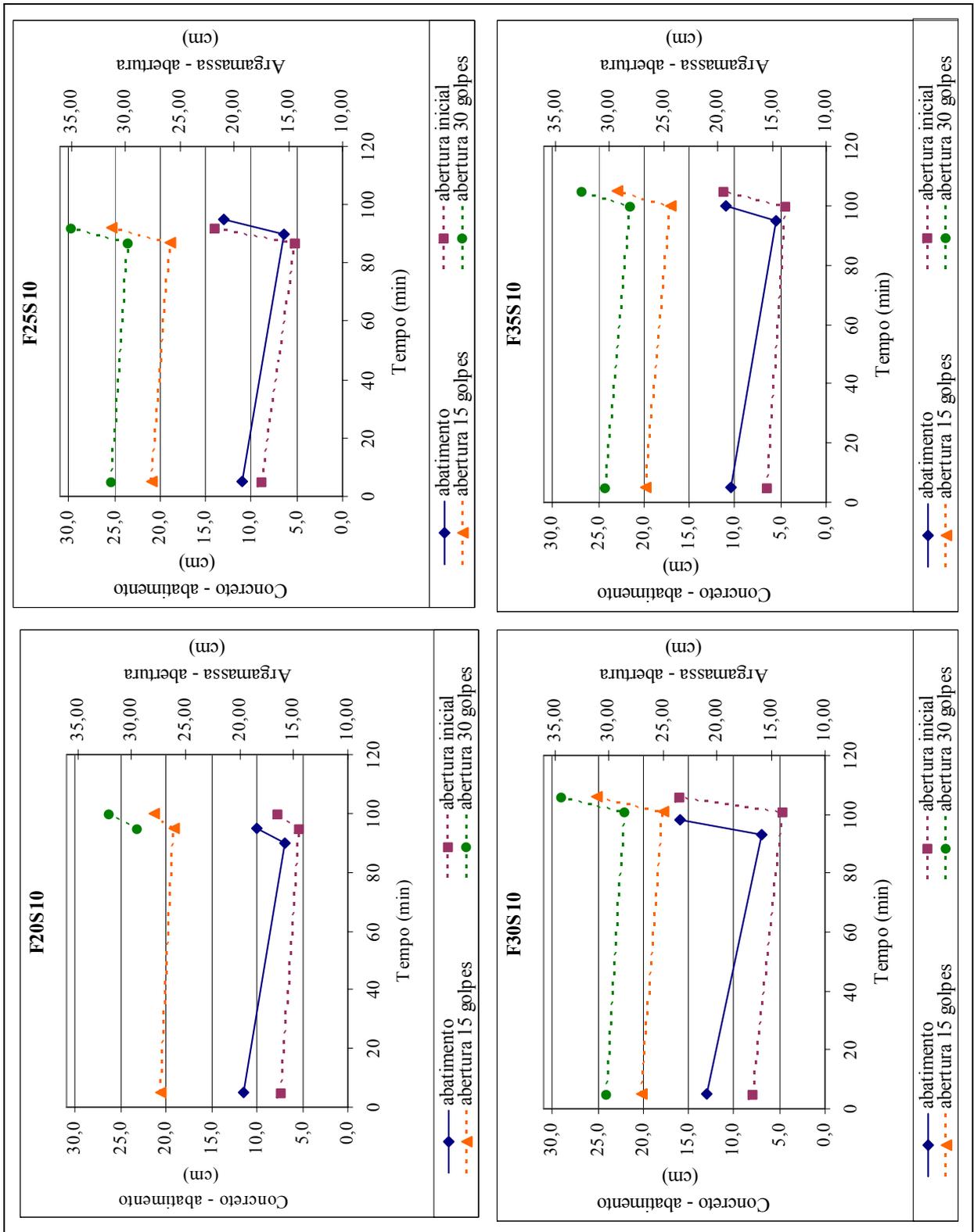
	Concreto												Argamassa											
	Abatimento (10 ± 2) cm						Abatimento (14 ± 2) cm						Abatimento (10 ± 2) cm						Abatimento (14 ± 2) cm					
	20	25	30	35	20	25	30	35	20	25	30	35	20	25	30	35	20	25	30	35				
Fck (MPa)	0,66	0,59	0,53	0,48	0,66	0,60	0,54	0,45	0,66	0,59	0,53	0,48	0,66	0,59	0,53	0,48	0,66	0,59	0,53	0,48				
a/c tabelado	22	23	24	25	19	20	22	19	22	23	24	25	22	23	24	25	22	23	24	25				
T _{ambiente} (°C)	23	24	25	25	20	21	22	21	23	24	24	25	23	24	24	25	19	20	22	21				
T _{material} (°C)	11,5	11,0	13,0	11,0	16,0	16,0	15,5	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Abatimento (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Abertura inicial (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	16,2	17,4	16,6	15,4	20,2	18,2	17,7	18,1	20,2	18,2	17,7	18,1				
Abertura com 15 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	27,2	27,6	26,9	26,6	27,5	28,7	28,7	29,9	27,5	28,7	28,7	29,9				
Abertura com 30 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,3	30,2	30,3	33,5	32,3	32,0	34,0	33,5	32,3	32,0	34,0				
a/c	0,66	0,59	0,52	0,50	0,66	0,59	0,53	0,50	0,66	0,59	0,52	0,50	0,66	0,59	0,52	0,50	0,66	0,59	0,52	0,50				
Resistência à compressão (MPa)	27,8	34,3	39,4	47,1	31,1	35,0	42,4	48,3	35,9	38,0	46,7	45,7	34,7	35,1	42,1	50,1	34,7	35,1	42,1	50,1				
T _{ambiente} (°C)	22,0	23,0	24,0	25,0	18,0	19,0	22,0	20,0	22,0	22,0	23,0	24,0	18,0	19,0	22,0	19,0	18,0	19,0	22,0	19,0				
T _{material} (°C)	22,0	24,0	24,0	25,0	19,0	20,0	23,0	20,0	22,0	23,0	23,0	24,0	19,0	19,0	21,0	20,0	19,0	19,0	21,0	20,0				
Abatimento (cm)	7,0	6,5	7,0	5,5	10,0	10,0	9,5	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Abertura inicial (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	14,3	14,3	13,8	13,7	15,2	14,2	14,1	14,2	15,2	14,2	14,1	14,2				
Abertura com 15 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	26,1	25,9	24,9	24,3	27,0	26,2	25,2	26,7	27,0	26,2	25,2	26,7				
Abertura com 30 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	29,4	29,7	28,5	28,0	32,3	30,1	28,7	30,7	32,3	30,1	28,7	30,7				
% aditivo (sobre a massa de cimento)	0,47	0,48	0,50	0,42	0,36	0,36	0,33	0,44	0,47	0,48	0,50	0,42	0,36	0,36	0,33	0,44	0,36	0,36	0,33	0,44				
Abatimento (cm)	10,0	13,0	16,0	11,0	13,0	15,0	14,0	17,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Abertura inicial (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	16,5	21,7	23,3	19,4	21,3	18,1	21,4	24,1	21,3	18,1	21,4	24,1				
Abertura com 15 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	27,9	31,3	31,1	29,2	30,8	28,4	30,0	32,8	30,8	28,4	30,0	32,8				
Abertura com 30 golpes (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	32,0	35,0	34,3	32,5	34,3	32,5	33,5	-	34,3	32,5	33,5	-				
γ _{real} (kg/dm³)	2,310	2,325	2,329	2,332	2,322	2,311	2,335	2,324	2,145	2,144	2,146	2,135	2,150	2,157	2,168	2,152	2,150	2,157	2,168	2,152				
γ _{tétrico} (kg/dm³)	2,351	2,351	2,357	2,356	2,338	2,342	2,349	2,338	2,166	2,171	2,177	2,168	2,151	2,161	2,162	2,156	2,151	2,161	2,162	2,156				
Teor de ar incorporado (%)	1,7	1,1	1,2	1,0	0,7	1,3	0,6	0,6	1,0	1,2	1,4	1,5	0,0	0,2	-0,3	0,2	0,0	0,2	-0,3	0,2				
Resistência à compressão (MPa)	25,8	35,4	38,1	45,1	32,3	36,7	45,6	46,5	30,0	35,6	43,9	45,1	33,6	41,0	42,8	44,4	33,6	41,0	42,8	44,4				

Momento da avaliação

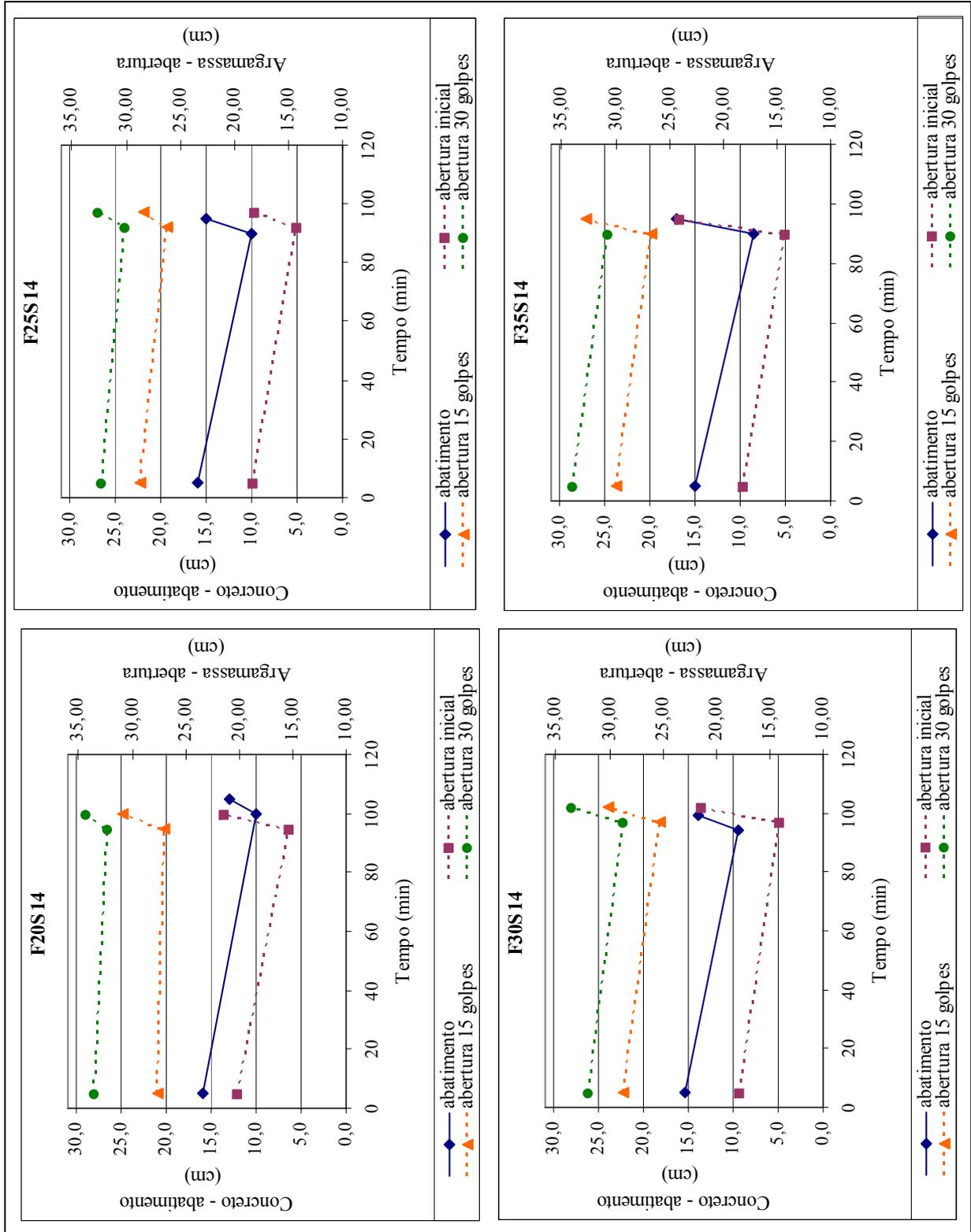
Adição de aditivo superplastificante

90 minutos

CONSISTÊNCIA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS EM FUNÇÃO DO TEMPO



CONSISTÊNCIA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS EM FUNÇÃO DO TEMPO



MEDIDAS REALIZADAS NOS ENSAIOS DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

Traço	Tempo (min)	Abatimento (cm)	Tempo (min)	Abatimento (cm)	Tempo (min)	Abatimento (cm)	
F20S10	5	11,5	90	7,0	Adição de superplastificante	95	10,0
F25S10	5	11,0	90	6,5		95	13,0
F30S10	5	13,0	93	7,0		98	16,0
F35S10	5	10,5	95	5,5		100	11,0
F20S14	5	16,0	100	10,0		105	13,0
F25S14	5	16,0	90	10,0		95	15,0
F30S14	5	15,5	94	9,5		99	14,0
F35S14	5	15,0	90	8,5		95	17,0

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (MPa)

Traço	Concreto				Argamassa			
	0 minutos		90 minutos		0 minutos		90 minutos	
	Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial
F20S10	25,7	27,8	25,8	25,8	26,9	35,9	30,0	30,0
	27,8		22,5		35,9		29,4	
	17,1		19,5		33,5		29,9	
F25S10	34,3	34,3	31,6	35,4	38,0	38,0	35,6	35,6
	28,2		35,4		35,8		35,1	
	21,3		18,1		28,2		27,8	
F30S10	39,4	39,4	38,1	38,1	45,4	46,7	42,4	43,9
	26,1		30,3		46,7		43,9	
	24,9		30,8		44,1		36,2	
F35S10	47,1	47,1	34,0	45,1	43,8	45,7	45,1	45,1
	45,5		45,1		45,7		40,7	
	43,7		35,0		39,0		43,9	
F20S14	31,1	31,1	31,2	32,3	34,7	34,7	32,6	33,6
	30,0		26,8		34,6		33,2	
	30,5		32,3		34,4		33,6	
F25S14	31,7	35,0	33,7	36,7	34,0	35,1	34,7	41,0
	35,0		36,1		35,1		24,4	
	31,9		36,7		34,3		41,0	
F30S14	42,4	42,4	28,6	45,6	38,9	42,1	39,6	42,8
	39,7		45,6		42,1		42,8	
	42,0		38,5		38,3		40,4	
F35S14	48,3	48,3	46,2	46,5	50,1	50,1	36,1	44,4
	46,6		46,5		48,9		44,4	
	46,8		45,0		50,1		42,4	

MEDIDAS REALIZADAS NOS ENSAIOS DA MESA DE CONSISTÊNCIA

Traço	Tempo (min)		Abertura (cm)						Tempo (min)		Abertura (cm)											
	5	10	Inicial	15 golpes	leitura	média	30 golpes	média	Tempo	Inicial	15 golpes	leitura	média	30 golpes	média	Tempo	Inicial	15 golpes	leitura	média	30 golpes	média
F20S10	5	10	15,4	16,2	27,3	27,2	-	-	95	14,4	14,3	26,2	26,1	29,3	29,4	100	16,7	16,5	28,1	27,9	32,0	32,0
			17,0	17,1	27,1	27,1	-	-		14,2	14,3	26,0	25,9	29,5	29,5		16,3	27,7	27,7	27,7	32,0	32,0
F25S10	5	10	17,3	17,4	27,3	27,6	31,0	31,3	87	14,2	14,3	25,8	25,9	29,3	29,7	92	22,0	21,7	31,5	31,3	35,0	35,0
			17,4	17,4	27,9	27,9	31,5	31,5		14,4	14,3	25,9	25,9	30,1	30,1		21,4	31,0	31,0	31,0	35,0	35,0
F30S10	5	10	16,5	16,6	26,8	26,9	29,8	30,2	101	13,8	13,8	25,1	24,9	28,3	28,5	106	23,5	23,3	31,0	31,1	34,0	34,3
			16,8	16,8	27,1	27,1	30,6	30,6		13,8	13,8	24,7	24,7	28,6	28,6		23,2	31,2	31,2	31,2	34,5	34,5
F35S10	5	10	15,4	15,4	26,5	26,6	30,0	30,3	100	13,7	13,7	24,3	24,3	28,1	28,0	105	19,1	19,4	28,8	29,2	31,8	32,5
			15,4	15,4	26,7	26,6	30,6	30,6		13,8	13,7	24,3	24,3	28,0	28,0		19,7	29,7	29,7	29,7	33,1	33,1
F20S14	5	10	20,4	20,2	25,4	27,5	33,5	33,5	95	15,5	15,2	27,1	27,0	32,0	32,3	100	21,3	21,3	30,6	30,8	34,0	34,3
			20,0	20,0	29,6	29,6	33,5	33,5		14,9	14,9	27,0	27,0	32,5	32,5		21,3	31,0	31,0	31,0	34,5	34,5
F25S14	5	10	18,3	18,2	28,5	28,7	31,5	32,3	92	14,2	14,2	26,3	26,1	30,1	30,1	97	18,1	18,1	28,2	28,4	32,5	32,5
			18,1	18,1	28,9	28,9	33,0	33,0		14,2	14,2	26,0	26,0	30,2	30,2		18,0	28,6	28,6	28,6	32,5	32,5
F30S14	5	10	17,5	17,7	28,4	28,7	31,0	32,0	97	14,0	14,1	25,0	25,2	28,4	28,7	102	21,2	21,4	29,7	30,0	33,0	33,5
			18,0	18,0	29,1	29,1	33,0	33,0		14,1	14,1	25,4	25,4	28,9	28,9		21,6	30,4	30,4	30,4	34,0	34,0
F35S14	5	10	18,0	18,1	29,9	29,9	33,5	34,0	90	14,2	14,2	26,3	26,7	29,9	30,7	95	24,1	24,1	33,1	32,8	32,0	32,0
			18,1	18,1	30,0	29,9	34,5	34,5		14,3	14,3	27,0	27,0	31,5	31,5		24,1	32,5	32,5	32,5	32,0	32,0

Adiço de superplastificante

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS REGRESSÕES LINEARES – Abatimento (10 ± 2) cm

<u>LEI DE ABRAMS</u>								
RESUMO DOS RESULTADOS								
<u>Estatística de regressão</u>								
R múltiplo		0,975707201						
R-Quadrado		0,952004541						
R-quadrado ajustado		0,928006812						
Erro padrão		0,025942133						
Observações		4						
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	0,026698093	0,0266981	39,670609	0,024292799			
Resíduo	2	0,001345989	0,000673					
Total	3	0,028044082						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	2,297734614	0,117563977	19,544546	0,0026076	1,791897294	2,803571933	1,791897294	2,803571933
Variável X 1	-1,29683061	0,205896431	-6,298461	0,0242928	-2,182732068	-0,410929155	-2,182732068	-0,410929155
		$\hat{f}_c = k_1/k_2^x$						
		$\log \hat{f}_c = \log k_1 - \log k_2 \cdot x$		K1=		10^a		198,4881635
		$y' = a + b \cdot x$		K2=		$10^{(-b)}$		19,80754319

<u>LEI DE LYSE</u>								
RESUMO DOS RESULTADOS								
<u>Estatística de regressão</u>								
R múltiplo		0,998994562						
R-Quadrado		0,997990135						
R-quadrado ajustado		0,996985202						
Erro padrão		0,044011452						
Observações		4						
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	1,923625984	1,923626	993,09146	0,001005438			
Resíduo	2	0,003874016	0,001937					
Total	3	1,9275						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	-1,3719685	0,199450109	-6,878755	0,0204867	-2,230133657	-0,513803351	-2,230133657	-0,513803351
Variável X 1	11,00787402	0,349308236	31,513354	0,0010054	9,504920933	12,5108271	9,504920933	12,5108271
		$m = k_3 + k_4 \cdot x$		k3=	-1,371968504			
				k4=	11,00787402			

LEI DE LYSE

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão

R múltiplo	0,988726108
R-Quadrado	0,977579316
R-quadrado ajustado	0,966368974
Erro padrão	0,135073431
Observações	4

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1,591010336	1,5910103	87,203344	0,011273892
Resíduo	2	0,036489664	0,0182448		
Total	3	1,6275			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	-1,15241184	0,622356289	-1,851691	0,2052725	-3,830196688	1,525373015	-3,830196688	1,525373015
Variável X 1	10,15808675	1,087790717	9,3382731	0,0112739	5,477697789	14,8384757	5,477697789	14,8384757

$$m = k_3 + k_4 x$$

$k_3 = -1,152411836$
 $k_4 = 10,15808675$

LEI DE MOLINARI

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão

R múltiplo	0,999394018
R-Quadrado	0,998788403
R-quadrado ajustado	0,998182604
Erro padrão	1,50226E-05
Observações	4

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	3,72078E-07	3,721E-07	1648,7134	0,000605982
Resíduo	2	4,51355E-10	2,257E-10		
Total	3	3,72529E-07			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	0,000455359	5,49778E-05	8,2826056	0,0142657	0,000218809	0,00069191	0,000218809	0,00069191
Variável X 1	0,000478141	1,17756E-05	40,604352	0,000606	0,000427475	0,000528808	0,000427475	0,000528808

$$C = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m)$$

$$1/C = k_5 / 1000 + k_6 / 1000 \cdot m$$

$$y = c + d \cdot x$$

$k_5 = 0,455359242$
 $k_6 = 0,478141473$

APÊNDICE C

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - $T(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ – F25S10

		Aditivos										
		P + SP	P + P	P ₁₀ + SP	Ø + SP	P + SP + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	23 / 22	23 / 22	23 / 22	22 / 22	22 / 22	23 / 21	23 / 22	22 / 21	23 / 20	23 / 20
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,35	-	0,35	0,50	0,50	0,15	0,15	0,25	0,25
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	17,2	17,0	14,0	14,7	17,6	20,0	14,0	13,9	13,8	15,1	14,1
	Média	17,5	17,1	13,7	14,4	17,6	20,9	14,1	14,0	13,6	15,6	13,8
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	17,3	17,0	13,9	14,6	17,6	20,5	14,1	13,9	13,7	15,4	14,0
	Média	29,7	28,9	26,4	26,9	30,5	30,1	26,8	25,8	26,4	28,3	26,8
Tempo (min)	Leituras	30,0	29,1	26,1	26,9	31,5	31,5	27,9	26,8	25,9	29,1	27,6
	Média	29,8	29,0	26,2	26,9	31,0	30,8	27,3	26,3	26,1	28,7	27,2
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	10	-	-	-	10	-	10	-	10
	Média	-	-	18,3	-	-	-	21,5	-	14,9	-	16,2
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	18,2	-	-	-	21,3	-	14,9	-	16,2
	Média	-	-	18,3	-	-	-	21,4	-	14,9	-	16,2
Tempo (min)	Leituras	-	-	30,1	-	-	-	32,0	-	27,6	-	29,3
	Média	-	-	31,5	-	-	-	32,0	-	27,8	-	29,6
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	30,8	-	-	-	32,0	-	27,7	-	29,4
	Média	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	14,8	14,4	16,4	14,0	15,4	15,3	18,3	13,9	13,9	14,5	15,0
	Média	14,7	14,1	16,7	13,8	15,0	15,0	17,9	13,7	13,8	14,3	14,8
Tempo (min)	Leituras	14,7	14,2	16,6	13,9	15,2	15,1	18,1	13,8	13,9	14,4	14,9
	Média	27,8	27,4	28,2	26,4	27,8	27,6	30,2	25,6	26,0	26,2	27,5
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	28,6	27,8	28,6	26,2	27,8	27,5	29,8	25,9	26,7	26,2	27,0
	Média	28,2	27,6	28,4	26,3	27,8	27,6	30,0	25,7	26,3	26,2	27,2
Abertura inicial (cm)	Leituras	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Média	14,6	14,1	16,0	13,6	14,7	14,5	16,4	13,6	13,3	12,8	14,1
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	14,4	13,9	15,5	13,7	14,7	14,3	16,0	13,4	13,5	12,9	14,3
	Média	14,5	14,0	15,8	13,7	14,7	14,4	16,2	13,5	13,4	12,8	14,2
Tempo (min)	Leituras	26,5	25,4	28,6	26,0	27,0	26,1	28,5	25,2	25,8	25,1	26,2
	Média	27,9	25,6	28,1	26,4	27,2	26,7	28,7	25,3	25,5	25,5	27,2
Abertura inicial (cm)	Leituras	27,2	25,5	28,4	26,2	27,1	26,4	28,6	25,3	25,6	25,3	26,7
	Média	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	13,1	13,6	14,6	13,8	14,2	14,1	15,2	13,5	13,6	12,9	14,3
	Média	14,0	13,5	14,6	13,4	14,2	14,2	15,5	13,4	13,6	12,8	14,2
Tempo (min)	Leituras	13,5	13,5	14,6	13,6	14,2	14,1	15,3	13,5	13,6	12,8	14,3
	Média	26,5	25,4	26,6	25,4	26,2	26,0	27,5	25,0	25,1	25,3	26,9
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	27,1	25,6	27,6	25,3	26,6	26,4	27,8	24,7	26,3	25,3	27,1
	Média	26,8	25,5	27,1	25,3	26,4	26,2	27,6	24,9	25,7	25,3	27,0

		Adição de aditivo										
		P + SP	P + P	P ₁₀ + SP	Ø + SP	P + SP + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	22 / 21	23 / 20	23 / 22	23 / 21	22 / 21	23 / 21	23 / 22	22 / 21	23 / 20	22 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,25	0,15	0,30	0,50	0,25	0,40	0,35	0,50	0,50	0,35	0,25
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,8	14,6	21,2	17,4	17,4	19,5	25,9	17,8	18,8	17,5	17,6
	Média	17,6	14,6	20,5	17,4	17,5	20,1	24,6	17,8	18,6	17,7	17,7
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	17,2	14,6	20,8	17,4	17,4	19,8	25,2	17,8	18,7	17,6	17,6
	Média	28,9	27,4	32,5	29,7	29,9	-	-	29,8	31,5	31,0	31,0
Tempo (min)	Leituras	29,8	28,2	32,0	29,4	29,9	-	-	30,5	31,0	31,0	31,0
	Média	29,4	27,8	32,3	29,5	29,9	-	-	30,1	31,3	31,0	31,0
Abertura inicial (cm)	Leituras	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Média	15,8	14,4	19,0	15,4	16,1	17,8	21,7	16,2	16,4	16,7	15,5
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	15,9	13,9	19,7	15,3	15,9	18,0	22,2	16,1	16,7	16,7	15,2
	Média	15,8	14,1	19,4	15,3	16,0	17,9	21,9	16,1	16,6	16,7	15,4
Tempo (min)	Leituras	27,9	26,9	29,7	27,3	28,4	28,8	31,5	27,7	28,3	28,4	27,9
	Média	28,7	26,2	30,0	27,2	28,5	29,6	33,0	28,2	28,6	29,1	28,0
Abertura inicial (cm)	Leituras	28,3	26,5	29,8	27,3	28,4	29,2	32,3	27,9	28,5	28,8	27,9
	Média	-	-	-	-	150	-	-	-	-	-	-
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	16,2	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	16,1	-	-	-	-	-	-
Tempo (min)	Leituras	-	-	-	-	16,1	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	16,1	-	-	-	-	-	-
Abertura / 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	28,5	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	28,2	-	-	-	-	-	-
Tempo (min)	Leituras	-	-	-	-	28,3	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	28,3	-	-	-	-	-	-

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (23 ± 1)°C – F35S10

		Aditivos								
		P + SP	P + P	P ₁₀ + SP	Ø + SP	P + SP + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	23 / 22	23 / 20	22 / 22	23 / 22	23 / 22	23 / 22	22 / 22	23 / 23
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,35	-	0,35	0,50	0,50	0,25	0,25
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,5	17,3	14,4	13,7	17,9	20,0	13,6	15,1	13,9
	Média	18,8	17,5	14,1	13,6	17,8	19,5	13,7	15,2	13,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	18,6	17,4	14,3	13,7	17,8	19,8	13,7	15,2	13,7
	Média	29,4	30,1	26,3	26,8	30,1	30,3	25,8	26,8	27,3
Tempo (min)	Leituras	30,0	29,6	26,2	26,3	30,4	30,4	26,9	27,1	25,9
	Média	29,7	29,8	26,2	26,5	30,3	30,3	26,3	26,9	26,6
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	10	-	-	-	10	-	10
	Média	-	-	21,8	-	-	-	21,9	-	15,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	21,0	-	-	-	21,2	-	15,5
	Média	-	-	21,4	-	-	-	21,5	-	15,6
Tempo (min)	Leituras	-	-	32,0	-	-	-	32,0	-	29,5
	Média	-	-	33,0	-	-	-	32,0	-	29,2
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	32,5	-	-	-	32,0	-	29,2
	Média	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,5	14,8	19,6	13,4	14,6	14,1	18,5	14,1	14,5
	Média	14,8	14,6	19,6	13,4	14,2	13,8	18,6	14,0	14,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	14,6	14,7	19,6	13,4	14,4	14,0	18,5	14,1	14,5
	Média	27,4	26,5	30,1	25,4	26,9	26,1	30,4	26,0	27,2
Tempo (min)	Leituras	28,1	26,9	30,1	25,9	26,6	25,5	30,4	26,2	26,5
	Média	27,8	26,7	30,1	25,6	26,7	25,8	30,4	26,1	26,8
Abertura inicial (cm)	Leituras	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Média	14,1	14,3	16,6	14,0	14,5	14,1	16,4	14,9	14,0
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	14,1	14,2	15,9	14,0	14,2	13,4	16,3	13,6	13,9
	Média	14,1	14,2	16,3	14,0	14,3	13,7	16,4	14,2	13,9
Tempo (min)	Leituras	26,2	26,3	27,9	25,5	26,9	25,2	28,2	25,5	25,6
	Média	26,5	26,6	27,6	25,4	26,8	24,2	28,4	25,0	25,0
Abertura inicial (cm)	Leituras	26,3	26,4	27,8	25,5	26,9	24,7	28,3	25,3	25,3
	Média	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,4	13,8	15,0	13,3	14,3	13,7	15,4	13,5	14,2
	Média	13,9	13,7	14,9	13,4	14,3	13,6	15,0	13,4	14,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	14,2	13,8	14,9	13,4	14,3	13,6	15,2	13,4	14,2
	Média	26,8	25,2	26,6	25,2	26,0	24,8	26,6	24,7	26,7
Tempo (min)	Leituras	27,0	26,4	26,6	25,2	26,2	24,9	27,0	25,4	26,5
	Média	26,9	25,8	26,6	25,2	26,1	24,9	26,8	25,0	26,6
Adição de aditivo										
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	22 / 22	23 / 22	22 / 21	23 / 22	22 / 22	23 / 22	22 / 22	22 / 22
Aditivo (% m. c.)		0,30	0,15	0,25	0,60	0,30	0,35	0,40	0,30	0,30
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,3	15,0	22,0	23,8	19,7	20,4	27,7	17,1	18,6
	Média	18,5	15,0	22,5	23,7	20,1	19,8	27,3	17,3	18,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	18,4	15,0	22,3	23,7	19,9	20,1	27,5	17,2	18,6
	Média	31,0	27,9	32,0	33,1	31,5	31,0	34,5	29,5	30,5
Tempo (min)	Leituras	31,0	28,0	32,5	33,8	32,0	31,0	35,0	30,3	31,0
	Média	31,0	28,0	32,3	33,5	31,8	31,0	34,8	29,9	30,8
Abertura inicial (cm)	Leituras	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Média	15,6	14,5	19,8	20,5	17,1	16,9	24,5	15,4	16,3
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	16,8	14,4	19,1	20,6	17,2	16,5	23,9	15,5	16,2
	Média	16,2	14,5	19,5	20,6	17,2	16,7	24,2	15,4	16,2
Tempo (min)	Leituras	28,9	26,8	30,2	31,0	29,5	28,2	32,5	27,7	28,6
	Média	29,1	26,8	29,3	31,3	29,0	28,3	33,0	27,7	28,9
Abertura inicial (cm)	Leituras	29,0	26,8	29,7	31,1	29,3	28,2	32,8	27,7	28,8
	Média	Adição de aditivo								
Aditivo (% m. c.)		-	-	-	-	0,10	-	-	-	-
Tempo (min)		-	-	-	-	120	-	-	-	-
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	21,2	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	21,9	-	-	-	-
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	21,6	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	31,0	-	-	-	-
Tempo (min)	Leituras	-	-	-	-	32,0	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	31,5	-	-	-	-
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	150	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	18,2	-	-	-	-
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	18,2	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	18,2	-	-	-	-
Tempo (min)	Leituras	-	-	-	-	30,1	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	29,4	-	-	-	-
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	29,7	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	29,7	-	-	-	-

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (23 ± 1)°C – F25S14

Aditivos										
	P + SP	P + P	P ₁₀ + SP	Ø + SP	P + SP + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP	
T _{amb} / T _{arg} (°C)	23 / 23	23 / 23	22 / 20	22 / 21	22 / 21	22 / 21	22 / 22	22 / 22	22 / 22	
Aditivo (% m. c.)	0,35	0,35	0,35	-	0,35	0,50	0,50	0,20	0,20	
Tempo (min)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Abertura inicial (cm)	Leituras	22,4	22,6	15,4	15,8	21,5	24,8	16,1	18,9	16,0
	Média	22,8	22,0	15,4	17,1	21,9	24,8	16,2	18,6	16,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	32,0	32,5	29,1	28,0	31,0	33,0	29,3	31,0	28,9
	Média	32,5	32,5	28,3	28,7	32,0	34,0	30,0	31,0	30,0
Tempo (min)	-	-	10	-	-	-	10	-	10	
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	22,9	-	-	24,8	-	19,8	
	Média	-	-	22,6	-	-	24,7	-	19,3	
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	33,0	-	-	34,0	-	31,5	
	Média	-	-	33,0	-	-	35,0	-	31,0	
Tempo (min)	-	-	33,0	-	-	-	34,5	-	31,3	
Tempo (min)	50	40	30	30	30	30	30	30	35	
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,4	17,2	20,1	14,9	16,9	18,3	22,0	15,7	17,1
	Média	15,9	17,6	20,3	14,9	17,2	18,7	21,0	16,1	17,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	27,6	29,1	31,5	27,9	29,4	30,0	31,5	27,5	29,0
	Média	28,4	30,0	32,0	27,7	29,9	31,0	31,5	28,5	30,0
Tempo (min)	70	60	60	60	60	75	60	60	60	
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,9	17,3	17,9	14,6	16,4	15,8	19,4	15,6	16,6
	Média	15,3	16,3	19,0	14,4	15,8	16,0	18,9	15,1	16,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,1	29,5	29,9	26,9	28,3	28,1	31,0	27,7	29,1
	Média	28,8	30,5	31,0	26,8	28,1	29,1	31,0	27,8	28,7
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,0	15,6	17,4	14,0	15,2	15,4	19,2	14,7	15,0
	Média	15,0	15,7	17,4	14,1	15,6	15,6	18,1	15,0	16,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	27,2	27,5	29,1	26,9	27,4	28,6	31,0	27,6	29,0
	Média	27,3	27,4	30,3	26,8	28,3	28,7	30,5	27,9	28,9
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Adição de aditivo										
T _{amb} / T _{arg} (°C)	23 / 23	21 / 22	22 / 20	22 / 21	23 / 21	22 / 21	22 / 22	22 / 22	22 / 21	
Aditivo (% m. c.)	0,40	0,15	0,20	0,40	0,40	0,35	0,25	0,25	0,20	
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Abertura inicial (cm)	Leituras	23,7	18,0	22,8	20,7	25,2	25,6	24,8	20,5	20,0
	Média	24,0	17,9	22,8	20,8	24,6	24,8	25,2	20,3	20,2
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	33,0	31,0	33,5	31,5	34,5	34,5	34,0	32,5	32,0
	Média	34,0	31,0	34,5	32,5	34,5	34,0	35,5	32,0	32,0
Tempo (min)	120	120	140	120	120	120	120	120	130	
Abertura inicial (cm)	Leituras	20,1	16,9	19,9	17,4	21,9	23,2	20,8	18,9	18,5
	Média	20,1	17,4	20,0	17,7	22,2	23,3	20,7	18,4	18,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	31,0	30,0	31,5	29,1	32,5	32,5	31,0	31,2	30,3
	Média	31,5	31,0	32,5	29,8	33,5	33,5	31,5	32,0	30,5
Tempo (min)	120	120	140	120	120	120	120	120	130	
Adição de aditivo										
Aditivo (% m. c.)	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	
Tempo (min)	-	-	-	-	120	-	-	-	-	
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	23,8	-	-	-	
	Média	-	-	-	-	23,7	-	-	-	
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	33,0	-	-	-	
	Média	-	-	-	-	33,5	-	-	-	
Tempo (min)	-	-	-	-	150	-	-	-	-	
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	21,4	-	-	-	
	Média	-	-	-	-	21,6	-	-	-	
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	31,0	-	-	-	
	Média	-	-	-	-	31,5	-	-	-	

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (23 ± 1)°C – F35S14

		Aditivos								
		P + SP	P + P	P ₁₀ + SP	Ø + SP	P + SP + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	23 / 23	22 / 22	23 / 22	22 / 22	22 / 21	23 / 22	22 / 22	22 / 20
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,35	-	0,35	0,60	0,60	0,25	0,25
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	20,2	21,3	15,6	14,3	20,6	23,2	14,6	16,2	14,9
	Média	20,4	21,7	15,5	14,2	20,7	23,2	14,5	16,3	14,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	31,0	30,5	28,1	26,4	31,0	31,5	27,8	28,2	27,3
	Média	31,5	31,0	28,1	26,1	31,0	32,0	27,6	28,2	27,2
Tempo (min)		-	-	10	-	-	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	22,2	-	-	-	24,5	-	17,4
	Média	-	-	22,0	-	-	-	24,4	-	17,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	32,5	-	-	-	33,0	-	30,0
	Média	-	-	32,8	-	-	-	33,5	-	30,0
Tempo (min)		30	35	30	30	30	30	35	30	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,8	15,8	19,6	13,7	16,1	15,8	20,4	14,3	16,0
	Média	15,8	16,2	19,8	13,6	16,1	15,4	19,7	14,3	15,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,8	28,9	31,0	25,0	28,7	27,9	31,5	28,0	28,7
	Média	28,3	28,9	31,5	24,7	28,4	27,2	31,0	27,0	28,8
Tempo (min)		60	60	60	60	60	75	70	65	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,3	16,2	18,1	13,7	15,2	14,1	16,7	13,9	15,1
	Média	15,1	16,4	18,4	13,8	15,0	14,1	16,5	13,9	14,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	27,9	29,0	29,5	25,3	27,1	26,0	28,9	26,2	27,8
	Média	28,0	28,5	30,0	25,4	27,1	25,6	28,9	25,8	27,1
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,6	15,5	17,3	13,6	14,7	14,5	16,2	14,2	14,5
	Média	14,6	15,6	17,2	13,5	14,5	13,8	16,1	13,9	14,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,8	27,7	30,5	24,8	26,6	26,4	28,7	25,4	26,9
	Média	26,7	27,9	30,0	24,2	26,2	25,4	28,7	25,6	27,7
Tempo (min)		26,8	27,8	30,3	24,5	26,4	25,9	28,7	25,5	27,3
Adição de aditivo										
T _{amb} / T _{arg} (°C)		22 / 22	21 / 21	21 / 21	23 / 20	22 / 21	23 / 22	23 / 20	22 / 19	
Aditivo (% m. c.)		0,30	0,15	0,15	0,40	0,30	0,35	0,20	0,35	0,30
Tempo (min)		90	90	95	90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	23,9	18,8	22,1	17,2	22,8	20,6	24,0	20,5	20,9
	Média	23,2	18,7	21,9	16,8	21,6	20,3	23,3	20,7	20,3
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	33,0	30,0	32,5	27,8	33,0	31,0	33,5	32,4	31,0
	Média	33,0	30,0	33,0	28,5	32,5	31,0	33,0	32,0	30,5
Tempo (min)		120	125	120	135	120	120	120	120	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	20,7	17,2	21,0	15,4	19,8	16,8	20,2	18,1	18,8
	Média	20,5	17,4	21,3	15,3	19,2	16,7	20,2	17,8	18,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,6	29,5	31,5	26,6	30,0	27,5	31,0	29,2	30,5
	Média	31,7	30,0	32,0	26,9	29,8	28,4	31,0	29,5	29,5
Tempo (min)		31,2	29,8	31,8	26,8	29,9	27,9	31,0	29,4	30,0
Adição de aditivo										
Aditivo (% m. c.)		-	-	-	-	0,10	-	-	-	-
Tempo (min)		-	-	-	-	135	-	-	-	-
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	19,8	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	19,4	-	-	-	-
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	30,5	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	29,8	-	-	-	-
Tempo (min)		-	-	-	-	160	-	-	-	-
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	-	-	-	17,8	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	17,3	-	-	-	-
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	-	-	-	29,1	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	29,7	-	-	-	-
Tempo (min)		-	-	-	-	29,4	-	-	-	-

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (34 ± 1)°C – F35S10

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		33 / 29	34 / 28	34 / 30	34 / 26	34 / 26	33 / 30
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,35	0,35
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,8	13,4	15,4	13,3	13,7	13,3
		15,4	13,2	15,5	13,3	13,3	13,0
	Média	15,6	13,3	15,4	13,3	13,5	13,2
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,2	24,8	28,2	24,5	25,1	24,7
		27,9	24,4	28,2	24,3	24,8	23,8
	Média	28,0	24,6	28,2	24,4	24,9	24,3
Tempo (min)		-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	15,6	-	16,7	-	14,8
		-	15,5	-	16,8	-	14,5
	Média	-	15,6	-	16,7	-	14,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	28,3	-	28,5	-	27,7
		-	28,2	-	28,6	-	27,5
	Média	-	28,3	-	28,6	-	27,6
Tempo (min)		30	40	30	30	40	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,8	14,0	13,4	14,9	13,2	14,0
		13,3	14,0	12,8	14,9	13,6	14,0
	Média	13,6	14,0	13,1	14,9	13,4	14,0
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	24,7	25,6	23,7	27,0	23,8	26,0
		24,9	26,2	23,2	26,2	24,4	26,5
	Média	24,8	25,9	23,4	26,6	24,1	26,2
Tempo (min)		60	60	60	60	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,5	13,2	13,4	13,7	13,1	13,5
		13,1	13,6	13,0	14,0	13,0	13,5
	Média	13,3	13,4	13,2	13,8	13,1	13,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	23,6	25,1	23,0	24,4	23,4	25,3
		23,5	25,7	22,8	24,7	23,0	25,5
	Média	23,6	25,4	22,9	24,6	23,2	25,4
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,2	13,7	12,8	13,8	13,2	13,7
		13,1	13,4	12,9	13,6	13,1	13,5
	Média	13,2	13,5	12,8	13,7	13,2	13,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	23,0	24,7	21,8	24,6	23,1	24,1
		22,9	24,4	22,0	24,4	22,6	24,3
	Média	23,0	24,5	21,9	24,5	22,8	24,2
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		34 / 31	34 / 29	34 / 25	34 / 28	33 / 27	34 / 27
Aditivo (% m. c.)		0,45	0,45	0,50	0,40	0,50	0,40
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,3	18,1	14,0	20,7	17,9	17,9
		15,7	18,1	14,0	20,4	18,0	18,6
	Média	16,0	18,1	14,0	20,5	18,0	18,2
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,3	28,8	25,4	30,4	28,7	30,0
		27,9	28,4	26,0	30,2	29,4	30,4
	Média	28,1	28,6	25,7	30,3	29,0	30,2
Tempo (min)		120	125	130	120	120	125
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,8	15,6	13,6	16,8	15,5	16,8
		14,4	15,8	13,3	16,5	15,7	16,7
	Média	14,6	15,7	13,4	16,6	15,6	16,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,3	27,0	23,5	27,7	28,5	29,0
		26,0	27,7	23,2	27,7	27,8	28,6
	Média	26,1	27,3	23,3	27,7	28,1	28,8

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (34 ± 1)°C – F25S14

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		34 / 26	34 / 24	34 / 28	33 / 25	34 / 28	34 / 24
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,35	0,35
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,8	14,5	20,2	14,0	16,8	14,6
		17,4	14,3	20,3	14,1	16,9	14,5
	Média	17,1	14,4	20,2	14,1	16,9	14,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,9	26,6	31,1	26,5	29,7	27,7
		28,8	26,7	31,3	27,5	29,4	27,9
	Média	28,9	26,6	31,2	27,0	29,5	27,8
Tempo (min)		-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	18,7	-	21,8	-	18,5
		-	18,5	-	21,3	-	18,6
	Média	-	18,6	-	21,6	-	18,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	30,0	-	32,7	-	30,7
		-	30,5	-	32,6	-	30,4
	Média	-	30,2	-	32,6	-	30,6
Tempo (min)		30	30	40	30	30	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,3	16,3	13,5	18,8	14,2	17,4
		13,8	16,3	15,0	18,3	14,0	17,1
	Média	14,0	16,3	14,2	18,6	14,1	17,2
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,2	28,9	26,6	30,9	26,9	29,5
		26,2	28,5	26,2	30,3	27,2	29,7
	Média	26,2	28,7	26,4	30,6	27,0	29,6
Tempo (min)		60	60	60	60	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,7	15,0	13,6	16,1	13,9	15,0
		13,5	14,8	13,5	16,0	13,7	15,6
	Média	13,6	14,9	13,6	16,0	13,8	15,3
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	24,8	26,7	25,4	29,2	26,1	28,1
		25,3	27,0	25,3	28,4	26,2	28,4
	Média	25,0	26,9	25,4	28,8	26,1	28,2
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,5	14,4	14,2	16,0	14,0	14,6
		13,2	14,0	14,3	15,9	13,6	14,7
	Média	13,4	14,2	14,2	16,0	13,8	14,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	24,5	26,4	24,3	28,6	26,0	27,5
		24,4	26,4	24,8	27,4	25,3	27,5
	Média	24,4	26,4	24,5	28,0	25,6	27,5
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		34 / 30	34 / 24	34 / 28	33 / 25	33 / -	33 / 27
Aditivo (% m. c.)		0,60	0,45	0,50	0,35	0,45	0,45
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	24,4	22,8	21,9	24,7	19,7	27,4
		23,9	22,5	21,8	26,5	20,3	26,5
	Média	24,2	22,6	21,9	25,6	20,0	26,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	33,9	33,1	32,2	33,9	30,7	36,0
		33,0	32,5	32,5	35,5	32,5	36,0
	Média	33,4	32,8	32,3	34,7	31,6	36,0
Tempo (min)		130	120	120	120	120	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	19,4	19,7	18,6	20,5	17,3	24,8
		19,6	19,8	18,2	20,6	17,6	24,0
	Média	19,5	19,7	18,4	20,6	17,4	24,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,0	30,7	29,9	32,1	29,9	34,4
		30,6	30,5	30,3	33,1	29,3	33,4
	Média	30,3	30,6	30,1	32,6	29,6	33,9

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (34 ± 1)°C – F35S14

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		34 / 28	34 / 27	33 / -	34 / 27	34 / 30	34 / 25
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,35	0,35
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	17,7	13,7	18,9	14,1	15,4	14,0
		17,4	13,5	19,2	13,6	15,7	13,5
	Média	17,5	13,6	19,0	13,8	15,6	13,8
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,4	25,9	30,2	25,8	28,5	25,7
		28,8	25,6	30,0	25,7	28,2	25,4
	Média	28,6	25,8	30,1	25,8	28,4	25,6
Tempo (min)		-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	18,6	-	20,5	-	16,6
		-	18,4	-	19,8	-	16,6
	Média	-	18,5	-	20,1	-	16,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	31,0	-	31,1	-	28,6
		-	31,0	-	31,2	-	29,0
	Média	-	31,0	-	31,2	-	28,8
Tempo (min)		30	30	35	30	35	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,5	16,9	13,8	17,8	14,4	15,4
		14,2	16,7	13,7	17,2	14,0	15,5
	Média	14,4	16,8	13,7	17,5	14,2	15,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,9	28,9	25,7	29,5	26,4	27,8
		26,7	28,6	25,7	29,5	26,1	28,2
	Média	26,8	28,8	25,7	29,5	26,2	28,0
Tempo (min)		60	60	60	60	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,1	15,4	13,6	14,4	13,8	14,6
		14,0	15,4	13,7	14,8	13,4	14,5
	Média	14,1	15,4	13,6	14,6	13,6	14,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,0	27,7	24,7	26,4	25,6	27,1
		26,3	28,0	24,9	27,1	25,2	27,5
	Média	26,2	27,9	24,8	26,7	25,4	27,3
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	13,9	15,1	13,2	13,8	13,7	14,6
		13,6	14,8	13,2	13,9	13,2	14,3
	Média	13,7	14,9	13,2	13,9	13,5	14,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	25,4	27,6	23,8	25,8	24,6	26,5
		25,3	27,0	24,0	26,4	24,3	26,8
	Média	25,3	27,3	23,9	26,1	24,5	26,7
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		33 / -	33 / 30	33 / -	34 / 28	34 / 29	34 / 27
Aditivo (% m. c.)		0,55	0,40	0,40	0,35	0,50	0,35
Tempo (min)		90	90	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	27,1	24,3	18,7	22,4	25,9	22,3
		26,5	23,9	18,0	21,7	25,4	21,5
	Média	26,8	24,1	18,3	22,0	25,7	21,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	35,5	34,0	30,6	32,5	35,0	32,5
		35,5	34,0	30,2	32,5	35,0	32,0
	Média	35,5	34,0	30,4	32,5	35,0	32,3
Tempo (min)		120	120	120	120	120	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	24,1	21,9	15,3	18,2	22,4	19,6
		23,5	21,1	14,8	17,8	22,4	18,9
	Média	23,8	21,5	15,0	18,0	22,4	19,2
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	32,5	32,0	27,3	29,3	32,0	29,9
		32,5	31,5	26,2	29,6	32,5	29,8
	Média	32,5	31,8	26,7	29,5	32,3	29,8

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (12 ± 1)°C – F25S10

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		12 / 20	12 / 21	13 / 18	13 / 19	12 / 15	12 / 20
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,20	0,20
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	17,6	14,1	21,6	14,2	15,8	14,5
		18,6	14,2	21,0	14,0	15,8	14,3
	Média	18,1	14,2	21,3	14,1	15,8	14,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	29,7	26,8	31,1	27,1	28,1	27,4
		30,3	27,4	31,5	27,1	27,6	26,9
	Média	30,0	27,1	31,3	27,1	27,9	27,1
Tempo (min)		-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	19,8	-	21,6	-	16,4
		-	19,4	-	20,9	-	16,4
	Média	-	19,6	-	21,2	-	16,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	32,0	-	32,5	-	29,6
		-	31,5	-	32,5	-	29,0
	Média	-	31,8	-	32,5	-	29,3
Tempo (min)		40	30	35	35	30	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,6	17,2	17,0	17,5	14,3	15,0
		14,9	16,9	16,9	17,8	14,3	15,0
	Média	14,7	17,0	17,0	17,6	14,3	15,0
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	27,4	29,5	28,3	28,9	27,0	27,9
		28,1	29,5	28,9	29,5	26,9	27,4
	Média	27,8	29,5	28,6	29,2	26,9	27,7
Tempo (min)		60	60	65	60	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,8	15,8	15,2	15,8	14,1	14,6
		14,7	16,0	15,3	15,9	13,9	14,7
	Média	14,8	15,9	15,2	15,8	14,0	14,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	27,5	28,7	27,6	28,7	26,5	26,6
		27,5	28,6	27,8	28,8	26,2	26,5
	Média	27,5	28,6	27,7	28,7	26,4	26,6
Tempo (min)		100	95	95	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,4	15,2	14,7	15,4	14,2	14,5
		14,7	15,1	14,3	15,1	14,4	14,4
	Média	14,6	15,1	14,5	15,2	14,3	14,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,5	27,6	27,1	27,5	27,0	27,1
		27,1	27,8	27,0	27,0	26,9	27,1
	Média	26,8	27,7	27,1	27,3	27,0	27,1
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		12 / 21	12 / -	12 / 19	11 / 18	13 / 20	13 / 20
Aditivo (% m. c.)		0,15	0,15	0,25	0,15	0,30	0,20
Tempo (min)		100	95	95	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,9	16,5	19,4	16,9	18,9	16,8
		16,3	17,0	20,3	16,9	19,0	17,1
	Média	16,6	16,8	19,8	16,9	19,0	17,0
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	29,6	29,8	31,2	29,2	30,7	29,2
		29,2	30,2	32,0	29,6	30,7	29,5
	Média	29,4	30,0	31,6	29,4	30,7	29,4
Tempo (min)		130	120	120	120	125	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	15,3	16,7	17,1	15,5	16,2	15,5
		15,7	16,5	17,3	15,4	16,2	15,6
	Média	15,5	16,6	17,2	15,5	16,2	15,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,7	30,0	29,4	28,1	29,0	27,8
		29,0	30,1	29,4	28,1	28,5	28,2
	Média	28,8	30,1	29,4	28,1	28,7	28,0

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (12 ± 1)°C – F35S10

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		15 / 18	15 / 19	13 / 18	13 / 17	13 / 18	13 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,20	0,20
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	19,5	14,0	18,6	14,5	16,2	14,1
		19,5	13,8	18,5	14,6	16,1	14,0
	Média	19,5	13,9	18,5	14,5	16,1	14,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,1	26,6	29,7	26,5	27,8	25,8
		30,9	26,7	30,0	26,8	27,7	25,7
	Média	30,5	26,7	29,8	26,7	27,8	25,7
Tempo (min)		-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	20,0	-	21,9	-	16,2
		-	19,2	-	22,3	-	15,6
	Média	-	19,6	-	22,1	-	15,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	32,0	-	32,0	-	28,7
		-	31,5	-	32,0	-	28,7
	Média	-	31,8	-	32,0	-	28,7
Tempo (min)		30	40	35	30	30	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,0	16,8	15,1	18,6	14,5	14,5
		15,6	16,8	15,0	18,0	14,4	14,5
	Média	15,8	16,8	15,0	18,3	14,5	14,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,8	29,4	26,2	30,0	26,9	27,3
		28,0	29,4	26,0	29,8	26,5	27,2
	Média	28,4	29,4	26,1	29,9	26,7	27,2
Tempo (min)		60	60	70	65	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,8	16,0	14,0	16,3	14,5	14,6
		14,6	15,5	13,8	15,7	14,1	14,5
	Média	14,7	15,8	13,9	16,0	14,3	14,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	28,1	28,4	26,2	28,3	26,0	26,7
		28,0	28,7	26,2	27,7	26,5	26,8
	Média	28,0	28,5	26,2	28,0	26,3	26,7
Tempo (min)		90	100	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	14,4	14,9	14,2	16,1	14,4	14,8
		14,4	14,7	14,0	15,7	14,1	14,6
	Média	14,4	14,8	14,1	15,9	14,2	14,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,7	27,5	25,8	27,6	25,7	25,8
		26,9	27,3	25,7	27,5	25,4	26,1
	Média	26,8	27,4	25,8	27,6	25,6	25,9
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		15 / 20	15 / 19	13 / 18	13 / 18	13 / 18	13 / 18
Aditivo (% m. c.)		0,20	0,15	0,25	0,10	0,25	0,25
Tempo (min)		90	100	90	90	90	90
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,3	18,2	20,4	17,6	17,3	16,9
		18,2	18,2	20,2	17,4	17,0	17,0
	Média	18,3	18,2	20,3	17,5	17,2	17,0
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,7	30,8	31,1	29,7	29,8	29,3
		29,6	30,4	31,0	29,3	30,0	29,7
	Média	30,1	30,6	31,0	29,5	29,9	29,5
Tempo (min)		120	130	125	120	120	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	16,3	16,6	17,3	15,9	15,9	16,4
		16,0	16,9	17,6	16,0	16,0	16,1
	Média	16,1	16,7	17,5	16,0	16,0	16,3
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	29,1	28,6	29,1	28,0	27,8	28,7
		28,3	29,2	28,8	27,8	28,0	28,7
	Média	28,7	28,9	29,0	27,9	27,9	28,7

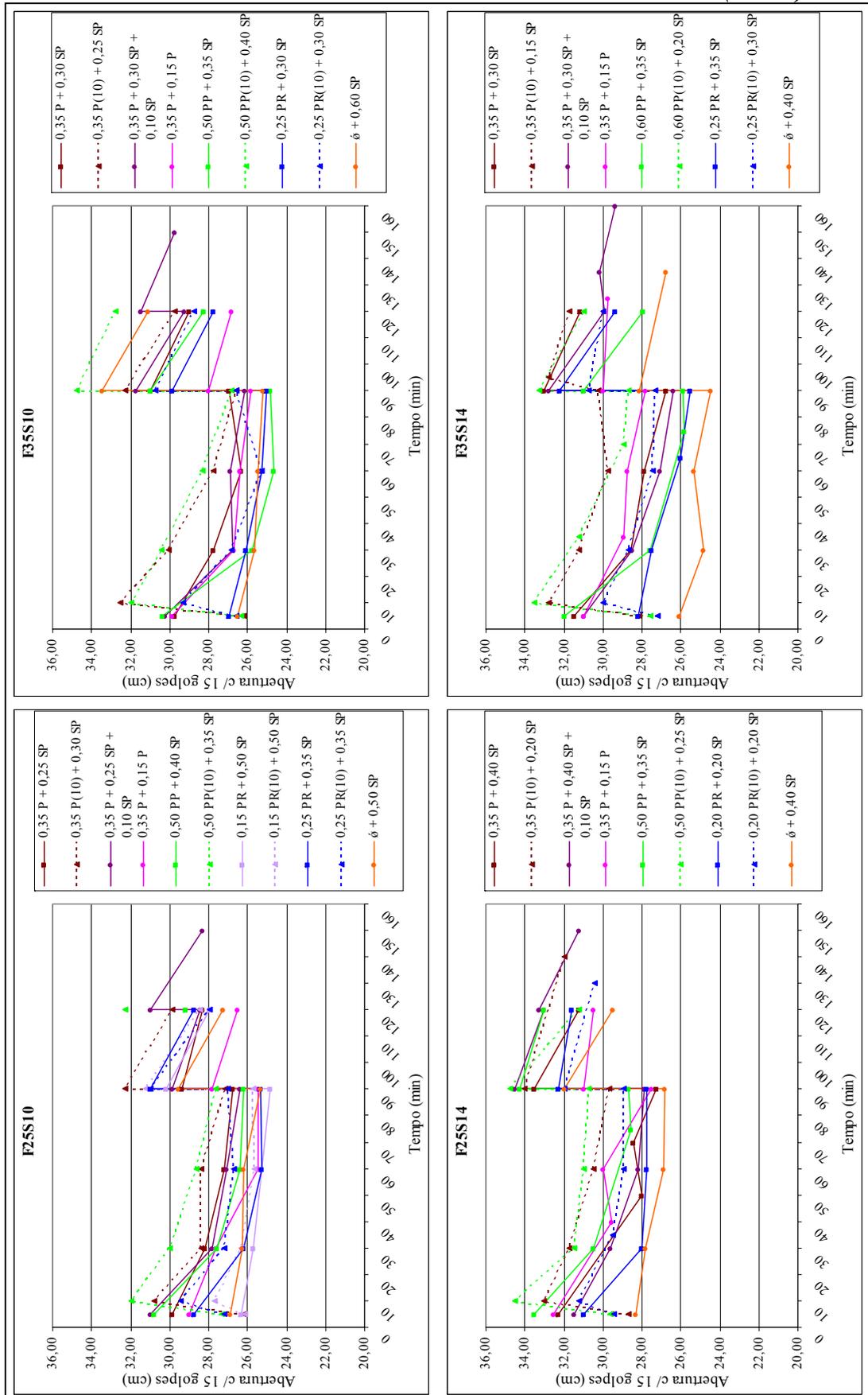
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (12 ± 1)°C – F25S14

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		13 / 19	13 / 18	13 / 18	13 / 18	13 / 19	13 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,20	0,20
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	23,7	16,4	27,2	17,2	20,2	18,5
		24,0	16,9	25,9	17,6	19,7	18,6
	Média	23,9	16,7	26,6	17,4	19,9	18,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	32,5	28,6	34,5	29,2	30,8	29,8
		32,7	29,4	34,5	29,8	30,4	29,4
	Média	32,6	29,0	34,5	29,5	30,6	29,6
Tempo (min)		-	15	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	23,9	-	27,8	-	21,9
		-	23,5	-	27,7	-	21,9
	Média	-	23,7	-	27,7	-	21,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	33,0	-	35,0	-	31,5
		-	33,5	-	35,5	-	32,0
	Média	-	33,3	-	35,3	-	31,8
Tempo (min)		40	30	35	30	35	30
Abertura inicial (cm)	Leituras	19,5	22,2	22,0	24,9	17,7	21,3
		20,0	22,6	20,2	24,4	17,3	19,8
	Média	19,7	22,4	21,1	24,6	17,5	20,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	31,0	32,0	32,0	33,5	29,8	32,0
		31,0	33,0	31,5	34,0	29,9	31,5
	Média	31,0	32,5	31,8	33,8	29,9	31,8
Tempo (min)		65	60	65	60	60	60
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,8	19,9	19,5	21,7	16,7	19,4
		18,2	20,0	20,0	22,3	16,8	19,3
	Média	18,5	20,0	19,8	22,0	16,8	19,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,4	30,2	30,5	31,5	29,2	30,5
		30,0	29,8	31,0	32,0	29,4	31,0
	Média	30,2	30,0	30,8	31,8	29,3	30,8
Tempo (min)		90	90	90	95	90	95
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,0	18,4	18,7	20,1	16,4	18,5
		18,0	18,4	18,8	20,1	17,0	18,7
	Média	18,0	18,4	18,7	20,1	16,7	18,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	30,0	29,6	30,5	31,2	28,8	30,0
		30,1	29,5	30,0	31,1	28,8	30,2
	Média	30,0	29,5	30,3	31,1	28,8	30,1
Adição de aditivo							
T _{amb} / T _{arg} (°C)		12 / 17	13 / 18	13 / 18	13 / 19	13 / 20	13 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,25	0,15	0,15	0,10	0,40	0,15
Tempo (min)		90	90	90	95	90	95
Abertura inicial (cm)	Leituras	23,4	21,2	24,5	23,5	26,7	21,8
		23,5	22,3	23,6	23,5	27,8	22,1
	Média	23,4	21,7	24,0	23,5	27,2	21,9
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	33,5	32,5	33,5	33,5	35,0	32,5
		34,0	32,5	33,5	33,5	36,5	33,0
	Média	33,8	32,5	33,5	33,5	35,8	32,8
Tempo (min)		130	120	130	120	125	120
Abertura inicial (cm)	Leituras	21,1	19,6	20,4	21,8	25,1	19,6
		21,3	19,8	20,6	20,5	24,9	20,0
	Média	21,2	19,7	20,5	21,1	25,0	19,8
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	31,5	32,0	31,5	32,0	33,5	30,5
		32,0	32,0	32,5	31,5	34,0	31,0
	Média	31,8	32,0	32,0	31,8	33,8	30,8

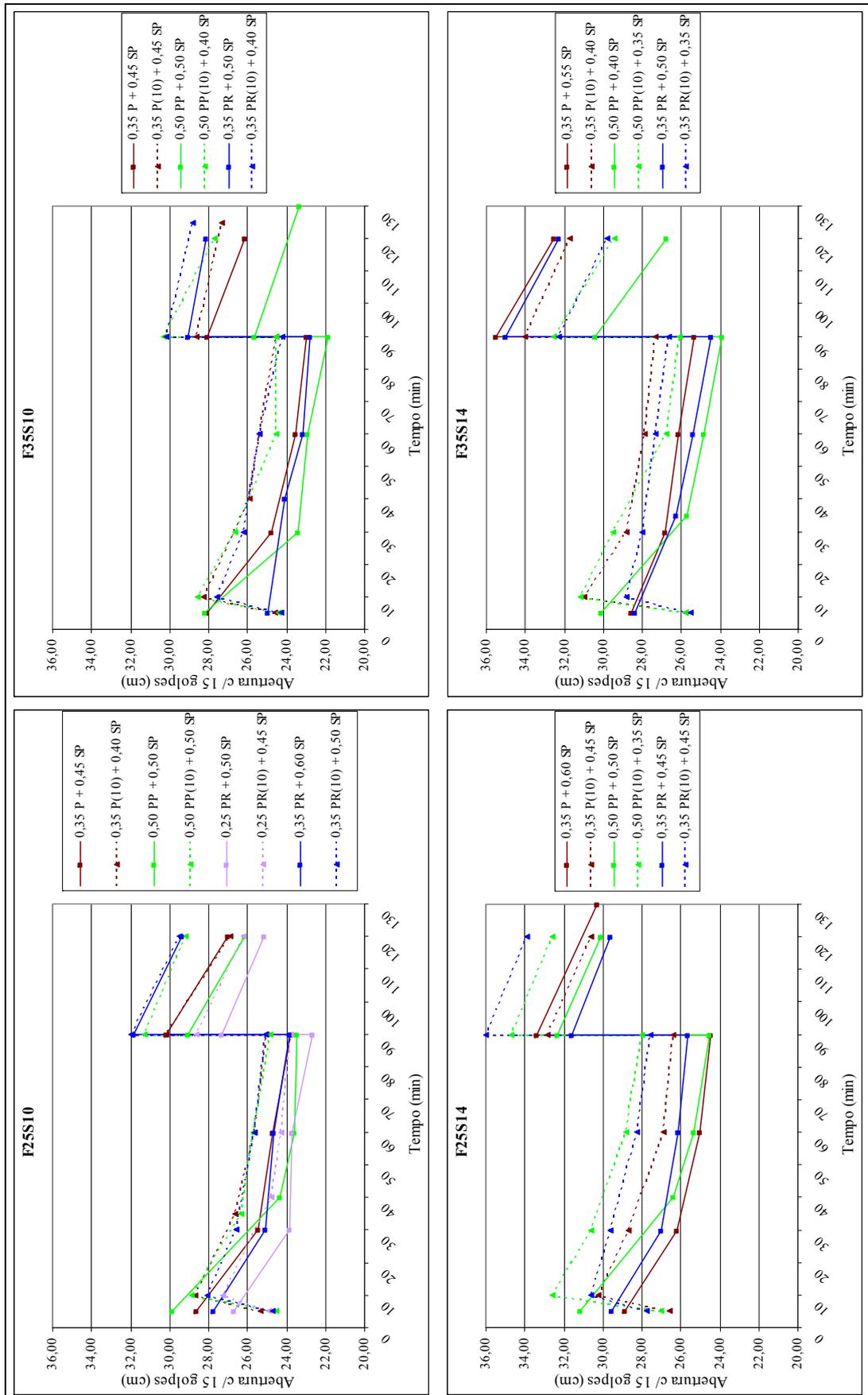
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA - T (12 ± 1)°C – F35S14

		Aditivos					
		P + SP	P ₁₀ + SP	PP + SP	PP ₁₀ + SP	PR + SP	PR ₁₀ + SP
T _{amb} / T _{arg} (°C)		13 / 19	13 / 19	13 / 19	13 / 19	13 / 18	13 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,35	0,35	0,50	0,50	0,20	0,20
Tempo (min)		5	5	5	5	5	5
Abertura inicial (cm)	Leituras	23,9	16,2	25,5	15,6	18,6	16,1
	Média	23,4	16,3	25,8	15,5	18,1	16,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	23,7	16,3	25,7	15,5	18,3	16,2
	Média	33,0	28,7	33,5	27,8	30,4	28,3
Tempo (min)	Leituras	33,5	28,3	34,0	27,8	30,0	28,4
	Média	-	10	-	10	-	10
Abertura inicial (cm)	Leituras	-	23,4	-	25,9	-	19,2
	Média	-	23,1	-	25,3	-	19,4
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	-	23,2	-	25,6	-	19,3
	Média	-	33,0	-	34,0	-	30,5
Tempo (min)	Leituras	-	33,0	-	34,0	-	30,8
	Média	-	33,0	-	34,0	-	30,7
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,8	21,2	21,1	22,4	16,2	17,5
	Média	18,6	21,0	20,1	22,4	16,0	17,5
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	18,7	21,1	20,6	22,4	16,1	17,5
	Média	29,5	31,5	31,0	31,5	28,5	29,1
Tempo (min)	Leituras	29,8	31,5	30,7	32,3	28,6	29,5
	Média	29,7	31,5	30,9	31,9	28,5	29,3
Abertura inicial (cm)	Leituras	18,3	19,6	19,9	19,8	16,0	16,9
	Média	17,8	18,7	19,7	19,5	15,6	16,7
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	18,0	19,1	19,8	19,6	15,8	16,8
	Média	29,6	31,0	30,0	30,4	27,9	28,6
Tempo (min)	Leituras	29,6	30,5	30,5	30,1	27,4	28,8
	Média	29,6	30,8	30,3	30,3	27,7	28,7
Abertura inicial (cm)	Leituras	90	95	90	95	90	95
	Média	13,9	18,4	18,1	17,8	15,3	16,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	13,6	18,3	18,0	18,2	15,7	15,9
	Média	13,7	18,4	18,1	18,0	15,5	16,0
Tempo (min)	Leituras	25,4	29,9	29,9	29,4	27,8	28,0
	Média	25,3	29,5	29,7	29,9	28,1	28,4
Abertura inicial (cm)	Leituras	25,3	29,7	29,8	29,7	28,0	28,2
	Média	Adição de aditivo					
T _{amb} / T _{arg} (°C)		13 / 19	13 / 18	13 / 19	13 / 18	13 / 19	13 / 19
Aditivo (% m. c.)		0,25	0,15	0,15	0,15	0,30	0,25
Tempo (min)		90	95	90	95	90	95
Abertura inicial (cm)	Leituras	27,1	22,9	22,8	23,0	23,3	22,5
	Média	26,5	23,5	23,2	26,6	23,3	23,1
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	26,8	23,2	23,0	24,8	23,3	22,8
	Média	35,5	32,5	33,0	34,5	33,0	32,5
Tempo (min)	Leituras	35,5	33,0	32,7	33,5	33,0	32,7
	Média	35,5	32,8	32,9	34,0	33,0	32,6
Abertura inicial (cm)	Leituras	125	130	130	125	120	120
	Média	24,1	22,7	20,5	21,9	21,2	21,6
Abertura c/ 15 golpes (cm)	Leituras	23,5	21,4	20,3	22,0	21,0	21,4
	Média	23,8	22,0	20,4	21,9	21,1	21,5
Tempo (min)	Leituras	32,5	32,0	31,0	31,5	31,5	31,5
	Média	32,5	32,0	31,0	31,5	31,5	32,0
Abertura inicial (cm)	Leituras	32,5	32,0	31,0	31,5	31,5	31,8
	Média						

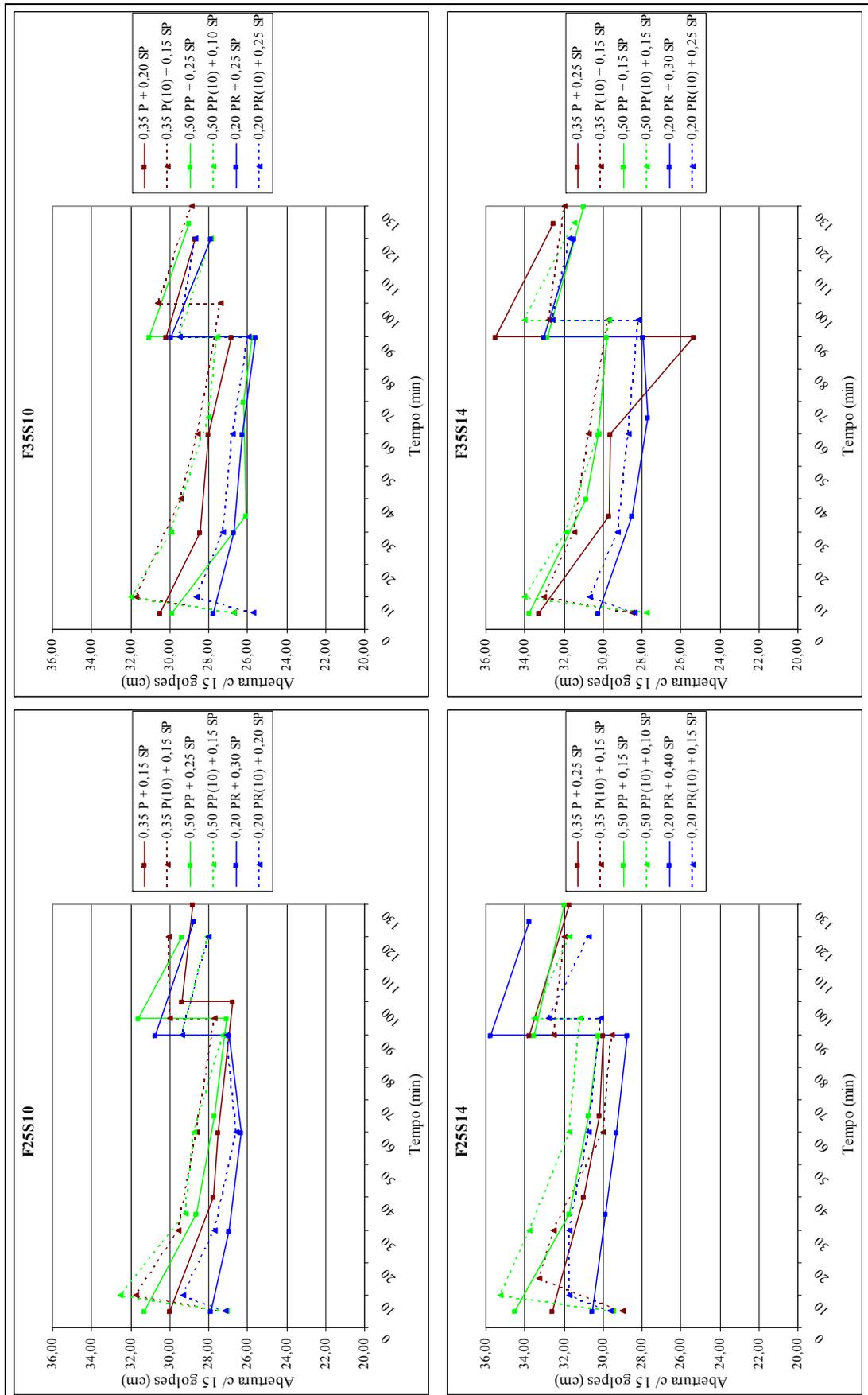
GRÁFICOS DE ABERTURA COM 15 GOLPES X TEMPO - T (23 ± 1)°C



GRÁFICOS DE ABERTURA COM 15 GOLPES X TEMPO - T (34 ± 1)°C



GRÁFICOS DE ABERTURA COM 15 GOLPES X TEMPO - T (12 ± 1)°C



RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (MPa) - T (23 ± 1)°C

Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial	Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial
F25S10	P + SP	33,6	34,2	F25S14	P + SP	29,6	30,7
		29,6				30,7	
		34,2				29,9	
	P + P	34,0	34,0		P + P	29,9	29,9
		33,3				28,3	
		32,6				29,2	
	P ₁₀ + SP	32,7	35,3		P ₁₀ + SP	31,1	33,9
		32,4				32,9	
		35,3				33,9	
	∅ + SP	32,8	32,8		∅ + SP	33,5	34,1
		32,2				33,3	
		28,6				34,1	
	P + SP + SP	30,9	35,3		P + SP + SP	31,3	31,3
		35,3				31,1	
		32,3				29,6	
	PP + SP	31,6	31,6		PP + SP	30,1	37,5
		30,9				37,5	
		30,7				32,4	
	PP ₁₀ + SP	36,3	36,3		PP ₁₀ + SP	27,3	31,6
		35,3				31,4	
		29,0				31,6	
	PR + SP	32,1	35,5		PR + SP	31,7	34,8
		33,2				31,9	
		35,5				34,8	
PR ₁₀ + SP	29,2	29,2	PR ₁₀ + SP	33,5	33,9		
	27,1			33,9			
	23,7			28,8			
F35S10	P + SP	32,4	41,7	F35S14	P + SP	38,0	43,8
		38,4				43,8	
		41,7				35,8	
	P + P	43,1	43,1		P + P	34,8	41,2
		41,3				37,8	
		42,6				41,2	
	P ₁₀ + SP	38,6	38,6		P ₁₀ + SP	34,3	39,7
		-				35,3	
		-				39,7	
	∅ + SP	28,8	37,9		∅ + SP	37,2	38,7
		33,9				38,7	
		37,9				35,9	
	P + SP + SP	41,2	41,5		P + SP + SP	41,4	45,3
		41,5				45,3	
		30,4				40,7	
	PP + SP	39,8	39,8		PP + SP	41,3	41,3
		34,5				37,1	
		34,9				36,0	
	PP ₁₀ + SP	28,6	39,2		PP ₁₀ + SP	36,8	37,2
		35,1				36,7	
		39,2				37,2	
	PR + SP	37,5	43,5		PR + SP	40,3	44,4
		43,5				37,2	
		41,1				44,4	
PR ₁₀ + SP	39,7	39,7	PR ₁₀ + SP	42,1	42,1		
	35,1			39,6			
	37,1			38,6			

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (MPa) - T (34 ± 1)°C

Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial	Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial
F25S10	P + SP	33,9	34,3	F25S14	P + SP	24,5	32,5
		34,3				28,6	
		32,2				32,5	
	P ₁₀ + SP	32,0	34,9		P ₁₀ + SP	26,5	28,4
		33,4				25,2	
		34,9				28,4	
	PP + SP	29,7	29,7		PP + SP	24,9	28,2
		25,3				28,0	
		28,4				28,2	
	PP ₁₀ + SP	29,7	31,8		PP ₁₀ + SP	29,7	29,7
		30,6				28,6	
		31,8				22,6	
	PR + SP	33,6	33,6		PR + SP	32,9	32,9
		32,0				28,9	
		21,1				21,5	
	PR ₁₀ + SP	30,5	30,5		PR ₁₀ + SP	28,0	30,8
		28,6				30,8	
		27,5				28,4	
F35S10	P + SP	36,5	36,5	F35S14	P + SP	38,6	38,6
		34,7				32,6	
		34,6				31,4	
	P ₁₀ + SP	34,6	36,2		P ₁₀ + SP	35,1	37,6
		36,2				37,6	
		31,1				-	
	PP + SP	33,6	39,3		PP + SP	34,3	34,3
		39,3				29,1	
		32,6				30,0	
	PP ₁₀ + SP	42,7	42,7		PP ₁₀ + SP	38,7	38,7
		33,7				22,2	
		34,2				38,7	
	PR + SP	37,1	37,1		PR + SP	19,7	30,2
		26,2				30,2	
		33,8				26,0	
	PR ₁₀ + SP	30,4	40,2		PR ₁₀ + SP	28,7	36,0
		40,2				36,0	
		38,0				34,7	

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (MPa) - T (12 ± 1)°C

Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial	Traço	Aditivos	Valores Individuais	Valor Potencial
F25S10	P + SP	30,0	31,4	F25S14	P + SP	26,8	31,4
		31,3				31,4	
		31,4				27,0	
	P ₁₀ + SP	23,0	35,2		P ₁₀ + SP	31,5	31,5
		32,3				29,0	
		35,2				31,0	
	PP + SP	30,0	35,4		PP + SP	30,2	34,3
		35,4				30,6	
		27,0				34,3	
	PP ₁₀ + SP	31,3	32,1		PP ₁₀ + SP	26,8	33,5
		30,0				33,5	
		32,1				32,3	
	PR + SP	30,7	30,7		PR + SP	28,0	29,8
		30,1				28,1	
		30,7				29,8	
	PR ₁₀ + SP	30,8	32,9		PR ₁₀ + SP	32,1	32,1
		32,2				29,7	
		32,9				31,4	
F35S10	P + SP	32,3	40,2	F35S14	P + SP	41,0	42,2
		37,5				34,9	
		40,2				42,2	
	P ₁₀ + SP	37,6	41,0		P ₁₀ + SP	39,0	42,1
		39,2				42,1	
		41,0				34,1	
	PP + SP	37,2	45,0		PP + SP	35,8	41,7
		45,0				36,1	
		43,0				41,7	
	PP ₁₀ + SP	41,3	41,3		PP ₁₀ + SP	41,4	41,4
		39,7				34,5	
		36,9				40,0	
	PR + SP	45,6	45,6		PR + SP	36,6	44,3
		37,4				44,3	
		45,2				37,3	
	PR ₁₀ + SP	43,6	44,1		PR ₁₀ + SP	45,6	46,3
		44,1				46,3	
		43,4				39,3	

APÊNDICE D

RESULTADOS GERAIS DA ETAPA 4

		Traço									
		F25SI4					F35SI4				
Aditivos	P + ÁGUA	P + SP	P ₁₀ + SP	PP ₁₀ + SP	P ₁₀ + SP + SP	P + ÁGUA	P + SP	P ₁₀ + SP	PP ₁₀ + SP	P ₁₀ + SP + SP	P + SP + SP
Tempo (min)	5	5	-	-	-	5	5	-	-	-	-
T _{amb} (°C)	26	21	25	25	25	25	24	23	24	23	23
Relação a/c	0,656	0,663	0,663	0,663	0,663	0,553	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556
Aditivo (% m. c.)	0,35	0,35	-	-	-	0,35	0,35	-	-	-	-
Abatimento (cm)	7,5	12,5	-	-	-	8,0	11,5	-	-	-	-
Tempo (min)	-	-	10	10	10	-	-	10	10	10	10
T _{amb} (°C)	-	-	25	25	25	-	-	23	24	23	23
Aditivo (% m. c.)	-	-	0,35	0,54	0,35	-	-	0,35	0,44	0,35	0,35
Abatimento (cm)	-	-	15,5	14,5	14,5	-	-	13,0	16,0	14,5	14,5
Tempo (min)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
T _{amb} (°C)	26	21	25	25	25	24	23	23	24	23	23
Abatimento (cm)	6,5	9,0	11,5	11,0	11,0	5,5	7,5	9,0	12,0	11,0	11,0
Tempo (min)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
T _{amb} (°C)	26	21	25	25	26	25	23	24	24	22	22
Abatimento (cm)	5,5	6,0	10,0	8,0	8,0	4,5	7,0	8,0	9,5	9,0	9,0
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
T _{amb} (°C)	26	21	24	25	26	24	23	24	24	22	22
Abatimento (cm)	3,5	5,5	7,5	7,5	6,5	4,0	6,5	7,0	8,5	7,5	7,5
Adição de água ou aditivo											
Relação a/c	0,740	0,663	0,663	0,663	0,663	0,609	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556
Aditivo (% m. c.)	-	0,43	0,48	0,51	0,46	-	0,57	0,36	0,36	0,37	0,37
Abatimento (cm)	12,5	13,5	16,5	17,0	14,5	14,0	18,5	14,0	14,5	15,0	15,0
Tempo (min)	-	-	-	-	130	-	-	-	-	-	120
T _{amb} (°C)	-	-	-	-	26	-	-	-	-	-	22
Abatimento (cm)	-	-	-	-	10,0	-	-	-	-	-	11,0
Adição de aditivo											
Aditivo (% m. c.)	-	-	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,09
Abatimento (cm)	-	-	-	-	14,0	-	-	-	-	-	13,0
γ_{real} (kg/dm ³)	2,283	2,298	2,299	2,299	2,301	2,288	2,298	2,311	2,318	2,313	2,342
$\gamma_{teórico}$ (kg/dm ³)	2,338	2,338	2,338	2,338	2,338	2,342	2,342	2,342	2,342	2,342	2,342
Teor de ar incorporado (%)	2,4	1,7	1,7	1,7	1,6	2,3	1,9	1,3	1,0	1,3	1,3
Taxa de exsudação (%/h)	0,054	0,088	0,114	0,076	0,065	0,091	0,085	0,087	0,074	0,083	0,083

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Traço	Aditivos	Resistência à compressão (Mpa)						Módulo de deformação (Gpa)	
		1 dia		7 dias		28 dias		28 dias	
		Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial	Valores Individuais	Valor Potencial
F25S14	P + ÁGUA	2,4	3,1	16,6	16,6	24,3	24,5	18,3	24,4
		3,1		16,1		24,5		24,2	
		-		-		22,4		24,4	
	P + SP	1,4	1,5	20,0	20,0	28,3	29,9	25,8	25,8
		1,5		20,0		29,9		25,3	
		-		-		28,3		-	
	P ₁₀ + SP	3,5	3,5	20,0	20,0	28,7	28,7	26,1	26,1
		2,3		20,0		27,3		25,7	
		-		-		26,5		25,6	
	PP ₁₀ + SP	2,5	2,5	19,4	19,4	27,4	28,5	23,7	27,6
		1,5		18,7		28,5		27,6	
		-		-		26,6		27,1	
	P ₁₀ + SP + SP	1,5	1,5	19,9	19,9	27,8	29,5	24,6	26,4
		1,1		19,5		29,5		26,4	
		-		-		27,1		26,4	
F35S14	P + ÁGUA	2,2	2,2	22,7	22,7	31,5	31,5	29,9	29,9
		1,3		22,0		29,6		27,1	
		-		-		29,5		27,3	
	P + SP	1,4	1,5	24,3	25,8	32,3	37,3	28,0	29,8
		1,5		25,8		37,3		27,5	
		-		-		34,5		29,8	
	P ₁₀ + SP	1,1	1,4	26,4	26,4	37,6	37,6	30,9	30,9
		1,4		24,3		34,3		29,3	
		-		-		35,5		26,5	
	PP ₁₀ + SP	1,1	2,9	24,4	24,6	34,0	34,0	28,9	28,9
		2,9		24,6		31,6		25,9	
		-		-		34,0		28,2	
	P ₁₀ + SP + SP	1,2	1,5	24,7	24,7	32,8	35,8	28,0	28,2
		1,5		24,7		34,2		28,2	
		-		-		35,8		26,8	

APÊNDICE E

RESULTADOS GERAIS DA ETAPA 5

Sub- etapa	Caminhão	Volume (m ³)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{méd} (°C)	Tempo central - obra (min)	Adição de água	Tempo (min)	Relação a/c traço	Relação a/c real	Abati- mento (cm)	Adição de aditivo superplastificante	Tempo (min)	Aditivo (% m.c.)	Abati- mento (cm)	Aditivo p/ aumentar 1 cm (%/cm)	Tempo total de lançament o (min)	Fc 7 dias (Mpa)	Fc 28 dias (Mpa)	Observações
1	1	7,0	18	26	23	75	Adição de água	80	0,530	0,530	8,0	Adição de aditivo superplastificante	85	0,33	11,0	0,11	15	28,8	36,4	* Os caminhões 2 e 6 estavam com problemas no hidrômetro
	2	7,0				77		0,542		5,5	92		0,51	16,0	0,05	15	28,7	35,5		
	3	7,0				97		0,530		7,5	102		0,42	17,5	0,04	15	28,4	43,8		
	4	7,0				90		0,530		6,5	115		0,42	12,0	0,06	15	29,2	36,2		
	5	7,0				54		0,530		4,0	123		0,14	16,0	0,09	15	31,9	49,8		
	6	7,0				59		0,542		10,0	114		0,56	18,0	0,07	15	24,4	36,1		
	7	7,0				70		0,530		7,5	80		0,42	13,0	0,08	15	30,4	39,7		
	8	7,0				73		0,530		7,5	88		0,42	17,0	0,04	15	26,8	37,7		
	9	7,0				73		0,530		3,0	83		0,75	16,0	0,06	15	29,1	41,5		
	10	7,0				75		0,530		9,5	85		0,33	15,0	0,06	15	24,3	38,2		
	11	6,5				75		0,530		12,0	85		0,30	17,0	0,06	15	22,0	32,8		
2	1	8,0	18	27	23	37	Adição de água	42	0,530	0,466	11,5	Adição de aditivo superplastificante	47	0,29	13,0	0,13	15	31,5	40,4	* Britas muito molhadas neste dia
	2	8,0				44		0,508		7,0	74		0,49	10,0	0,10	15	26,6	34,7		
	3	7,0				27		0,486		12,0	82		0,47	16,0	0,12	15	29,8	41,9		
	4	8,0				33		0,520		11,5	73		0,73	22,0	0,07	15	28,0	38,9		
	5	8,0				31		0,530		8,0	96		0,73	20,0	0,06	15	33,5	41,0		
	6	8,0				48		0,493		8,5	61		0,69	19,0	0,07	15	32,6	39,8		
	7	8,0				34		0,528		9,5	109		0,65	18,0	0,08	20	32,5	38,8		
	8	8,0				36		0,530		10,5	106		0,61	20,5	0,06	25	27,3	36,5		

RESULTADOS GERAIS DA ETAPA 5

Sub- etapa	Caminhão	Volume (m ³)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{méd} (°C)	Tempo central- obra (min)	Tempo (min)	Relação a/c _{tempo}	Relação a/c _{real}	Abati- mento (cm)	Aditivo (% m.c.)	Abati- mento (cm)	Aditivo p/ aumentar 1 cm (%/cm)	Tempo total de lançament o (min)	Fc 7 dias (Mpa)	Fc 28 dias (Mpa)	Observações
3	1	8,0				45	55		0,530	3,0	0,82	15,0	0,07	15	28,5	39,1	* No caminho 3 o aditivo SP não misturou direito
	2	8,0				32	47		0,530	8,5	0,69	19,0	0,07	15	29,6	35,5	
	3	8,0				43	48		0,530	0,0	0,90	21,0	0,04	15	30,5	38,1	
	4	8,0	26	30	29	34	39	0,530	0,525	9,0	0,69	21,0	0,06	15	30,4	38,3	
	5	8,0				39	39		0,530	5,0	0,94	19,5	0,06	20	31,4	43,1	
	6	8,0				42	42		0,530	9,5	0,65	21,0	0,06	20	31,2	40,1	
	7	8,0				35	35		0,530	3,5	0,90	24,0	0,04	15	30,8	43,5	
4	1	8,0				40	55		0,530	5,5	0,82	26,0	0,04	10	30,4	41,7	* No caminho 6 o teor de plastificante foi 0,40% ao invés de 0,35%
	2	8,0				41	56		0,530	6,5	0,61	13,5	0,06	20	28,6	38,2	
	3	8,0				50	55		0,540	3,0	0,82	21,0	0,05	40	31,0	43,1	
	4	8,0	16	25	22	37	42	0,530	0,540	3,0	0,98	18,0	0,07	10	28,6	32,5	
	5	8,0				32	37		0,547	5,0	0,98	16,5	0,09	20	28,8	41,6	
	6	8,0				30	30		0,564	8,0	0,65	21,0	0,05	15	28,6	35,4	
	7	8,0				48	68		0,564	5,0	0,82	21,0	0,05	15	25,7	29,9	
	8	8,0				38	38		0,563	6,0	0,73	18,0	0,06	30	27,0	37,3	

Adição de aditivo superplastificante

Adição de água