

AUGUSTO CESAR ABDUCHE CORRÊA

**ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS PLASTIFICANTES E
POLIFUNCIONAIS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND TIPO CPIII-40.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal Fluminense como
requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre. Área de Concentração; Tecnologia
da Construção

Orientador: Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Niterói
2010

AUGUSTO CESAR ABDUCHE CORRÊA

**ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS PLASTIFICANTES E
POLIFUNCIONAIS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND TIPO CPIII-40.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal Fluminense como
requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre. Área de Concentração; Tecnologia
da Construção

Aprovado em.....

BANCA EXAMINADORA

Niterói
2010

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo estímulo que prestaram nos momentos em que pensei que o melhor seria desistir principalmente pela falta de tempo, ao amigo Francisco Varejão e ao Prof. Gilberto Couri, ambos, pelos sábios conselhos na elaboração deste trabalho e à equipe do laboratório da Bautech Ltda. por todo apoio e dedicação na execução dos ensaios.

RESUMO

Este trabalho é baseado em ensaios de laboratório e foi dividido em dois temas relacionados. Na primeira etapa é apresentado um estudo de desempenho dos aditivos redutores de água: plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland CPIII 40, cujo objetivo foi o de avaliar os efeitos do incremento da dosagem destes aditivos na consistência de uma amostra de concreto e indicar as suas limitações técnicas de uso, em função dos efeitos destas dosagens sobre o retardamento do fim de pega e a resistência à compressão axial do concreto. Na segunda etapa, aproveitando o estudo de consistência realizado, foi selecionada a dosagem com melhor desempenho de cada um dos aditivos testados e avaliada a redução de consumo de cimento possível de ser obtida por cada aditivo, em função da redução da água de dosagem, e também avaliada uma redução parcial desta quantidade de água, com incremento da plasticidade. No trabalho são apresentados também os outros dois tipos de redutores de água, os superplastificantes e os fluidificantes, como são chamados os aditivos de última geração, mas o estudo é baseado somente no plastificante e no polifuncional. Na primeira etapa os ensaios laboratoriais foram de avaliação dos desempenhos de cada dosagem em: consistência, massa específica, incorporação de ar, manutenção da plasticidade, retardamento de fim de pega e resistências mecânicas. Na segunda etapa, os ensaios se limitaram a avaliação da consistência e resistência a compressão axial. A partir dos resultados obtidos foi feita uma avaliação de desempenho de cada um dos aditivos, apresentados os benefícios técnicos e econômicos com o uso de cada aditivo, e também os riscos de dosagens. Este estudo pode auxiliar os trabalhos de implantação de dosagem de concreto com uso de aditivos, mesmo em pequenos canteiros de obra, o que hoje é muito limitado aos segmentos de concretos dosados em central e fabricantes de pré-moldados. Além dos benefícios técnicos e econômicos foi apresentado também o benefício ecológico gerado pelo incremento no uso de aditivos redutores de água.

Palavras-chave: Aditivo redutor de água, Concreto, Trabalhabilidade, Consistência, Resistência mecânica.

ABSTRACT

This work is based in lab tests and it was divided in two related subjects. In the first part it is presented a performance study of the water reducers admixtures: plasticizers and multifunctional, in a Portland cement type III – 40 concrete, which target was to evaluate the effects of the dosage increments of these admixtures over a concrete sample consistence and to show the technical dosage limitation related to the effect of these dosages over the concrete final set delay and also over the strength. At the second part of this work, using the results of the first study, the best dosage of each one of the tested admixtures were selected to do an evaluation of the maximum possible cement reduction to be obtained in function of the water reduction potential of each one admixture and also an evaluation was done with partial water reduction aiming the increase of plasticity. In this work two other types of water reducers are presented, the superplasticisers and the super fluidizing admixtures, as the last generation of admixtures are called, but the study is based only in the plasticizer and the multifunctional. In the first part, the lab tests were done to evaluate the performance of each dosage concerning: consistence, density, air entraining, plasticity retention, final set delay and mechanical strength. In the second part, the tests were the consistence and mechanical strength only. Based on the results obtained, a performance evaluation of both admixtures was done, revealing the technical and economic benefits with the use of each admixture, and also the dosages risks. This study can be useful for the implantation works of concrete dosage with use of admixtures, even in small job sites, which use today is limited only to the ready mix and pre-cast segments. Beyond the technical and economic benefits, ecological benefits were also presented, generated by the increasing of water reducing admixtures use.

Key works: water reducer admixture, concrete, workability, consistence, mechanical strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Representação da ação do aditivo interagindo com o cimento e a água.....	35
Figura 3.2: Representação da cadeia bipolar envolvendo o grão de cimento.....	35
Figura 3.3: Estrutura dos grãos de cimento em forma de castelo de cartas.....	37
Figura 3.4: Elementos do lignosulfonato de sódio interagindo com o cimento e a água.....	40
Figura 3.5: Estrutura do lignosulfonato de sódio.....	40
Figura 3.6: Estrutura química do gluconato de sódio.....	42
Figura 3.7: Estrutura química do polinaftaleno sulfonato.....	43
Figura 3.8: Esquematização estrutural.....	43
Figura 4.1: Limpeza das pedras.....	49
Figura 4.2: Colocação do concreto no tronco de cone em três camadas.....	54
Figura 4.3: Golpeamento do concreto no tronco de cone em três camadas com 25 golpes cada.....	55
Figura 4.4: Medição do abatimento da amostra e avaliação visual da coesão.....	55
Figura 4.5: Colocação do concreto em 3 camadas com 14 golpes cada.....	56
Figura 4.6: Golpes com martelo de borracha após adensamento de cada camada.....	56
Figura 4.7: Adensamento da última camada.....	57
Figura 4.8: Alisamento superficial.....	57
Figura 4.9: limpeza de borda.....	58
Figura 4.10: Pesagem para determinação da densidade.....	58
Figura 4.11: Colocação da água.....	59
Figura 4.12: Aplicação de carga de pressão.....	59
Figura 4.13: Calibragem da agulha.....	60
Figura 4.14: Tomada de pressão para determinação do teor de ar.....	60
Figura 4.15: Moldagem em duas camadas com 13 golpes cada.....	61
Figura 4.16: Adensamento da última camada.....	61
Figura 4.17: Posicionamento da forma, 2 a 3 mm acima do corpo de prova.....	62
Figura 4.18: Preenchimento com argamassa polimérica rápida, Rapdez.....	63
Figura 4.19: Acabamento com desempenadeira metálica.....	63
Figura 4.20: Prensa para rompimento Pavitest de 12,0 t.....	64
Figura 6.1: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone.....	77
Figura 6.2: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone após 45 min.....	77
Figura 6.3: Resultados médios do teor de ar incorporado das amostras.....	78
Figura 6.4: Resultados médios de massa específica do concreto.....	79
Figura 6.5: Resultados de resistência à compressão axial em 24 h.....	79
Figura 6.6: Resultados de resistência à compressão axial em 7 dias.....	80
Figura 6.7: Resultados de resistência à compressão axial em 28 dias.....	81
Figura 6.8: Tempo de fim de pega do concreto.....	81

Figura 6.9: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone.	84
Figura 6.10: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone após 45 min.	85
Figura 6.11: Resultados médios do teor de ar incorporado das amostras	85
Figura 6.12: Resultados médios de massa específica do concreto.	86
Figura 6.13: Resultados de resistência à compressão axial média em 24 hs.	87
Figura 6.14: Resultados de resistência à compressão axial média em 7 dias.	87
Figura 6.15: Resultados de resistência à compressão axial média em 28 dias.	88
Figura 6.16: Tempo médio de retardamento do fim de pega do concreto.	89
Figura 6.17: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo plastificante.	94
Figura 6.18: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.	95
Figura 6.19: Resistência à compressão axial média aos 7 dias.	95
Figura 6.20: Resistência à compressão axial média aos 28 dias.	96
Figura 6.21: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo polifuncional.	97
Figura 6.22: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.	98
Figura 6.23: Resistência à compressão axial média aos 7 dias, expressa em MPa.	98
Figura 6.24: Resistência à compressão axial média aos 28 dias, expressa em MPa.	99
Figura 6.25: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo plastificante.	102
Figura 6.26: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.	102
Figura 6.27: Resistência à compressão axial média aos 7 dias.	103
Figura 6.28: Resistência à compressão axial média aos 28 dias.	103
Figura 6.29: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo polifuncional.	105
Figura 6.30: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.	106
Figura 6.31: Resistência à compressão axial média aos 7 dias, expressa em MPa.	106
Figura 6.32: Resistência à compressão axial média aos 28 dias, expressa em MPa.	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Características do aditivo plastificante informadas pelo fabricante.....	70
Quadro 5.2: Características do aditivo polifuncional informadas pelo fabricante.....	70
Quadro 6.1: Composição e características do traço definitivo da amostra do concreto de referência.....	74
Quadro 6.2: Composição por m ³ , do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.....	93
Quadro 6.3: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.....	93
Quadro 6.4: Composição por m ³ , do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.....	97
Quadro 6.5: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.....	97
Quadro 6.6: Composição por m ³ , do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.....	101
Quadro 6.7: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.....	101
Quadro 6.8: Composição por m ³ , do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.....	104
Quadro 6.9: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.....	104
Quadro 7.1: Reduções máximas de água e cimento em relação ao concreto de referência. ..	111
Quadro 7.2: Reduções parciais de água e cimento em relação ao concreto de referência.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Relatório de ensaios de cimento	71
Tabela 5.2: Curva granulométrica da areia.....	71
Tabela 5.3: Curva granulométrica da brita.	72
Tabela 6.1: Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e resistências à compressão axial para as amostras do concreto de referência, concretos aditivados com aditivo plastificante e com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% para o aditivo plastificante e 0,5% para o aditivo polifuncional com redução máxima da água.	99
Tabela 6.2: Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e resistências à compressão axial para as amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26), concretos aditivados com aditivo plastificante e com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% para o aditivo plastificante (amostras 31 e 32) e 0,5% para o aditivo polifuncional (amostra 33 e 34), com redução parcial (70%) da água.	107
Tabela 7.1: Painel de resultados médios dos ensaios com o gradiente de dosagens do aditivo plastificante comparado à amostra de concreto padrão.	109
Tabela 7.2: Painel de resultados médios dos ensaios com o gradiente de dosagens do aditivo polifuncional comparado à amostra de concreto padrão	110
Tabela 7.3: Painel de avaliação da redução máxima de cimento com as dosagens selecionadas.	111
Tabela 7.4: Painel de avaliação da redução parcial de cimento com as dosagens selecionadas.	112

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ed.	edição
p.	pagina
CPIII 40	cimento Portland tipo 3 de classe 40 MPa
CP 32	cimento Portland de classe 32 MPa
CPV	cimento Portland tipo 5
cp	corpo de prova
f_{ck}	resistência característica de dosagem
MPa	mega Pascal
a/c	fator água-cimento
kcal/kg	quilocaloria por quilo
GJ/t	giga joules por tonelada
t	tonelada
Kg	quilograma
G	grama
CO ₂	dióxido de carbono
C ₃ A	silicato tricálcico
SO ₃	Sulfato (óxido de enxofre)
OH	hidroxila
COO-	carboxilatos
°C	graus Celsius
slump	abatimento do concreto
h	horas
min	minuto
mm	milímetro

brita 1	britas passantes na peneira de malha de no máximo 19 mm
brita 2	britas passantes na peneira de malha de no máximo 25 mm
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
pH	indicador de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa
m ³	metro cúbico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivos específicos.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	21
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2 ADITIVOS	23
2.1 HISTÓRICO	23
2.2 DEFINIÇÕES	24
2.3 ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA.....	26
2.3.1 Aditivos Plastificantes	26
2.3.2 Aditivos Superplastificantes	29
2.3.3 Aditivos. Polifuncionais.....	31
2.3.4 Aditivos Fluidificantes.....	32
3. MATÉRIAS PRIMAS DOS ADITIVOS E MECANISMOS DE AÇÃO.....	34
3.1 AÇÚCAR E MELADO	38
3.2 LIGNOSULFONATOS DE CÁLCIO E DE SÓDIO.....	39
3.3 GLUCONATO DE SÓDIO.....	41
3.4 POLINAFTALENO SULFONATO DE SÓDIO E DE CÁLCIO	42
3.5 FORMOL E BIOCIDAS	44
3.6 ANTIESPUMANTES	44
3.7 OUTRAS BASES QUÍMICAS	45
4. METODOLOGIA.....	46
4.1 PRIMEIRA ETAPA	51
4.2 SEGUNDA ETAPA	64
5. SELEÇÃO DE MATERIAIS	66
5.1 MATÉRIAS PRIMAS	66
5.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	68
5.3 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS SELECIONADOS.....	70
6 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
6.1 COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DE CONCRETO E CONDIÇÕES DE ENSAIOS	73
6.2 PRIMEIRA ETAPA	75
6.2.1 Resultados médios da primeira e da segunda bateria de ensaio	76
6.2.1.1 Consistência inicial.....	76
6.2.1.2 Consistência após 45 minutos.....	77
6.2.1.3 Teor de ar incorporado médio e massa específica.....	78

6.2.1.4 Resistência à compressão axial em 24 horas.....	79
6.2.1.5 Resistência à compressão axial em 7 dias	80
6.2.1.6 Resistência à compressão axial em 28 dias	80
6.2.1.7 Observação do retardamento do final de pega.....	81
6.2.2 Comentários sobre as dosagens da primeira e da segunda bateria de ensaio com aditivo plastificante.	82
6.2.3 Resultados médios da terceira e quarta baterias de ensaio	83
6.2.3.1 Consistência inicial.....	84
6.2.3.2 Consistência após 45 minutos.....	84
6.2.3.3 Teor de ar incorporado médio e massa específica.....	85
6.2.3.4 Resistência à compressão axial média em 24 horas.	86
6.2.3.5 Resistência à compressão axial média em 7 dias	87
6.2.3.6 Resistência à compressão axial média em 28 dias	88
6.2.3.7 Observação do retardamento do final de pega.....	88
6.2.3.8 Comentários sobre as dosagens com aditivo polifuncional.....	89
6.3 SEGUNDA ETAPA	91
6.3.1 Avaliação da redução máxima de consumo de cimento.....	91
6.3.1.1 Traço com aditivo plastificante com redução máxima do consumo de cimento.....	93
<i>6.3.1.1.1 Abatimento inicial.....</i>	<i>94</i>
<i>6.3.1.1.2 Resistências mecânicas à compressão axial:.....</i>	<i>94</i>
6.3.1.2 Traço com aditivo polifuncional com redução máxima do consumo de cimento.	96
<i>6.3.1.2.1 Abatimento inicial.....</i>	<i>97</i>
<i>6.3.1.2.2 Resistências mecânicas à compressão axial.....</i>	<i>98</i>
6.3.1.3 Painel comparativo e comentários sobre as reduções máximas de água.....	99
6.3.2 Avaliação da redução parcial de consumo de cimento.....	100
6.3.2.1 Traço com aditivo plastificante com redução parcial do consumo de cimento.....	100
<i>6.3.2.1.1 Abatimento inicial.....</i>	<i>102</i>
<i>6.3.2.1.2: Resistências mecânicas à compressão axial:</i>	<i>102</i>
6.3.2.2 Traço com aditivo Polifuncional com redução parcial do consumo de cimento.....	104
<i>6.3.2.2.1 Abatimento inicial.....</i>	<i>105</i>
<i>6.3.2.2.2 Resistências mecânicas à compressão axial:.....</i>	<i>105</i>
6.3.2.3 Painel comparativo e comentários das reduções parciais de água.....	107
7 PAINEL RESUMO DE RESULTADOS.....	109
7.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SÉRIE DE DOSAGENS DE ADITIVO PLASTIFICANTE.....	109
7.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SÉRIE DE DOSAGENS DE ADITIVO POLIFUNCIONAL	110
7.3 AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO MÁXIMA DE CIMENTO COM AS DOSAGENS SELECIONADAS.....	111
7.4 AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO PARCIAL DE CIMENTO COM AS DOSAGENS SELECIONADAS	112
8 CONCLUSÃO.....	113
9 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	116
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICES	120

1. INTRODUÇÃO

O homem faz usos dos aglomerantes hidráulicos de agregados minerais, desde a descoberta das propriedades aglomerantes de matérias primas como o gesso e o calcário tratados termicamente.

O conhecimento evoluiu com o emprego de lavas vulcânicas mescladas a cal e finalmente, o homem descobriu no século XIX, na mistura sinterizada (clinkerização) de calcário e argila, as propriedades do cimento Portland que, após mais de um século de existência, vem se mantendo como a melhor solução técnica e econômica na aglomeração de rochas fragmentadas ou seixos rolados e areia na fabricação do concreto e argamassas.

Houve muita evolução na qualidade dos cimentos Portland e também no processo industrial, com grande redução do consumo de energia para sua produção, porém este consumo ainda é muito alto (+/- 950 kcal / kg. de clínquer) o que faz da indústria cimenteira um alto consumidor de energia e uma indústria de alto risco devido à geração de mais de 600 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido, o que exige um controle necessário, mas nem sempre eficiente, da emissão de CO₂ na atmosfera, além de ser ainda um consumidor em alta escala de reservas minerais de calcário e argila. Somente estes três fatores já são suficientes para considerar a produção de cimento um processo com alto dano a natureza, porém este ainda é um produto indispensável e de mais fácil obtenção, para atender as necessidades do homem de moradia e construções em geral.

Segundo descreve Mehta e Monteiro (2008, p. 660),

O concreto de cimento Portland é reconhecido como um material verde (compatível com o meio ambiente) com relação aos outros materiais de construção. No entanto, muito precisa ser feito para reduzir o impacto ambiental da indústria do concreto. O cimento Portland, o principal ligante hidráulico, usado no concreto moderno, é produto de uma indústria não apenas de uso intensivo de energia (4GJ/t de cimento), mas também responsável por grandes emissões de CO₂. A fabricação de uma tonelada de

clinker de cimento Portland lança perto de uma tonelada de CO₂ na atmosfera. Assim, atualmente, a produção anual mundial de cimento de 1,5 bilhão de toneladas (atualizando: 2,8 bilhões de toneladas segundo o SNIC), principalmente de cimento Portland, é responsável por quase 7% das emissões globais de CO₂.

Como ainda não é possível substituir o cimento Portland, apesar de seus danos e riscos, o ideal é encontrar formas de otimizar sua produção e reduzir o seu consumo, mitigando assim o impacto negativo à natureza. Dentro do processo produtivo, as principais evoluções ocorridas são na redução do consumo de energia e no uso de energias alternativas, além do incremento de adições aos cimentos, que só demandam energia para moagem. Outra grande evolução do processo produtivo que também contribui para reduzir o consumo é o aumento da classe de resistência dos cimentos.

A otimização da produção tem sido intensamente investigada no sentido da redução do consumo de energia no processo produtivo, com melhoria na seleção de matérias-primas e eficiência de equipamentos e com o uso de energias alternativas como a queima de pneus velhos e rejeitos industriais nos fornos de cimento, que tem um custo menor que outros combustíveis e contribuem para a eliminação de um lixo poluente.

Na França, no início do novo milênio, durante a epidemia da “vacca louca” as fábricas de cimento foram de grande valia na queima das ossadas dos animais, e neste mesmo país há fabricas de cimento com custo de produção negativo em função do faturamento pela queima de resíduos industriais combustíveis, como os agentes de limpeza de tanques utilizados nas indústrias de perfume.

No Brasil, a principal forma de reduzir o impacto da produção, tem sido através do incremento de adições minerais ao cimento como calcário cru e pozolanas ou ainda resíduos industriais como a escória granulada de alto forno e as cinzas de termo elétricas, que são substâncias potencialmente poluidoras e tem este efeito anulado pelo seu aproveitamento na fabricação de cimento. Com estas adições, que são reativas, o teor de clínquer na composição do cimento pode ser reduzido a até pouco mais de 20%, como é o caso do cimento Portland CPIII, onde a escória granulada de alto forno, de boa reatividade, pode por norma chegar a 70% da composição do cimento e há ainda a presença de filler calcário e gesso, que juntos podem representar cerca de 10% da composição total deste tipo de cimento. Os produtos de adições ao cimento geralmente não sofrem processos de aquecimento, necessitando somente energia de moagem, o que reduz muito a energia de produção, a não ser nos casos de cimentos pozolânicos quando não são produzidos com lavas vulcânicas e sim com argilas calcinadas,

como o xisto e opalas que são ativados, ou seja, passam a ter reatividade pela atividade pozolânica, sob temperaturas de cerca de 850 °C, mesmo assim com um consumo de energia inferior ao da produção de clínquer. Como afirmam Metha e Monteiro (2008, p. 661), “Os cimentos Portland compostos com adições que contem um alto volume de cinzas volantes de usinas termoelétricas, ou de escória granulada de alto-forno da indústria do aço apresentam excelentes exemplos da ecologia industrial, porque oferecem uma solução holística para reduzir o impacto ambiental de duas importantes indústrias”.

No Brasil com uma produção de aço superior a 30 milhões de toneladas/ano, a geração de escória granulada básica de alto forno é superior a 7 milhões de toneladas/ano e é alta também a produção de cinzas volantes no sul do país, o que, segundo Metha e Monteiro (2008, p.661), colocam o Brasil, que foi um dos países pioneiros em adições ao cimento, em desatque no aproveitamento de resíduos industriais, pelo baixo fator clínquer (proporção de clínquer por tonelada de cimento produzido), que é da ordem de 0,6 no país, enquanto que no mundo esta média é de cerca de 0,86.

Outra forma de redução da produção de cimento é a redução do seu consumo na composição do traço do concreto devido ao incremento da qualidade e aumento das propriedades mecânicas do clínquer. Isto já vem ocorrendo desde sua criação com a elevação das classes de resistência, predominando hoje as classes 32,0 MPa e 40,0 MPa e com o incremento do conhecimento da formação e propriedades do clínquer no processo produtivo, através dos estudos de sua microestrutura, a qualidade de produção vem evoluindo constantemente e hoje cimentos do tipo CPV já apresentam desempenhos de resistência aos 28 dias próximos de 60 MPa, superiores às classes normalizadas. Conseqüentemente quanto maior a classe de resistência mecânica do cimento, menor será seu consumo para a mesma resistência do concreto e menor, a necessidade de produção. Dentro desse conceito, é necessário estabelecer limites mínimos para o consumo de cimento suficiente para a preservação da reserva alcalina do concreto, ou seja, cimentos de classe de resistência mais elevadas não devem ser destinados a reduzir drasticamente consumos de concretos de baixa resistência e sim proporcionar a possibilidade de se produzir concretos com maior resistência à compressão, atendendo às evoluções dos projetos com reduções de volumes de concreto nas obras. Este mesmo conceito se aplica aos aditivos químicos redutores de água, vistos a seguir.

Além das adições e melhorias na qualidade e no processo produtivo, outra forma para se reduzir o consumo de cimento é com o uso de aditivos químicos redutores de água, que tem propriedades capazes de reduzir o consumo de cimento a níveis superiores a 30%

comparando-se dois traços de concreto com mesmas características de resistência mecânica e trabalhabilidade, com e sem o uso de aditivos. No Brasil a maioria dos aditivos em uso são os plastificantes e polifuncionais que geralmente proporcionam uma redução no consumo de cimento no traço entre 6 e 15%, o que já é um alto índice, porém como o uso de aditivos está limitado, quase que exclusivamente, aos consumidores de perfil técnico específico, ou seja: concreteiras, grandes canteiros de obra, fabricantes de pré-moldados e indústrias da química da construção, segmentos que no Brasil consomem somente cerca de 20% das cerca de 50.000.000 de toneladas/ano do cimento comercializado no país, esta redução no consumo de cimento em função do uso de aditivos é de somente cerca de 1.000.000 ton./ano, ou seja, aproximadamente 2% da produção nacional. Nos países europeus, onde os segmentos técnicos de consumo representam mais de 60% do mercado e os aditivos são bem utilizados em canteiros de obra, a redução do consumo de cimento é superior a 6% do cimento comercializado. Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 289), em alguns países, não é raro que 70 a 80% de todo concreto produzido contenha um ou mais destes materiais (aditivos).

Além do aspecto ecológico o uso de aditivos redutores de água deve ser estimulado no meio da construção civil, pois podem proporcionar aos concretos e argamassas melhores características de resistências mecânicas e de trabalhabilidade, tornando-os mais adaptáveis aos processos de aplicação. Esta melhoria na trabalhabilidade promove um grande incremento no nível de qualidade do concreto confeccionado em canteiro de obra, devido à melhor homogeneidade das misturas quando processadas com aditivos, o que proporciona também maior regularidade entre os traços do mesmo concreto. Mehta e Monteiro (2008, p. 289) ainda recomendam que os engenheiros que atuam na construção civil deveriam ter algum conhecimento das vantagens e limitações dos aditivos e adições comumente usados.

A redução de consumo de cimento no traço proporciona ainda outros benefícios como uma menor liberação de calor de hidratação o que favorece a elaboração de traços de “concreto massa”, para barragens e também concretos de alto desempenho (CAD) ou de pavimentos, que demandam um alto consumo de cimento e cura rigorosa em função das conseqüências do alto calor de hidratação. A redução de água no traço também favorece a redução de efeitos de retração, considerando concretos de mesmas características e propriedades e sob mesmas condições de aplicação e cura. “O uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes em concretos com a mesma composição faz com que as deformações por retração hidráulica sejam maiores. Entretanto, com a redução da relação água/cimento conseguida com o uso desses aditivos, o efeito é contrário, pois, para uma mesma resistência

desejada, será necessário menos água e, conseqüentemente, haverá menos deformação”. (BROOKS, 2000 apud MARTIN, 2005 p. 662)

Outras características positivas ainda podem se obtidas com os aditivos redutores de água tais como a melhor hidratação do cimento e o retardamento de pega do concreto. Na maior parte dos aditivos redutores de água, o mecanismo de ação provoca uma repulsão eletrostática entre os grãos de cimento e a água, gerando uma melhor dispersão destes grãos na pasta do concreto, evitando a formação de grumos e promovendo uma hidratação mais homogênea e efetiva em toda superfície específica do cimento, resultando em um concreto de maior regularidade e possivelmente maior resistência devido à redução das falhas de hidratação. Muitos aditivos redutores de água apresentam também um efeito retardador da pega do cimento, o que possibilita a concretagem de estruturas de grande volume como as barragens, resultando em melhores condições de trabalho sem muitos inconvenientes em relação ao tempo de pega do cimento e ao calor de hidratação do concreto, e em um uso mais comum, permite o transporte em caminhões betoneira até as obras, o que viabiliza a operação das empresas fornecedoras de concreto usinado, conhecidas como “concreteiras”.

Por muitos anos os aditivos predominantes em concretos dosados em central foram os plastificantes compostos de várias bases distintas como lignosulfonatos de cálcio ou sódio, gluconato de sódio, melassa, licor negro (resíduo da fabricação de papel) e outras bases menos usuais. A partir da década de 80 os aditivos superplastificantes, à base de polinaftaleno sulfonato ou melamina, começaram a ser introduzidos no Brasil para o uso em concretos dosados em central, e com isto, foi possível começar a produzir concretos com abatimentos superiores a 20 cm possibilitando um avanço nos processos construtivos, com melhora na bombeabilidade do concreto e facilitando a sua instalação, mesmo em estruturas com alta densidade de armadura, com reduzido índice de vibração, evitando riscos de segregação e eventuais danos às armaduras, quando “pisoteadas” durante a aplicação do concreto. O único elemento limitador do uso de superplastificantes, em concretos dosados em central, é o tempo de manutenção da plasticidade, por isto tem que ser dosados somente no momento da aplicação, sobre um concreto já dosado com aditivos plastificantes que permitem o transporte à obra. A partir desta prática, foi desenvolvido o aditivo polifuncional, que vem a ser uma mescla dos compostos químicos dos plastificantes e dos superplastificantes, com propriedades muito diferentes de ambos, atingindo níveis de plasticidade próximos aos dos superplastificantes, associado a um bom tempo de manutenção desta plasticidade. Os polifuncionais apresentam limites de dosagem bem superiores aos aditivos plastificantes, que

tem limites determinados pelos longos retardamentos e/ou possíveis incorporações de ar excessivas, quando utilizados acima de certas dosagens.

O aditivo polifuncional é um produto de cerca de 30 anos, mas a ABNT ainda não tem uma classificação específica para o produto, a ABNT, EB 1763 distingue os aditivos redutores de água somente entre plastificantes e superplastificantes, ou seja, que possibilitam a redução da quantidade de água em no mínimo 6 e 12% respectivamente. Neste trabalho, como nosso foco é traçar um comparativo entre os aditivos plastificantes e os polifuncionais, sendo assim, vamos considerar uma segmentação entre os superplastificantes, separando-os em superplastificantes, polifuncionais e fluidificantes, que são três produtos que segundo a norma possibilitam uma redução da água de amassamento superior a 12%, porém apresentam propriedades bem distintas entre si.

Hoje em dia os aditivos superplastificantes são consumidos principalmente pelas empresas de pré-moldados onde a ausência de retardamento de pega é uma vantagem. Os fluidificantes ou como também são chamados os aditivos de última geração, que são os produtos com base em policarboxilatos, poliácridatos e copolímeros à base de polietileno, possibilitam a execução de concretos de alto desempenho e concretos auto-nivelantes de usos ainda muito limitados no mercado brasileiro, mas já presente nos concretos especiais de concreteiras e fabricantes de pré-moldados de alto desempenho estrutural e de pisos industrializados. Neste trabalho os aditivos superplastificantes e fluidificantes, serão abordados apenas teoricamente, pois o foco principal do trabalho é avaliar o desempenho dos dois principais tipos de aditivos utilizados em centrais de concreto, os aditivos plastificantes e os polifuncionais e apresentar um estudo prático com todos os benefícios e riscos no uso de cada um destes aditivos para melhor viabilizar seu uso em canteiros de obra.

Foram avaliadas as propriedades do aditivo plastificante e do aditivo polifuncional, considerando: aumento da plasticidade, densidade, incorporação de ar, tempo de trabalhabilidade, efeitos de retardamento, comportamento da resistência e redução do consumo de cimento em função do uso de aditivos.

Para o concreto fresco foram avaliados os seguintes itens: consistência inicial, consistência 45 minutos após a adição da água, ar incorporado e densidade. Os testes de consistência foram feitos pelo método do cone de Abrams, sendo que o teste após 45 minutos, de introdução da água na mistura, teve como objetivo avaliar a influencia das dosagens de aditivos na manutenção da trabalhabilidade do concreto em um tempo relativamente adequado

ao transporte e aplicação do concreto dentro de uma obra, visto que este trabalho tem como um dos objetivos, estimular, o uso dos aditivos nos canteiros de obra. A manutenção de um bom nível de trabalhabilidade é importante para permitir que o concreto seja aplicado com uma perda mínima de homogeneidade conforme preconiza a norma ASTM C 12593 que define a trabalhabilidade como “propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém-misturado, com uma perda mínima de homogeneidade”. Não testamos aditivos de características retardadoras, pois o cimento CPIII 40 não é um cimento de pega rápida, porém foram avaliados efeitos de retardamento provocados pelas diversas dosagens dos aditivos testados para se definir os limites de uso em função de não promover um retardamento excessivo. Para avaliação do teor de ar incorporado e densidade do concreto adensado foi utilizado o aparelho de ar incorporado normalizado. Além dos testes de avaliação citados, foram também observados no concreto os efeitos sobre a segregação.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de mostrar os benefícios e riscos no uso dos aditivos plastificantes e polifuncionais no concreto e apresentar-los em uma linguagem compatível para engenheiros civis e tecnologistas, demonstrando que não é necessário que um consumidor tenha um perfil técnico específico para fazer uso destes tipos de produtos, pois sabendo utilizar de maneira correta, os aditivos redutores de água podem trazer grandes benefícios tanto para uma central dosadora de concreto ou uma indústria de pré-moldados onde já são amplamente utilizados, como para os menores canteiros de obra, onde seu uso ainda é muito reduzido, principalmente por falta de domínio de uso dos produtos pelos engenheiros de obra.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados com este trabalho são:

1. Apresentar um estudo avaliativo do comportamento dos dois tipos de aditivos (plastificante e polifuncional) em diversas dosagens, que pode ser útil para orientar na escolha do tipo de aditivo e da dosagem recomendada para cada condição de aplicação do concreto.
2. Estimular o uso de aditivos redutores de água, plastificantes e polifuncionais, hoje

muito restrito às empresas de concreto usinado e fabricantes de pré-moldados, nos canteiros de obra, em função dos benefícios técnicos, econômicos e ecológicos proporcionados pelo produto, demonstrando que os aditivos são produtos facilmente adaptáveis aos traços da obra e devem ser considerados o quinto componente do concreto de boa qualidade, junto com o cimento, a areia, a brita e a água.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O uso de aditivos redutores de água ainda é muito restrito a alguns segmentos mais especializados em concreto da construção civil: os fabricantes de pré-moldados e os produtores de concreto usinado, concreteiras e grandes empreiteiras. Por proporcionar uma redução no custo da obra, uma melhoria significativa na qualidade e trazer um benefício ecológico de grande impacto com a redução do consumo de cimento, os aditivos redutores de água devem ter seu uso estimulado junto aos engenheiros nos canteiros de obra em geral, que por uma questão de costume, desconfianças e principalmente falta de informação tem se mantido afastados de todo processo de evolução do uso de aditivos na construção civil. Como este segmento da construção civil de produção de concreto na obra ainda representa a maior parte de consumo de cimento no país, todas as ações voltadas a estimular e favorecer o acesso destes consumidores aos aditivos redutores de água resultará em melhoria da qualidade do concreto produzido no país e também a redução da produção de cimento, como benefício ecológico.

Além de apresentar mais um estudo sobre o comportamento dos aditivos como uma ferramenta simples para o construtor, que pode proporcionar benefícios técnicos e financeiros, outra razão deste trabalho é ampliar as informações disponíveis sobre o comportamento dos aditivos polifuncionais, que já ocupam um lugar de destaque no mercado brasileiro, porém existem poucos trabalhos técnicos sobre o assunto.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica que segue será apresentado um pequeno histórico do uso de aditivos e as principais definições sobre os aditivos em geral com destaque para os aditivos redutores de água, que é a classe à qual pertencem os plastificantes e polifuncionais, objetos desta dissertação. Na literatura técnica há muito pouca informação sobre a atuação dos aditivos polifuncionais, assim como não há ainda nenhuma normalização específica, tanto no

Brasil como em muitos países, sobre este tipo específico de aditivo. Com respeito aos redutores de água, as normas e a literatura técnica encontrada segmentam esta classe de aditivos somente entre plastificantes e superplastificantes, sem fazer referência aos polifuncionais e aos fluidificantes que apresentam desempenhos de plasticidade que poderiam ser classificadas como superplastificantes, porém com outras características bem distintas principalmente com respeito aos tempos de manutenção da trabalhabilidade no caso dos polifuncionais e também alguns tipos de fluidificantes com base em derivados de fósforo. Os fluidificantes que são os aditivos de última geração com maior poder de redução de água que os superplastificantes tradicionais, são fabricados com bases químicas mais complexas e já reúnem um bom número de trabalhos técnicos sobre seu desempenho, porém sobre os polifuncionais, que utilizam as mesmas bases químicas que os plastificantes e superplastificantes, há muito pouca informação disponível, exceto pelos catálogos técnicos dos fabricantes do produto.

Para melhor compreender os mecanismos de reação dos aditivos serão apresentados também, na revisão bibliográfica, o comportamento das principais bases químicas utilizadas nos plastificantes e polifuncionais,

A pesquisa bibliográfica se concentrou em publicações técnicas específicas sobre concreto e catálogos de fabricantes de aditivos e suas bases químicas.

2 ADITIVOS

Os aditivos de um modo geral são produtos capazes de modificar o comportamento de concretos e argamassas e já começaram a ser utilizados mesmo antes da descoberta do cimento Portland, com outros tipos de aglomerantes. O uso de aditivos sempre foi com o objetivo de ampliar as propriedades dos aglomerantes, adequando concretos e argamassas às mais diversas exigências de projeto e necessidades de canteiro de obras.

2.1 HISTÓRICO

O uso de produtos aglomerantes de pedras e areia para a geração de concretos e argamassas é muito antigo e o uso de elementos para alterar as características destes aglomerantes, já é conhecido desde o Império Romano, quando, segundo a (ABESC, 2000 p. 25), já se usavam “certas substâncias que hoje chamaríamos de aditivos: Albumina (sangue e clara de ovos) e Álcalis (cal); para plastificar e retardar a pega” dos concretos e argamassas feitos à base de cal e pozolanas. Segundo a mesma publicação, no Brasil muitas obras foram feitas com aditivação de óleo de baleia na argamassa de assentamento para dar maior plasticidade, isso antes da criação do cimento Portland. ”A clara de ovo foi também utilizada na construção da muralha da China” MARTIN (2005, 2V, vol. 1, p.381).

O cimento Portland, que foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, começou a ser aditivado a partir de 1873, com gesso cru ou cloreto de cálcio, para regular o tempo de pega e no final do século XIX já se usavam certos tipos de graxas, que são substâncias tenso-ativas como plastificante de hidrofugantes de argamassas e concretos.

A partir de 1910 começou a produção industrial dos aditivos formulados com características plastificantes, impermeabilizantes, aceleradores e retardadores e hoje após muita evolução da química da construção, a gama de aditivos existentes, para as mais diversas aplicações, é muito ampla, proporcionando aos concretos e argamassas produzidos com

cimento Portland propriedades muito superiores às obtidas somente com o uso do cimento puro, adequando esses materiais a soluções que promoveram grande avanço na construção civil.

Os aditivos redutores de água tiveram uma evolução lenta do início do século passado até a década de 70, quando foram desenvolvidos os aditivos superplastificantes, elevando a redução de água que era de cerca de 6 a 8% com os aditivos plastificantes clássicos, para níveis superiores a 12%, possibilitando a execução de concretos com abatimento de tronco de cone (slump) de cerca de 200 mm. Esse tipo de aditivo foi introduzido no Brasil, para uso em concreto usinado, na década de 80 e possibilitou a execução de obras como as de contenção de encostas no Parque da Catacumba no bairro da Lagoa no Rio de Janeiro, onde foi executado o bombeamento de concreto, por mais de 100 metros de altura, exigindo assim um concreto com alta plasticidade.

No final dos anos 80 foram desenvolvidos os aditivos a base de policarboxilatos, e a partir dessa época foram criados os poliacrilatos, fosfanatos etoxilados e outras bases de igual desempenho, que possibilitam a redução de água em até 40% e particularmente no caso do fosfanato etoxilado, que além de fluidificante tem a propriedade de manter a essa fluidez por longo tempo, foi possível efetuar concretagens no Eurotúnel do Canal da Mancha, com mais de 2,0 km de tubulação.

No Brasil o uso de aditivos plastificantes e de polifuncionais, que são tratados neste trabalho, está mais concentrado nos produtores de concreto usinado como as empresas de concretagem e as empreiteiras que atuam em grandes canteiros de obra como nas construções de barragens e rodovias. Ainda é pequeno o uso desses produtos pelos pequenos e médios construtores em seus canteiros de obras.

2.2 DEFINIÇÕES

Para melhor se definir os aditivos plastificantes e os polifuncionais que são os objetos deste trabalho, primeiramente vamos considerar os demais tipos de aditivos para concreto e principalmente os demais redutores de água, que são os superplastificantes e os fluidificantes.

Em se tratando de concreto o termo aditivo corresponde a diversos tipos de produtos, que alteram as características originais de um traço. As citações que seguem definem os aditivos na sua forma mais ampla e nos próximos parágrafos serão tratados especificamente os redutores de água. Segundo Neville (1997, p. 251), “Um aditivo pode ser definido como um

produto químico que exceto em casos especiais, é adicionado à mistura de concreto em teores não maiores do que 5% em relação à massa de cimento durante a mistura ou durante uma mistura complementar antes do lançamento do concreto, com a finalidade de se obterem modificações específicas, ou modificações das propriedades normais do cimento.”

Essa definição de aditivo abrange todos os tipos de aditivos para argamassas e concretos, assim como a ABNT que tem uma definição muito sucinta a respeito dos aditivos: “Produtos que adicionados em pequena quantidade ao concreto de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.” ABNT, EB 1763

Da mesma forma o manual da ABESC, Associação Brasileira de Serviços de Concretagem, define: “Os aditivos são produtos adicionados em pequena quantidade, antes ou durante a dosagem dos materiais componentes do concreto: com a finalidade de melhorar as propriedades do concreto fresco ou endurecido.” (ABESC – Manual Técnico – p. 25)

Todas as citações acima afirmam a influência positiva dos aditivos nas propriedades do concreto, porém nenhuma delas expõe de forma ampla todos os benefícios dos aditivos. Os diversos tipos de aditivos hoje existentes permitem que se transforme uma única matriz do concreto em vários produtos de características de aplicação e propriedades muito diferentes entre si. Tomando-se como base uma matriz de concreto, com o uso de aditivos pode-se fazer concretos de pega mais lenta ou mais rápida, com maior plasticidade ou com maior coesão, com maior impermeabilidade ou maior permeabilidade, maiores e menores módulos de elasticidade, mais leves ou mais densos e com maiores e menores resistências. Pode-se afirmar que os aditivos ampliaram enormemente o campo de ação do cimento Portland e outros tipos de cimento, criando oportunidades de avanço nos processos construtivos tão importantes como a criação do próprio cimento Portland.

BARON e AITICIN em seu trabalho, “Os aditivos normalizados para concreto”, apresentam uma definição mais abrangente e mais adequada aos benefícios que os aditivos trazem aos usuários:

Os aditivos fornecem ao formulador de concreto uma extensa gama de várias possibilidades de facilitar a aplicação dos concretos, de adaptar sua produção aos tempos frios ou aos tempos quentes, reduzir os custos de aplicação, melhorar as propriedades dos concretos endurecidos e mesmo proporcionar propriedades novas. São eles, por exemplo, que tornaram possível o conceito atual de altas performances. Eles contribuem para fazer da formulação uma ocupação onde a habilidade e a capacidade de responder necessidades dos

responsáveis pela obra e dos empreendedores pode ser objeto de um progresso contínuo. AITICIN; BARÓN (1996, p. 87)

2.3 ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA

As principais definições sobre os aditivos redutores de água, em normas e publicações, somente os diferencia entre plastificantes e superplastificantes, inclusive pela norma brasileira que os classifica de acordo com o nível de redução de água.

Para Mehta e Monteiro (2008, p. 292), “Um aditivo redutor de água é aquele que reduz o consumo de água necessário na mistura para produzir um concreto com uma determinada consistência.” e para Adam Neville (1997, p. 260), de uma forma mais ampla,

A função dos redutores de água é reduzir o teor de água da mistura, geralmente entre 5% e 10%. às vezes até 15%, em concretos com elevada trabalhabilidade. Assim, a finalidade de um redutor de água em um concreto é a redução da relação água/cimento, mantendo a trabalhabilidade desejada ou, como alternativa, aumentar a trabalhabilidade com uma mesma relação água/cimento.

Nas últimas décadas dois novos tipos de aditivos foram introduzidos no mercado, os polifuncionais e os fluidificantes, com características de redução de água que atendem a especificação dos superplastificantes, porém com propriedades diferenciadas adequando mais ainda os aditivos a determinadas aplicações.

A introdução desses novos tipos de aditivos: os fluidificantes, à base de policarboxilatos, poliacrilatos, fosfonatos e copolímeros de polietileno, com elevadas reduções de água de até 40% e os polifuncionais que alcançam níveis de redução de água equivalentes aos superplastificantes, mas com maior tempo de manutenção da trabalhabilidade, trazem uma nova segmentação aos aditivos redutores de água, que ainda não está normalizada.

Sendo assim os aditivos redutores de água podem ser classificados em: plastificantes, polifuncionais, superplastificantes e fluidificantes, que serão melhor definidos nos próximos itens desse trabalho.

2.3.1 Aditivos Plastificantes

A Norma ABNT define aditivo plastificante da seguinte forma: “Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que

possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência”, (ABNT, EB 1763, p. 2).

Para a ABESC os aditivos plastificantes são definidos como:

Produtos cuja função principal é reduzir a água de amassamento para a mesma trabalhabilidade, além de melhorar a coesão, a homogeneidade e diminuir a retração. Basicamente diminuem a tensão superficial da água, com a conseqüente dispersão da mesma, proporcionando um melhor aproveitamento do gel do cimento (ABESC, Manual Técnico, p. 26).

Essas propriedades são as mesmas dos demais aditivos redutores de água, diferenciando-se entre si pelo nível de redução possível. Da mesma forma Aiticin e Baron definem de uma forma um pouco mais abrangente da ação dos aditivos plastificantes, que também se aplica aos demais redutores de água:

Os plastificantes redutores de água agem dispersando (defloculando) os grãos de cimento, assim como os outros finos e ultrafinos; à mesma dosagem, seu efeito depende da reatividade do cimento, dos íons em solução na água intersticial do concreto, do tempo de mistura e do momento mais ou menos tardio de sua introdução. (AITICIN; BARON (1996, p. 96))

Muitas bases químicas podem ser utilizadas como aditivos plastificantes sendo que as mais utilizadas são os lignosulfonatos e gluconatos, “Os dois principais grupos de aditivos redutores de água são: a) ácidos lignosulfônicos e seus sais e b) ácidos carboxílicos hidroxilados e seus sais.” NEVILLE (1997, p. 260). Da mesma forma Metha e Monteiro definem as bases dos plastificantes: “Os surfactantes geralmente utilizados como aditivos plastificantes são sais, modificações e derivados de ácidos lignosulfônicos, ácidos carboxílicos hidroxilados e polissacarídeos ou qualquer combinação dos três, com ou sem constituintes secundários.” MEHTA; MONTEIRO (2008, p. 290)

No Brasil o uso do gluconato não é tão alto devido ao custo elevado do produto e a aquisição dificultada por ser importador. As bases químicas de maior uso no Brasil são os lignosulfonatos de cálcio e sódio que tem produção nacional.

Além dos lignosulfonatos e gluconatos, citados, outros produtos como o açúcar e a melassa também são utilizados como compostos dos aditivos plastificantes assim como o “licor negro” que é o resíduo líquido da produção de papel que por ter um alto teor de lignina também apresenta propriedades plastificantes, tendo como limitante o fato de gerar uma alta incorporação de ar ao concreto e de não ser um produto totalmente controlado, como os

lignosulfonatos que tem a mesma origem, porém são produzidos com controle técnico e regularidade.

Nas definições encontradas sobre os plastificantes e demais aditivos redutores de água, o foco entre as propriedades dos aditivos é forte sobre as propriedades de redução de água e cimento, porém mais duas propriedades devem ser ressaltadas, o aumento do tempo de trabalhabilidade e a capacidade dos aditivos de promover melhores condições de hidratação dos grãos de cimento, gerando concretos e argamassas de maior regularidade e possivelmente de maior resistência mecânica.

O aumento do tempo de trabalhabilidade é em função da maior dispersão dos grãos que ocorre enquanto perduram as forças de repulsão eletrostática provocadas pelos aditivos na ligação da água com os compostos do cimento e esta mesma força eletrostática é responsável pela eliminação da formação de grumos de cimento contrapondo-se às forças naturais de atração entre as partículas possibilitando assim um melhor envolvimento da água sobre os grãos gerando melhor nucleação e, conseqüentemente, um melhor nível de hidratação do cimento.

As transformações químicas ocorridas com a introdução de aditivos no concreto precisam ser controladas em função dos limites de dosagem. As mesmas bases que promovem um maior tempo de trabalhabilidade e maior plasticidade podem também gerar uma maior incorporação de ar, com efeitos negativos sobre as resistências mecânicas dos concretos e também tempos muito longos de retardamento da pega do cimento, com riscos de até mesmo inibir sua hidratação. As limitações de dosagem, citadas acima, podem ser consideradas uma das melhores formas de diferenciar os aditivos redutores de água entre plastificantes, polifuncionais, superplastificantes e fluidificantes.

Os plastificantes que são compostos com base em lignosulfonatos, gluconatos ou outros compostos de base açucarada assim como o próprio açúcar e a melassa, tem sua dosagem limitada principalmente pela ação de retardamento promovida pelo açúcar sobre o cimento, que dependendo do nível alcançado pode inclusive inibir a pega do cimento.

Outra característica importante, neste caso, mais limitada aos lignosulfonatos, que são amplamente utilizados como base de aditivos plastificantes, é o incremento da presença de ar incorporado no concreto, que pode ser responsável por perdas importantes de resistência mecânica. De acordo com Neville (1997, p. 552) “a perda média de resistência à compressão é de 5,5% para cada unidade de porcentagem de ar presente”. O nível de dosagem de certos

aditivos plastificantes, principalmente à base de lignosulfonatos, pode ser limitado em função do incremento da incorporação de ar. Alguns aditivos, como o aditivo plastificante utilizado neste trabalho, são elaborados com elementos desaerantes capazes de controlar a geração de ar incorporado, mas de qualquer forma, a dosagem destes aditivos é limitada em função do retardamento da pega promovido pelo lignosulfonato. Os aditivos a base de gluconato de sódio, geralmente promovem pouca incorporação de ar, porém os efeitos de retardamento de pega do gluconato de sódio são ainda mais acentuados que no lignosulfonato, sendo um forte limitador da dosagem para esse tipo de aditivo.

É com base nestas limitações que as dosagens de aditivos plastificantes são monitoradas para que se obtenha do produto o melhor nível de benefícios sem riscos de perda de resistência ou retardamento excessivo e prejudicial à qualidade do concreto.

2.3.2 Aditivos Superplastificantes

Diferentemente dos aditivos plastificantes, a maioria dos aditivos superplastificantes é constituída de bases químicas que apresentam menor influência sobre o tempo de pega do cimento e também sobre o incremento do teor de ar incorporado no concreto. Essas propriedades permitem dosagens em quantidades bem superiores às utilizadas com os aditivos plastificantes, promovendo uma ação defloculante muito mais intensa, com um aumento significativo da plasticidade. Isso permite a obtenção de concretos com abatimentos elevados, da ordem de 200 mm e boa compacidade, que exigem pouca ação de vibração, para aplicações em formas com alta densidade de armadura ou concretos pré-moldados onde se exige um alto nível de acabamento superficial. O fato de aumentar a plasticidade do concreto de forma intensa permite que se mantendo o abatimento inicial, se reduza de forma elevada o consumo de cimento ou ainda uma terceira opção que é associar um leve incremento na plasticidade a uma redução média no consumo de cimento. “A primeira geração de superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência, são compostos de sais sulfonados de melamina ou condensados de naftaleno formaldeído.” MEHTA; MONTEIRO (2008, p. 292).

As bases dos aditivos plastificantes como os lignosulfonatos e os gluconatos tem propriedades dispersantes até superiores aos superplastificantes, porém as limitações de dosagem dos plastificantes, pelos efeitos de retardamento e incorporação de ar, tornam o desempenho dos superplastificantes superiores pela possibilidade de se efetuar adições mais elevadas, até que se alcance os limites de riscos de dosagem, e obter resultados mais

expressivos. Para se viabilizar o seu uso em concreteiras, onde há tempos de transporte e lançamento superiores a uma hora, os superplastificantes tem seu uso associado a um plastificante, e normalmente os superplastificantes são adicionados ao concreto somente após a chegada do caminhão betoneira à obra. Esta baixa interferência no tempo de pega, que para o uso em concreteiras é um limitador, é uma grande vantagem em um canteiro de pré-moldados, possibilitando a desforma e reaproveitamento das formas com maior velocidade.

As principais definições na literatura técnica ainda não diferenciam os superplastificantes dos aditivos polifuncionais e dos fluidificantes, desta forma as citações abaixo consagram os três tipos de aditivos.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas,

superplastificante é um produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência. (ABNT, EB 1763, p.2)

Todos os três tipos citados: superplastificante, polifuncional e fluidificante, atendem a este pré-requisito da definição da norma da ABNT, porém apresentam outras características bastante distintas entre si, como já foi comentado nesse trabalho, sendo os fluidificantes aditivos com capacidade de redução de água normalmente superior aos 30% e os polifuncionais aditivos com capacidade de redução de água que atendem ao limite mínimo de 12%, mas com tempos de manutenção de trabalhabilidade mais longos que os aditivos superplastificantes.

A ação dos superplastificantes é mais intensas que a dos plastificantes, porem com o mesmo principio de ação conforme descrevem Aiticin e Baron, “Os superplastificantes são dispersantes que funcionam sob o mesmo princípio que os plastificantes redutores de água, mas de uma maneira mais eficaz, visto que é possível deflocular completamente os grãos”. AITICIN E BARON (1996, p. 103)

“A primeira geração de superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência, são compostos de sais sulfonados de melamina ou condensados de naftaleno formaldeído” MEHTA; MONTEIRO (2008, p. 292). Estas bases químicas associadas às bases dos aditivos plastificantes, lignosulfonatos e gluconatos, deram origem aos aditivos polifuncionais.

2.3.3 Aditivos. Polifuncionais

Os aditivos polifuncionais foram desenvolvidos a partir da associação de uso de aditivos superplastificantes em caminhões betoneiras, que tem que ser dosados no momento da aplicação do concreto, com os aditivos plastificantes responsáveis pela manutenção da plasticidade do concreto entre a dosagem na central de concreto e a chegada à obra para adição do superplastificante. Dessa forma se obtém um concreto com alta plasticidade porem com o tempo de boa trabalhabilidade muito reduzido, sendo assim é necessário que seja feita a dosagem do aditivo superplastificante na obra, aumentando os riscos da operação de concretagem. A concepção do aditivo polifuncional foi a partir da mistura das bases químicas dos aditivos plastificantes e superplastificantes com o objetivo de obter um aditivo com alta plasticidade e um bom tempo de manutenção da trabalhabilidade, para atender a demanda de um concreto com maior plasticidade na obra, mas que pudesse ser dosado a partir da central de concreto, sem a necessidade de executar dosagens depois da chegada do caminhão betoneira ao canteiro de obra.

O principio de formulação do aditivo foi a mistura pura e simples dos aditivos plastificantes e superplastificantes e o resultado obtido foi bastante satisfatório, principalmente porque, como o polinaftaleno sulfonato proporciona plasticidade mas é menos retardador que os lignosulfonatos e também esta mescla tem baixo impacto na incorporação de ar, isso possibilitou que se utilizasse dosagens mais elevadas ampliando os efeitos benéficos do aditivo tanto na plasticidade quanto no tempo em aberto, sem riscos de um retardamento excessivo.

Em uma explicação sobre a influência do tempo de introdução do aditivo superplastificante no concreto, Aiticin e Baron explicam de maneira indireta a vantagem de um aditivo como o polifuncional, que é uma mescla de plastificantes e superplastificantes:

Há grande interesse em adicionar o superplastificante o mais tarde possível durante a mistura do concreto. Desta forma é dado um tempo ao sulfato e cálcio para formar uma casca de etringita que bloqueará temporariamente a hidratação do cimento Portland antes que o aditivo seja introduzido. As moléculas do superplastificante não entram em competição com o sulfato de cálcio para reagir com o C_3A ; elas restam disponíveis para dispersar as partículas de cimento e aumentar desta forma os efeitos do superplastificante sobre a consistência do concreto. Uma prática da universidade de Sherbrooke, consiste em incorporar no concreto uma pequena quantidade de retardador (gluconato de sódio) no momento da mistura com toda quantidade de superplastificante necessária. Efetivamente, as moléculas (curtas) do retardador reagem mais rápido sobre o C_3A que as moléculas (mais grossas)

de superplastificantes, assim menos moléculas de superplastificantes reagem com o C₃A. AITICIN; BARON (1996, p. 119).

No caso da mistura de lignosulfonato e polinaftaleno sulfonato, que é a base mais comum nos aditivos polifuncionais, ocorre o mesmo fenômeno.

2.3.4 Aditivos Fluidificantes

Essa nova geração de aditivos, com capacidade tão elevada de redução de água proporcionou um salto significativo em relação aos desempenhos dos aditivos superplastificantes normais que se definem em aditivos com capacidade de redução de água acima de 12%. A partir da introdução dos aditivos fluidificantes tornou-se possível a criação de concretos autonivelantes, com grande capacidade de escoamento, reduzindo enormemente a necessidade de mão de obra, tanto na aplicação quanto no acabamento, mesmo em concretagens com alta densidade de armadura e ainda foi possível o desenvolvimento mais amplo dos concretos de alto desempenho que, por contarem, em muitos casos, com a adição de microsilica ou metacaulim, precisam de aditivos com alto poder de dispersão para alcance de resistências a compressão axial da ordem de 100 MPa.

Na literatura técnica ainda não há muita distinção entre superplastificantes e fluidificantes, porém a diferença de bases químicas entre os produtos é muito grande, sendo que os superplastificantes são compostos de melamina sulfonada ou polinaftaleno sulfonato que são produtos desenvolvidos para outros fins e se adaptaram aos aditivos redutores de água, enquanto os fluidificantes são polímeros desenvolvidos especificamente para a produção de aditivo, conforme explicam Aiticin e Baron:

Os superplastificantes utilizados para fluidificar os concretos ou diminuir sua relação a/c não são mais do que redutores de água muito mais poderosos que os redutores de água normais. São, em geral, produtos a base de moléculas de síntese especialmente fabricadas para os concretos, onde os efeitos secundários, idênticos aos dos redutores de água, não começam a se manifestar até que a dosagem seja realmente muito mais elevada. Utilizando-se os superplastificantes (fluidificantes) em dosagens mais elevadas que os redutores de água habituais, pode-se ou fluidificar os concretos sem que haja riscos de segregação, incorporação de ar exagerada ou de retardamentos de pega inoportunos, ou ao contrário diminuir a quantidade de água de mistura necessária para obter um abatimento pré-determinado, ou seja ainda diminuir em parte a quantidade de água de mistura e o fator a/c obtendo ainda um concreto com grande fluidez. Tudo é uma simples questão de dosagem. É desta forma que se pode fabricar concretos com altas performances e baixa relação a/c e, todavia fluidos. AITICIN; BARON (1996, p 128)

Na definição acima os superplastificantes citados são os ditos alto redutores de água ou fluidificantes a base de polímeros de síntese de alto peso molecular, com desempenho muito superiores aos dos superplastificantes tradicionais à base de polinaftaleno sulfonato de sódio ou de cálcio e a melamina sulfonada.

As bases químicas utilizadas nos aditivos superplastificantes clássicos alcançam reduções máximas de água limitadas entre 15% e 20%. O desenvolvimento dos policarboxilatos, poliacrilatos, e outros polímeros de síntese de alto peso molecular permitiu que as reduções de água tenham alcançado níveis de até 40% em relação ao traço original.

3. MATÉRIAS PRIMAS DOS ADITIVOS E MECANISMOS DE AÇÃO

Neste capítulo, serão enfocados os açúcares, os lignosulfonatos, o gluconato de sódio e o polinaftaleno sulfonato de sódio, que são as bases químicas mais usuais na produção de aditivos plastificantes e polifuncionais. Outras bases químicas tem também efeitos redutores de água no concreto tais como a melamina, que devido ao custo elevado é pouco empregada nos polifuncionais em substituição ao polinaftaleno sulfonato, ou ainda o ácido cítrico ou o bórax e outras bases, que são pouco utilizados e não serão tratadas neste trabalho. Complementando as matérias primas, serão apresentados os preservadores e anti-espumantes.

O mecanismo de ação dos aditivos redutores de água baseia-se no principio de promover uma maior dispersão dos grãos de cimento através da redução da tensão superficial da água de amassamento do concreto, ou seja, reduzindo a força de coesão entre suas moléculas. A presença desta força de coesão entre as moléculas da água impede que ela penetre com facilidade por entre os grãos de cimento que por sua vez devido a sua alta finura, tendem a se aglomerar em função das forças de atração de Van der Waals, ou seja, minerais extremamente moídos tem em suas arestas cargas positivas e negativas que promovem uma forte atração entre si formando grumos.

Os aditivos redutores de água são compostos formados por moléculas de forte carga negativa e devido a isso, os dois pólos existentes possuem cargas negativas. Esse tipo de molécula é chamado de bipolar negativa, ficando a carga positiva no centro da molécula, sem capacidade de combinação com qualquer outro elemento, pois as bordas da molécula estão ocupadas pelas fortes cargas negativas. Ao contato com o grão de cimento uma das extremidades polares negativas do aditivo, é atraída pelas cargas positivas do cimento e a outra extremidade negativa fica exposta formando uma cadeia polar negativa em volta do grão, o que gera uma maior repulsão entre os grãos, por todos estarem envolvidos por essa forte carga negativa.

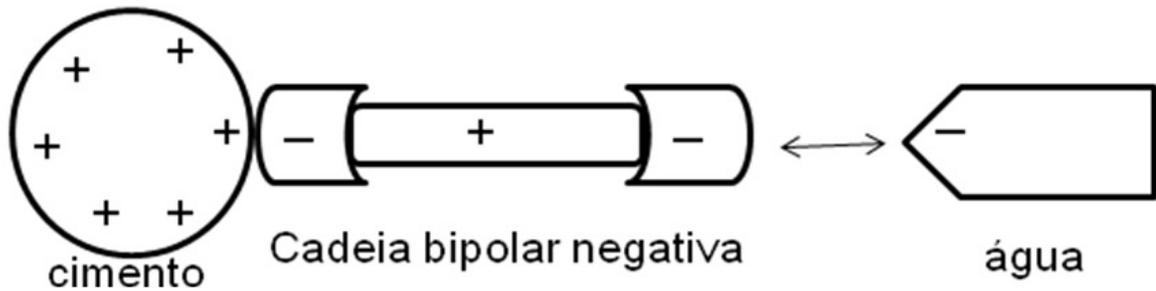


Figura 3.1: Representação da ação do aditivo interagindo com o cimento e a água.

Ao solubilizar o aditivo na água, esta teve a sua tensão superficial reduzida e passou a ter predominância de cargas negativas. Em função disso, a cadeia de carga negativa formada em volta do grão, promove a repulsão do cimento em relação à água, como pode ser observado nas Figuras 3.1 e 3.2, que representam o sistema aditivado.

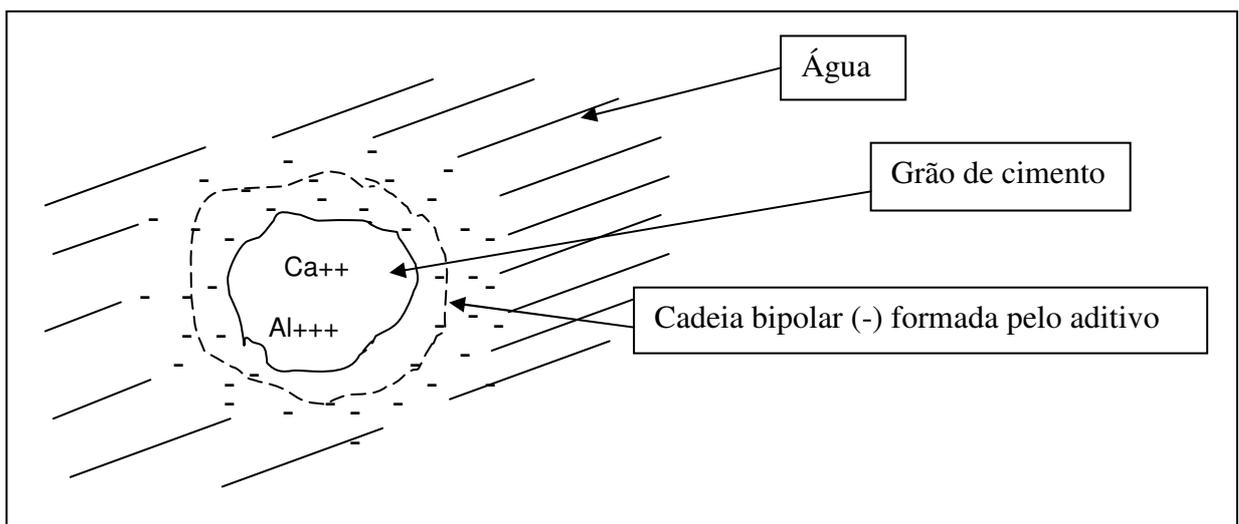


Figura 3.2: Representação da cadeia bipolar envolvendo o grão de cimento.

Desde o início da reação as cargas positivas do cimento passam a combinar quimicamente com as cargas negativas do aditivo e enquanto houver predominância de cargas negativas aderidas às paredes dos grãos de cimento haverá repulsão entre essas partículas e também entre esses grãos e a água. Essas ações de repulsão vão promover uma maior dispersão entre o cimento, agregados e a água, o que aumenta a plasticidade da mistura e evitam a formação de grumos com um melhor envolvimento da água ao redor dos grãos de cimento, resultando em um melhor grau de hidratação. Quando as reações de combinação destas cargas negativas do aditivo com as cargas positivas do cimento são esgotadas, termina o efeito dispersante do aditivo e inicia o processo de hidratação. A presença de elementos tais como os açúcares, fósforo e outros, retardam o tempo dessas combinações e são utilizados na

composição do aditivo quando se deseja um efeito retardador mais intenso, além do normalmente existente nos compostos básicos como os lignosulfonatos, gluconatos e polinaftalenos sulfonatos.

Na literatura técnica encontram-se outras definições para o tema, conforme as citações que se seguem, todas mostrando que o efeito dos aditivos sobre a tensão superficial da água é devido à presença de elementos surfactantes na sua composição, que além de promoverem melhor hidratação dos grãos e redução da quantidade de água no traço ainda tem efeitos sobre o tempo de manutenção da plasticidade e retardamento de pega do concreto.

Adam Neville, através de uma referência à Adams, descreve como os aditivos redutores de água interferem nas reações do cimento:

Os componentes ativos principais dos aditivos são agentes tenso-ativos. São substâncias que se concentram na interface entre duas fases não miscíveis alterando as forças físico-químicas atuantes nesta interface. Estas substâncias são adsorvidas nas partículas de cimento, conferindo-lhes uma carga elétrica negativa, resultando uma repulsão entre as partículas, isto é uma defloculação, com a estabilização da dispersão; as bolhas de ar também são repelidas e não podem aderir às partículas de cimento. (PRIOR; ADAMNS, 1960 apud NEVILLE, 1997, p. 260)

A ação dos agentes tenso-ativos descrita por Adamns pode ser observada nas Figuras 3.1 e 3.2, que representam a ação do aditivo interagindo com o grão de cimento pelo pólo negativo esquerdo e com a água pelo pólo negativo direito e dessa forma justifica o aumento da plasticidade do concreto. Complementando a descrição de Adamns, Neville descreve a ação das cargas eletrostáticas presentes no sistema.

As cargas eletrostáticas dão origem a uma camada de moléculas de água orientadas que impedem que as partículas se aproximem muito umas das outras. Portanto, as partículas adquirem grande mobilidade e a água, livre da influência restritiva do sistema flocculado, fica disponível para lubrificar mistura e aumenta a trabalhabilidade. NEVILLE (1997, p. 261)

Como na definição acima, as Figuras 3.1 e 3.2 mostram a ação dessas cargas eletrostáticas, promovendo a atração de um dos pólos negativos da molécula do aditivo pelas cargas positivas dos grãos de cimento, criando uma camada envoltória que por ter também o outro pólo negativo (molécula bipolar negativa), repele a água que está também carregada negativamente. Enquanto perdurarem as combinações de cargas entre o cimento e o aditivo a água ficará isenta de reação e as forças de repulsão presentes na pasta de cimento vão promover esta lubrificação da mistura conforme descrito na citação.

Aiticin e Baron em seu trabalho sobre aditivos normalizados descrevem o mecanismo de ação dos aditivos plastificantes da seguinte forma;

O grão de cimento em contato com a água tem a tendência de se aglomerar sob a forma amontoada como uma estrutura de um castelo de cartas, como pode ser visto no “croquis” da Figura 3.3. Diz-se que os grãos floculam. Este fenômeno está ligado a presença de cargas elétricas na superfície dos grãos promovendo uma aglomeração e aprisionando uma quantidade de água no interior da estrutura de grãos (chamadas flocos). E ainda isto impede a água de hidratar certas partes da superfície dos grãos de cimento que se encontram soldadas umas as outras em função das cargas elétricas. Os plastificantes redutores de água são dispersantes que defloculam os grãos finos em suspensão na água (estes grãos podem ser do cimento, da adição, dos finos de correção ou ainda dos grãos finos da areia). Essa melhor dispersão dos grãos finos, se traduz em uma diminuição da quantidade de água de mistura necessária para obter de um concreto com o abatimento estipulado. AITICIN; BARON (1996, p. 96).

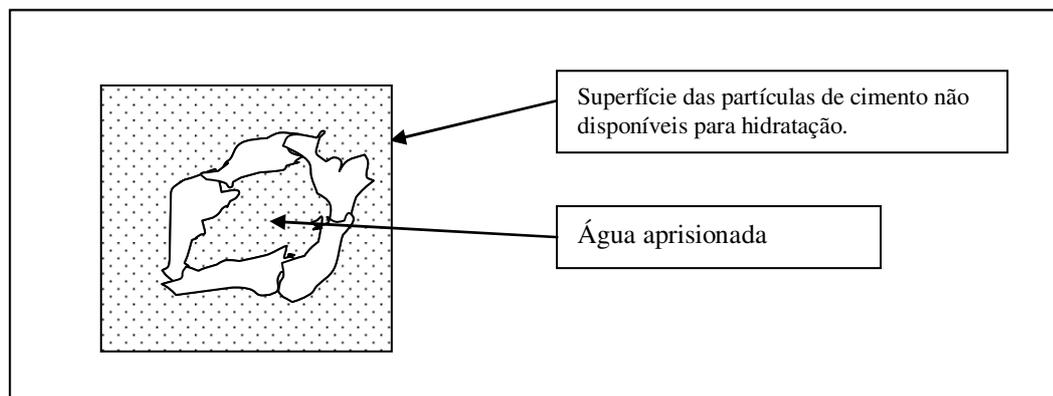


Figura 3.3: Estrutura dos grãos de cimento em forma de castelo de cartas.

A formação de grumos, durante o processo de mistura e hidratação de concretos e argamassa, é responsável pelas falhas de hidratação de parte dos grãos de cimento. Essa melhor capacidade de hidratação, promovida pela maior dispersão dos finos, explica porque, normalmente, com o uso de aditivos, concretos e argamassas apresentam um aumento das resistências á compressão axial em relação aos concretos sem aditivos.

Tecnicamente a ligação entre as moléculas do aditivo e o grão de cimento é chamada de adsorção química. Mehta e Monteiro definiram assim as interações entre o cimento a água e os aditivos:

Os aditivos químicos podem ser divididos em dois tipos. Algumas substâncias químicas começam a agir no sistema cimento-água instantaneamente, influenciando na tensão superficial da água e adsorvendo na superfície das partículas do cimento; outras se dissociam e afetam as reações químicas entre os compostos do cimento e a água, desde os primeiros minutos até várias horas após a sua adição. MEHTA; MONTEIRO (2008, p. 290)

Essas ligações químicas ou ligações covalentes, como são denominadas, manterão a repulsão eletrostática entre o cimento e a água até que se esgotem as combinações químicas entre o aditivo e o cimento. A duração do efeito de um aditivo vai depender de vários fatores conforme descreve abaixo Metha e Monteiro:

O período de eficiência dos surfactantes é bastante limitado, porque, logo após o início das reações de hidratação entre os componentes do cimento Portland e a água, grandes quantidades de produtos, como etringita, começam a se formar. Os produtos de hidratação do cimento capturam as pequenas quantidades de surfactantes presentes no sistema. Assim a temperatura ambiente e a finura e composição do cimento, especialmente os teores de C_3A , SO_3 e álcali, que controlam a taxa de formação de etringita, podem afetar as interações cimento-aditivo. É claro que a quantidade ou concentração do aditivo no sistema também determinará o efeito. Quantidades de aditivo maiores do que o normalmente necessário para o efeito plastificante ou redutor de água pode retardar o tempo de pega evitando a formação de ligações dos produtos de hidratação. Assim, dependendo da dosagem, a maioria dos surfactantes pode servir, simultaneamente, como redutores de água e retardadores de pega. MEHTA; MONTEIRO (2008, p. 296)

Alguns aditivos plastificantes compostos com lignosulfonatos de sódio ou de cálcio e gluconato de sódio, por exemplo, atuam das duas formas, ao mesmo tempo em que atuam rompendo a tensão superficial da água, promovendo um efeito de repulsão eletrostática entre os grãos de cimento e a água, agem também com retardadores e afetam as reações químicas entre os compostos do cimento e a água, em função principalmente da presença de açúcares, ou mesmo cadeias de hidroxilas, em sua composição.

3.1 AÇÚCAR E MELADO

Açúcares são formas possíveis dos hidratos de carbono e podem estar na composição de outras bases químicas dos aditivos como os lignosulfonatos e gluconatos, porém a forma mais comum de açúcar consiste em sacarose no estado sólido e cristalino.

O açúcar e o melado foram uma das primeiras formas de aditivos utilizados para se obter um retardamento da pega do concreto através do retardamento da dissolução dos cátions e ânions do cimento. Hoje em dia estes produtos ainda são utilizados como complementos em aditivos onde haja a necessidade de um retardamento mais amplo. “O açúcar é conhecido como retardador de pega e constantemente utilizado desde 1909.” (CIMBETON, 1994, p. 1)

A cultura popular credita ao açúcar propriedades impermeabilizantes em concretos e argamassa, sendo que o que ocorre é a maior compactação descrita acima e também porque

um concreto ou argamassa com reação mais lenta, sem exagero e com bom procedimento de cura, tende a formar menos micro-fissuras em função da ação do calor de hidratação. É necessário que se tenha muito cuidado na adição de açúcar ao concreto. Há muitos relatos de perdas de todo um trabalho de concretagem devido à alta dosagem de açúcar que inibiu totalmente a pega do cimento, “uma grande quantidade de açúcar, de 0,2 a 1,0% da massa do cimento, virtualmente impede a pega do cimento.” NEVILLE (1997, p. 258).

O efeito de retardamento observado com o uso de açúcar exige cuidados mas também traz benefícios ao concreto quando bem controlados conforme relata Neville:

Quando se usa açúcar como retardador, controlador de pega, as resistências do concreto às primeiras idades são acentuadamente reduzidas^{3.1} mas, depois dos 7 dias, nota-se um aumento da resistência de vários pontos percentuais quando comparada com concretos sem retardador.^{3.2} Isso provavelmente se deve ao fato de que uma pega mais retardada resulta em um gel de cimento hidratado mais compacto. (BLOEM, 1959; ASHWORTH, 1965 apud NEVILLE (1997, p. 258).

Esse efeito de melhora nas resistências finais do concreto quando aditivados com retardadores é devido à melhor nucleação do grão de cimento o que favorece a uma melhor reação de hidratação.

3.2 LIGNOSULFONATOS DE CÁLCIO E DE SÓDIO

Lignosulfonatos são polímeros obtidos a partir da lignina da madeira na fabricação do papel. Os três compostos básicos da madeira são: celulose, hemicelulose e lignina. Para separação da lignina, que não interessa a produção de papel, a madeira é cosida em ácido, sulfonando a lignina que se torna solúvel em água e é separada da celulose insolúvel. As ligninas solúveis são chamadas de lixívias ou licor negro, compostas principalmente de lignosulfonatos que após tratamentos químicos resultam na principal base dos aditivos dispersantes de concretos fabricados no Brasil.

Paralelamente à reação de sulfonação, ocorre também uma hidrólise parcial de algumas cadeias estruturais da lignina e dos carboidratos. Essa hidrólise provoca a solubilização das moléculas de lignosulfonatos e de outros componentes como os açúcares. MELBAR (Catálogo Técnico, pág. 7).

A maioria dos lignosulfonatos, utilizados por fabricantes no Brasil, contém açúcar em sua composição. Na aplicação para concretos dosados em central que necessitam retardamento adequado aos tempos de transporte do concreto até a obra, a presença de açúcar favorece o desempenho do aditivo.

O mecanismo de ação dos lignosulfonatos é o mesmo descrito no início desse capítulo, baseado na redução da tensão superficial da água e na repulsão eletrostática instalada entre o cimento e a água em função da característica bipolar negativa do aditivo. Essas características conferem ao produto uma alta capacidade de dispersão dos grãos e aumento da plasticidade favorecendo o processo de hidratação do cimento e a trabalhabilidade do concreto.

Uma característica que tem que ser controlada quando se utiliza lignosulfonato como base para um aditivo é a influência sobre a incorporação de ar no concreto que deve ser controlada em determinados casos com aditivos desareantes, que serão abordados nesse capítulo.

Na Figura 3.4 é apresentado o sistema envolvendo o cimento a água e o lignosulfonato com seus sulfatos e hidroxilas atuando no papel de dispersantes e a Figura 3.5 mostra a estrutura do lignosulfonato de sódio

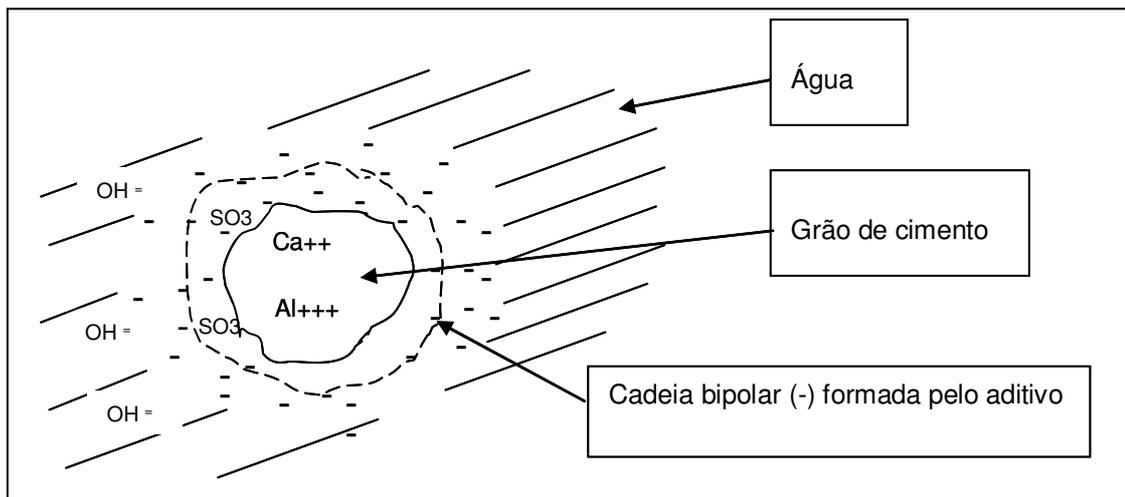


Figura 3.4: Elementos do lignosulfonato de sódio interagindo com o cimento e a água

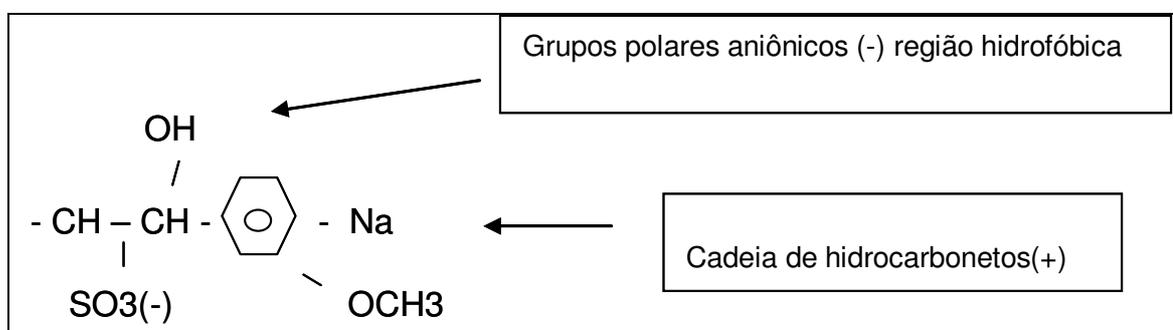


Figura 3.5: Estrutura do lignosulfonato de sódio

Na estrutura mostrada na Figura 3.5, os elementos mais atuantes têm suas influências conforme o descrito abaixo:

- OH⁻: As hidroxilas tem efeito retardador;
- OCH₃⁻: Elo de ligação polimérica, que gera incorporação de ar e plasticidade;
- SO₃: Os sulfatos são mais atraídos pela carga do cimento (+), mantendo a repulsão eletrostática.
 - A hidroxila ligada à cadeia carbônica torna o meio mais ácido provocando retardamento de pega sem relação com a plasticidade.
 - Ao contato do aditivo com o grão de cimento, iniciam as reações de dissolução de cargas positivas.
 - Enquanto houver predominância de cargas negativas haverá repulsão eletrostática. A ação do aditivo termina quando toda a sua carga negativa é combinada com os íons do cimento.

3.3 GLUCONATO DE SÓDIO

O gluconato do sódio (NaC₆H₁₁O₇) é o sal do sódio do ácido glucônico, produzido pela fermentação da glicose do milho, do trigo ou da batata. É granulado em pó branco, fino, cristalino, muito solúvel na água. Não é corrosivo nem tóxico e prontamente biodegradável (98% após 2 dias).

Para a função de plastificante o gluconato de sódio é considerado uma das melhores bases químicas porque tem muito pouco efeito sobre a incorporação de ar do concreto, porém dosagens muito elevadas podem levar a um retardamento muito longo.

A ação do gluconato de sódio é principalmente por repulsão eletrostática promovida entre os grãos de cimento e a água. Os carboxilatos (COO⁻) têm um efeito plastificante na promoção desta repulsão eletrostática e as hidroxilas (OH⁻) tem um efeito retardador.

Os carboxilatos e hidroxilas são atraídos pelas cargas positivas do cimento e apesar de as hidroxilas terem uma carga muito pequena, de cerca de 1% da carga do carboxilato, por estarem em cadeia esta carga se torna importante.

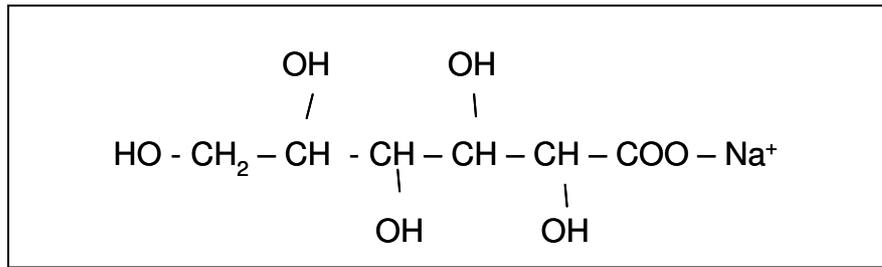


Figura 3.6: Estrutura química do gluconato de sódio

Na Figura 3.6 são mostrados os elementos atuantes e mecanismo de reação, onde :

- Hidroxilas e carboxilatos são atraídos pela carga do cimento (+).
- Os carboxilatos (COO-) tem um efeito plastificante por repulsão eletrostática.
- As hidroxilas (OH-) tem uma carga pequena (1% do COO) mas em cadeia se torna uma carga importante com efeito retardador.

Como observado com o lignosulfonato, ao reagir com a água o gluconato vai agir na dissolução das cargas positivas do cimento. Enquanto houver predominância de cargas negativa na reação, haverá repulsão. A ação do aditivo termina quando toda a sua carga negativa é combinada com os íons do cimento.

3.4 POLINAFTALENO SULFONATO DE SÓDIO E DE CÁLCIO

O polinaftaleno sulfonato mais utilizado em aditivos para concreto é o de sódio. O baseado em cálcio é mais utilizado pela indústria de painéis de gesso. Segundo MARTIN (2005, 2v. V. 1, p. 389), esses produtos foram desenvolvidos no Japão na metade do século passado, são dissolvidos com 40% de concentração e tem um bom comportamento com a maior parte dos cimentos.

Os polinaftalenos são utilizados como bases de superplastificantes porque permitem dosagens mais elevadas que os lignosulfonatos e gluconatos, sem o risco de um grande retardamento. É certo que há limites de dosagem para que as influências sobre o retardamento não sejam altas, mas enquanto a maioria dos plastificantes está limitada a uma dosagem máxima de 0,5% sobre o peso do cimento para evitar o retardamento, os superplastificantes à base de polinaftalenos sulfonatos de sódio permitem dosagens três vezes superiores, até que iniciem os efeitos indesejáveis de retardamento da pega.

A influência sobre a incorporação de ar em concretos também é baixa, permitindo também, aos aditivos superplastificantes, dosagens de até três vezes às utilizadas com aditivos plastificantes sem prejuízo das resistências mecânicas.

Com possibilidade de dosagens superiores a 1,0% sobre a massa de cimento é possível uma alta concentração de aditivo, de alto peso molecular, dando ao concreto um nível de plasticidade muito mais elevado que com o uso dos aditivos plastificantes em seus limites máximos.

O polinaftaleno sulfonato de sódio é a base dos aditivos superplastificantes como visto, porém também é usado como base do aditivo polifuncional, avaliado nesse trabalho, combinado com lignosulfonatos, gluconatos ou outras bases.

No Brasil, a combinação de polinaftalenos sulfonatos de sódio e lignosulfonatos de sódio é a principal base dos aditivos polifuncionais. Essa combinação resultou em um aditivo, com uma influência sobre o tempo de retardamento e uma incorporação de ar, inferiores à maioria dos plastificantes, adequando esse aditivo ao uso em centrais de concreto.

Nas Figuras 3.7 e 3.8, são apresentadas, a título ilustrativo, a estrutura química do polinaftaleno sulfonato.

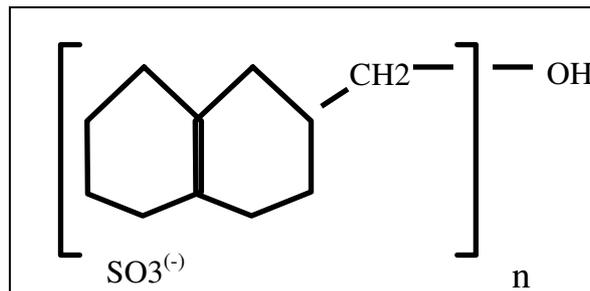


Figura 3.7: Estrutura química do polinaftaleno sulfonato

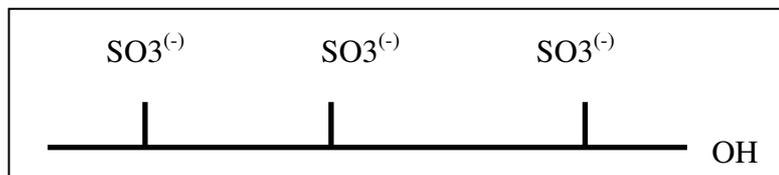


Figura 3.8: Esquematização estrutural

Apesar do mecanismo de reação dos polinaftalenos sulfonatos ser por repulsão eletrostática como nos plastificantes, as características de reação são diferenciadas conforme indicado a seguir:

- Cadeia de $\text{SO}_3^{(-)}$: Os sulfatos com maior peso molecular têm alto efeito dispersante e plastificante.
- Os poucos efeitos secundários, como retardamento de pega e incorporação de ar,

permitem uma maior dosagem proporcionando maior dispersão.

Ao contato do aditivo com o grão de cimento, iniciam as reações de dissolução de cargas positivas. Como com outras bases químicas, enquanto houver predominância de cargas negativas haverá repulsão. A ação do aditivo termina quando toda a sua carga negativa é combinada com os íons do cimento.

3.5 FORMOL E BIOCIDAS

Por ser a maioria das matérias primas dos aditivos formada por compostos orgânicos, existe a necessidade de serem protegidos contra os efeitos de formação de bactérias, fungos e leveduras, que afetam diretamente as propriedades químicas dos produtos.

A proteção dos aditivos contra a contaminação deve ser rigorosa e pode resultar de uma combinação de biocidas, onde é mais comum o uso formol, que apesar de volatilizar em menos de um mês, serve como um choque inicial de descontaminação, sempre associado à um biocida de longa durabilidade de preservação, em geral a base de isotiazolonas e em alguns casos específicos, dependendo das matérias primas e condições de armazenagem é incorporado ainda algum tipo de biocida mais focado em fungos e leveduras.

Além do uso de biocidas, é importante que as instalações das plantas de aditivos estejam livres de contaminação, sendo recomendadas esterilizações freqüentes dos tanques e incremento da cloração da água.

3.6 ANTIESPUMANTES

Algumas bases de aditivos como os lignosulfonatos, promovem a geração de ar incorporado no concreto, o que é um limitador às dosagens destes aditivos em função do comprometimento das resistências mecânicas. Segundo Neville, para concretos de relação a/c entre 0,45 e 0,72 testadas, “A perda média de resistência à compressão é de 5,5% para cada unidade de percentagem de ar presente” Neville (1997; p.553). Para isto são utilizados alguns produtos, como o fosfato de tributílica, com o objetivo de reduzir a geração de ar incorporado no concreto ou argamassa estrutural.

A adição de anti espumantes reduz a plasticidade do concreto por isto a dosagem na composição do aditivo deve ser bem avaliada.

3.7 OUTRAS BASES QUÍMICAS

Outras bases químicas são associadas aos aditivos plastificantes e polifuncionais tais como a trietalonamina, cloretos e tiocianato de sódio, que tem propriedades de acelerador de resistências mecânicas ou ainda o bórax, o ácido cítrico e outras substâncias açucaradas que funcionam como plastificantes e retardadores ou ainda o licor negro, que é o resíduo industrial da produção de papel, que tem alto poder plastificante, porém é um produto com baixa regularidade e com forte tendência à incorporação de ar, o que torna seu uso desaconselhável.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a execução do trabalho foi através da pesquisa literária e testes em laboratório.

Os trabalhos laboratoriais foram realizados em duas etapas, sendo a primeira etapa, a avaliação da influência de diferentes dosagens, crescentes em concentração, de ambos aditivos, plastificante e polifuncional, sobre o comportamento da consistência de uma amostra de concreto de referência e também a influência, desse gradiente de dosagens, sobre as outras características também importantes do concreto, para se montar um quadro de resultados, que permitiu avaliar qual dosagem, de cada um dos dois tipos de aditivos, pode proporcionar maiores benefícios no seu uso dentro das condições de ensaio.

Na segunda etapa, considerando que como os aditivos redutores de água podem ser empregados tanto para o incremento da plasticidade do concreto, quanto para a redução do consumo de cimento do traço, foram testadas duas alternativas para esta redução de consumo.

Na primeira alternativa, mantidos a consistência e o fator água/cimento do concreto de referência, foi avaliado o comportamento do concreto com a redução máxima possível de água, de acordo com o procedimento de dosagem adotado neste trabalho e por conseqüência a redução do consumo de cimento, para a dosagem selecionada, de cada um dos aditivos testados na primeira etapa, com o mesmo concreto de referência.

A segunda alternativa testada, também para as dosagens de aditivos selecionadas, foi baseada nos mesmo princípios da primeira, porém optou-se por obter um pouco mais de plasticidade no traço, para avaliar que benefícios poderiam ser obtidos, retirando menos água e cimento, que na primeira alternativa, mas com aumento da plasticidade do concreto, em relação ao concreto de referência.

Em todos os testes desta segunda etapa foram utilizadas a mesma composição da amostra de concreto de referência, e mantidos os mesmos procedimentos de mistura adotados em todos os ensaios.

A metodologia de trabalho adotada, nos ensaios laboratoriais, teve como objetivo, na primeira etapa, analisar as principais transformações promovidas pelas diferentes dosagens dos dois aditivos, plastificante e polifuncional, na consistência, manutenção da trabalhabilidade, massa específica, teor de ar incorporado, retardamento do fim de pega e evolução da resistência à compressão axial do concreto, tendo sido mantida, em todos os ensaios, a quantidade de água original do traço de referência sem aditivo. Com o conjunto dessas informações foi possível apresentar uma visão ampla do desempenho de cada um dos aditivos testados, sobre a amostra de concreto de referência, apontando os principais benefícios de cada dosagem e os riscos quando existentes. A partir dessa análise, foram selecionadas a dosagem do plastificante e a dosagem do polifuncional que apresentaram o melhor desempenho nos testes realizados. As dosagens selecionadas, uma de cada aditivo, foram empregadas na segunda etapa do trabalho.

Na segunda etapa do trabalho, com as dosagens selecionadas, de aditivo plastificante e polifuncional, na etapa anterior, foram avaliadas as duas alternativas de redução máxima e parcial de consumo de água e cimento em relação ao concreto de referência.

Para calcular esta redução de água e cimento na primeira alternativa de redução máxima, manteve-se a mesma expectativa de resistência à compressão axial e consistência da amostra do concreto de referência, ou seja, tomou-se como base para o cálculo dessa redução da água e do cimento do traço, a manutenção do fator água/cimento e o abatimento de 60 mm da amostra do concreto de referência.

A outra alternativa de redução de consumo de cimento, avaliada para apresentar uma forma de equilíbrio entre plasticidade e redução de consumo, foi a redução parcial desta quantidade, de água e de cimento, com incremento da plasticidade. Para esta redução parcial, foi adotado 70% da redução possível de água adotada na primeira alternativa e como na redução máxima, manteve-se a relação água/cimento original de 0,538 para se reduzir a quantidade de cimento.

O traço da amostra de concreto de referência escolhido para este trabalho foi o f_{ck} 25,0 MPa com britas 1 e 2, slump 6,0 +/- 2,0 e teor de argamassa de 53%. Por ser esse um traço de concreto de resistência à compressão axial mediana em relação à maioria dos traços utilizados

nos mais diversos tipos de obra, esse estudo pode servir como parâmetro de desempenho para dosagem desses tipos de aditivos na maioria dos traços de uso corrente nos canteiros de obra. Os benefícios obtidos por ambos aditivos testados, em relação ao traço padrão de referência adotado nesse trabalho, podem ser transferidos, com algumas variações de desempenho para outros traços de concreto, inclusive com outros tipos e classes de cimento, podendo as dosagens indicadas no trabalho servir como uma sugestão de dosagem inicial, a ser testada na obra, para se obter um concreto com as melhores características de trabalhabilidade para as condições existentes de aplicação. Estes testes devem ser realizados utilizando os equipamentos e materiais disponíveis em canteiro e com pequenos ajustes pode-se atingir a composição de concreto mais adequado ao tipo de aplicação, antes do uso definitivo.

A metodologia adotada para a determinação do traço da amostra de concreto de referência foi a mesma adotada pelo Prof. Salvador E. Giammusso no livro Manual de Concreto. Esse método de dosagem de concreto é de fácil compreensão e prático na busca da obtenção de uma composição do concreto, mais adequada ao tipo e classe do cimento e aos agregados disponíveis em canteiro. A partir da definição teórica do traço é possível preparar uma amostra na betoneira e com um pequeno ajuste na relação areia/brita, ou seja, retirando um pouco da areia e substituindo, pelo mesmo volume absoluto, por brita, ou vice-versa pode-se chegar a um traço de trabalhabilidade ideal para as condições de canteiro, ou ainda efetuar ajustes na quantidade de água, mantendo-se a relação água/cimento de cálculo.

Particularmente neste trabalho, para evitar que a influência da quantidade de pó de pedra impregnado na brita, que por ser muito irregular, interferisse na avaliação do desempenho de dosagens de cada aditivo, adotou-se a limpeza da brita por hidro-jateamento antes dos ensaios.



Figura 4.1: Limpeza das pedras

A limpeza da brita foi considerada ideal para o trabalho porque evitou que a areia artificial ou pó de pedra como também são tratados os finos resultantes da britagem das rochas, presente de forma irregular nas pesagens de pedra, nos ensaios realizados, interferisse na avaliação real da variação de dosagem dos aditivos. Essa condição, não é a condição normal de canteiro, mas o conhecimento da potencialidade de cada dosagem dentro das condições adotadas em laboratório poderá ser empregado como referência para uma dosagem mais adequada às condições de limpeza da brita disponível no canteiro de obras. O que tem que se ter em conta é que em canteiro a necessidade de água, será maior e vai estar relacionada ao grau de impregnação de pó na brita, que se for alto terá que ser equilibrado com os demais agregados miúdos do traço, através de traços experimentais de adequação. Dessa forma pode-se estimar que, para as condições de canteiro de obra, o desempenho das diversas dosagens de aditivos, sobre o aumento do abatimento de uma amostra de concreto padrão, serão próximos dos observados nos ensaios, com variações ajustáveis em função da natureza e condições dos agregados, assim como, também serão semelhantes, os efeitos negativos de dosagens excessivas, como o retardamento que está ligado à composição do cimento e do ar incorporado influenciados pelos tipos de cimento e agregados empregados.

Para que os resultados obtidos nesse estudo possam ser adotados como uma base de avaliação na escolha do tipo do aditivo e da melhor dosagem para as condições de canteiro, deve ser considerado que a possibilidade de uso de cimentos diferentes em tipo, classe de

resistência e mesmo finura e principalmente a utilização de agregados sem padrões estabelecidos, exigem que seja feito um teste de ajuste da melhor dosagem, tomando por base duas a três dosagens diferentes de um mesmo aditivo, para que se tenha o concreto com a melhor relação desempenho/custo para uso na obra.

Como no procedimento de dosagem adotado no Quadro 2 (Apêndice 1), referente ao consumo de água/m³ de concreto, está baseada no uso de britas impregnadas com uma determinada quantidade de pó de pedra, como é comum nos canteiros de obra, o fato de termos lavado a brita, para melhor interpretar o desempenho de cada dosagem de aditivo, reduziu a necessidade de água estimada para o traço. Optou-se desta forma para uma redução do fator água/cimento original de 0,57 para 0,538, aumentando um pouco a resistência de dosagem mas sem grandes alterações na composição do concreto.

A quantidade de concreto de cada amostra foi determinada em função do atendimento à norma NBR NM 33/1998 que determina que o volume de amostra de concreto fresco deve ser pelo menos 1,5 vezes a quantidade necessária para a realização dos ensaios. Como os volumes dos recipientes que serão utilizados nos ensaios são os que seguem: tronco de cone (5,5 l.); 6 corpos de prova 100 mm x 200 mm (9,42 l.) e recipiente de calibração para determinação do teor de ar incorporado (7,07 l.), que somados representam 22 litros, ficou estabelecido que as amostras de concreto fresco fossem feitas com 33 litros, para atender a todos os ensaios. As frações de concreto das amostras empregadas nos ensaios, de consistência e teor de ar incorporado, foram descartadas após a realização de cada ensaio.

No procedimento de mistura do concreto, as dosagens de aditivos selecionadas foram misturadas previamente a 10% da água de dosagem da amostra e só foram adicionadas ao concreto dois minutos após a adição dos 90% da água de dosagem. O motivo desse retardamento, na introdução do aditivo, foi para dar tempo de dissolução do gesso do cimento Portland na água, antes da ação química do aditivo, porque quando o aditivo é misturado junto à primeira água de contato com o cimento, a ação do gesso, que tem a função de retardar a pega do cimento, pode alterar o desempenho do aditivo, já se o gesso tiver tempo para se dissolver e reagir com o C₃A do cimento os efeitos dos aditivos podem ser melhores, conforme descreve NEVILLE (1979, p. 259),

..um atraso de até 2 minutos, depois que a água tiver entrado em contato com o cimento, aumenta o retardamento,...O aumento do retardamento ocorre principalmente com cimentos com alto teor de C₃A, pois quando reage com o gesso, parte do C₃A não adsorve o aditivo ficando mais produto para

retardar os silicatos de cálcio, o que se faz por adsorção nos núcleos de hidróxido de cálcio

4.1 PRIMEIRA ETAPA

Na primeira etapa para avaliação da influência de diferentes teores, de ambos aditivos e seleção da melhor dosagem de cada um deles, foram testadas as seguintes dosagens de cada aditivo, em peso sobre a massa de cimento:

- Plastificante (5 dosagens): 0,2%; 0,3%; 0,4%, 0,55% e 0,8%;
- Polifuncional (5 dosagens): 0,3%; 0,5%; 0,7%; 0,9% e 1,2%.

As dosagens foram escolhidas em função das recomendações de fabricantes de aditivos, que indicam dosagens mínimas, nas quais já é possível observar os primeiros efeitos de um aditivo e as dosagens máximas limitadas pelos efeitos negativos de retardamento e/ou incorporação de ar.

Nesta etapa, foram testadas as seguintes amostras:

- 4 amostras do concreto de referência sem aditivo;
- 2 amostras para cada dosagem de plastificantes (10 amostras);
- 2 amostras para cada dosagem de polifuncional (10 amostras).

A avaliação foi feita em quatro baterias de ensaios, conforme a programação abaixo:

- **Primeira bateria:** Uma amostra sem aditivo e uma de cada dosagem selecionada do aditivo plastificante.
Ensaio: Consistência inicial; moldagem de corpos de prova e manutenção da trabalhabilidade.
- **Segunda bateria:** Uma amostra sem aditivo e uma de cada dosagem selecionada do aditivo plastificante.
Ensaio: Consistência inicial; massa específica, teor de ar incorporado e moldagem de corpos de prova.
- **Terceira bateria:** Uma amostra sem aditivo e uma de cada dosagem selecionada do aditivo polifuncional.
Ensaio: Consistência inicial; moldagem de corpos de prova e manutenção da trabalhabilidade.

- Quarta bateria: Uma amostra sem aditivo e uma de cada dosagem selecionada do aditivo polifuncional.

Ensaio: Consistência inicial; massa específica, teor de ar incorporado e moldagem de corpos de prova.

Na primeira e na terceira baterias de amostras do concreto de referência sem aditivo e com cada dosagem estabelecida para cada aditivo, foram feitos ensaios de consistência inicial pelo abatimento do troco de cone, moldados seis corpos de prova (100x200 mm), sendo dois para cada uma das idades a seguir: 24 h, 7 dias e 28 dias, para avaliação da evolução da resistência à compressão axial de cada amostra e também a influência dos aditivos sobre as resistências nas primeiras 24 h. Com o restante do concreto na betoneira, foi avaliada a manutenção da trabalhabilidade 45 minutos após a adição de água ao concreto, pelo mesmo ensaio de consistência inicial.

O teste de abatimento após 45 minutos não é um teste normalizado, mas interessa a este trabalho, para que se possa estimar a manutenção das características de trabalhabilidade do concreto avaliando a perda da consistência em um tempo próximo das condições de canteiro de obra. Essa característica é muito importante, se considerarmos que em nem todos os canteiros de obra há responsáveis cientes ou vigilantes dos riscos das adições de água posteriores a mistura do concreto para manter a plasticidade adequada à aplicação e que este fenômeno não é tão raro assim. Neste ensaio foram mantidos os procedimentos de mistura e não foi feita nenhuma proteção sobre a abertura do balão da betoneira com o objetivo de não interferir nos efeitos da umidade do ar sobre a consistência do concreto.

Nestas duas baterias cada amostra atendeu a seguinte sequência de dosagem:

1. Colocação da brita;
2. Colocação da metade da areia;
3. Colocação do cimento;
4. Colocação da segunda metade da areia;
5. Misturar a seco por 30 segundos;
6. Colocação de 90% da água do traço sem aditivo;
7. Misturar por dois minutos;
8. Adicionar o restante da água misturada com o aditivo;
9. Misturar por 5 minutos;
10. Retirar diretamente da betoneira a quantidade de concreto necessária para

execução do teste de abatimento com o tronco de cone;

11. Após a execução do teste de abatimento, descartar o concreto utilizado no teste;
12. Misturar por mais três minutos, o material restante na betoneira;
13. Retirar diretamente da betoneira a quantidade de concreto necessária para moldar os seis corpos de prova (10 cm x 20 cm);
14. Manter a betoneira girando até que se complete 45 minutos da adição da água ao traço;
15. Realizar o teste de abatimento do tronco de cone para avaliar a consistência do concreto.

Na segunda e na quarta baterias de amostras do concreto de referência sem aditivo e com cada dosagem estabelecida para cada aditivo, foram também feitos ensaios de consistência inicial pelo abatimento do tronco de cone, moldados seis corpos de prova e ainda realizados ensaios para determinação da massa específica e do teor de ar incorporado do concreto. Em todas as amostras foram também avaliadas a homogeneidade e coesão do concreto, pelo método crítico visual.

Nas baterias dois e quatro, os procedimentos de mistura e ensaios realizados, obedeceram à seguinte ordem:

1. Colocação da brita;
2. Colocação da metade da areia
3. Colocação do cimento
4. Colocação da segunda metade da areia
5. Misturar a seco por 30 segundos
6. Colocação de 90% da água do traço sem aditivo;
7. Misturar por dois minutos
8. Adicionar o restante da água misturada com o aditivo.
9. Misturar por 5 minutos.
10. Retirar diretamente da betoneira a quantidade de concreto necessária para execução do teste de abatimento com o tronco de cone.
11. Após a execução do teste de abatimento, descartar o concreto utilizado no teste.
12. Misturar por mais três minutos, o material restante na betoneira.
13. Retirar diretamente da betoneira a quantidade de concreto necessária para execução do teste de densidade e teor de ar incorporado.
14. Realizar os testes de massa específica e teor de ar incorporado, descartando o

concreto utilizado.

15. Misturar o concreto restante na betoneira por mais três minutos e moldar os seis corpos de prova.

Neste trabalho foram utilizadas dosagens elevadas de ambos aditivos com o objetivo de, nos dias posteriores aos ensaios, avaliar os efeitos destas altas dosagens sobre o retardamento do fim de pega do concreto, em relação às temperaturas de ensaio, para se determinar os limites de dosagem, quando já se observam efeitos secundários de retardamento do fim de pega. O retardamento de pega excessivo (acima de 15 horas) submete o concreto a riscos, porque exige maior rigor no trabalho de cura para evitar a perda excessiva de água de hidratação, podendo comprometer o desenvolvimento da resistência se o concreto não tiver uma cura bem feita e também provocar efeitos sobre a retração do concreto.

A confecção das amostras de concreto fresco obedeceu a NBR NM33/1998 e a avaliação da variação da plasticidade foi através da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo a norma NBR NM 67/1998 de cada amostra executada (Figuras 4.2 à 4.4). Foi feita também a avaliação da coesão/desagregação das amostras, porém de forma visual.



Figura 4.2: Colocação do concreto no tronco de cone em três camadas.



Figura 4.3: Golpeamento do concreto no tronco de cone em três camadas com 25 golpes cada.



Figura 4.4: Medição do abatimento da amostra e avaliação visual da coesão.

Para a aferição da massa específica foi adotado o método gravimétrico (Figuras 4.5 à 4.10), obedecendo aos procedimentos descritos na norma NBR 9833 Concreto – Massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico, porém para determinação do teor de ar

incorporado optou-se pelo método pressométrico, utilizando o aparelho específico e os procedimentos de acordo com a norma NM 47:2002– Teor de ar pelo método pressométrico (Figuras 4.11 à 4.14).



Figura 4.5: Colocação do concreto em 3 camadas com 14 golpes cada.



Figura 4.6: Golpes com martelo de borracha após adensamento de cada camada.



Figura 4.7: Adensamento da última camada



Figura 4.8: Alisamento superficial



Figura 4.9: limpeza de borda

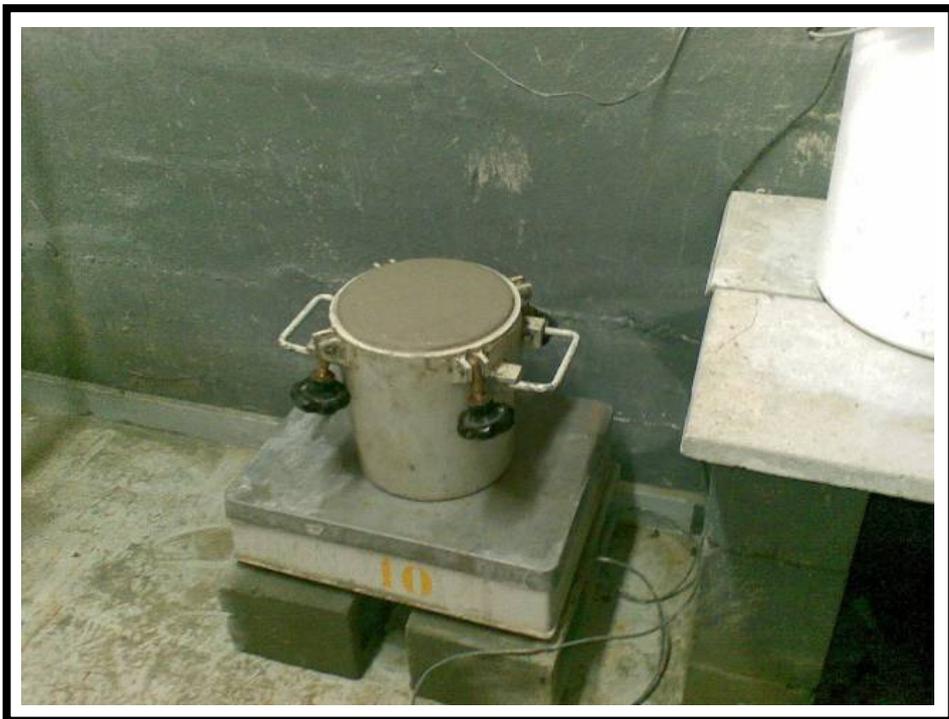


Figura 4.10: Pesagem para determinação da densidade



Figura 4.11: Colocação da água



Figura 4.12: Aplicação de carga de pressão



Figura 4.13: Calibragem da agulha



Figura 4.14: Tomada de pressão para determinação do teor de ar.

Os corpos de prova utilizados para avaliação da resistência à compressão axial, de acordo com a norma NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, foram de dimensões 100x200 mm, moldados de acordo com a norma NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Foram moldados seis

corpos de prova cilíndricos para cada amostra de concreto (Figuras 4.15 e 4.16), para serem rompidos aos pares nas idades de 24 h, 7 dias e 28 dias.



Figura 4.15: Moldagem em duas camadas com 13 golpes cada.



Figura 4.16: Adensamento da última camada.

A cura dos corpos de prova foi em um tanque de imersão e para o capeamento desses corpos de prova foi utilizada uma argamassa polimérica de alta resistência inicial garantindo o nivelamento da superfície (Figuras 4.17 à 4.19). Apesar desse método, de capeamento dos corpos de prova com argamassa polimérica de alta resistência inicial, não ser normalizado, observou-se uma alta regularidade na proximidade de resistência entre os corpos de prova de mesmo traço durante o rompimento, o que comprovou o bom nivelamento das superfícies dos corpos de prova. Uma das vantagens do uso de argamassa polimérica é evitar o uso do enxofre nos capeamentos de corpos que são poluidores e extremamente nocivos à saúde, exigindo um grande aparato de proteção do operador de capeamento, o que nem sempre acontece.



Figura 4.17: Posicionamento da forma, 2 a 3 mm acima do corpo de prova.



Figura 4.18: Preenchimento com argamassa polimérica rápida, Rapdez



Figura 4.19: Acabamento com desempenadeira metálica.

Para o ensaio de rompimento dos corpos de prova, foi utilizada a prensa manual da marca Pavitest de 12,0 t, de classe II de acordo com a norma NBR 6156 – Máquina de ensaio de tração e compressão – Verificação e em conformidade com os itens 3.1.1 a 3.1.4 da norma NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.



Figura 4.20: Prensa para rompimento Pavitest de 12,0 t

A execução, dos ensaios realizados, obedeceu a todos os pré-requisitos da norma NBR 5739 nos itens 4.1 a 4.9, assim com o cálculo das resistências, sendo o resultado expresso em Mega Pascal (MPa) pela média dos dois corpos de prova de cada idade.

Na avaliação desta etapa, após os resultados dos ensaios realizados, foi escolhida a dosagem de cada um dos aditivos (plastificante e polifuncional) que apresentaram o melhor desempenho no conjunto das características do concreto testado.

4.2 SEGUNDA ETAPA

Utilizando a dosagem selecionada de cada aditivo, comparada com a amostra de concreto de referência, foi iniciada a segunda etapa do trabalho, de avaliação da redução do consumo de água, em função do uso dos aditivos, estabelecendo como parâmetro comparativo a mesma consistência para os ensaios de abatimento do tronco de cone das amostras com e sem aditivo (slump 60 +/- 20 mm).

Uma segunda alternativa de redução da água consistiu em reduzir somente 70% da quantidade máxima possível, para proporcionar ao concreto uma maior plasticidade e avaliar os benefícios desta alternativa. Com a redução máxima e parcial de água foram reduzidas também as quantidades de cimento em cada traço, pois foi mantido o fator água/cimento

original do concreto de referência (a/c 0,538) para todos os traços. Os cálculos das novas composições dos traços, em função de cada aditivo e quantidade de água estabelecida, estão nos apêndices 3 a 6 deste trabalho.

A fixação do fator água/cimento do traço do concreto de referência sem aditivo, assim como a consistência, foi outro parâmetro de avaliação importante e serviu para determinar a redução de cimento no traço em função da redução de água obtida na consistência projetada.

Para determinação da redução da quantidade máxima possível de água no traço, foi feita a relação entre o incremento da plasticidade e a quantidade possível de água a ser reduzida utilizando-se o Quadro 2 do Apêndice 1 desse trabalho, de determinação da quantidade de água em função do abatimento desejado e do diâmetro máximo do agregado graúdo extraído do livro “Manual do Concreto” do prof. Salvador Giamusso. A partir da determinação da nova quantidade de água, foi calculada a nova quantidade e cimento em função do fator água/cimento da amostra de concreto de referência. O mesmo foi feito para as amostras ensaiadas na segunda alternativa dessa etapa, com redução de 70% da água total.

Para as duas alternativas dessa segunda etapa foram feitos somente ensaios de determinação da consistência inicial, pelo abatimento de tronco de cone e moldagens de seis corpos de prova, por mistura, para avaliação da evolução das resistências à compressão axial do concreto nas mesmas idades da primeira etapa.

Cada mistura atendeu a seguinte seqüência de operação:

1. Colocação da brita 1;
2. Colocação da metade da areia
3. Colocação do cimento
4. Colocação da segunda metade da areia
5. Misturar a seco por 30 segundos
6. Colocação de 90% da água do traço sem aditivo;
7. Misturar por dois minutos
8. Adicionar o restante da água misturada com o aditivo.
9. Misturar por 5 minutos.
10. Retirar diretamente da betoneira a quantidade de concreto necessária para execução do teste de abatimento com o tronco de cone.
11. Após a execução do teste de abatimento, descartar o concreto utilizado no teste.
12. Misturar o concreto restante na betoneira por mais três minutos e moldar os seis corpos de prova 100 x 200 mm.

5. SELEÇÃO DE MATERIAIS

Para a execução dos ensaios foram selecionados os aditivos redutores de água, o cimento, os agregados e a água, tendo todos os produtos suas características de acordo com as normas brasileiras.

5.1 MATÉRIAS PRIMAS

Aditivo Plastificante - O aditivo plastificante selecionado para os testes é um aditivo comercial, à base de lignosulfonato de cálcio com uma concentração de sólidos de 40%.

Aditivo Polifuncional - O aditivo polifuncional selecionado para os testes é também um aditivo comercial, à base de lignosulfonato de cálcio e polinaftaleno sulfonato de sódio, com uma concentração de sólidos de 40%.

Cimento CPIII 40 - Apesar do cimento CPIII 40 não ter ainda seu uso muito difundido nas obras que produzem concreto em canteiro, onde é mais comum o uso dos cimentos de classe 32, a escolha deste cimento foi fundamentada na busca de um cimento também acessível aos construtores e de características de desempenho superiores às do cimento de classe CP 32.

Sob o ponto de vista dos ensaios realizados, devido a esse melhor desempenho, do cimento de classe 40, a diferença principal, em relação a um traço com CP 32, foi o teor de cimento no traço, que representa uma redução superior a 15%, no caso de concreto de f_{ck} 25,0 MPa, como o que foi utilizado em todos ensaios, porém como o objetivo deste trabalho destaca também os benefícios ecológicos da redução da produção de cimento, o uso do cimento CPIII 40, por dois excelentes motivos é coerente ao tema e deveria ser uma tendência natural à medida que as preocupações com a preservação do meio ambiente se intensificam. O primeiro é por possibilitar a redução de consumo de cimento nos traços, em cerca de 15%,

como foi comentado acima e o segundo porque possibilita o aproveitamento da escoria granulada de alto forno, que já foi tratada, no passado, como um passivo ambiental e neste tipo de cimento pode substituir o clínquer em até 70% da composição do cimento, segundo as normas brasileiras, reduzindo praticamente na mesma proporção os danos, já citados, à natureza e ainda com excelente desempenho de reação alterando positivamente algumas características do cimento Portland tradicional como uma menor permeabilidade e uma maior resistência química.

Outro fator que favorece o incremento do uso de um cimento de classe 40 é a justificativa econômica, pois nos últimos anos a diferença percentual de preços entre esses dois tipos de cimento tem sido inferior a redução de consumo proporcionada pelos cimentos de classe CP 40 em relação aos cimentos de classe CP 32, o que já justifica a escolha.

Apesar dos benefícios gerados, nos cimentos do tipo CPIII, há uma característica que encontra resistência por alguns usuários, que é o retardamento de pega e o endurecimento mais lento que os cimentos do tipo CP II, mais utilizados nas obras, exigindo um tempo um pouco maior na retirada de escoramentos, porém este não é um fator limitador para a maioria das obras. O que tem faltado aos construtores é um maior conhecimento das vantagens dos cimentos da classe CP 40 e do tipo CP III para tirar o melhor proveito dessas vantagens.

O cimento CPIII 40 selecionado para os testes foi fornecido pela empresa fabricante e pertencem a um mesmo lote de produção. Para este trabalho foram considerados os resultados de ensaios realizados pelo fornecedor de cimento.

Areia – As duas areias utilizadas em todos os testes são areias de cava de mesma procedência, tendo sido fornecidas secas e selecionadas, pela empresa pela Jundu Mineração.

Apesar de nos canteiros de obra as areias não serem usualmente selecionadas e secas, o uso dessas areias, de características regulares, foi com o objetivo de que as principais diferenças observadas entre os traços não sofressem nenhuma interferência de variação de qualquer componente do traço, exceto o cimento.

Brita - A brita utilizada em todos os testes foi uma brita fornecida em uma única vez por um revendedor da região de Itaquaquetuba SP. A composição granulométrica indicou uma brita de características de mescla de brita 1 e brita 2. Como já citado, devido ao alto grau de impregnação de pó de pedra misturado à brita, o que poderia provocar uma grande alteração nos resultados, por essa razão foi decidido lavar toda a brita antes das realizações dos ensaios de laboratório.

Água - A água utilizada em todos os testes realizados foi a água disponível no laboratório da empresa BAUTECH Ltda., que é proveniente da rede de abastecimento municipal de Itaquaquecetuba SP, o que dispensou a realização de testes de avaliação.

5.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Todo o trabalho de ensaios físicos foi desenvolvido no laboratório de concreto da empresa Bautech Ltda em Itaquaquecetuba SP, porém as análises granulométricas das britas e areias utilizados foram feitas no laboratório de materiais de construção da Universidade Federal Fluminense. Antes do início dos testes toda matéria prima utilizada nos ensaios foi armazenada no laboratório da Bautech e amostras das matérias primas foram enviadas ao laboratório da Universidade Federal Fluminense.

Caracterização das Amostras de Aditivos - As principais características dos aditivos: densidade, pH e teor de sólidos, foram fornecidas pelo fabricante e somente feita a checagem do pH dos aditivos antes de cada etapa de uso para avaliar se não havia sinais de deterioração do produto por ação de bactérias. Foi observado também que os aditivos apresentavam um aspecto homogêneo e sem segregação.

Caracterização das Amostras de Cimento - Para o cimento, foram adotados os resultados de análise fornecidos pelo fabricante Holcin, com as seguintes características: resistência à compressão axial, superfície específica (Blaine) e tempos de início e fim de pega. Com estes dados já foi possível posicionar o cimento em sua classe de resistência para a determinação da composição do concreto de referência e avaliar os impactos, das dosagens de aditivos, nos retardamentos de fim de pega das amostras ensaiadas.

Caracterização das Amostras de Agregados - As caracterizações das amostras de agregados miúdos e graúdos foram feitas de acordo com a norma ABNT NBR 7211/ 2005 – Agregados para concreto – Especificação.

Os dois agregados miúdos selecionados foram fornecidos beneficiados e secos. Devido ao controle de qualidade exercido pelas mineradoras, fornecedoras do material, e pelo histórico de uso destes agregados pela empresa Bautech, foram dispensados os testes de substâncias nocivas que envolvem a detecção de: Torrões de argila e materiais friáveis; materiais carbonosos; materiais finos e impurezas orgânicas. Testes de reatividade álcali-agregado, teor de cloretos e teor de sulfatos também foram dispensados. A massa específica foi fornecida pelos fornecedores, sendo 2.650 kg/m³ para ambos agregados. O único teste

realizado com os agregados miúdos foi o estabelecimento da distribuição granulométrica de acordo com a ABNT NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

- Granulometria - Este ensaio foi feito com o uso da série de peneiras, de malha quadrada, definida pela norma NBR 7211, nas seguintes faixas de granulometria, com a abertura da malha em mm:

Agregado graúdo: 38 – 25 - 19 – 12,5 – 6,3 – 4,8

Agregado miúdo: 4,8 – 2,4 – 1,2 – 0,6 – 0,3 – 0,15

- Módulo de finura - Para determinação do módulo de finura, primeiramente foi obtida a curva granulométrica da areia, pela NBR NM 248:2003 AGREGADO – Determinação da composição granulométrica.

O conhecimento do módulo de finura do agregado miúdo é importante no processo de dosagem e é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Classificação: Módulo de Finura

$$MF = \frac{\sum(\%retidaAcumulada)}{100} \quad (\text{Equação 5.1})$$

No procedimento de dosagem adotado neste trabalho, o módulo de finura é considerado no item: Relação agregado miúdo/agregado total, na determinação do teor de agregado miúdo na composição do concreto, como um elemento diferenciador dos índices percentuais de agregados miúdos em relação ao teor total de agregado na composição do concreto. Em canteiro não tendo como determinar a granulometria da areia, na maioria dos casos, pequenos ajustes na confecção do primeiro traço são suficientes para compensar esta análise.

- Teor de umidade - Os agregados miúdos foram fornecidos secos e beneficiados, sendo assim somente o agregado graúdo teve sua umidade determinada em estufa segundo a

norma NBR 9939 – Agregados – Teor de umidade total, por secagem, em agregados graúdos.

Caracterização das Amostras de Água - Como a água utilizada nos ensaios era de uso corrente na indústria, potável e sem histórico de variações importantes, foram dispensadas análises.

5.3 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS SELECIONADOS

Abaixo seguem as características de cada uma das matérias primas selecionadas para os ensaios.

Aditivo Plastificante - O aditivo plastificante à base de lignosulfonato de cálcio apresentou as características mostradas no Quadro 5.1:

pH: 7,0	densidade: 1,18 g/cm ³
teor de sólidos: 40,0%	cor: castanho

Quadro 5.1: Características do aditivo plastificante informadas pelo fabricante.

Aditivo Polifuncional - O aditivo polifuncional, à base de lignosulfonato de cálcio e polinaftaleno sulfonato de sódio, apresentou as características mostradas no Quadro 5.2:

pH: 7,0	densidade: 1,18 g/cm ³
teor de sólidos: 40,0%	cor: castanho

Quadro 5.2: Características do aditivo polifuncional informadas pelo fabricante.

Cimento Portland - O cimento Portland selecionado foi o CPIII 40 e a Tabela 5.1 apresenta os resultados de testes fornecidos pelo fabricante para o cimento e argamassa padrão de resistência com água/cimento 0,45:

Tabela 5.1: Relatório de ensaios de cimento

Relatório De Ensaios De Cimento			
tipo / classe : CP III 40 RS – médias de 15/12/2009 à 05/01/2.010			
Blaine (m ² /kg)	Início de Pega (min.)		Fim de pega (min.)
4483	186		246
R 1 dia (MPa)	R 3 dias (MPa)	R 7 dias (MPa)	R 28 dias (MPa)
10,1	25,4	37,4	47,9

Areia - Apesar de as areias terem sido pesadas separadas durante os ensaios, pois foram utilizadas duas areias beneficiadas, a análise laboratorial foi feita com ambas areias pré-misturadas em igual proporção.

A mescla das areias utilizadas apresentou a curva granulométrica mostrada na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Curva granulométrica da areia.

malha	Peso Ret. (gr)	% Retido	% Retido Acumulado
4,8 mm	2,4	0,2	0,2
2,4 mm	12,75	1,3	1,5
1,2 mm	85,57	8,6	10,1
0,6 mm	269,2	26,9	37,0
0,3 mm	599,95	60,0	97,0
0,15 mm	28,82	2,9	99,9
	0,82	0,1	100,0
	999,25		

Módulo de Finura: $MF = (0,2 + 1,5 + 10,1 + 37,0 + 97,0 + 99,9) / 100 = 2,46$

Brita - A análise granulométrica da brita utilizada é mostrada na Tabela 5.3, o que a classifica como uma mescla de britas 1 e 2:

Tabela 5.3: Curva granulométrica da brita.

malha	Peso Ret. (g)	% Retido	% Retido Acumulado
38 mm	-	-	-
25 mm	10,65	0,2	0,2
19 mm	1.897,03	37,94	38,14
12,5 mm	2.994,09	59,88	98,0
6,5 mm	77,85	1,56	99,6
4,8 mm	16,35	0,33	99,9
Fundo	3,21	0,06	100,0
acumulado	4.999,18		

6 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os ensaios físicos e mecânicos realizados obedeceram as determinações das normas brasileiras vigentes e a metodologia adotada. Para os ensaios físicos e mecânicos realizados foi utilizado o traço de concreto de referência com f_{ck} 25,0 MPa, com britas 1 e 2, abatimento (slump) 60 mm e desvio padrão de 4,0 MPa, considerando que todas as dosagens foram feitas em peso e a umidade dos agregados foi conhecida.

6.1 COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DE CONCRETO E CONDIÇÕES DE ENSAIOS

No caso do traço da amostra de concreto de referência adotada (Quadro 6.1), foi feito um ajuste na quantidade de água. Como a areia utilizada foi uma areia beneficiada e principalmente porque foi adotado o procedimento de lavar toda a brita antes dos ensaios, o que eliminou todos os finos, houve uma maior folga na quantidade de água em relação à estimada no procedimento de cálculo adotado, por este motivo, após alguns ensaios de ajuste, foi feita uma correção na quantidade de água e também da quantidade de cimento para não alterar muito o fator água/cimento estabelecido no cálculo.

A brita utilizada foi fornecida com muita impregnação de pó de pedra e este descontrole da presença de finos certamente iria influenciar os resultados, assim, foi decidido realizar a lavagem de toda brita antes de cada um dos ensaios, conforme já foi citado neste trabalho. Nos ensaios de determinação da umidade da brita em estufa, após a lavagem, esta umidade foi avaliada em cerca de 1,0% do massa total das amostras de brita. Para se manter o fator água/cimento adotado para todos os traços, essa quantidade de água relativa ao peso de água, presente na brita, foi reduzida da água total do traço.

A limpeza da brita, apesar de não ser uma realidade nos canteiros de obra, evitou que a influencia dos finos, presentes na maioria das vezes nas pilhas de agregados graúdos em teores variados, promovessem uma variação muito grande nos resultados de incremento de

plasticidade, já que esse trabalho é uma avaliação de desempenho dos aditivos em função da variação de dosagem. Todavia deve-se ter em conta que as necessidades de água, em função da granulometria do agregado graúdo e do abatimento desejado, nas condições normais de canteiro, com a brita impregnada de pó de pedra deve ser o consumo indicado na Tabela A1.1 do Apêndice 1 desse trabalho, por se aproximar mais das condições de canteiro.

O procedimento de cálculo para determinação do primeiro traço para a amostra do concreto de referência encontra-se no Apêndice 1, assim como o cálculo do ajuste realizado para determinação do traço definitivo para este concreto.

Materiais	kg / m ³	kg / 33 l
Cimento CPIII 40	321	10,59
Areia Fina Beneficiada	444	14,65
Areia Média Beneficiada	444	14,65
Britas 1 e 2 (pré misturadas)	1052	34,73
Água (original)	173	5,71
Fator água/cimento: 0,538		
Teor de argamassa: 53,5%		

Quadro 6.1: Composição e características do traço definitivo da amostra do concreto de referência.

Em função da umidade da brita ter sido avaliada em 1,0%, durante os ensaios houve uma correção da quantidade de água no traço adotado.

$$\text{Correção da água: } 5,71 - 0,35 = 5,36 \text{ litros}$$

Todas as dosagens foram controladas em peso com variações de dosagens de no máximo 5 gramas para o cimento e os agregados, 2 gramas para a água e 0,1 grama para as dosagens de aditivo.

Nos ensaios realizados foram utilizadas duas areia fornecidas beneficiadas e secas, por esta razão não foi necessário ensaios de umidade das areias antes das dosagens.

Todas as amostras de concreto foram feitas em uma betoneira de 150 litros marca Menegotti e os componentes do concreto foram pesados e acondicionados em sacos antes dos ensaios. A colocação dos materiais e os procedimentos de cada mistura destas amostras obedeceram ao descrito na metodologia deste trabalho.

6.2 PRIMEIRA ETAPA

Na primeira etapa para avaliação da influência de diferentes dosagens, de ambos aditivos e seleção da melhor dosagem, foram realizadas vinte e quatro amostras, de 33 litros de concreto cada, divididas em quatro baterias de ensaio, de acordo com o descrito na metodologia.

Os ensaios da primeira etapa, para a avaliação da variação da plasticidade de cada dosagem de cada aditivo testado em relação à amostra de concreto de referência, foram feitos em quatro dias, tendo sido uma bateria completa por dia. Os dois primeiros dias foram para a avaliação das cinco dosagens de aditivo plastificante e os outros dois dias, espaçados dos primeiros em uma semana, dedicados às cinco dosagens do aditivo polifuncional. Procurou-se concentrar ao máximo a execução dos ensaios para buscar as condições de umidade relativa do ar e temperaturas próximas, entre si, evitando erros de interpretação, mesmo assim a vinda de uma frente fria no último dia de avaliação dos aditivos polifuncionais, provocou uma pequena variação no processo de pega e endurecimento de algumas amostras.

Na primeira bateria de ensaios foram realizados seis amostras de concreto sendo uma do concreto de referência e os demais com dosagens de aditivos plastificantes na seguinte seqüência: 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,55% e 0,8% sobre a massa de cimento. Os testes realizados nesta primeira bateria foram:

- consistência inicial;
- moldagem de seis corpos de prova;
- manutenção da trabalhabilidade, conforme descritos no capítulo de metodologia.

Na segunda bateria de ensaios, da primeira etapa, também foram realizadas seis amostras com as mesmas dosagens de aditivo plastificante que na primeira bateria e foram feitos ensaios de:

- consistência inicial;
- massa específica do concreto;
- teor de ar incorporado;
- Moldagem de seis corpos de prova, como na mistura anterior para avaliação da resistência à compressão axial.

Na terceira e a quarta bateria foram repetidos, na mesma sequencia, os ensaios realizados na primeira e na segunda bateria respectivamente, porém o aditivo utilizado foi o polifuncional nas dosagens: 0,3%,0,5%; 0,7%; 0,9% e 1,2%, conforme descrito na metodologia.

Após a execução e resultados dos ensaios, para avaliação dos efeitos das dosagens de ambos aditivos sobre a plasticidade e demais características do concreto da amostra de referência, foram selecionadas as duas dosagens que apresentaram o melhor desempenho, uma do aditivo plastificante e outra do polifuncional, para a execução da segunda etapa do trabalho.

6.2.1 Resultados médios da primeira e da segunda bateria de ensaio

A seguir são apresentados os resultados médios dos ensaios das duas primeiras baterias referentes a serie de dosagens com o aditivo plastificante e das amostras de concreto de referência sem aditivo. Nos apêndices 2 a 7 são encontrados os detalhes de cada ensaio realizado.

6.2.1.1 Consistência inicial

O primeiro ensaio avaliado é o de consistência inicial determinado pelo ensaio de abatimento do tronco de cone de todas as amostras realizadas. Na Figura 6.1, o eixo das ordenadas corresponde aos abatimentos médios em milímetros das amostras, das duas baterias, referentes às dosagens de aditivos sobre a massa de cimento indicada no eixo das abscissas.

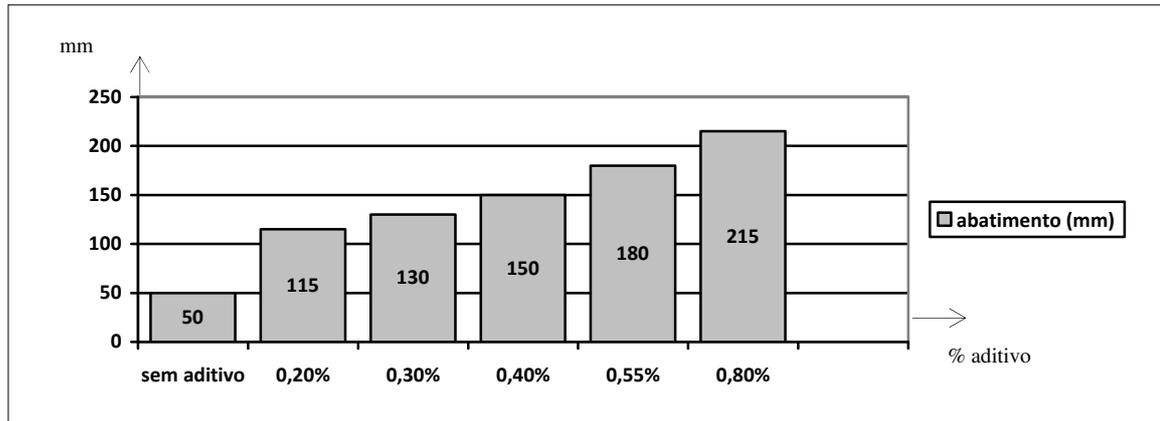


Figura 6.1: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone.

O que é notável é que mesmo com a menor dosagem o aumento do abatimento foi superior a 100% comparado a amostra de concreto sem aditivo. Todas as amostras não apresentaram segregação.

6.2.1.2 Consistência após 45 minutos

Os ensaios de avaliação da consistência pelo abatimento do tronco de cone após 45 minutos foram feitos mantendo-se os materiais na betoneira em movimento até o momento dos ensaios. Como na Figura 6.1, no eixo das ordenadas são apresentados os abatimentos médios em milímetros e no eixo das abscissas as dosagens do aditivo.

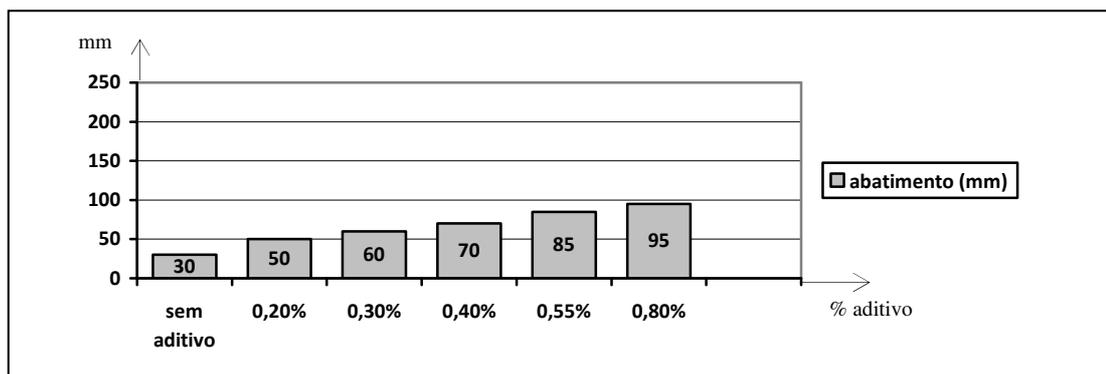


Figura 6.2: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone após 45 min.

O que se observa é que em todas as dosagens, a consistência após 45 minutos foi próxima dos 50% da consistência inicial.

6.2.1.3 Teor de ar incorporado médio e massa específica

Para uma melhor avaliação da influência das diferentes dosagens, junto aos ensaios de teor de ar incorporado médio, foram realizados os ensaios para aferição da massa específica média das amostras de concreto, cujos resultados em série, devem apresentar similaridades proporcionais aos resultados dos teores de ar incorporado.

Na Figura 6.3, os teores de ar incorporado estão representados no eixo das ordenadas e as dosagens de aditivos estão no eixo das abscissas.

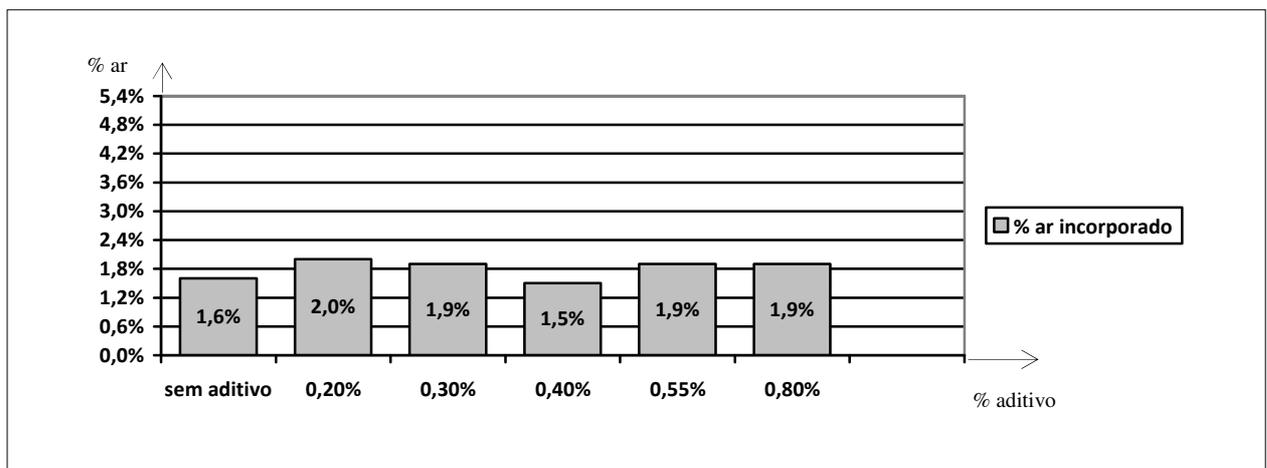


Figura 6.3: Resultados médios do teor de ar incorporado das amostras.

Os teores de ar incorporado apresentaram muito pouca variação, mesmo em dosagens elevadas como 0,8% sobre a massa do cimento. Isto é resultado da boa interação do desareante presente na composição do aditivo.

Na Figura 6.4, a massa específica é representada em kg/m^3 , indicada no eixo da ordenadas e a amostra do concreto de referência e as diferentes dosagens dos aditivos no eixo das abscissas.

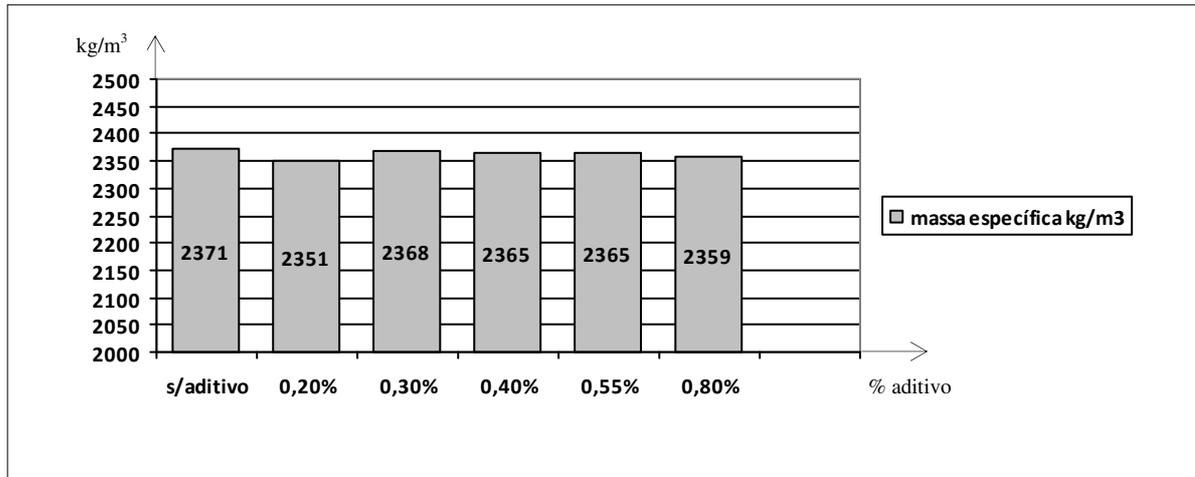


Figura 6.4: Resultados médios de massa específica do concreto.

Como nos teores de ar incorporado, a variação de densidade entre as amostras foi mínima, mostrando que no caso desse aditivo a incorporação de ar não é um limitador de dosagem, pois mesmo sob altas dosagens houve muito pouca influência do aditivo.

6.2.1.4 Resistência à compressão axial em 24 horas.

Nas primeiras idades a dosagem de aditivo tem forte influência sobre o crescimento de resistência do concreto. Na Figura 6.5, as resistências à compressão axial estão no eixo das ordenadas, com valores expressos em MPa.

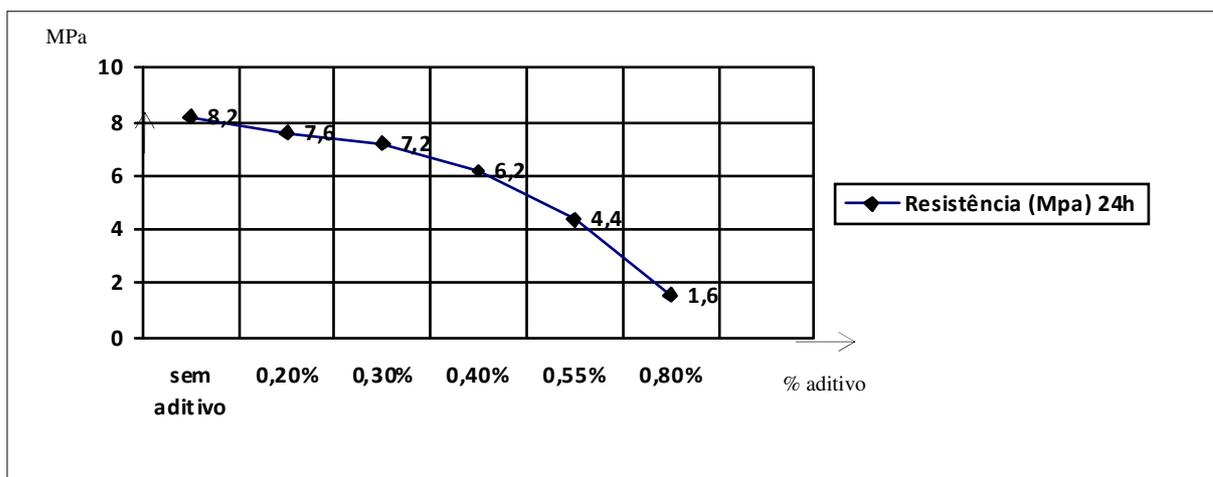


Figura 6.5: Resultados de resistência à compressão axial em 24 h.

As resistências à compressão axial de todas as amostras dosadas com aditivos foram inferiores às amostras sem aditivos. Isso ocorre devido ao retardamento promovido pelos

aditivos que quanto maior a dosagem, menores serão os resultados de resistência nas primeiras idades.

6.2.1.5 Resistência à compressão axial em 7 dias

Nessa idade o concreto feito com cimento CPIII 40 já alcança mais de 70% da provável resistência aos 28 dias e os efeitos de retardamento dos aditivos já não influenciam os resultados de forma notável.

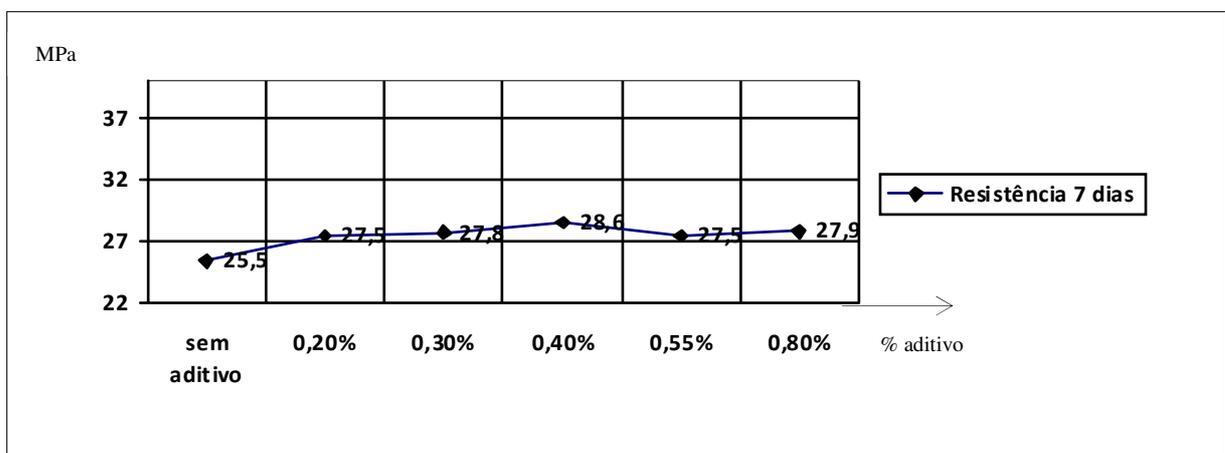


Figura 6.6: Resultados de resistência à compressão axial em 7 dias.

As diferenças de resistência são pequenas, destacando-se somente o resultado das amostras sem aditivo que já apresenta perdas de resistência em relação aos demais resultados.

6.2.1.6 Resistência à compressão axial em 28 dias

Na Figura 6.7, já se pode avaliar a influência das diversas dosagens sobre a amostra de concreto padrão.

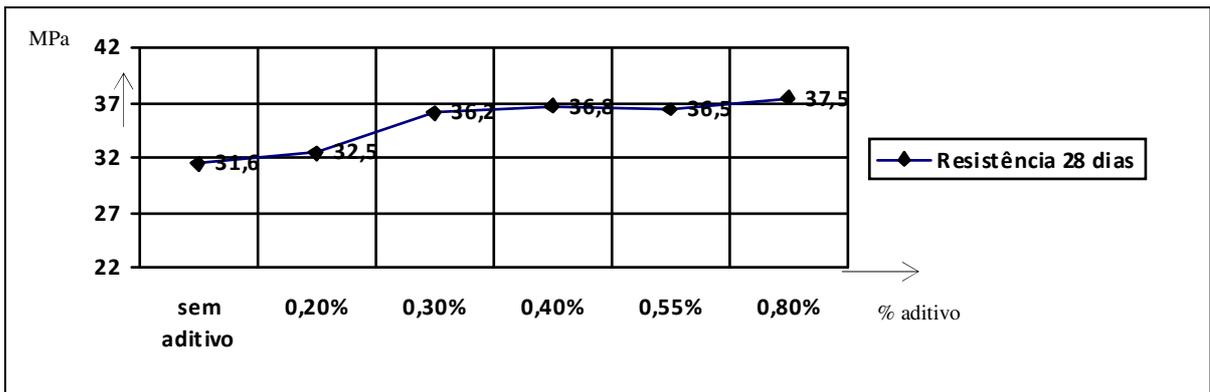


Figura 6.7: Resultados de resistência à compressão axial em 28 dias

O salto nas resistências das dosagens sem aditivo para o concreto aditivado já demonstram o ganho de qualidade que pode ser obtido com o uso de aditivos. Os resultados com 0,55% e 0,8% foram muito bons, mas essas dosagens afetaram muito o fim de pega do concreto, como será visto a seguir.

6.2.1.7 Observação do retardamento do final de pega

No dia posterior aos ensaios, as amostras foram observadas para avaliar se o concreto já estava em processo de endurecimento. O parâmetro adotado foi o de identificar as amostras que apresentassem um retardamento superior a 15 h, identificadas na Figura 6.8 no eixo das ordenadas, para as dosagens de aditivo correspondentes no eixo das abscissas.

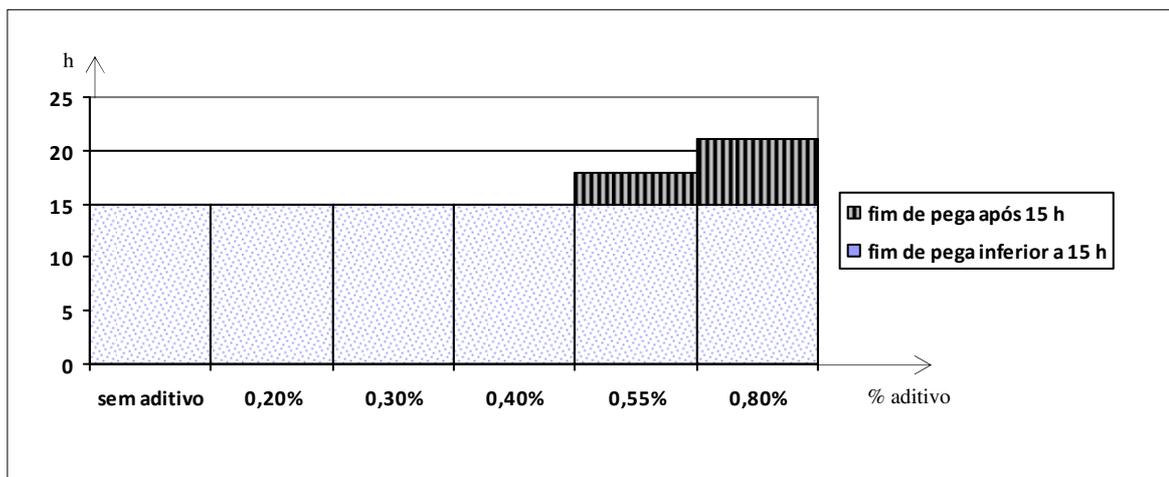


Figura 6.8: Tempo de fim de pega do concreto.

As dosagens de 0,55% e 0,8% sobre a massa do cimento ultrapassaram às 15 horas determinadas como limites para os retardamentos de fim de pega.

6.2.2 Comentários sobre as dosagens da primeira e da segunda bateria de ensaio com aditivo plastificante.

Diferentemente de muitos aditivos a base de lignosulfonatos o aditivo testado não apresentou incremento de ar incorporado ao concreto. A limitação de dosagem, neste caso, deve ser baseada no retardamento do fim de pega do concreto. Considerando que este concreto foi executado no mês de janeiro sob temperaturas acima de 20 °C, mesmo durante a noite, o risco de ocorrer retardamento sob dosagens acima de 0,55% é bem maior sob condições de temperaturas mais baixas durante outros períodos do ano, sendo assim ficam descartadas, exceto quando a temperatura estiver elevada, as dosagens superiores a 0,5% do peso do cimento, principalmente quando o cimento for do tipo CPIII, que por ter um teor mais elevado de escória de alto forno, normalmente tem as reações iniciais mais lentas que outros tipos de cimento. O principal cuidado a ser adotado quando ocorrer retardamentos além do previsto é intensificar os trabalhos de cura do concreto e prolongar para períodos mais longos até que o concreto alcance cerca de 70% da sua resistência e dosagem (f_{ck}).

Apesar da não recomendação de dosagens elevadas, de aditivo em função do retardamento, vale à pena observar que como o aditivo plastificante utilizado não provocou a incorporação de ar, a resistência à compressão axial aos 28 dias para a dosagem de 0,8% sobre o peso do cimento foi maior que nas demais dosagens (37,5 MPa). Este efeito está ligado à melhor nucleação do grão de cimento e conseqüente melhor teor de hidratação, já comentados neste trabalho, porém um retardamento excessivo, sem controle, pode representar um risco muito alto no canteiro de obras, devido à exigência de maior cuidado no procedimento de cura, como comentado acima.

Ainda sobre o tema de eficiência na hidratação dos grãos de cimento, é possível observar que, todas as amostras aditivadas tiveram um desempenho de resistência à compressão axial superiores às amostras não aditivadas. Isso é explicado pela melhor dispersão dos grãos de cimento promovida pelo aditivo, com conseqüente melhor hidratação e também, neste caso, pela baixa incorporação de ar promovida pelo aditivo.

Com respeito ao incremento da plasticidade do concreto, todas as dosagens tiveram um desempenho muito bom, inclusive a baixa dosagem de 0,2% sobre o peso do cimento já foi suficiente para quase dobrar o abatimento observado na amostra de concreto sem aditivo.

A manutenção da trabalhabilidade ficou limitada a cerca de 50% do abatimento inicial, na maioria dos casos, o que indica que os tempos de manuseio do concreto devem ser

inferiores aos 45 minutos testados ou deve-se partir de um concreto com abatimento inicial duas vezes superior ao abatimento desejado aos 45 minutos após a adição da água, para que se tenha neste intervalo de tempo a consistência adequada à sua aplicação.

Considerando as limitações provocadas pelo retardamento do fim de pega do concreto, os melhores desempenhos de dosagens estão entre a dosagem com 0,3% e a dosagem com 0,4% em peso de aditivo plastificante sobre o peso do cimento.

As duas dosagens apresentam um resultado médio de resistência à compressão axial muito próximos (36,2 MPa e 36,8 MPa), com diferença menor que 2% já na consistência as dosagens com 0,4% apresentaram um abatimento médio de 15 cm, 15% superior ao abatimento médio de 13 cm obtido com as dosagens de 0,3%.

Tomando por base as considerações acima, foi escolhida a dosagem de 0,4% de aditivo plastificante sobre o peso do cimento, como a dosagem que apresentou o melhor desempenho entre as dosagens testadas, para as condições de ensaios. Outros tipos de cimento e também outros tipos de agregados, podem justificar pequenas variações no desempenho dos aditivos na adequação do concreto às condições de canteiro, por isso a dosagem de 0,4% deve ser tomada somente como um parâmetro de aproximação à melhor dosagem de um aditivo plastificante às condições variadas de materiais disponíveis e canteiro de obra.

Como foi observado diferentemente de muitos aditivos plastificantes à base de lignosulfonatos, o aditivo testado não gerou incorporação de ar significativa, porém quando forem testados outros aditivos plastificantes esta característica tem que ser testada e avaliada. Não havendo o aparelho específico para o teste de teor de ar incorporado, os resultados de resistência à compressão axial podem indicar o excesso de ar, quando existente, pela queda destes resultados.

Quando se quiser adotar uma dosagem de aditivo para um traço determinado, é aconselhável testar no mínimo três dosagens próximas, em cerca de 20% entre si, para se eleger a de melhor desempenho. Desta forma pode-se obter a dosagem que gere o concreto com melhor relação desempenho/custo para uso na obra.

6.2.3 Resultados médios da terceira e quarta baterias de ensaio

Na sequência são apresentadas as tabelas com os gráficos dos resultados médios da série de ensaios das duas baterias finais desta etapa, com o aditivo polifuncional, com a

avaliação parcial de cada ensaio realizado com dosagens variadas do produto em relação ao concreto de referência sem aditivo.

6.2.3.1 Consistência inicial

Como nas primeiras baterias, a consistência inicial é determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone. Na Figura 6.9, o eixo das ordenadas corresponde aos abatimentos médios em milímetros das amostras, das duas baterias, referentes às dosagens de aditivos sobre a massa de cimento indicada no eixo das abscissas.

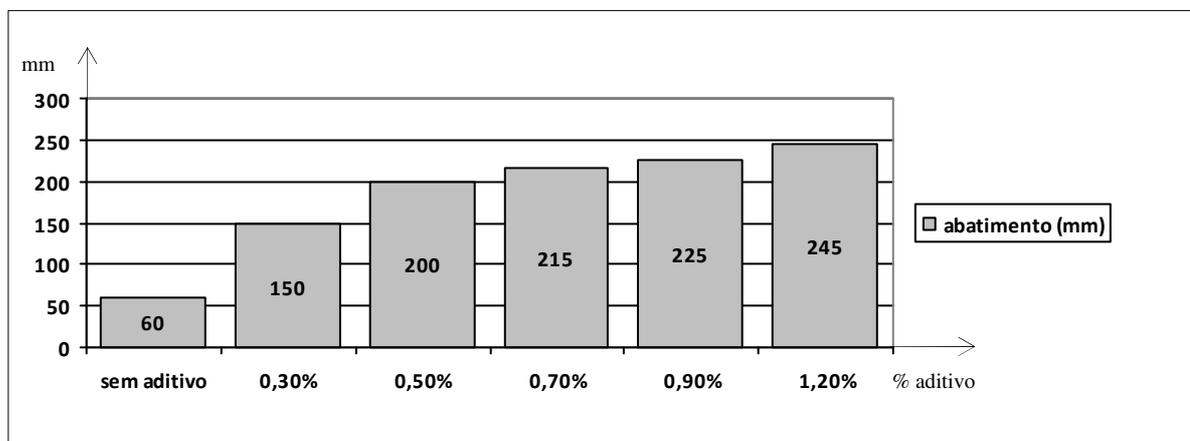


Figura 6.9: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone.

Esta é a característica de maior diferenciação entre o aditivo polifuncional e o plastificante. Enquanto que, com o aditivo plastificante foi atingido no máximo 215 mm de abatimento médio, com o aditivo polifuncional chegou-se a média de 245. Considerando nas condições de ensaio, onde a dosagem escolhida, em função do retardamento, para o plastificante foi de 0,4% sobre o peso do cimento com um abatimento médio de 150 mm, para o polifuncional, a dosagem mínima testada já atingiu o mesmo abatimento.

6.2.3.2 Consistência após 45 minutos

Os ensaios de avaliação da consistência pelo abatimento do tronco de cone após 45 minutos foram feitos mantendo-se os materiais na betoneira em movimento até o momento dos ensaios. Como no ensaio acima, na Figura 6.10, no eixo das ordenadas são apresentados os abatimentos médios em milímetros e no eixo das abscissas as dosagens do aditivo.

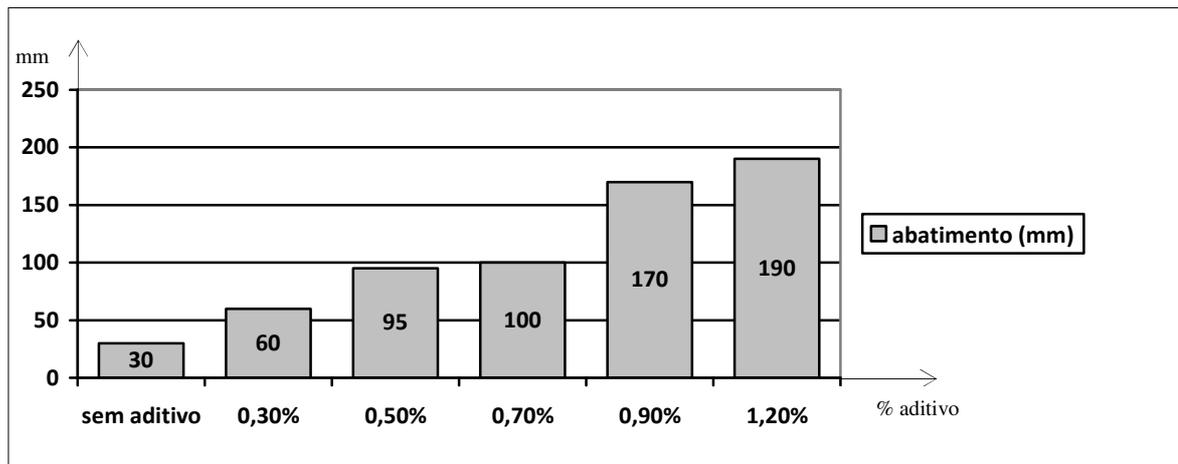


Figura 6.10: Resultados médios de abatimentos de tronco de cone após 45 min.

O que se observa é que, como para os aditivos plastificantes, nas principais dosagens o nível de retenção da consistência foi próximo de 50% após 45 minutos, porém a plasticidade inicial é superior.

6.2.3.3 Teor de ar incorporado médio e massa específica

Junto aos ensaios de teor de ar incorporado médio, foram realizados os ensaios para aferição da massa específica média das amostras de concreto, cujos resultados em série, devem apresentar similaridades proporcionais aos resultados dos teores de ar incorporado.

Na Figura 6.11, os teores de ar incorporado estão representados no eixo das ordenadas e as dosagens de aditivos estão no eixo das abscissas.

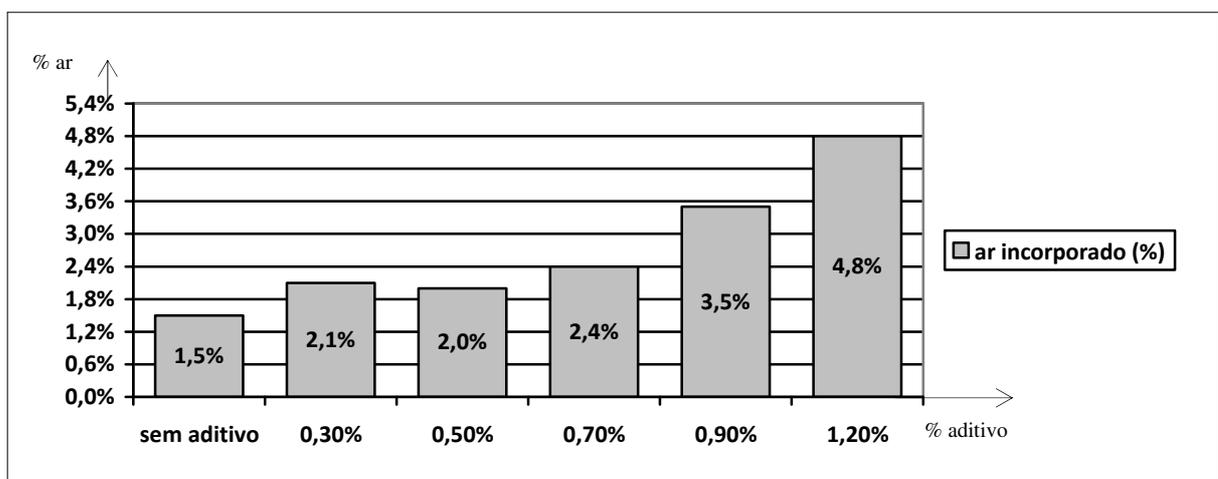


Figura 6.11: Resultados médios do teor de ar incorporado das amostras

Até a dosagem de 0,7%, o teor de ar incorporado é satisfatório. O incremento para dosagens de 0,9% é elevado para um concreto de uso corrente, mas há casos como em concretos de pavimentos ou para situações de congelamento, onde incorporações de até 5% de ar podem ser favoráveis.

Na Figura 6.12, a massa específica é representada em kg/m^3 e é indicada no eixo da ordenadas e as diferentes dosagens do aditivo no eixo das abscissas.

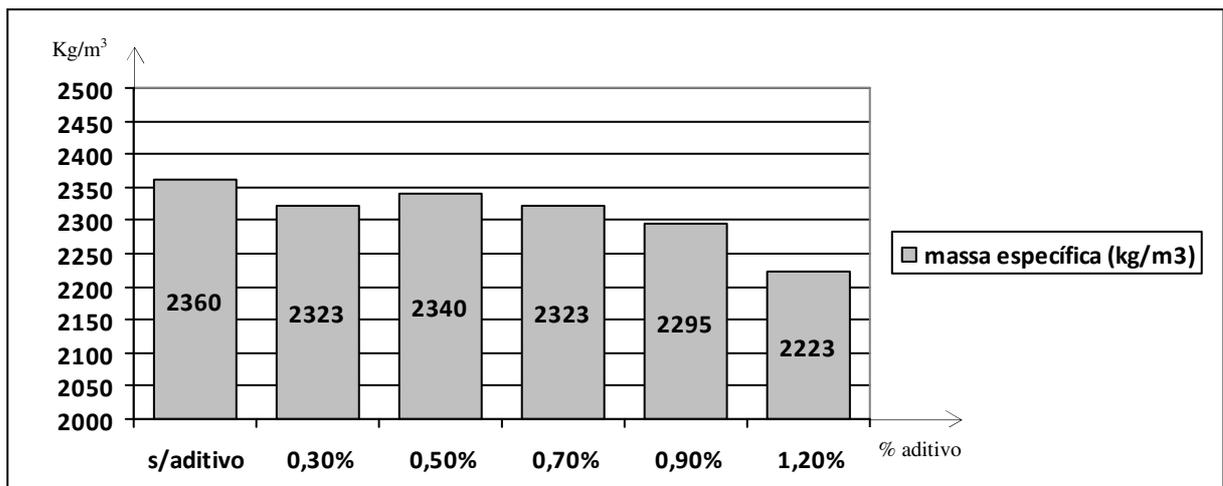


Figura 6.12: Resultados médios de massa específica do concreto.

A variação da massa específica tem correlação com os resultados obtidos nos ensaios de teor de ar incorporado, que é inversamente proporcional ao de massa específica.

6.2.3.4 Resistência à compressão axial média em 24 horas.

Nas primeiras idades a dosagem de aditivo tem forte influência sobre o crescimento de resistência do concreto. Na Figura 6.13, as resistências à compressão axial médias estão no eixo das ordenadas, com valores expressos em MPa. Essa é a mesma orientação para as próximas três tabelas.

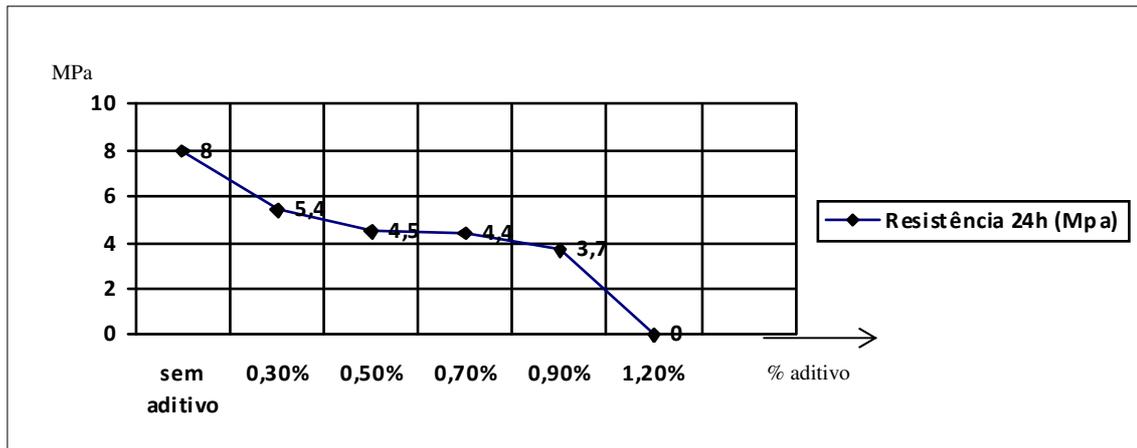


Figura 6.13: Resultados de resistência à compressão axial média em 24 hs.

Como para os aditivos plastificantes, nas primeiras 24 horas, as resistências à compressão axial de todas as amostras dosadas com aditivos foram inferiores às amostras sem aditivos, influenciadas pelo retardamento que provocou inclusive, a nulidade da resistência com dosagem de 1,2% e de uma das amostras com 0,9% do peso do cimento.

6.2.3.5 Resistência à compressão axial média em 7 dias

Nessa idade o concreto feito com cimento CPIII 40 já alcança mais de 70% da provável resistência aos 28 dias e os efeitos de retardamento dos aditivos já não influenciam os resultados de forma notável.

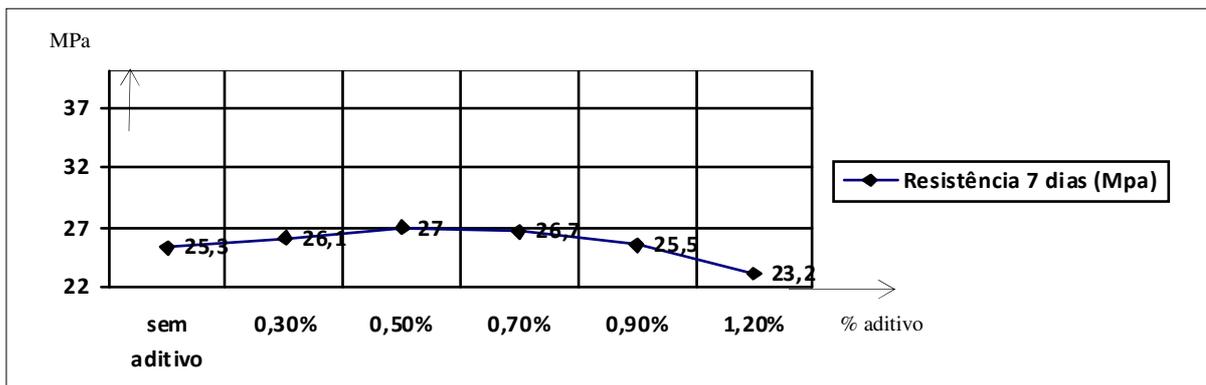


Figura 6.14: Resultados de resistência à compressão axial média em 7 dias.

Os resultados das amostras com 0,9% e 1,2% de aditivo polifuncional sobre o peso do cimento refletem os efeitos da incorporação de ar. As demais dosagens já apresentam, aos 7 dias, superioridade em relação à amostra sem aditivo.

6.2.3.6 Resistência à compressão axial média em 28 dias

Nessa idade, já se pode afirmar, sem muitas alterações futuras, a influência das diversas dosagens, de aditivo polifuncional, sobre a amostra de concreto padrão.

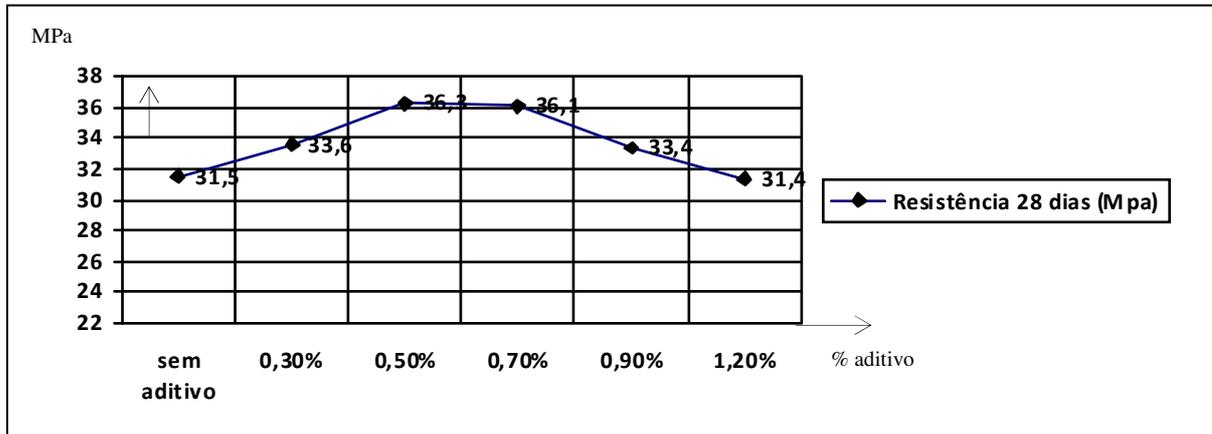


Figura 6.15: Resultados de resistência à compressão axial média em 28 dias.

Da mesma forma que para com os aditivos plastificantes, houve um salto nas resistências das dosagens sem aditivo para o concreto aditivado, porém nesse caso a influência do ar incorporado nas altas dosagens, eliminou os ganhos de resistência. Há de se ter em conta, que os ganhos de plasticidade para iguais resistências entre o concreto aditivado e o concreto sem aditivo foi muito elevado.

6.2.3.7 Observação do retardamento do final de pega

No dia posterior aos ensaios, as amostras foram observadas para avaliar se o concreto já estava em processo de endurecimento. O parâmetro adotado foi o de identificar as amostras que apresentassem um retardamento superior a 15 h., identificadas na Figura 6.16, no eixo das ordenadas, para as dosagens correspondentes, do aditivo, no eixo das abscissas.

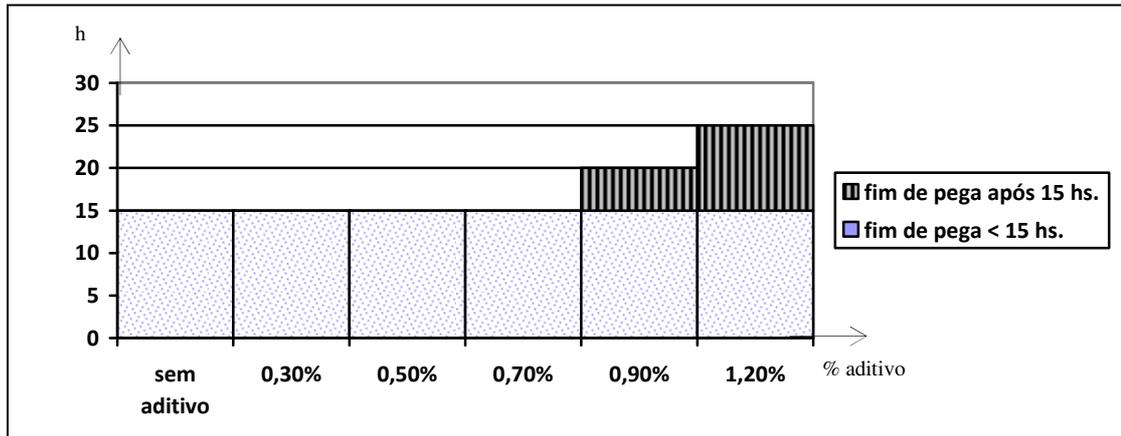


Figura 6.16: Tempo médio de retardamento do fim de pega do concreto

As dosagens de 0,9% e 1,2% sobre a massa do cimento ultrapassaram às 15 horas determinadas, nesse trabalho, como limites para os retardamentos de fim de pega.

6.2.3.8 Comentários sobre as dosagens com aditivo polifuncional

A primeira observação é sobre o efeito do aditivo na consistência do concreto. Mesmo com uma dosagem baixa (0,3%), o efeito de abatimento é mais notável que no plastificante.

Diferentemente do ocorrido no aditivo plastificante testado, que teve suas dosagens limitadas somente em função do retardamento, este aditivo polifuncional terá suas dosagens também limitadas em função do incremento da incorporação de ar, que tem efeito direto sobre a resistência à compressão axial.

Vale notar que mesmo com a dosagem de 1,2%, sobre o peso do cimento, que é uma dosagem elevada, com alta incorporação de ar (4,8%), mas com grande influencia positiva sobre o incremento do abatimento do concreto (elevando o abatimento de 60 mm para 245 mm, comparado ao concreto padrão), não houve perda na resistência mecânica axial média em relação a este mesmo concreto sem aditivo. Isto se deve, como no caso do aditivo plastificante à melhor dispersão e nucleação dos grãos de cimento promovida pelo aditivo, melhorando as condições de hidratação do cimento e só não houve um incremento da resistência devido aos efeitos da incorporação de ar ocorrida. Essa incorporação de ar gerada por alguns aditivos, quando equilibrada com a resistência mecânica axial desejada, pode auxiliar na adequação de traços com agregados de menor compatibilidade granulométrica é o que ocorre, por exemplo, em muitos casos de concretos de pavimentos rodoviários.

Há também casos onde a necessidade de incorporação de ar é imperativa, como, por exemplo, nos casos de concretos de cimento Portland em câmaras frigoríficas ou pavimentos e pisos submetidos a fortes temperaturas negativas.

Os teores de ar incorporado foram superiores aos obtidos com os aditivos plastificantes, porém até a dosagem de 0,7% do peso do cimento, os níveis de incorporação de ar (< 2,5%) estão dentro da expectativa de um concreto tradicional.

Nas dosagens acima de 0,5% todos os resultados de consistência têm abatimentos superiores a 20 cm, o que caracteriza a classificação deste aditivo como um superplastificante, pois tomando-se por base a Tabela A1.1 do Apêndice 1 deste trabalho, de determinação da quantidade de água no traço, a redução de água entre o abatimento de 220 mm e 60 mm que é o abatimento da amostra do concreto de referência é de 209 lts./m³ para 184 lts./m³, ou seja cerca de 12%.

Como nos aditivos plastificantes o primeiro limitador de dosagem foi o retardamento do fim de pega do concreto, ou seja, cerca de 15hs. após a execução das amostras as dosagens de 0,9% e 1,2% ainda não haviam alcançado o fim de pega do concreto, desta forma, as dosagens de aditivos polifuncionais acima de 0,8% devem ser avaliadas com cuidado principalmente sob climas frios e com cimentos lentos como o CP-III e o CP-IV. Outro limitador de dosagem foi a incorporação de ar que mostrou, pelas resistências obtidas, que mesmo sob climas mais quentes e cimentos mais rápidos este efeito tem que ser avaliado em dosagens superiores a 0,7% de aditivo polifuncional.

Também como o ocorrido no aditivo plastificante, a manutenção da trabalhabilidade ficou limitada a cerca de 50% do abatimento inicial, na maioria dos casos, o que indica que os tempos de manuseio do concreto devem ser inferiores aos 45 minutos testados ou deve-se partir de um concreto com abatimento inicial duas vezes superior ao abatimento desejado aos 45 minutos após a adição da água.

As melhores dosagens foram 0,5% e 0,7% sobre o peso do cimento, ficando assim definida como uma boa zona de pesquisa na obtenção da melhor dosagem para um outro traço com tipo de cimento e agregados diferentes do utilizado neste trabalho.

O resultado de dosagem escolhido para representar o aditivo polifuncional na segunda etapa do trabalho foi o de 0,5% sobre o peso do cimento, que apesar de não ter apresentado o mais elevado abatimento, apresentou a melhor resistência mecânica. Em função dos resultados obtidos, a dosagem de 0,6% sobre o peso do cimento seria também uma boa opção

para avaliar a redução do consumo de cimento, porém para aproveitar os resultados já analisados, optou-se pela dosagem de 0,5% sobre o peso do cimento.

Outros aditivos polifuncionais do mesmo fornecedor de aditivos promovem menor incorporação de ar ao concreto, porém foi adotado este aditivo polifuncional, por haver um maior histórico de testes realizados.

6.3 SEGUNDA ETAPA

Na segunda etapa do trabalho, para a avaliação da redução máxima possível do consumo de cimento proporcionada por cada um dos aditivos na dosagem escolhida, e na avaliação da redução parcial deste consumo, foram feitas dez amostras:

- Duas para o concreto de referência (traços 25 e 26);
- Duas para cada dosagem escolhida, do plastificante e do polifuncional, com a redução máxima de água (4 amostras: traços 27 ao 30);
- Duas com as mesmas dosagens de aditivos com a redução parcial de 70% da água (4 amostras: traços 31 ao 34).

As misturas também foram feitas com 33 litros de concreto cada, para se manter as mesmas características da primeira etapa. Os ensaios realizados foram o de consistência pelo abatimento do tronco de cone e a moldagem de seis corpos de prova para rompimento aos pares nas idades de 24 h, 7 dias e 28 dias, para avaliação da resistência à compressão axial.

Todos os ensaios foram feitos em dois dias seguidos, cerca de um mês após a primeira etapa, sob condições climáticas muito próximas e todos os cálculos para redução do consumo de cimento nos traços e os resultados detalhados dos ensaios, estão nos apêndices desse trabalho.

6.3.1 Avaliação da redução máxima de consumo de cimento

O critério adotado para definir a redução máxima de consumo de cimento do traço foi através da redução do consumo de água, possível de ser efetuada, com o uso dos aditivos, para se obter o mesmo abatimento do concreto de referência (60 mm).

Para este cálculo, foi utilizando como referência, o “Quadro de determinação do consumo de água” (Tabela A1.1 – Apêndice 1), que é baseado na relação entre a dimensão

máxima do agregado, que nesse caso é 25 mm, e o abatimento desejado, para se determinar a quantidade de água necessária no traço.

Foi determinada a diferença proporcional de água entre valores médios de abatimento, obtido nos ensaios, das amostras do concreto de referência comparadas com os ensaios das amostras do concreto aditivado. Esta diferença proporcional, entre a quantidade de água indicada na Tabela A1.1, para o abatimento obtido pelo concreto aditivado e a quantidade de água indicada para o abatimento obtido pela amostra de concreto de referência, foi aplicada para se determinar a redução da quantidade de água utilizada nas amostras dos traços aditivados, com o objetivo de obter o mesmo nível de abatimento do traço sem aditivo, ou seja o abatimento de 60 mm.. No caso do aditivo plastificante esta estimativa foi confirmada nos ensaios, mas para o aditivo polifuncional este procedimento mostrou que um novo ajuste poderia ter sido feito, como será visto adiante.

A quantidade de água adotada, para as amostras do concreto de referência de 33 litros, foi de 5,71 litros (173 litros/m^3) e o fator água/cimento: 0,538, sendo o consumo de cimento por traço de 10,59 kg (321 kg/m^3).

A diferença proporcional, na quantidade de água, encontrada entre os dois níveis de abatimento na Tabela A1.1, Apêndice 1, foi retirada dos 173 litros/m^3 do concreto de referência para se atingir o objetivo de se obter o mesmo abatimento com o uso de cada um dos aditivos testados.

No caso da avaliação com redução parcial, que será vista a seguir, não foi utilizada toda a redução possível de água, com o objetivo de se obter apenas parte da redução do consumo de cimento, mas com um nível de plasticidade mais elevado para as amostras de concreto. Foram retirados do traço original, somente, 70% da quantidade proporcional de água encontrada na Tabela A1.1, de determinação da quantidade de água no traço, encontrado no Apêndice 1.

A partir da quantidade de água definida para o traço aditivado e tomando-se por base, como indicador da resistência mecânica axial a ser obtida, o fator água/cimento original (0,538), determina-se a nova quantidade de cimento e compensa-se esta quantidade com areia, para se manter o teor de argamassa original (53,5%).

6.3.1.1 Traço com aditivo plastificante com redução máxima do consumo de cimento.

Para o aditivo plastificante foi escolhida a dosagem de 0,4% do aditivo, em peso sobre a massa do cimento, que apresentou nos ensaios da primeira etapa um abatimento médio de 150 mm. Na Tabela A1.1 – Apêndice 1, para concreto com britas 1 e 2 (\varnothing max. 25,0 mm), a quantidade de água indicada para se atingir 150 mm de abatimento é de 202 litros e a quantidade de água necessária para se atingir 60 mm é 184 litros, sendo assim a diferença é de 8,9% de água.

Transportando-se este percentual para a quantidade de água do concreto de referência, que é de 173 litros/m³ para o abatimento de 60 mm, a quantidade de água estabelecida para o concreto aditivado com 0,4% de aditivo plastificante, com redução máxima da água, foi 8,9% menor que a do traço original, ou seja, 158 litros/m³.

Para a determinação da nova quantidade de cimento, para o concreto aditivado, foi mantido o fator água/cimento original de 0,538, e com a nova quantidade de água (158 litros/m³) foi calculada a nova quantidade de cimento, que foi reduzida de 321 kg/m³ para 294 kg/m³.

Para o traço da amostra aditivada de concreto, a quantidade de cimento foi reduzida de 10,59 kg para 9,70 kg. Para se manter o mesmo teor de argamassa original, a diferença de peso obtida entre as duas dosagens de cimento foi dividida entre as duas areias diferentes do traço.

O Quadro 6.2 mostra a correção do traço para avaliação do desempenho do concreto com 0,4% em peso de aditivo plastificante sobre a massa do cimento:

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	321	444	444	1.052	173	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	294	458	458	1.052	158	1,18

Quadro 6.2: Composição por m³, do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.

Para as amostras de 33 litros as quantidades de materiais são mostradas no Quadro 6.3.

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg)	10,59	14,65	14,65	34,71	5,71	
Concreto c/ aditivo (kg)	9,70	15,11	15,11	34,71	5,21	0,039

Quadro 6.3: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.

A memória de cálculo do traço de concreto com aditivo plastificante, com a redução máxima de água, conforme descrito acima, a partir da composição do concreto de referência, se encontra no Apêndice 16 deste trabalho.

As tabelas a seguir mostram os resultados médios de consistência e resistências à compressão axial, obtidos com as duas amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26) comparadas com as duas amostras de concreto com aditivo plastificante dosado com 0,4% em peso sobre a massa de cimento (amostras 27 e 28), com redução de 8,9% no consumo de cimento e da água. Os resultados individuais de cada amostra estão no apêndice 18 deste trabalho.

6.3.1.1.1 Abatimento inicial

A Figura 6.17 mostra o desempenho das amostras 25 e 26, sem aditivo, comparadas com as amostras 27 e 28 aditivadas.

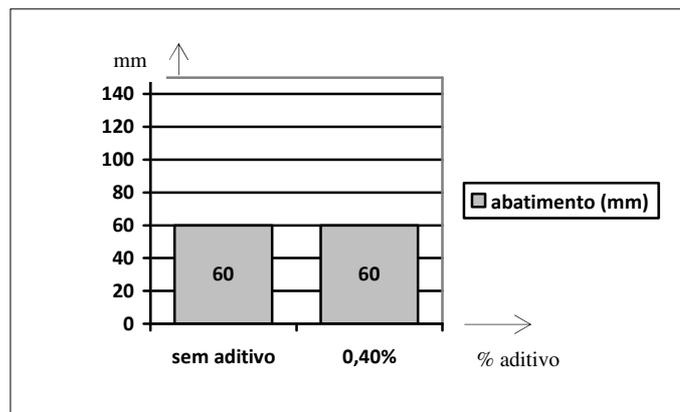


Figura 6.17: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo plastificante.

Com a quantidade de água adotada para as amostras aditivadas, foi possível obter a mesma média, de abatimento do tronco de cone, que a amostra de concreto padrão com 8,9% a mais de água. Isso indica que o cálculo adotado para se obter a mesma consistência, da amostra de concreto padrão, com a redução de água, foi acertado.

6.3.1.1.2 Resistências mecânicas à compressão axial:

Nas Figuras 6.18 à 6.20, são apresentados os resultados médios, das resistências à compressão axial, das amostras testadas, após 1, 7 e 28 dias. Nesse caso, o mais importante

foi avaliar o efeito da redução no consumo de cimento no traço, para validar ou não a dosagem escolhida.

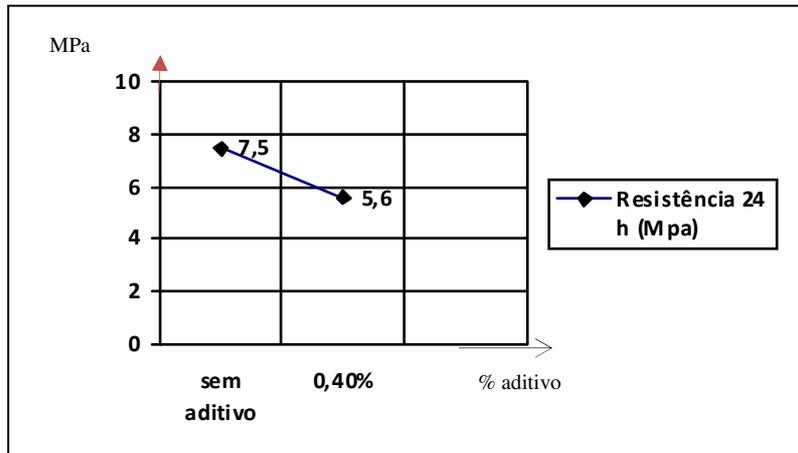


Figura 6.18: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.

Como previsto os resultados de 24 horas em concretos aditivados são sempre inferiores aos obtidos em concretos sem aditivo. Isso se deve aos efeitos retardadores dos aditivos.

Na Figura 6.19 estão os resultados médios de 7 dias de idade das amostras sem aditivo e das amostras com aditivo plastificante.

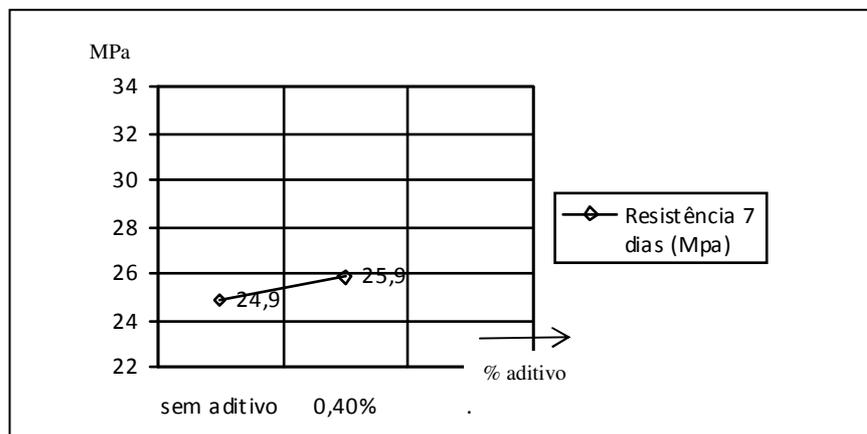


Figura 6.19: Resistência à compressão axial média aos 7 dias.

O resultado médio das amostras aditivadas supera a média das amostras sem aditivo, mesmo com um consumo de cimento 8,9% inferior. Aos sete dias, os efeitos do retardamento não interferiram nos resultados.

A Figura 6.20, mostra os resultados finais, para esse trabalho, da avaliação comparativa entre as amostras testadas.

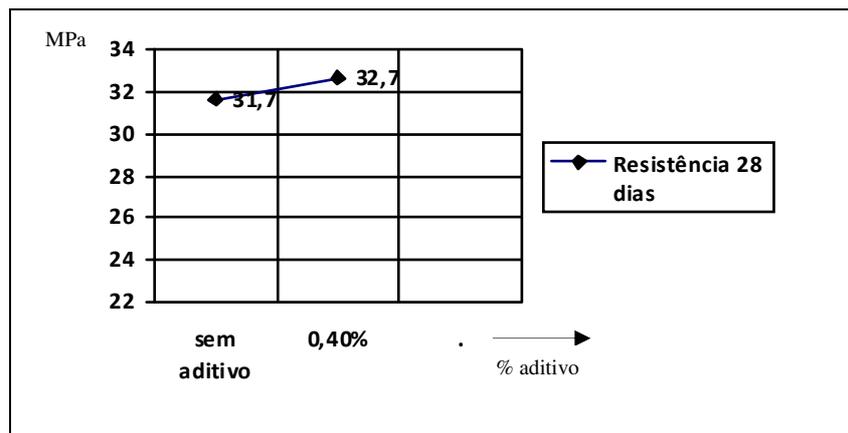


Figura 6.20: Resistência à compressão axial média aos 28 dias.

A “leve” superioridade obtida pelas amostras aditivadas é o aval suficiente para aprovar a redução de cimento adotada, pois a expectativa era de se obter os mesmos resultados.

6.3.1.2 Traço com aditivo polifuncional com redução máxima do consumo de cimento.

Para o aditivo polifuncional foi escolhida a dosagem de 0,5% do aditivo em peso sobre o peso do cimento que apresentou um abatimento médio de 200 mm. No quadro A.1.2 para concreto com britas 1 e 2 a quantidade de água para se atingir 200 mm de abatimento do tronco de cone é de 207 litros e a quantidade de água para se atingir 60 mm de abatimento é 184 litros, uma diferença de 11,1%.

Retirando-se dos 173 litros de água do concreto de referência os 11,1% relativos à redução de água proporcionada pela dosagem de 0,5% do aditivo polifuncional, a quantidade de água no traço do concreto aditivado foi de 154 litros, para se obter o abatimento de tronco de cone de 60 mm com a amostra de concreto aditivado com 0,5% de aditivo polifuncional.

Mantendo-se o fator água/cimento de 0,538, a nova quantidade de cimento no traço aditivado foi de 286 kg/m³ contra os 321 kg/m³ do traço original. Esta diferença, em peso, foi compensada na quantidade de areia, para não reduzir muito o volume do traço e não alterar o teor de argamassa original.

O Quadro 6.4 apresenta a correção do traço para avaliação do desempenho do concreto com 0,5% em peso de aditivo polifuncional sobre a massa do cimento:

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	321	444	444	1.052	173	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	286	462	462	1.052	154	1,43

Quadro 6.4: Composição por m³, do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.

Para as amostras de 33 litros as quantidades de materiais são:

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg)	10,59	14,65	14,65	34,71	5,71	
Concreto c/ aditivo (kg)	9,44	15,25	15,25	34,71	5,08	0,047

Quadro 6.5: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.

A memória de cálculo do traço de concreto com aditivo polifuncional, com a redução máxima de água, conforme descrito acima, a partir da composição do concreto de referência, se encontra no Apêndice 17 deste trabalho.

As tabelas a seguir mostram os resultados médios de consistência e resistências à compressão axial, obtidos com as duas amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26) comparadas com as duas amostras de concreto com aditivo polifuncional dosado com 0,5% em peso sobre a massa de cimento (amostras 29 e 30), com redução de 11,1% no consumo de cimento e da água.

6.3.1.2.1 Abatimento inicial

A Figura 6.21 mostra o desempenho das amostras 25 e 26, sem aditivo, comparadas com as amostras 29 e 30 aditivadas.

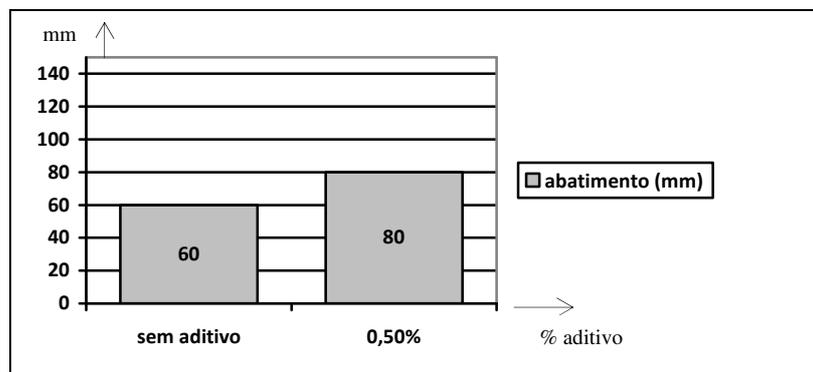


Figura 6.21: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo polifuncional.

O abatimento médio das amostras aditivadas foi superior ao das amostras sem aditivo. O que se pode concluir é que nesse caso, um novo ajuste de dosagem poderia ser realizado retirando-se um pouco mais de água do traço das amostras aditivadas.

6.3.1.2.2 Resistências mecânicas à compressão axial

As Figuras 6.22 a 6.24 mostram a evolução das resistências à compressão axial das amostras testadas, após 1, 7 e 28 dias. Nesse caso, o mais importante é avaliar o efeito da redução no consumo de cimento no traço, para validar ou não a dosagem escolhida.

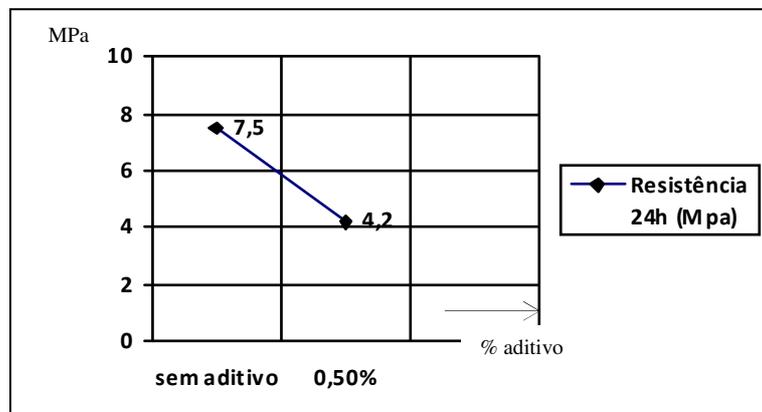


Figura 6.22: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.

Como para os plastificantes, os resultados de 24 horas em concretos aditivados são sempre inferiores aos obtidos em concretos sem aditivo.

A Figura 6.23 mostra os resultados de resistência à compressão axial média aos 7 dias.

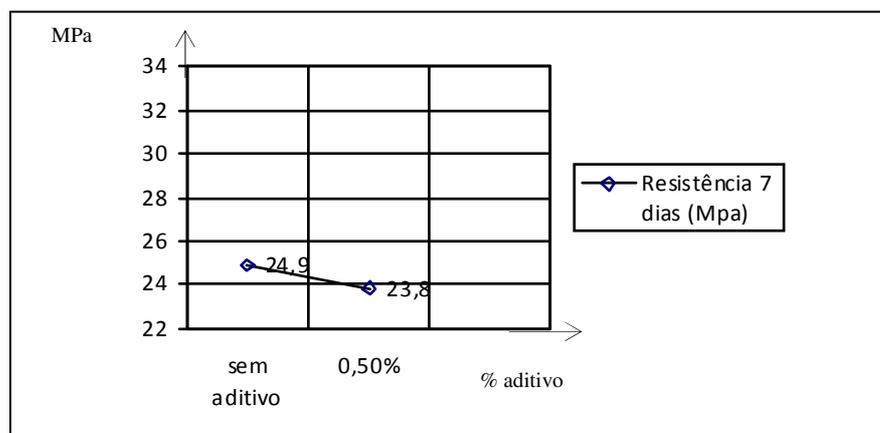


Figura 6.23: Resistência à compressão axial média aos 7 dias, expressa em MPa.

Aos 7 dias a resistência à compressão axial das amostras com aditivo polifuncional ainda não se igualam às resistências das amostras sem aditivo. Pelo resultado final, que será visto a seguir, observa-se que no caso do aditivo polifuncional os efeitos do retardamento tiveram influência nos resultados de 7 dias.

Na Figura 6.24 são mostrados os resultados dos rompimentos aos 28 dias, que são considerados os resultados para análise final nesse trabalho.

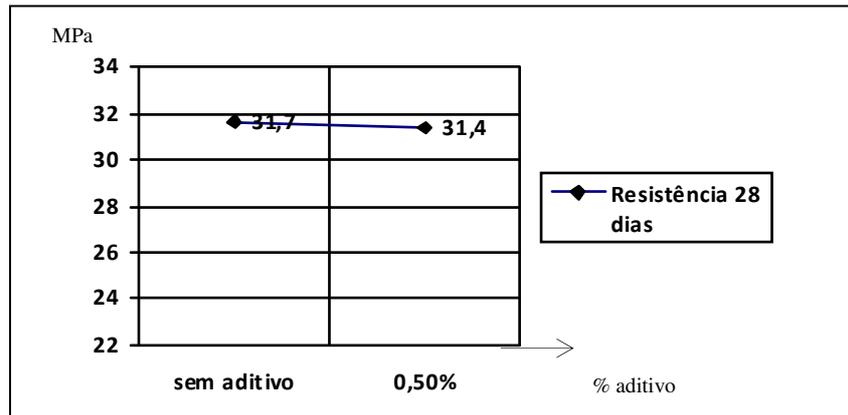


Figura 6.24: Resistência à compressão axial média aos 28 dias, expressa em MPa.

Os resultados médios foram praticamente os mesmos, o que mostra que a redução de cimento foi adequada, porém sem folga.

6.3.1.3 Painel comparativo e comentários sobre as reduções máximas de água

A Tabela 6.1 apresenta o resumo dos resultados médios obtidos nos testes de redução máxima de água e de cimento nos traços dos aditivos testados.

Tabela 6.1: Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e resistências à compressão axial para as amostras do concreto de referência, concretos aditivados com aditivo plastificante e com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% para o aditivo plastificante e 0,5% para o aditivo polifuncional com redução máxima da água.

	slump	R 24 h.	R 7 dias	R 28 dias
	mm	MPa	MPa	MPa
Referência	60	7,5	24,9	31,7
Plastificante (0,4%)	60	5,6	25,9	32,7
Polifuncional (0,5%)	80	4,2	23,8	31,4

A primeira observação sobre o comportamento das amostras utilizando a redução máxima de água adotada é que no caso da dosagem com aditivo plastificante a expectativa de

abatimento do tronco de cone se confirmou, resultando em um abatimento médio de 60 mm, mas com o aditivo polifuncional este abatimento foi superado, chegando à média de 80 mm, o que significa que no caso do uso deste aditivo, a água poderia ter sido reduzida ainda mais, o que poderia proporcionar um reflexo positivo nas resistências mecânicas e/ou na redução do consumo de cimento.

Com respeito às resistências, apesar do retardamento das resistências iniciais dos concretos aditivados em 24 horas, o que é normal no caso de usos de aditivos, o que se observou é que as amostras feitas com aditivo plastificante apresentaram resultados levemente superiores aos demais, o que é fruto da melhor hidratação do cimento associado ao baixo teor de ar incorporado. As amostras feitas com aditivo polifuncional apresentaram resistências mecânicas axiais aos 28 dias semelhantes às do concreto de referência, porém com possibilidades de melhora devido ao abatimento superior como citado acima.

6.3.2 Avaliação da redução parcial de consumo de cimento

A partir da definição da quantidade máxima de água a ser reduzida para cada um dos aditivos, plastificante e polifuncional, nos itens anteriores, foram definidas as novas quantidades de água para cada aditivo, fixada em 70% da redução total adotada.

Com esta redução parcial, foi possível avaliar os efeitos de incremento da plasticidade e manteve-se, como nos testes anteriores, o fator água/cimento original (0,538), para se avaliar também o reflexo, da melhor plasticidade, sobre a resistência mecânica axial das amostras testadas.

Estes testes foram realizados um dia após os testes de redução de dosagem total, desta forma, as amostras testadas foram comparadas às mesmas amostras do concreto de referência feitas no dia anterior (amostras 25 e 26).

6.3.2.1 Traço com aditivo plastificante com redução parcial do consumo de cimento.

Como ficou definido no item 6.3.1.1, que o percentual a ser reduzido de água total foi de 8,9% em função do aditivo plastificante dosado a 0,4% do peso do cimento, neste teste de redução parcial o índice de redução de água foi de 6,2%, correspondente a 70% da redução total. A nova quantidade de água no traço, calculada a partir do traço original com 173 litros, será de 162 litros/m³ e com esta nova quantidade de água, foi avaliado o incremento da

plasticidade através dos ensaios de abatimento do tronco de cone comparando-se com a amostra de concreto de referência. Para o traço da amostra do concreto aditivado a quantidade de água adotada foi de 5,35 litros.

Considerando esta quantidade de água (162 litros/m³) e o fator água/cimento utilizado (0,538), a quantidade de cimento do traço resultou em 301 kg/m³ contra os 321 kg/m³ do traço de referência, uma redução também de 6,2% no consumo de cimento. A quantidade de cimento para o traço para testes foi de 9,93 kg contra 10,59 kg do concreto de referência. Esta quantidade de cimento reduzida foi compensada, em peso com areia, para manter o mesmo teor de argamassa adotado.

O Quadro 6.6 apresenta a correção do traço para avaliação do desempenho da amostra de concreto, com redução parcial da água, com 0,4% em peso de aditivo plastificante sobre a massa do cimento:

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	321	444	444	1.052	173	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	301	454	454	1.052	162	1,2

Quadro 6.6: Composição por m³, do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.

Para os traços de 33 litros as quantidades de materiais são mostradas no Quadro 6.7.

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	10,59	14,65	14,65	34,71	5,71	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	9,93	14,98	14,98	34,71	5,35	0,04

Quadro 6.7: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo plastificante.

A memória de cálculo do traço de concreto com aditivo plastificante, com a redução parcial de água, conforme descrito acima, a partir da composição do concreto de referência, se encontra no Apêndice 19 deste trabalho.

As tabelas a seguir mostram os resultados médios de consistência e resistências à compressão axial, obtidos com as duas amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26) comparadas com as duas amostras de concreto com aditivo plastificante dosado com 0,4% em peso sobre a massa de cimento (amostras 31 e 32), com redução de 6,2% no consumo de cimento e da água. Os resultados individuais de cada amostra estão no apêndice 21 desse trabalho.

6.3.2.1.1 Abatimento inicial

A tabela 25 mostra o desempenho das amostras 25 e 26, sem aditivo, comparadas com as amostras 31 e 32 aditivadas.

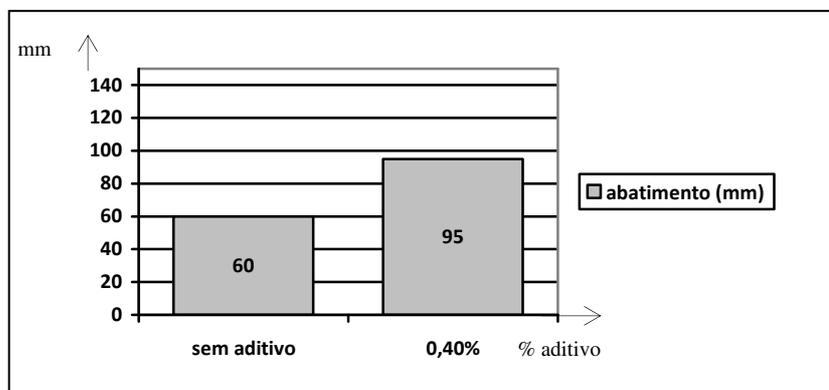


Figura 6.25: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo plastificante.

A redução parcial da água do traço foi responsável por um incremento notável na plasticidade média do concreto.

6.3.2.1.2: Resistências mecânicas à compressão axial:

Na Figuras 6.26 a 6.28 são apresentados os resultados médios, das resistências à compressão axial, das amostras testadas, após 1, 7 e 28 dias. Como todos os traços possuem o mesmo fator água/cimento, o que, teoricamente conduz às mesmas resistências, o objetivo é avaliar o efeito da maior plasticidade sobre a resistência do concreto.

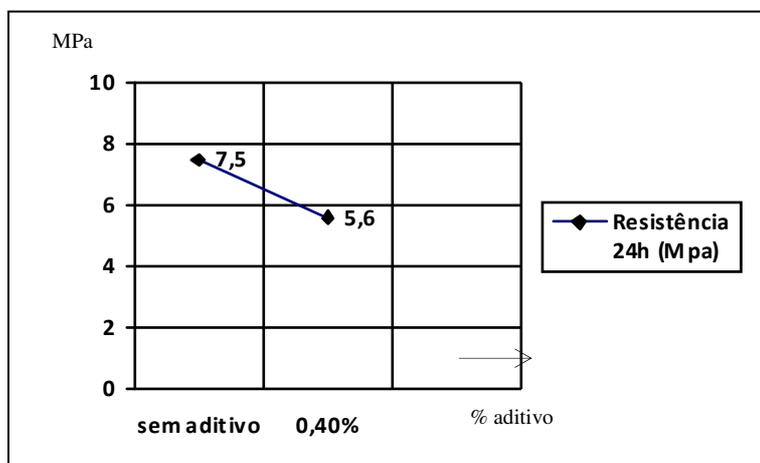


Figura 6.26: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.

Como já comentado, os resultados de 24 horas são sempre favoráveis aos concretos sem aditivo.

Na Figura 6.27 são apresentados os resultados médios de 7 dias de idade das amostras sem aditivo e das amostras com aditivo plastificante.

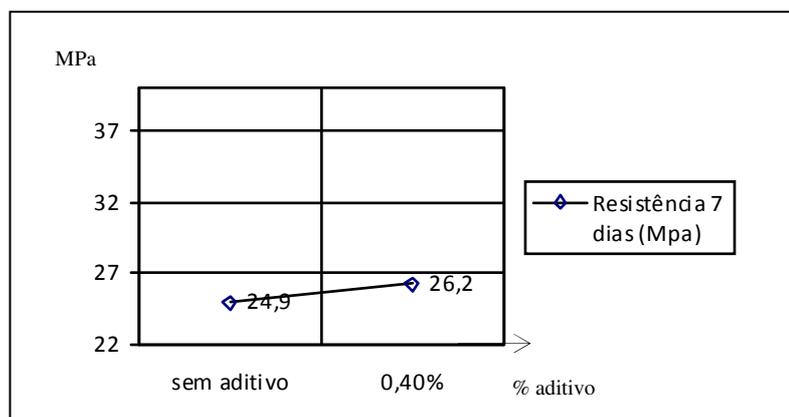


Figura 6.27: Resistência à compressão axial média aos 7 dias.

Como na redução máxima de cimento, os efeitos do retardamento não interferiram nos resultados aos 7 dias e os concretos aditivados apresentaram melhor desempenho.

A figura 6.28 mostra os resultados aos 28 dias de idade.

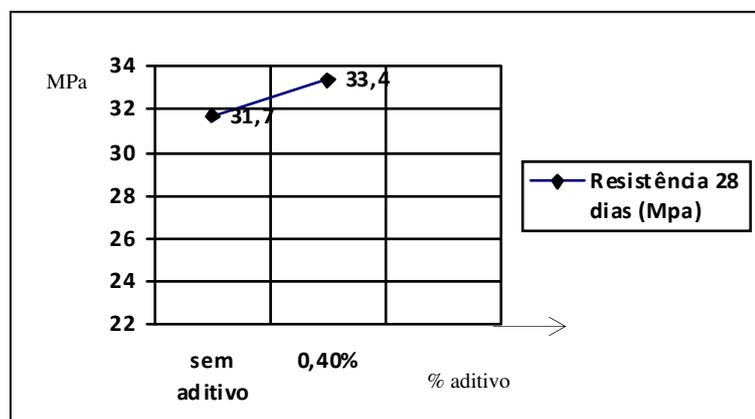


Figura 6.28: Resistência à compressão axial média aos 28 dias.

Apesar de ambos os traços terem o mesmo fator água/cimento, o ganho médio de resistência foi superior a 5%.

6.3.2.2 Traço com aditivo Polifuncional com redução parcial do consumo de cimento

O percentual reduzido de água no item 6.3.1.2 referente à redução máxima de água com uso de aditivo polifuncional dosado a 0,5% do peso do cimento, foi de 11,1%. Nesses ensaios de redução parcial foi adotado o índice de 70% dessa redução, ao que corresponde a uma redução de 7,77%, resultando em um consumo de água de 159 litros/m³ para se obter um concreto com o mesmo nível de resistência do concreto de referência, porém com maior plasticidade. Para o traço da amostra do concreto aditivado a quantidade de água adotada foi de 5,25 litros.

Adotando-se a mesma redução percentual (7,77%) para o cimento, o consumo será de 296 kg/m³. O consumo de cimento para o traço para testes foi de 9,77 kg e essa redução da quantidade de cimento também será compensada com areia, para manter o mesmo teor de argamassa original.

No Quadro 6.8 é mostrada a correção do traço para avaliação do desempenho do concreto com 0,5% em peso de aditivo polifuncional sobre a massa do cimento:

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	321	444	444	1.052	173	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	295	457	457	1.052	159	1,47

Quadro 6.8: Composição por m³, do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.

Para os traços de 33 litros as quantidades de materiais são mostradas no Quadro 6.9.

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto de referência (kg/m ³)	10,59	14,65	14,65	34,71	5,71	
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	9,74	15,08	15,08	34,71	5,25	0,05

Quadro 6.9: Composição das amostras para testes do concreto de referência e do concreto com aditivo polifuncional.

A memória de cálculo do traço de concreto com aditivo polifuncional, com a redução parcial de água, conforme descrito acima, a partir da composição do concreto de referência, se encontra no Apêndice 20 deste trabalho.

As tabelas a seguir mostram os resultados médios de consistência e resistências à compressão axial, obtidos com as duas amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26) comparadas com as duas amostras de concreto com aditivo polifuncional dosado com 0,5% em peso sobre a massa de cimento (amostras 33 e 34), com redução de 7,77% no consumo de

cimento e da água. Os resultados individuais de cada amostra estão no apêndice 21 desse trabalho.

6.3.2.2.1 Abatimento inicial

A Figura 6.29 mostra o desempenho das amostras 25 e 26, sem aditivo, comparadas com as amostras 33 e 34 aditivadas.

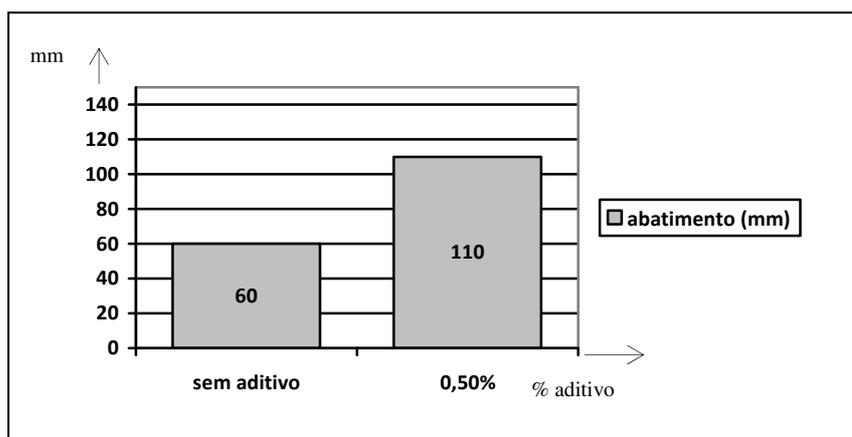


Figura 6.29: Abatimento médio inicial das amostras sem aditivo e com aditivo polifuncional.

O abatimento médio das amostras aditivadas poderia ter sido um pouco menor, entre 80 mm e 100mm. Para isso a quantidade de água no traço seria também menor com reflexos ou na economia de cimento ou no aumento da resistência mecânica do concreto.

6.3.2.2.2 Resistências mecânicas à compressão axial:

As Figuras 6.30 a 6.32 mostram a evolução das resistências à compressão axial das amostras testadas, após 1, 7 e 28 dias. Nesse caso, o objetivo é avaliar o efeito da maior plasticidade sobre as resistências mecânicas do concreto aditivado.

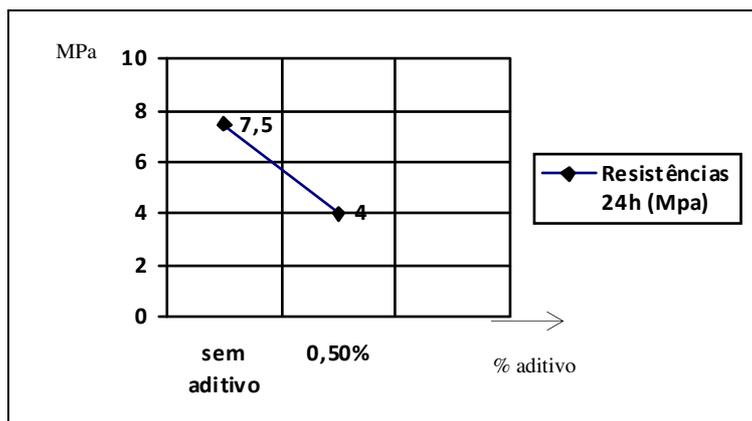


Figura 6.30: Resistência à compressão axial média às 24 horas, expressa em MPa.

São observadas nesse caso as mesmas características de retardamento das resistências mecânicas iniciais, pelo uso do aditivo.

Os resultados de resistência à compressão axial média aos 7 dias são apresentados na Figura 6.31.

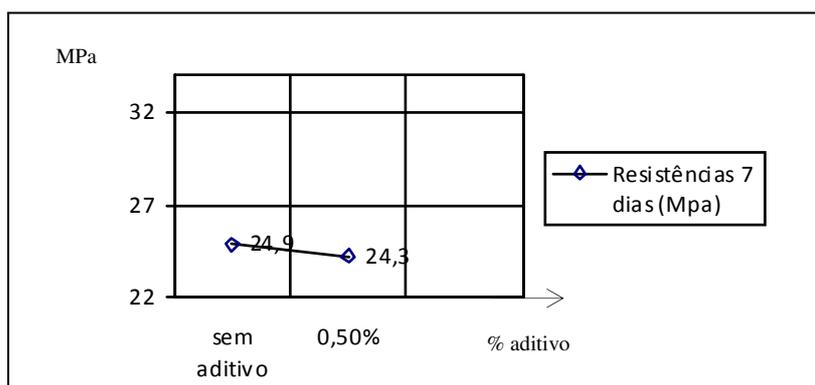


Figura 6.31: Resistência à compressão axial média aos 7 dias, expressa em MPa.

Como na redução máxima de cimento no traço, os efeitos do retardamento tiveram influência nos resultados de 7 dias.

Na Figura 6.32 são mostrados os resultados dos rompimentos aos 28 dias, que são considerados os resultados para análise final nesse trabalho.

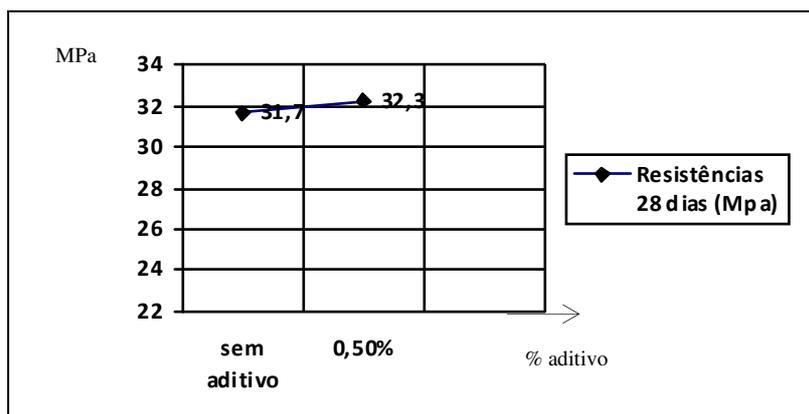


Figura 6.32: Resistência à compressão axial média aos 28 dias, expressa em MPa

Houve uma pequena melhora no resultado médio das amostras aditivadas que associado a elevada plasticidade obtida confere à dosagem um alto grau de segurança.

6.3.2.3 Painel comparativo e comentários das reduções parciais de água

A Tabela 6.2 é o resumo dos resultados médios obtidos nos testes de redução máxima de água e de cimento nos traços dos aditivos testados.

Tabela 6.2: Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e resistências à compressão axial para as amostras do concreto de referência (amostras 25 e 26), concretos aditivados com aditivo plastificante e com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% para o aditivo plastificante (amostras 31 e 32) e 0,5% para o aditivo polifuncional (amostra 33 e 34), com redução parcial (70%) da água.

	slump	R 24 hs.	R 7 dias	R 28 dias
	mm	MPa	MPa	MPa
Referência	60	7,5	24,9	31,7
Plastificante (0,4%)	95	5,6	26,2	33,4
Polifuncional (0,5%)	110	4,0	24,3	32,3

Com o incremento no abatimento de 60 mm para 95 mm, com o uso do aditivo plastificante, o concreto apresentou um ótimo aspecto e muito adequado a maior parte das aplicações em canteiro. Este nível de plasticidade é muito importante na maioria das obras para evitar que os aplicadores alterem a quantidade de água original do traço, adicionando água acima do preconizado, o que não é raro ocorrer em obras onde a supervisão durante as concretagens não é muito rigorosa. Isso mostra que o uso de aditivos favorece a melhoria da qualidade do concreto.

O abatimento de 115 mm, obtido pelo aditivo polifuncional poderia ser reduzido também para o nível de 100 mm, o que resultaria em melhoria da resistência mecânica, no caso de somente a água ser reduzida, ou ainda em uma maior redução no consumo de cimento para se atingir a mesma resistência à compressão axial do concreto de referência.

As resistências mecânicas das amostras aditivadas apresentaram em todos os resultados um desempenho um pouco superior às amostras sem aditivos. Esse desempenho devido à melhor hidratação dos grãos de cimento é também mais um argumento de que o uso de aditivo favorece a melhoria da qualidade do concreto.

7 PAINEL RESUMO DE RESULTADOS

7.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SÉRIE DE DOSAGENS DE ADITIVO PLASTIFICANTE

Resultados médios das amostras com o uso do aditivo plastificante nos ensaios realizados na primeira etapa do trabalho, na avaliação dos efeitos da variação de dosagens sobre a consistência comparadas com o concreto de referência.

Tabela 7.1: Painel de resultados médios dos ensaios com o gradiente de dosagens do aditivo plastificante comparado à amostra de concreto padrão.

	Dosagem					
	Padrão	0,2%	0,3%	0,4%	0,55%	0,8%
Massa Esp. (Kg/m ³)	2.371	2.351	2.368	2.365	2.365	2.359
Ar Incorporado (%)	1,6	2,0	1,9	1,5	1,9	1,9
Endurecimento	normal	normal	normal	normal	retardado	retardado
Slump 0 (mm)	50	115	130	150	180	215
Slump 45' (mm)	30	50	60	70	85	95
R 24 horas (MPa)	8,2	7,6	7,2	6,2	4,4	1,6
R 7 dias (MPa)	25,5	27,5	27,8	28,6	27,5	27,9
R 28 dias (MPa)	31,6	32,5	36,2	36,8	35,5	37,5

Características observadas: A partir de 0,3% de aditivo plastificante, em peso, sobre a massa de cimento, os efeitos de incremento da plasticidade já são muito elevados e foi observada também um incremento de cerca de 10% na resistência à compressão axial nas amostras testadas.

Riscos: As dosagens acima de 0,5% podem provocar um retardamento indesejável e em outros tipos de plastificantes um aumento também na incorporação de ar. Por isto dosagens acima de 0,5% devem ser estudadas rigorosamente antes de postas em uso. Podem ser mesmo muito benéficas sob climas elevados e com cimentos do tipo CPV ou mesmo CPII mais acelerados, mas devem ser sempre pré-avaliadas.

Recomendação: Para definição da dosagem ideal em função do cimento utilizado, das características dos agregados e das condições de trabalhabilidade necessárias para aplicação do concreto, é aconselhável, no caso dos aditivos plastificante, efetuar 3 dosagens, de 0,3% a 0,5% sobre o peso do cimento, para definir a melhor dosagem.

7.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SÉRIE DE DOSAGENS DE ADITIVO POLIFUNCIONAL

Resultados médios das amostras com do aditivo polifuncional nos ensaios realizados na primeira etapa do trabalho, na avaliação dos efeitos da variação de dosagens sobre a consistência comparadas com o concreto de referência.

Tabela 7.2: Painel de resultados médios dos ensaios com o gradiente de dosagens do aditivo polifuncional comparado à amostra de concreto padrão

	Dosagem					
	Padrão	0,3%	0,5%	0,7%	0,9%	1,2%
Massa Esp. (Kg/m ³)	2.360	2.323	2.340	2.323	2.295	2.223
Ar Incorporado (%)	1,5	2,1	2,0	2,4	3,5	4,8
Endurecimento	normal	normal	normal	normal	retardado	retardado
Slump 0 (mm)	60	150	200	215	225	245
Slump 45' (mm)	30	60	95	100	170	190
R 24 horas (MPa)	8,0	5,4	4,5	4,4	5,1	-
R 7 dias (MPa)	25,3	26,1	27,0	26,7	25,5	23,2
R 28 dias (MPa)	31,5	33,6	36,3	36,1	34,4	31,4

Características observadas: Mesmo com uma dosagem baixa (0,3%), o efeito de abatimento é mais notável que no plastificante e a possibilidade de incremento de dosagem é maior.

Riscos: A incorporação de ar do aditivo testado foi maior que a do plastificante, sem prejuízo para a resistência mecânica na dosagem testada. Dosagens maiores que 0,9% em peso sobre a massa de cimento do traço devem ser pré-testadas em função da possibilidade de alta incorporação de ar e do retardamento do fim de pega.

Recomendação: Para definição da dosagem ideal, como no caso dos plastificantes, efetuar três dosagens, de 0,5% a 0,8% sobre o peso do cimento, para definir a melhor dosagem.

7.3 AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO MÁXIMA DE CIMENTO COM AS DOSAGENS SELECIONADAS

Concreto	Cimento kg/m ³	redução	Água (l/m ³)
Referência	321		173
Plast. 0,4%	294	8,9%	158
Poli 0,5%	286	11,1%	154

Quadro 7.1: Reduções máximas de água e cimento em relação ao concreto de referência.

Tabela 7.3: Painel de avaliação da redução máxima de cimento com as dosagens selecionadas.

	slump	R 24 h.	R 7 dias	R 28 dias
	mm	MPa	MPa	MPa
Referência	6,0	7,5	24,9	31,7
Plastificante (0,4%)	6,0	5,6	25,9	32,7
Polifuncional (0,5%)	8,0	4,2	23,8	31,4

Características observadas: As amostras feitas com aditivo plastificante apresentaram resistências à compressão axial superiores às do concreto sem aditivo e as amostras feitas com aditivo polifuncional apresentaram as mesmas resistências que as amostras de concreto de referência, mas com um maior abatimento, o que poderia proporcionar uma redução ainda maior da água resultando em redução de cimento ou aumento da resistência.

Riscos: As reduções de consumo de cimento devem estar de acordo com as normas vigentes para não interferir na reserva alcalina do concreto.

Recomendações: Nos testes realizados foi adotado o abatimento de 60 mm apenas como uma referência para demonstrar a amplitude de redução possível de ser obtida, mas na prática o mais indicado é trocar parte dessa redução de consumo por um nível maior de plasticidade, principalmente com o objetivo de melhor ajustar o concreto às condições de

aplicação e evitar que por necessidades operacionais de canteiro de obras, a quantidade de água seja aumentada sem critério e com alto risco.

7.4 AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO PARCIAL DE CIMENTO COM AS DOSAGENS SELECIONADAS

Concreto	Cimento kg/m ³		Água (l/m ³)
Referência	321		173
Plast. 0,4%	301	(6,2%)	162
Poli 0,5%	295	(7,77%)	159

Quadro 7.2: Reduções parciais de água e cimento em relação ao concreto de referência.

Tabela 7.4: Painel de avaliação da redução parcial de cimento com as dosagens selecionadas.

	slump	R 24 hs.	R 7 dias	R 28 dias
	mm	MPa	MPa	MPa
Referência	60	7,5	24,9	31,7
Plastificante (0,4%)	95	5,6	26,2	33,4
Polifuncional (0,5%)	110	4,0	24,3	32,3

Características observadas: Ambos aditivos apresentaram um bom índice de plasticidade e resistência axiais superiores às do concreto sem aditivo. Com respeito a trabalhabilidade do concreto, para a maior parte das aplicações em canteiro, esta é a melhor forma de obter benefícios dos aditivos, reduzir somente parte da água possível de ser reduzida, proporcionando uma maior abatimento evitando os riscos, de excesso de água, acima citados.

Riscos: As reduções de consumo de cimento devem estar de acordo com as normas vigentes para não interferir na reserva alcalina do concreto.

Recomendações: o abatimento ideal para a maioria dos trabalhos em canteiro de obras é 100 +/- 20 mm. Quando o concreto é calculado para este nível de consistência é menor o risco de erros de dosagem durante os processos de concretagem.

8 CONCLUSÃO

O estudo laboratorial realizado neste trabalho testou o desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em dosagens mínimas e acima das recomendações máximas, para avaliar a evolução do desempenho desses aditivos sobre um concreto de referência e também as reações indesejáveis de superdosagem.

O aditivo plastificante testado apresentou um bom desempenho de incremento de plasticidade elevando o abatimento de 50 mm para 150 mm com a dosagem de 0,4% sobre o peso do cimento. Com a mesma dosagem apresentou um incremento de resistência a compressão axial média de 16% e uma redução possível no consumo de água de 8,9%. As reações indesejáveis de retardamento excessivo do fim de pega foram notadas com dosagens a partir de 0,55% sobre o peso do cimento, por isso, é recomendável efetuar testes de avaliação de retardamento e possível incorporação de ar em dosagens superiores a 0,5%.

Nos testes com aditivo polifuncional o desempenho de plasticidade foi ainda mais notável que com o aditivo plastificante. Na dosagem de 0,5% sobre o peso do cimento, que foi a escolhida para os testes de redução de consumo de cimento, a amostra de concreto teve um incremento de abatimento do tronco de cone de 60 mm para 200 mm, com um excelente aspecto, sem segregação. Com essa mesma dosagem o incremento médio de resistência a compressão axial obtido, foi 15% superior ao do concreto de referência e a redução de água máxima possível obtida com esta dosagem foi superior a 11%. Nas dosagens testadas acima de 0,9% os efeitos de retardamento e incorporação exagerada de ar começaram a ser notados. Por essa razão dosagens muito elevadas devem ser testadas antes da aplicação do concreto em canteiro e deve-se ter em conta que os resultados obtidos com dosagens medianas até 0,7% já trazem benefícios elevados ao concreto.

Este trabalho teve como principal propósito, apresentar o desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em diversas dosagens, apontando os benefícios e riscos em

função dessa variação de dosagens e mostrar que se pode tirar muito proveito do uso de aditivos redutores de água mesmo nas menores obras. Os benefícios podem ser econômicos, ecológicos e principalmente na qualidade do concreto produzido em canteiro. Normalmente a responsabilidade pela execução do concreto quando “virado em obra”, para se usar a expressão popular do concreto “estrutural” preparado em canteiros de obra, é na maioria dos casos do mestre ou do encarregado do concreto e a execução é em muitos casos efetuada por um servente de obras. Em muitos casos, o poder de decisão sobre a plasticidade do concreto está na mão do servente de obras e este, diante de concretos pouco plásticos, sujeitos a reclamação dos aplicadores, não é raro que ultrapasse os limites de água de dosagem do traço. O uso de concretos com traços de boa trabalhabilidade é fundamental para se evitar erros em canteiro de obras e os aditivos plastificantes ou polifuncionais podem ser ferramentas de uso fácil para se obter um concreto com melhor trabalhabilidade e mais seguro.

A segurança gerada pelo aditivo não para por aí, em certas dosagens o efeito dos aditivos aumenta a resistência do concreto, devido a melhor dispersão e hidratação dos grãos de cimento, melhora o nível de qualidade do concreto produzido em canteiro e o mais importante é que os procedimentos para escolha de uma dosagem ideal são simples como mostrados neste trabalho.

A redução do consumo de cimento dentro das recomendações propostas e mantendo-se o consumo mínimo de cimento para manter a boa reserva alcalina do concreto, tem vários benefícios. Em certos casos pode representar uma redução de consumo benéfica pela redução do calor de hidratação para certas aplicações e em outros casos significar simplesmente uma redução no custo do concreto e da obra, porém a redução da necessidade de cimento em cerca de 10%, como pode proporcionar o uso de aditivos, pode ser uma grande contribuição para a redução de CO₂ na atmosfera e redução da destruição de jazidas calcáreas.

Como já citado acima, deve ser considerado que cimentos diferentes e principalmente agregados sem padrões estabelecidos exigem que seja feito um teste de ajuste da melhor dosagem, tomando por base duas a três dosagens diferentes de um aditivo, para que se tenha o concreto com a melhor relação desempenho/custo para uso na obra. Para execução desta desse ajuste, da melhor dosagem, pode-se adotar a dosagem recomendada no estudo e testar variações 10% a 15% acima e abaixo dessa recomendação.

Em função dos resultados observados no trabalho, comprovando os benefícios dos aditivos plastificantes e polifuncionais na qualidade do concreto, e pelas razões citadas acima,

a conclusão desse trabalho é que a maior difusão do uso de aditivos nos canteiro de obras trará benefícios ao nível de qualidade desse tipo de obras e à sociedade.

9 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Para que se tenha uma maior riqueza de informações sobre o tema a sugestão é a de expandir este mesmo tipo de avaliação a outros tipos e classes de cimento.

Além dos aditivos redutores de água outros tipos de aditivos químicos que são incorporados ao concreto e argamassas, merecem ser mais explorados, em trabalhos acadêmicos. Os aditivos químicos abrem um grande leque de oportunidades para o uso de concretos e argamassa agregando novas propriedades com benefícios técnicos, financeiros e ecológicos, como, por exemplo, os silicatos que tem propriedades cristalizantes importantes na impermeabilização de obras sujeitas a infiltrações provenientes do lençol freático mas também sujeitas a contaminar este lençol. Um bom sistema de cristalização evita problemas de percolação de água por capilaridade nas paredes da estrutura, mas a maioria das obras não faz uso desses tipos de produtos por falta de informação.

Outros tipos de aditivos pouco explorados são os polímeros acrílicos e PVA que como modificadores de concretos e argamassas aumentam os limites de aplicações desses produtos, pela redução do módulo de elasticidade pela maior aderência e menor permeabilidade.

A química da construção é um segmento de pesquisas e desenvolvimento dentro do mercado da construção civil, que pode trazer muitos benefícios para o processo construtivo, tanto nos resultados de melhoria da qualidade das construções quanto na dinâmica desse processo, mas ainda é muito pouco explorado, principalmente pelos pequenos e médios construtores no Brasil, que estão presos a sistemas construtivos tradicionais. Nos últimos trinta anos tem crescido o consumo de argamassas colantes e argamassas multiusos nas obras, o que já representou um grande avanço no processo construtivo, mas a maioria dos produtos químicos disponíveis como ferramentas para o construtor, ainda são desconhecidas pela maioria dos engenheiros de obra.

REFERÊNCIAS

ABNT ver ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem - Manual Técnico de 2.000 – São Paulo, 2000, Abesc – 20 p.

ABNT - EB 1763 - Aditivos para Concreto de Cimento Portland – Rio de Janeiro, Jan/ 1992, 4 p.

ABNT - NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova – Rio de Janeiro, dez 2003, 6 p.

ABNT - NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Rio de Janeiro, jul 94, 4 p.

ABNT - NBR 6156 – Máquina de ensaio de tração e compressão – Verificação – Rio de Janeiro, set 1983, 5 p.

ABNT – NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação – Rio de Janeiro, abr 2005, 11 p.

ABNT - NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Rio de Janeiro, dez 1996, 8 p.

ABNT - NBR 9833 – Concreto – Massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro,

ABNT - NBR 9939 – Agregados – Teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo – Rio de Janeiro, ago 1987, 2 p.

ABNT - NM 33 : 1998 – Concreto – Amostragem de concreto fresco, fev 1998, 5 p.

ABNT - NM 47 : 2002 - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico, Rio de Janeiro, jun 2002, 23 p.

ABNT - NM 67 : 1998 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, fev 1998, 8 p.

ABNT - NM 248:2003 Agregado – Determinação da composição granulométrica – Rio de Janeiro, jul 2003, 6 p.

AITICIN, P.C. e BARON, J. – Lês adjuvants normalisés pour béton. In : Les Bétons, Bases et données pour leur formulation -- Paris, Éditions Eyrolles, 1996, 522 p. cap.4, p. 87-141.

ASHWORTH, R. - Some investigations into the use of sugar as an admixture to concrete. Proc. Inst. Civ. Engrs.. 31, pp.129-45 (London, June 1965)

ASTM C 494/C 494M Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, West Conshohocken, USA, jan. 2006, 10 p.

BOEM, D.L. - Preliminary tests of effect of sugar on strenght of mortars, Nat. Ready-mixed Concr. Assoc. Publ. (Washington D.C., August 1959)

BROOKS, J.J. - Elasticity, Creep. And Shrinkage of Concrete Containing Admixture, SP – 194, Michigan: Farmington Hills, 2000

CIMBETON, COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON – Fiches Techniques CB 2 – Constituants du béton, Les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis -Centre d'information sur lê ciments et sés applications, Paris – FSA – 09/94

GIAMUSSO, Salvador Eugenio – Manual do Concreto – São Paulo: Pini, 1992, 163 p.

MARTIN, Juan Fernando Matías – Aditivos para Concreto. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações / ed. G.C.Isaia – São Paulo: Ibracon, 2005, 2 v. 1579 p., V. 1, cap. 13, p. 381 – 406.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. - Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª. Ed.– São Paulo: Ibracon, 2008, 674 p.

MELBAR PRODUTOS DE LIGNINA – Catálogo Técnico – São Paulo: Melhoramentos, 24 p.

NEVILLE, Adam Matthew - Propriedades do Concreto, 2ª ed. rev. atual. – São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

PRIOR, M.E. and ADAMNS, A.B. - Introduction to producer's papers on water-reducing admixtures and self retarding admixtures for concrete, ASTM Sp. Tech. Publ. No. 266, pp.170-9 (1960)

OBRAS CONSULTADAS

BLEZARD, Robert G. - The History of Calcareous Cements. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete – fourth edition – Peter C. Hewlett – Elsevier Science & Technology Books – Jan. 2004, 1057 p., cap. 1, p. 1- 23.

EDMEADES, Rodney M.; HEWLETT, Peter C. – Cement Admixtures. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete – fourth edition – Peter C. Hewlett – Elsevier Science & Technology Books – Jan. 2004, 1057 p., cap. 15, p. 841 – 905.

JACKSON, Peter J. - Portland Cement Classification and Manufacture. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete – fourth edition – Peter C. Hewlett – Elsevier Science & Technology Books – Jan. 2004, 1057 p., cap. 2, p. 24 – 94.

MONTEIRO, Cesar Augusto Costa – Estudo da Variação da Resistência à Compressão Axial de um Concreto, com a Variação do Teor de Aditivo Redutor de Água: Estudo de Caso – Relatório de TCC em Engenharia Civil – Unijui - Ijuí – RS, 2002, 111 p.

ODLER, Ivan – Hydratation, Setting and Hardening of Portland Cements. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete – fourth edition – Peter C. Hewlett – Elsevier Science & Technology Books – Jan. 2004, 1057 p., cap. 6, p. 241 – 297.

PETRUCCI, Eladio G.R. – Concreto de Cimento Portland – 11. ed. rev. – Rio de Janeiro: Globo, 1987, 307 p.

SOUZA, Jocelio; PEREIRA Luciano Alves; BIANCHINI, Maurício - Avaliação da Influência de Altas Dosagens de Aditivo Polifuncional em Concreto Dosado em Central. Estudo de Caso – Sul do Brasil – Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – São Paulo – IBRACON, 2006, 6 p.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Cálculo do traço da amostra do concreto de referência

O traço de concreto de referência é o fck 25,0 com brita 1/2, slump de 60 mm, cimento CPIII 40. O desvio padrão adotado, para efeitos de cálculo deste traço de concreto, foi de 4,0 MPa porque todos os materiais foram dosados em peso e as umidades controladas. Os agregados miúdos não tiveram umidade a considerar, porque toda a areia foi fornecida seca e as britas 1 e 2, que foram sempre lavadas antes dos ensaios, tiveram sempre a umidade aferida.

As britas foram lavadas para evitar a influência descontrolada dos finos e ultra finos aderidos às mesmas, que conduz a erros de dosagem em função da absorção elevada de água destes finos, o que resulta em interpretações errôneas do desempenho de cada dosagem. A regularidade no crescimento da plasticidade com as elevações de dosagem comprovaram a eficiência desta medida.

Nas obras é muito difícil exercer este tipo de cuidado, mas no caso da presença de excessos de finos aderidos aos agregados graúdos, é conveniente fazer a sua lavagem.

O procedimento de cálculo adotado é baseado no descrito no livro Manual do Concreto de Salvador Giammusso, por ter se mostrado um procedimento bem adaptável à maioria dos agregados.

Após o cálculo, o traço do concreto de referência foi ajustado em uma dosagem na betoneira para atender ao abatimento de 60 mm +/- 20 mm estipulado. O traço ajustado foi o traço de referência efetivo para os testes com as dosagens de aditivos. Como será visto a maior necessidade de ajuste deste traço foi a redução da quantidade de água estimada em função da limpeza realizada na brita, o que foi necessário para se ter uma melhor avaliação da influência de cada dosagem.

Segue abaixo o desenvolvimento dos cálculos de dosagens do traço do concreto de referência.

PARÂMETROS DE DOSAGEM DO CONCRETO

Características do Concreto:

f_{ck} 25,0 MPa	Slump: 60 mm	Britas: 1 e 2
Cimento: CPIII 40	Devio padrão (sd): 4,0 MPa (*)	

(*) todo material dosado em peso e umidade controlada.

Determinação da resistência de dosagem:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \text{ sd} \quad (\text{Equação A1.1})$$

$$f_{cj} = 25,0 + 1,65 \cdot 4,0 = 31,60 \text{ MPa}$$

Determinação do fator a/c:

$$a/c = \frac{A'}{f_{cj} + B'} \quad (\text{Equação A1.2})$$

	A'	B'
CP 32	21	11
CP 40	26	14

$$a/c = 26 / (31,6 + 14) = 0,57$$

Tabela A1.1 - Determinação da quantidade de água no traço:

	9,5	19,0	25,0	38,0
10 mm	183	162	154	143
20 mm	196	173	165	153
30 mm	204	180	172	159
40 mm	210	186	177	164
50 mm	215	190	181	167
60 mm	219	193	184	171
80 mm	225	199	189	176
100 mm	230	203	194	180
120 mm	235	207	197	183
150 mm	240	212	202	187
180 mm	244	216	205	190
220 mm	249	220	209	194

Para o slump de 60 mm e britas 1 e 2, a quantidade de água no traço é de 184 litros.

Consumo de cimento:

$$c = \frac{\text{água}}{\text{fatora} / c} \quad (\text{Equação A1.3})$$

$$\text{cimento} = 184 / 0,57 = 322,8 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Teor de agregado total:

$$M = \frac{(1000 - c - \text{água})d_{\text{agr}}}{d_{\text{cim}}} \quad (\text{Equação A1.4})$$

$$M = \frac{(1000 - 323 - 184) \cdot 2,65}{3,10} = 1.886 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Teor de agregado miúdo - Escolher um dos três valores abaixo:

1. Teor de argamassa seca:

$$M1 = a_{\text{seca}} (c + M) - c \quad a_{\text{seca}}: (45 \text{ a } 55\%) \quad (\text{Equação A1.5})$$

Adotar 53% de argamassa seca, pois como esta é uma areia beneficiada e de baixa absorção optou-se por um teor de argamassa um pouco mais elevado para refletir melhor os efeitos das diferenças de dosagem.

$$M1 = 0,53 \cdot (323 + 1886) - 323 = 848 \text{ kg} / \text{m}^3$$

2. Relação agregado miúdo/agregado total:

$$M1 = \% \text{ am} \times M \quad (\text{Equação A1.6})$$

Tabela A1.2 – Percentual de agregado miúdo em relação ao agregado total em função do consumo de cimento.

CONSUMO DE CIMENTO	A	B	C	D
250 kg/m ³	39	40	41	42
300 kg/m ³	38	39	40	41
350 kg/m ³	37	38	39	40
400 kg/m ³	36	37	38	39
450 kg/m ³	35	36	37	38
500 kg/m ³	34	35	36	37

A: Concretos Correntes;

B: Concretos para peças delgadas;

C: Concretos Aparentes ;

D: Concretos Bombeáveis

Valores para areia com Módulo de Finura = 2,7

Para cada variação de +0,1 reduzir 1,0% o valor indicado

Adotar: Modulo de finura 2,5, consumo de cimento de 300 kg/m³ e concreto bombeável (41% + 2% = 43%):

$$M1 = 0,43 \times 1886 = 811 \text{ kg/m}^3$$

Volume absoluto de agregados graúdos:

$$M1 = M - M2.d2$$

(Equação A1.7)

Concretos Correntes	0,42 - 0,45 m ³
Concretos Bombeáveis	0,40 - 0,42 m ³
Concretos Superflúidos	0,36 - 0,40

Adotar: Concreto bombeável: 0,41 m³ de agregado graúdo de densidade 2.700 kg/m³.

$$M1 = 1886 - 0,4 \cdot 2.650 = 826 \text{ kg/m}^3$$

Dentre os valores de M1 indicados nos três cálculos diferentes temos:

a) 848 kg/m ³	b) 811 kg/m ³	c) 826 kg/m ³
--------------------------	--------------------------	--------------------------

Apesar de não ser o valor médio, adotou-se o valor de 848 kg/m³, pois como a brita foi lavada, foi adotada uma reposição de finos perdidos na lavagem.

$$\text{Teor de agregado graúdo: } 1886 - 848 = 1.038 \text{ kg/m}^3$$

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
323 kg / m ³	424 kg/m ³	424 kg/m ³	1.038 kg / m ³	184 litros / m ³

Quadro A1.1 - Composição do traço teórico do concreto de referência:

Composição proporcional: 1: 1,31: 1,31: 3,22 : 0,57

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
10,65 kg	13,99 kg	13,99 kg	34,25 kg	6,07 litros

Quadro A1.2 - Para os traços de 33 litros as quantidades são as seguintes:

Como nos ensaios realizados a brita foi lavada para retirada de todo o pó de pedra impregnado na superfície, a quantidade de água estimada para o traço foi acima do necessário. A limpeza da brita foi adotada para se ter uma relação entre as diversas dosagens de aditivo, sem a influência variável da quantidade de pó de pedra presente nas amostras. Após a execução de dois ensaios de ajustes, a nova quantidade de água foi definida e o traço de concreto ficou com a seguinte composição:

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
321 kg / m ³	444 kg/m ³	444 kg/m ³	1.052 kg / m ³	173 litros / m ³

Quadro A1.3 - Composição do traço adotado do concreto de referência:

Composição proporcional: 1: 1,38: 1,38: 3,28: 0,538

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
10,59 kg	14,65 kg	14,65 kg	34,72 kg	5,71 litros

Quadro A1.4 - Para os traços de 33 litros as quantidades são as seguintes:

Apêndice 2 Ensaio das amostras do concreto de referência, para avaliação do aditivo plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência sem aditivo das duas primeiras baterias na avaliação do aditivo plastificante.

Cimento CPIII40	Areia fina	Areia média	Brita 1e2	Água corrigida
10,59	14,65	14,65	34,72	5,36

Quadro A2.1 - Traço do concreto em kg para confecção de 33 litros para os ensaios, considerando 1,0% de umidade na brita 1 e 2:

Tabela A2.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagens de traço de concreto de referência.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Amostra 1	13/01	26°C	60	30	X	X	X
Amostra 7	14/01	26°C	40	X	16,760	2,371	1,6
Média			50				

Tabela A2.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de traço de concreto de referência.

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Amostra 1: corpo de prova 1a	8,0	25,4	31,6
Amostra 1: corpo de prova 1b	8,2	25,3	31,4
Média	8,1	25,3	31,5
Amostra 7: corpo de prova 7a	8,2	25,8	31,5
Amostra 7: corpo de prova 7b	8,4	25,5	31,8
Média	8,3	25,7	31,6
Média	8,2	25,5	31,6

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs. após ao ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentavam uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem dano.

Apêndice 3 – Ensaio das amostras com 0,2% de plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,2% de aditivo plastificante das duas primeiras baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo plastificante com dosagem em peso de 0,2% do peso da massa de cimento.

Tabela A3.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,2% de aditivo plastificante

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Amostra 2	13/01	26°C	100	50	X	X	X
Amostra 8	14/01	26°C	110	X	16,62	2,351	2,0
Média			115				

Tabela A3.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,2% de aditivo plastificante

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
amostra 2: corpo de prova 2a	7,5	26,2	32,3
amostra 2: corpo de prova 2b	7,6	25,9	32,7
Média	7,6	26,0	32,5
amostra 8: corpo de prova 8b	7,8	26,4	32,6
amostra 8: corpo de prova 8b	7,6	20,4 ^(*)	32,6
Média	7,7	26,4	32,6
Média	7,6	27,5	32,5

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs. após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentavam uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos.

(*) Foi desprezada a resistência obtida por este corpo de prova, devido a grande variação em relação ao outro corpo de prova testado

Apêndice 4 – Ensaio das amostras com 0,3% de plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,3% de aditivo plastificante das duas primeiras baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo plastificante com dosagem em peso e 0,3% do peso da massa de cimento.

Tabela A4.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,3% de aditivo plastificante

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Amostra 3	13/01	26°C	125	60	X	X	X
Amostra 9	14/01	26°C	135	X	16,740	2,368	1,9
Média			130				

Tabela A4.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,3% de aditivo plastificante

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
amostra 3: corpo de prova 3a	6,9	27,5	35,9
amostra 3: corpo de prova 3b	7,1	27,8	36,2
Média	7,0	27,6	36,0
amostra 9: corpo de prova 9a	7,2	28,0	36,0
amostra 9: corpo de prova 9b	7,6	27,8	36,6
Média	7,4	27,9	36,3
Média	7,2	27,8	36,2

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs. após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentavam uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos

Apêndice 5 – Ensaio das amostras com 0,4% de plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,4% de aditivo plastificante das duas primeiras baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo plastificante com dosagem em peso e 0,4% do peso da massa de cimento.

Tabela A5.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,4% de aditivo plastificante.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Amostra 4	13/01	26°C	150	70	X	X	X
Amostra 10	14/01	26°C	150	X	16,720	2,365	1,5
Média			150				

Tabela A5.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,4% de aditivo plastificante

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
amostra 4: corpo de prova 4a	6,1	28,6	37,2
amostra 4: corpo de prova 4b	6,1	29,0	36,4
Média	6,1	28,8	36,8
amostra 10: corpo de prova 10a	6,3	28,2	36,6
amostra 10: corpo de prova 10b	6,3	28,6	37,0
Média	6,3	28,4	36,8
Média	6,2	28,6	36,8

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs. após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentavam uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos

Apêndice 6 – Ensaio das amostras com 0,55% de plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,55% de aditivo plastificante das duas primeiras baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo plastificante com dosagem em peso e 0,55% do peso da massa de cimento.

Tabela A6.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,55% de aditivo plastificante.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Traço 5	13/01	26°C	190	85	X	X	X
Traço 11	14/01	26°C	170	X	16.720	2.365	1,9
Média			180				

Tabela A6.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,55% de aditivo plastificante

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
amostra 5: corpo de prova 5a	4,9	27,5	35,2
amostra 5: corpo de prova 5b	4,7	27,0	35,5
Média	4,8	27,3	35,3
amostra 11: corpo de prova 11a	3,8	27,9	35,5
Amostra 11: corpo de prova 11b	4,0	27,3	35,9
Média	3,9	27,7	35,7
Média	4,4	27,5	35,5

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova ainda não apresentava uma boa rigidez superficial e a desmoldagem foi possível somente após 22hs, como pode ser observado pelas baixas resistências apresentadas.

Apêndice 7 – Ensaios das amostras com 0,8% de plastificante

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,8% de aditivo plastificante das duas primeiras baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo plastificante com dosagem em peso e 0,8% do peso da massa de cimento.

Tabela A7.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,8% de aditivo plastificante.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Amostra 6	13/01	26°C	220	95	X	X	X
Amostra 12	14/01	26°C	210	X	16.680	2.359	1,9
Média			215				

Tabela A7.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,8% de aditivo plastificante

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
amostra 6: corpo de prova 6a	1,2	28,2	38,2
amostra 6: corpo de prova 6b	1,2	27,0	36,9
Média	1,2	27,6	37,5
amostra 12: corpo de prova 12a	2,0	28,2	37,8
amostra 12: corpo de prova 12b	2,0	28,2	37,0
Média	2,0	28,2	37,5
Média	1,6	27,9	37,5

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova ainda não apresentava uma boa rigidez superficial e a desmoldagem foi possível somente após 22hs, como pode ser observado pelas baixas resistências apresentadas em 24hs.

Apêndice 8 – Painel Comparativo das dosagens do aditivo plastificante

Tabela A8.1 – Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e com 45 min., densidade e teor de ar incorporado para dosagem de 0,2% à 0,8% de aditivo plastificante comparativo ao traço de concreto de referência.

	Slump 0	Slump 45'	M. Esp.	Ar Incorporado
	mm	mm	Kg/m ³	%
Padrão	50	30	2.371	1,6
Dosagem 0,2%	115	50	2.351	2,0
Dosagem 0,3%	130	60	2.368	1,9
Dosagem 0,4%	150	70	2.365	1,5
Dosagem 0,55%	180	85	2.365	1,9
Dosagem 0,8%	215	95	2.359	1,9

Tabela A8.2 – Valores médios de resistências à compressão axial para dosagens de 0,2% a 0,8% de aditivo plastificante comparativo à amostra de concreto de referência.

	R 24 horas	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Padrão	8,2	25,5	31,6
Dosagem 0,2%	7,6	27,5	32,5
Dosagem 0,3%	7,2	27,8	36,2
Dosagem 0,4%	6,2	28,6	36,8
Dosagem 0,55%	4,4	27,5	35,5
Dosagem 0,8%	1,6	27,9	37,5

Tabela A8.3 – Aspectos gerais do concreto e avaliação do tempo de fim de pega para dosagens de 0,2% à 0,8% de aditivo plastificante comparativo ao traço de concreto de referência.

	Aspecto	Endurecimento
Padrão	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,2%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,3%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,4%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,55%	Homogêneo e consistente	retardado
Dosagem 0,8%	Homogêneo e consistente	retardado

Apêndice 9 - Amostras do Concreto de Referência para avaliação do aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência sem aditivo das duas primeiras baterias na avaliação do aditivo polifuncional.

Tabela A9.1– Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagens de traço de concreto de referência.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	kg	Kg/m ³	%
Traço13	20/01	26°C	65	30	X	X	X
Traço 19	21/01	22°C	60	X	16.680	2.360	1,5
Média			60				

Tabela A9.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de traço de concreto de referência.

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 13: amostra 1	7,9	25,3	31,6
Traço 13: amostra 2	8,1	25,0	31,8
Média	8,0	25,1	31,7
Traço 19: amostra 1	7,8	25,4	31,3
Traço 19: amostra 2	8,3	25,4	31,3
Média	8,0	25,4	31,3
Média	8,0	25,3	31,5

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentava uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos.

Apêndice 10 - Amostras com 0,3% de aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,3% de aditivo polifuncional das duas últimas baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo polifuncional com dosagem em peso e 0,3% do peso da massa de cimento.

Tabela A10.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,3% de aditivo polifuncional

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	mm	Kg	Kg/m ³	%
Traço 14	20/01	26°C	135	60	X	X	X
Traço 20	21/01	22°C	170	X	16.420	2.323	2,1
Média			150				

Tabela A10.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,3% de aditivo polifuncional

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 14: amostra 1	5,8	26,1	33,8
Traço 14: amostra 2	5,2	26,6	34,3
Média	5,4	26,3	34,0
Traço 20: amostra 1	5,4	25,6	33,3
Traço 20: amostra 2	5,4	26,0	33,3
Média	5,4	25,8	33,3
Média	5,4	26,1	33,6

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentava uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos.

Apêndice 11 – Amostras com 0,5% de aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,5% de aditivo polifuncional das duas últimas baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo polifuncional com dosagem em peso e 0,5% do peso da massa de cimento.

Tabela A11.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,5% de aditivo polifuncional.

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	Mm	Kg	Kg/m ³	%
Traço 15	20/01	26°C	200	95	X	X	X
Traço 21	21/01	22°C	200	X	16.540	2.340	2,0
Média			200				

Tabela A11.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,5% de aditivo polifuncional comparativo ao concreto padrão.

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 15: amostra 1	4,6	27,2	36,0
Traço 15: amostra 2	4,0	27,2	36,7
Média	4,3	27,2	36,3
Traço 21: amostra 1	4,4	27,0	36,2
Traço 21: amostra 2	5,0	26,5	36,4
Média	4,7	26,7	36,3
Média	4,5	27,0	36,3

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentava uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos.

Apêndice 12 – Amostras com 0,7% de aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,7% de aditivo polifuncional das duas últimas baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo polifuncional com dosagem em peso e 0,7% do peso da massa de cimento.

Tabela A12.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,7% de aditivo polifuncional

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	Mm	Kg	Kg/m ³	%
Traço16	20/01	26°C	225	100	X	X	X
Traço 22	21/01	22°C	210	X	16.420	2.323	2,4
Média			215				

Tabela A12.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,7% de aditivo polifuncional comparativo ao concreto padrão..

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 16: amostra 1	4,2	27,0	36,0
Traço 16: amostra 2	4,8	26,7	35,6
Média	4,5	26,8	35,8
Traço 22: amostra 1	4,4	26,8	36,3
Traço 22: amostra 2	4,4	26,4	36,3
Média	4,4	26,7	36,3
Média	4,4	26,7	36,1

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova apresentava uma boa rigidez superficial, permitindo inclusive a desmoldagem sem danos.

Apêndice 13 – Amostras com 0,9% de aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 0,9% de aditivo polifuncional das duas últimas baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo polifuncional com dosagem em peso e 0,9% do peso da massa de cimento.

Tabela A13.1– Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., densidade e teor de ar incorporado para dosagem de 0,9% de aditivo polifuncional

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	Densid.	Ar Incorp.
			mm	mm	Kg	Kg/m ³	%
Traço 17	20/01	26°C	220	170	X	X	X
Traço 23	21/01	22°C	230	X	16.220	2.295	3,5
Média			225				

Tabela A13.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 0,9% de aditivo polifuncional

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 17: amostra 1	3,6	25,8	33,1
Traço 17: amostra 2	3,8	25,4	33,5
Média	3,7	25,6	33,3
Traço 23: amostra 1	X	25,5	33,4
Traço 23: amostra 2	X	25,5	33,4
Média		25,5	33,4
Média	3,7	25,5	33,4

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova não apresentaram boa rigidez inclusive o traço testado no segundo dia (21/01), foi afetado pela chegada da frente fria, que reduziu a temperatura de 26°C para 20°C, e não permitiu a desmoldagem, mesmo 24 hs após a moldagem. Esta dosagem para cimento do tipo CPIII, pode ser considerada muito elevada, pois depende muito das condições de temperatura e um retardamento excessivo vai exigir uma maior atenção com a cura do concreto.

Apêndice 14 – Amostras com 1,2% de aditivo polifuncional

Resultados da amostra do concreto de referência com dosagem de 1,2% de aditivo polifuncional das duas últimas baterias.

Foram executadas duas amostras do traço de concreto de referência com aditivo polifuncional com dosagem em peso e 1,2% do peso da massa de cimento.

Tabela A14.1 – Abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 1,2% de aditivo polifuncional

	Data	Temp.	Slump 0	Slump 45'	Peso	M. Esp.	Ar Incorp.
			mm	Mm	Kg	Kg/m ³	%
Traço 18	20/01	26°C	250	190	X	X	X
Traço 24	21/01	22°C	240	X	15.700	2.223	4,8
Média			245				

Tabela A14.2 – Resistências à compressão axial para dosagens de 1,2% de aditivo polifuncional

	R 24 hs	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Traço 18: amostra 1	X	23,5	31,0
Traço 18: amostra 2	X	23,5	31,4
Média	X	23,5	31,2
Traço 24: amostra 1	X	23,0	31,3
Traço 24: amostra 2	X	23,0	31,6
Média	X	23,0	31,5
Média		23,2	31,4

Aspectos gerais do concreto:

1. O concreto apresentou boa consistência, sem segregação.
2. No dia seguinte, mais de 15hs após o ensaio, o concreto dos corpos de prova não apresentaram boa rigidez inclusive o traço testado no segundo dia (21/01), foi afetado pela chegada da frente fria, que reduziu a temperatura de 26°C para 20°C, e não permitiu a desforma, mesmo 24 hs após a moldagem. Esta dosagem para cimento do tipo CPIII, pode ser considerada muito elevada porque depende muito das condições de temperatura e um retardamento excessivo vai exigir uma maior atenção com a cura do concreto.

Apêndice 15 - Painel Comparativo das dosagens do aditivo polifuncional

Tabela A15.1 - Valores médios de: abatimentos (slump) inicial e com 45 min., massa específica e teor de ar incorporado para dosagem de 0,3% à 1,2% de aditivo polifuncional comparativo ao traço de concreto de referência.

	Slump 0	Slump 45'	M. Espec.	Ar Incorporado
	mm	mm	Kg/m ³	%
Padrão	60	30	2.360	1,5
Dosagem 0,3%	150	60	2.323	2,1
Dosagem 0,5%	200	95	2.340	2,0
Dosagem 0,7%	215	100	2.323	2,4
Dosagem 0,9%	225	170	2.295	3,5
Dosagem 1,2%	245	190	2.223	4,8

Tabela A15.2 - Valores médios de resistências à compressão axial para dosagens de 0,3% à 1,2% de aditivo polifuncional comparativo ao traço de concreto de referência.

	R 24 horas	R 7 dias	R 28 dias
	MPa	MPa	MPa
Padrão	8,0	25,3	31,5
Dosagem 0,3%	5,4	26,1	33,6
Dosagem 0,5%	4,5	27,0	36,3
Dosagem 0,7%	4,4	26,7	36,1
Dosagem 0,9%	3,7	25,5	33,4
Dosagem 1,2%	-	23,2	31,4

Tabela A15.3 – Aspectos gerais do concreto e avaliação do tempo de fim de pega para dosagens de 0,3% à 1,2% de aditivo polifuncional comparativo ao traço de concreto de referência.

	Aspecto	Endurecimento
Padrão	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,3%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,5%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,7%	Homogêneo e consistente	normal
Dosagem 0,9%	Homogêneo e consistente	retardado
Dosagem 1,2%	Homogêneo e consistente	retardado

Apêndice 16 – Demonstrativo de cálculo da redução máxima de água com uso de aditivo plastificante com dosagem de 0,4% da massa do cimento.

Dados para dosagem:

- Abatimento do tronco de cone obtido com uso de plastificante: 150 mm;
- Quantidade de água necessária para atingir este abatimento no Quadro 2 abaixo, para concretos sem aditivo: 202 litros/m³;
- Abatimento do tronco de cone desejado: 60 mm;
- Quantidade de água necessária para atingir este abatimento na Tabela A16.1, para concretos sem aditivo: 184 litros/m³;
- Diferença percentual para redução da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência: $1 - (184/202) = 0,089$ (8,9%)

Tabela A16.1 - Determinação da quantidade de água no traço:

	9,5	19,0	25,0	38,0
10 mm	183	162	154	143
20 mm	196	173	165	153
30 mm	204	180	172	159
40 mm	210	186	177	164
50 mm	215	190	181	167
<u>60 mm</u>	219	193	<u>184</u>	171
80 mm	225	199	189	176
100 mm	230	203	194	180
120 mm	235	207	197	183
<u>150 mm</u>	240	212	<u>202</u>	187
180 mm	244	216	205	190
220 mm	249	220	209	194

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
321 kg / m ³	444 kg/m ³	444 kg/m ³	1.052 kg / m ³	173 litros / m ³

Quadro A16.1 - Composição do traço adotado do concreto de referência:

- Quantidade original de água: 173 litros/m³;

- Quantidade de água com 0,4% de aditivo plastificante: $173 - 8,9\% = 158 \text{ litros/m}^3$
- Correção da quantidade de cimento: - fator água/cimento: 0,538
- Cimento = $(158 / 0,538) = 294 \text{ kg/m}^3$

Correção da quantidade de areia: →manutenção do teor de argamassa: 53,5%

- Agregado total: $444+444+1052=1940 \text{ kg/m}^3$
- Teor de argamassa: $(444+444+321)/(1940+321)= 0,535$
- Areia + cimento = $0,535 \times (1940 + 321) = 1.210 \text{ kg/m}^3$
- Areia = $1.210 - 294 = 916 \text{ kg/m}^3$

Dosagem de aditivo: $0,4\% \times 294 = 1,176 \text{ kg / m}^3$

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto c/ aditivo (kg/m^3)	294	458	458	1.052	158	1,18
Traço da amostra c/ aditivo (kg)	9,70	15,11	15,11	34,71	5,21	0,039

Quadro A16.2 – Composição do concreto aditivado com 0,4% de aditivo plastificante, com abatimento previsto de 60 mm.

Apêndice 17 – Demonstrativo de cálculo da redução máxima de água com uso de aditivo polifuncional com dosagem de 0,5% da massa do cimento.

Dados para dosagem:

- Abatimento do tronco de cone obtido com uso de polifuncional: 200 mm;
- Quantidade de água necessária para atingir este abatimento no Quadro 2 abaixo, para concretos sem aditivo: 207 litros/m³;
- Abatimento do tronco de cone desejado: 60 mm;
- Quantidade de água necessária para atingir este abatimento no Quadro 2, para concretos sem aditivo: 184 litros/m³;
- Diferença percentual para redução da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência : $1 - (184/207) = 0,111$ (11,1%).

Tabela A17.1 - Determinação da quantidade de água no traço:

	9,5	19,0	25,0	38,0
10 mm	183	162	154	143
20 mm	196	173	165	153
30 mm	204	180	172	159
40 mm	210	186	177	164
50 mm	215	190	181	167
60 mm	219	193	184	171
80 mm	225	199	189	176
100 mm	230	203	194	180
120 mm	235	207	197	183
150 mm	240	212	202	187
180 mm	244	216	205	190
220 mm	249	220	209	194

Composição do traço adotado do concreto de referência:

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
321 kg / m ³	444 kg/m ³	444 kg/m ³	1.052 kg / m ³	173 litros / m ³

- Quantidade original de água: 173 litros/m³;
- Quantidade de água com 0,4% de aditivo plastificante: $173 - 11,1\% = 154$ litros/m³
- Correção da quantidade de cimento: - fator água/cimento: 0,538
- Cimento = $(154 / 0,538) = 286$ kg/m³

Correção da quantidade de areia: -manutenção do teor de argamassa: 53,5%

- Agregado total: $444+444+1052=1940$ kg/m³
- Teor de argamassa: $(444+444+321)/(1940+321)= 0,535$
- Areia + cimento = $0,535 \times (1940 + 321) = 1.210$ kg/m³
- Areia = $1.210 - 286 = 924$ kg/m³

Dosagem de aditivo: $0,5\% \times 286 = 1,43$ kg / m³

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	286	462	462	1.052	154	1,43
Traço da amostra c/ aditivo (kg)	9,44	15,25	15,25	34,71	5,08	0,047

Quadro A17.1 – Composição do concreto aditivado com 0,5% de aditivo polifuncional, com abatimento previsto de 60 mm.

Apêndice 18 - Resultados dos ensaios comparativos para a redução máxima do consumo de cimento

Tabela A18.1 - Resultados de consistência e resistência à compressão axial das amostras de concreto de referência (amostras 25 e 26), concretos aditivados com aditivo plastificante com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% (amostras 27 e 28) e concretos aditivados com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,5% (amostras 29 e 30), com redução máxima da água.

	data	Temp.	slump	R 24 h.	R 7 dias	R 28 dias
			Mm	MPa	MPa	MPa
Amostras sem aditivo						
Amostra 25: cp 25 a	03/03	24°C	6,5	7,8	24,7	31,8
Amostra 25: cp 25 b	03/03	24°C		7,3	25,1	32,0
Amostra 26: cp 26 a	03/03	24°C	6,0	7,5	24,8	31,3
Amostra 26: cp 26 b	03/03	24°C		7,5	25,2	31,7
Média (Referência)			6,0	7,5	24,9	31,7
Aditivo plastificante (0,4%)						
Amostra 27: cp 27 a	03/03	24°C	5,5	5,6	26,0	32,5
Amostra 27: cp 27 b	03/03	24°C		5,6	25,8	32,8
Amostra 28: cp 28 a	03/03	24°C	6,5	5,8	26,1	33,0
Amostra 28: cp 28 b	03/03	24°C		5,4	25,7	32,6
Média (Plastificante)			6,0	5,6	25,9	32,7
Aditivo polifuncional (0,5%)						
Amostra 29: cp 25 a	03/03	24°C	7,0	4,0	24,0	31,8
Amostra 29: cp 25 b	03/03	24°C		4,0	24,2	31,3
Amostra 30: cp 25 a	03/03	24°C	9,0	4,2	23,6	31,1
Amostra 30: cp 25 b	03/03	24°C		4,4	23,4	31,3
Média (Polifuncional)			8,0	4,2	23,8	31,4

Apêndice 19 – Demonstrativo de cálculo da redução de 70% da água com uso de aditivo plastificante com dosagem de 0,4% da massa do cimento.

Dados para dosagem:

- Diferença percentual máxima para redução da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência : 8,9%;
- Diferença percentual para redução de 70% da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência: $8,9\% \times 0,7 = 6,23\%$

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
321 kg / m ³	444 kg/m ³	444 kg/m ³	1.052 kg / m ³	173 litros / m ³

Quadro A19.1 - Composição do traço adotado do concreto de referência:

- Quantidade original de água: 173 litros/m³;
- Quantidade de água com 0,4% de aditivo plastificante: $173 - 6,23\% = 162$ litros/m³
- Correção da quantidade de cimento: - fator água/cimento: 0,538
- Cimento = $(162 / 0,538) = 301$ kg/m³

Correção da quantidade de areia: →manutenção do teor de argamassa: 53,5%

- Agregado total: $444+444+1052=1940$ kg/m³
- Teor de argamassa: $(444+444+321)/(1940+321)= 0,535$
- Areia + cimento = $0,535 \times (1940 + 321) = 1.210$ kg/m³
- Areia = $1.210 - 301 = 909$ kg/m³

Dosagem de aditivo: $0,4\% \times 301 = 1,2$ kg / m³

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	301	455	455	1.052	162	1,2
Traço da amostra c/ aditivo (kg)	9,93	15,01	15,01	34,71	5,35	0,039

Quadro A19.1 – Composição do concreto aditivado com 0,4% de aditivo plastificante, com redução parcial de água.

Apêndice 20 – Demonstrativo de cálculo da redução de 70% da água com uso de aditivo polifuncional com dosagem de 0,5% da massa do cimento.

Dados para dosagem:

- Diferença percentual máxima para redução da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência : 11,1%;
- Diferença percentual para redução de 70% da quantidade de água da amostra de concreto aditivado em relação ao concreto de referência: $11,1\% \times 0,7 = 7,77\%$

cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1 e 2	água
321 kg / m ³	444 kg/m ³	444 kg/m ³	1.052 kg / m ³	173 litros / m ³

Quadro A20.1 - Composição do traço adotado do concreto de referência:

- Quantidade original de água: 173 litros/m³;
- Quantidade de água com 0,4% de aditivo plastificante: $173 - 7,77\% = 160$ litros/m³
- Correção da quantidade de cimento: - fator água/cimento: 0,538
- Cimento = $(160 / 0,538) = 297$ kg/m³

Correção da quantidade de areia:►- manutenção do teor de argamassa: 53,5%

- Agregado total: $444+444+1052=1940$ kg/m³
- Teor de argamassa: $(444+444+321)/(1940+321)= 0,535$
- Areia + cimento = $0,535 \times (1940 + 321) = 1.210$ kg/m³
- Areia = $1.210 - 297 = 913$ kg/m³

Dosagem de aditivo: $0,5\% \times 297 = 1,48$ kg / m³

	cimento	areia 1	areia 2	brita 1	água	adit.
Concreto c/ aditivo (kg/m ³)	297	456	456	1.052	160	1,48
Traço da amostra c/ aditivo (kg)	9,8	15,05	15,05	34,71	5,28	0,049

Quadro A20.1 – Composição do concreto aditivado com 0,5% de aditivo polifuncional, com redução parcial de água.

Apêndice 21 - Resultados dos ensaios comparativos para a redução parcial do consumo de cimento

Tabela A21.1 - Resultados de consistência e resistência à compressão axial das amostras de concreto de referência (amostras 25 e 26), concretos aditivados com aditivo plastificante com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,4% (amostras 31 e 32) e concretos aditivados com aditivo polifuncional com dosagem em peso sobre a massa de cimento de 0,5% (amostras 33 e 34), com redução parcial da água.

	data	Temp.	slump	R 24 h.	R 7 dias	R 28 dias
			mm	MPa	MPa	MPa
Amostras sem aditivo						
Amostra 25: cp 25 a	03/03	24°C	6,5	7,8	24,7	31,8
Amostra 25: cp 25 b	03/03	24°C		7,3	25,1	32,0
Amostra 26: cp 26 a	03/03	24°C	6,0	7,5	24,8	31,3
Amostra 26: cp 26 b	03/03	24°C		7,5	25,2	31,7
Média (Referência)			6,0	7,5	24,9	31,7
Aditivo plastificante (0,4%)						
Amostra 31: cp 31 a	04/03	21°C	9,0	5,6	26,3	33,8
Amostra 31: cp 31 b	04/03	21°C		5,3	26,0	33,6
Amostra 32: cp 32 a	04/03	21°C	9,5	5,8	26,5	33,0
Amostra 32: cp 32 b	04/03	21°C		5,8	26,0	33,3
Média (Plastificante)			9,5	5,6	26,2	33,4
Aditivo polifuncional (0,5%)						
Amostra 33: cp 33 a	04/03	21oC	10,5	4,2	24,5	32,1
Amostra 33: cp 33 b	04/03	21oC		4,0	24,9	32,0
Amostra 34: cp 34 a	04/03	21oC	11,5	3,8	24,0	32,3
Amostra 34: cp 34 b	04/03	21oC		4,0	24,0	32,6
Média (Polifuncional)			11,0	4,0	24,3	32,3

GLOSSÁRIO

Abatimento -Ensaio para a determinação da medida da consistência do concreto fresco.

Abrasão - Desgaste superficial do concreto.

Adensamento -Processo manual ou mecânico para compactar uma mistura de concreto no estado fresco, com o intuito de eliminar vazios internos da mistura (bolhas de ar) ou facilitar a acomodação do concreto no interior das fôrmas.

Agregados - Materiais granulares (brita, areia,etc.), que são unidas pela pasta de cimento no preparo do concreto.

Blaine – Superfície específica dos grãos de cimento, representando a área relativa à soma das áreas de uma determinada quantidade de grãos de cimento, normalmente expressa em cm^2/gr .

Brita - Material obtido por trituração de rocha e classificado segundo a sua granulometria.

Canteiros de obras - Instalações provisórias destinadas a alojamentos, estoque de materiais, equipamentos e almoxarifado, durante a fase de construção da obra.

Capreamento - Revestimento com pasta de cimento ou de uma mistura composta de material pulverulento e enxofre derretido, que regulariza os topos de um corpo-de-prova com o objetivo de distribuir uniformemente a carga durante o ensaio.

Clinker- Produto da fusão de calcário e argila em forno rotatório, composto principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio, com propriedades aglomerantes. É o principal componente do cimento Portland, podendo ser composto com outros produtos tais como escórias e pozolanas.

Consistência - É a medida da mobilidade da mistura (plasticidade), isto é, maior ou menor facilidade de deformar-se sob a ação de cargas. É expressa pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test).

Consumo de cimento – Quantidade dosada, em massa (kg), para produzir um metro cúbico de concreto.

Corpo -de -prova – Amostra do concreto endurecida,especialmente preparada para testar propriedades como: resistência à compressão, módulo de elasticidade etc.

Cura – Procedimentos para a manutenção das condições favoráveis de umidade e temperatura nas primeiras idades do concreto (7 dias) que possibilitam o desenvolvimento de sua resistência e de outras propriedades.

Densidade – O termo utilizado nas tabelas, refere-se a massa específica do concreto testado, expressa em kg/m³.

Desvio Padrão – Medida da dispersão de um conjunto de valores. Dispersão entre a média e os valores individuais.

Dosagem – Estabelecer as quantidades ótimas dos componentes do concreto para atender a determinadas características ou propriedades pré estabelecidas.

Elementos Des aerantes – São produtos que promovem a expulsão parcial de micro bolhas de ar incorporado, geradas por algumas bases químicas dos aditivos redutores de água.

Ensaio – Realização de testes para avaliar propriedades físicas ou químicas de um material ou peça.

Escória granulada de alto forno – Subproduto da fabricação do aço, composto principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio com propriedades aglomerantes quando em reação conjunta com o clínquer do cimento Portland.

Granulometria – Determinação das proporções de quantidade de partículas existentes em um material granular, pela separação por peneiras de diferentes aberturas.

Massa específica – Relação entre a massa e o volume de um corpo (densidade).

Moldagem – Especificamente sobre concretos ou argamassas de cimentos portland, refere-se a procedimento normalizado de confeccionar corpos-de-prova.

Pega – Condição de perda da plasticidade da pasta, argamassa ou concreto, medida pela resistência à penetração ou deformação em ensaios padronizados

Resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) – Esforço resistido pelo concreto, estimado pela ruptura de corpos-de-prova cilíndricos em prensas especiais.

Slump - Expressão inglesa que designa o abatimento do tronco de cone no ensaio de determinação da medida da consistência do concreto fresco.

Teor de sólidos – Relativo ao teor de material sólido dissolvidos nos aditivos redutores de água.

Trabalhabilidade – Propriedade do concreto que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. ASTM C-125

Traço – Composição das misturas compostas de cimento Portland ou outro tipo de aglomerante, é a forma de exprimir a proporção entre os componentes dessas misturas.

Tronco de cone – Aparato metálico com 30 cm de altura, de forma tronco cônica, utilizado para medir a consistência do concreto.

Fonte: WWW.absec.org.br/pdf/pbasico.pdf, Terminologia, em 29/05/2010 às 22h10