

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HUGO RAPHAEL CARVALHO CAMAPUM

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO INCORPORADOR DE AR NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO CONCRETO**

São Luís

2016

HUGO RAPHAEL CARVALHO CAMAPUM

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO INCORPORADOR DE AR NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia civil, pela Universidade Estadual do Maranhão, Centro de Ciências Tecnológicas, *campus* de São Luís.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

São Luís

2016

Camapum, Hugo Raphael Carvalho.

Influência do uso de aditivo incorporador de ar na resistência mecânica do concreto / Hugo Raphael Carvalho Camapum. – São Luís, 2016.

90 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

1. Incorporador de ar. 2. Concreto. 3. Resistência mecânica. 4. Análise experimental. I. Título.

CDU 691.32:621.745.4

HUGO RAPHAEL CARVALHO CAMAPUM

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO INCORPORADOR DE AR NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia civil, pela Universidade Estadual do Maranhão, Centro de Ciências Tecnológicas, *campus* de São Luís.

Aprovado em: 16 / 12 / 2016

BANCA EXAMINADORA



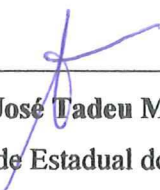
Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar (Orientador)

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Iêdo Alves de Souza

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Esp. José Tadeu Moura Serra

Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por me dar coragem e confiança nessa caminhada, dando força sempre para concluir esta etapa da minha vida e acabando com minhas incertezas.

Aos meus pais, Bento José Camapum e Maria do Socorro Lima Carvalho Camapum, por estarem sempre ao meu lado e darem todo o apoio e carinho durante o curso.

À minha família, principalmente todos os meus tios e meus avós, Herculano, Anésia, Cleonice e José de Ribamar, por ensinarem e darem exemplos não apenas a meus pais, como a mim também.

Ao meu irmão, Luiz Fernando, por todo o companheirismo e atenção, além de ser um grande amigo, torcendo sempre pelo meu sucesso e felicidade.

À minha namorada, melhor amiga e companheira de sempre, Ana Júlia, por sempre estar disposta a me dar os melhores conselhos, me ajudar quando necessário e ficar sempre ao meu lado, nas horas mais alegres, e nas mais difíceis também. Sem dúvida, o caminho teria sido muito mais desafiador se não fosse por você.

A todos os amigos que pude fazer durante esses anos, em especial a Francisco Mateus, Gilberto, João e Netto, por todas as horas de estudo e dedicação que tivemos juntos.

Ao meu orientador desta monografia, Eduardo Aurélio Barros Aguiar, por ter me dado a honra de ser seu orientando, podendo contribuir com este trabalho e ajudando na escolha do tema, além de ser um dos responsáveis pela minha vontade de continuar crescendo profissionalmente.

A todos os meus colegas, professores e servidores da Universidade Estadual do Maranhão, por tornarem este sonho possível, além de tornarem minha caminhada mais feliz.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, torceram pelo meu sucesso e me ajudaram em algum momento ao longo desses anos.

“Um cientista deve, acima de tudo, ser como criança. Se ele vê algo, deve dizer o que está vendo, independentemente daquilo ser o que ele imaginava ver ou não. Ver primeiro, testar depois. Mas sempre ver primeiro. Senão, você só vai ver o que você esperava ver. A maioria dos cientistas se esquece disso”.

Douglas Adams

RESUMO

O propósito maior deste trabalho é analisar a interação entre o aditivo incorporador de ar (IAR) e o concreto, sobretudo no que toca o aspecto da resistência mecânica deste. Procura-se discutir, através desta pesquisa, a ação do aditivo incorporador de ar nas características de misturas de concreto em geral. Para tanto, uma análise experimental foi feita, avaliando, na medida do possível, as propriedades do concreto fresco e endurecido, tais como a consistência, densidade e resistência à compressão. Como forma de analisar essas características, escolheu-se realizar uma série de ensaios em laboratório, como o ensaio de resistência à compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos, o ensaio de abatimento de tronco de cone, essencial para mensurar a consistência do concreto em seu estado fresco, e verificação da variação da massa específica dos corpos de prova. Escolheu-se um número de traços, e, em cada um deles, duas amostras foram analisadas, sendo a primeira uma amostra de controle, e a segunda com aditivo em sua composição. A primeira parte deste trabalho se encarrega de fazer um apanhado geral dos conhecimentos sobre tecnologia do concreto, tais como o histórico desse material, suas propriedades conhecidas, ensaios, adições e aditivos para concreto em geral. Após isso, no segundo capítulo, discutiu-se de forma detalhada sobre o aditivo incorporador de ar. Portanto, escolheu-se abordar sobre o seu surgimento, princípio de funcionamento, sua influência nas mais diversas características do concreto, utilização, vantagens e precauções. Finalmente, o último capítulo se encarregou de detalhar os procedimentos experimentais adotados, mostrando também os resultados adquiridos através dos ensaios e analisando-os a fim de tirar as necessárias conclusões.

Palavras-chave: Incorporador de ar. Concreto. Resistência mecânica. Análise experimental.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to analyze the interaction between the air-entraining admixtures (AEA) and concrete, particularly about changes in concrete compressive strength. Through this research, the influence of the air-entraining admixture on concrete properties is discussed. To do so, an experimental analysis was done, evaluating the characteristics of fresh and hardened concrete mixtures, such as their consistency, density and compressive strength. In order to reach this goal, a number of tests were chosen: the slump test, compressive strength tests by using cylindrical samples, and measuring dimensions of these samples, as well as taking their weight, so that their densities could be calculated. A number of mix designs was made, and, for each one of them, two samples were tested. The first sample had no air-entraining admixture in it, whereas the second one had. The first chapter of this paper gathers some relevant information concerning concrete technology, as the history of concrete, its properties, tests, supplementary cementing materials and admixtures. After that, in the second part, the air-entraining admixture was carefully discussed. Therefore, its creation, operating principle, use, advantages and precautions were detailed. Lastly, the final chapter showed the experimental procedures used in this research, describing its results and taking conclusions about them.

Keywords: Air-entraining admixtures. Concrete. Compressive Strength. Experimental Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Constituintes do concreto: água, cimento e agregados	20
Figura 2	Água na pasta de cimento	21
Figura 3	Ar incorporado e ar aprisionado ao concreto	42
Figura 4	Deterioração do concreto por ciclos de gelo-degelo	43
Figura 5	Sistema construtivo com concreto de baixa densidade (concreto celular) ...	44
Figura 6	Aparelho pressiométrico para medição de ar incorporado	45
Figura 7	Sistema de vazios do concreto com ar incorporado	49
Figura 8	Materiais usados na mistura: agregados, cimento e aditivo	58
Figura 9	Manuseio do aditivo incorporador de ar (IAR)	59
Figura 10	Betoneira usada para mistura	60
Figura 11	Moldes cilíndricos de PVC com óleo nas paredes internas	62
Figura 12	Corpos de prova após moldagem	63
Figura 13	Cura em tanque com solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	65
Figura 14	Aparelhagem para execução do <i>slump test</i>	66
Figura 15	Balança para os corpos de prova	68
Figura 16	Processo de capeamento dos corpos de prova	69
Figura 17	Ensaio de resistência à compressão	70
Figura 18	Influência do aditivo incorporador de ar no abatimento do concreto	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Efeito do aditivo redutor de água no abatimento do concreto.....	37
Gráfico 2	Efeito do redutor de água de alta eficiência no abatimento do concreto....	38
Gráfico 3	Abatimento x tempo para concretos com retardador de pega	39
Gráfico 4	Resistência a compressão vs. teor de ar na mistura.....	48
Gráfico 5	Fator A/C x dimensões dos vazios	52
Gráfico 6	Função entre o abatimento e o fator água/cimento.....	72
Gráfico 7	Resistência à compressão variando com fator água/cimento (7 dias)	78
Gráfico 8	Resistência à compressão variando com fator água/cimento (14 dias)	80
Gráfico 9	Resistência à compressão variando com fator água/cimento (28 dias)	81
Gráfico 10	Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 1)	82
Gráfico 11	Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 2)	82
Gráfico 12	Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 3)	83
Gráfico 13	Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 4)	83
Gráfico 14	Resistência e densidade do concreto	84
Gráfico 15	Resistência e abatimento do concreto.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades vs. Métodos de Ensaio	30
Tabela 2	Aditivos redutores de água e seus efeitos	36
Tabela 3	Classificação e desempenho de aditivos incorporadores de ar usuais	41
Tabela 4	Relação entre finura do cimento e teor de aditivo em argamassa 1:3.....	51
Tabela 5	Temperatura vs. Teor de ar incorporado para diferentes tipos de aditivos...	53
Tabela 6	Traços utilizados no estudo experimental.....	55
Tabela 7	Quantidade de materiais por m ³ de concreto	56
Tabela 8	Quantidade de materiais utilizadas no traço	56
Tabela 9	Análise granulométrica do agregado miúdo	57
Tabela 10	Análise granulométrica do agregado graúdo	57
Tabela 11	Volume de aditivo por traço	59
Tabela 12	Identificação dos traços	64
Tabela 13	Abatimento de diferentes traços de concreto	71
Tabela 14	Dimensões dos corpos de prova rompidos em 7 dias	73
Tabela 15	Densidade das misturas para amostras testadas em 7 dias.....	74
Tabela 16	Dimensões dos corpos de prova rompidos em 14 dias	74
Tabela 17	Densidade das misturas para amostras testadas em 14 dias.....	75
Tabela 18	Dimensões dos corpos de prova rompidos em 28 dias	75
Tabela 19	Densidades das misturas para amostras testadas em 28 dias	76
Tabela 20	Densidades médias das misturas sem IAR	76
Tabela 21	Densidades médias das misturas com IAR	77
Tabela 22	Resistências à compressão em 7 dias.....	77
Tabela 23	Variação da resistência à compressão em 7 dias decorrente do uso de aditivos.....	78
Tabela 24	Resistências à compressão em 14 dias.....	79
Tabela 25	Variação da resistência à compressão em 14 dias decorrente do uso de aditivos.....	79
Tabela 26	Resistências à compressão em 28 dias.....	80
Tabela 27	Resistência em 28 dias	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	-	Porcentagem
A	-	Traço sem aditivo incorporador de ar
ABCP	-	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	-	Fator água/cimento
ACI	-	American Concrete Institute
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
B	-	Traço com aditivo incorporador de ar
C ₂ S	-	Silicato dicálcico
C ₃ A	-	Aluminato tricálcico
C ₃ S	-	Silicato tricálcico
C ₄ AF	-	Ferroaluminato tetracálcico
CaCl ₂	-	Cloreto de Cálcio
Ca(OH) ₂	-	Hidróxido de Cálcio
C-S-H	-	Silicato de cálcio hidratado
CP	-	Cimento Portland
Dm	-	Diâmetro médio
f _c	-	Resistência à compressão
GGBFS	-	Ground granulated blast-furnace slag
h	-	Altura
IAR	-	Incorporador de Ar
NDT	-	Nondestructive tests
PVC	-	Policloreto de vinila
RPM	-	Rotações por minuto
SCM	-	Supplementary cementing materials
V	-	Volume do corpo de prova

LISTA DE UNIDADES

°C	-	graus Celsius
cm ²	-	centímetros quadrados
cm ² /g	-	centímetros quadrados por grama
cm ³	-	centímetros cúbicos
g	-	gramas
g/ cm ³	-	gramas por centímetro cúbico
l	-	litros
Kg	-	Quilogramas
Kg/m ³	-	quilogramas por metro cúbico
m ³	-	metros cúbicos
ml	-	Mililitros
mm	-	milímetros
MPa	-	Megapascal
t/ m ³	-	toneladas por metro cúbico
ton	-	toneladas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Identificação do tema	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Gerais	16
1.2.2	Específicos	16
1.3	Justificativa	16
1.4	Metodologia	17
1.4.1	Obtenção de dados em laboratório	17
1.4.2	Análise e interpretação dos resultados	17
1.5	Limitações	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Histórico do concreto	19
2.2	Materiais constituintes do concreto	20
2.2.1	Cimento Portland	20
2.2.1.1	<i>Tipos de cimento Portland</i>	22
2.2.2	Agregados	23
2.3	Propriedades do concreto	23
2.3.1	Propriedades do concreto fresco	24
2.3.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	24
2.3.1.2	<i>Tempo de pega</i>	25
2.3.2	Propriedades do concreto endurecido	25
2.3.2.1	<i>Durabilidade</i>	25
2.3.2.2	<i>Densidade</i>	26
2.3.2.3	<i>Estabilidade volumétrica</i>	26
2.4	Dosagem do concreto	27
2.4.1	Método de dosagem ABCP	28
2.5	Ensaio para o concreto	29
2.5.1	Ensaio não destrutivo	30
2.5.2	Ensaio de resistência à compressão	30
2.6	Adições	31
2.6.1	Cinzas volantes	31

2.6.2	Sílica ativa.....	32
2.6.3	Escória de alto-forno.....	32
2.6.4	Pozolana natural.....	32
2.7	Aditivos para concreto.....	33
2.7.1	Classificação dos aditivos	34
2.7.2	Aditivos tensoativos.....	35
2.7.2.1	<i>Aditivos tensoativos redutores de água</i>	35
2.7.3	Modificadores de pega.....	38
2.7.3.1	<i>Retardadores</i>	39
2.7.3.2	<i>Aceleradores</i>	39
2.8	Aditivo Incorporador de Ar (IAR)	40
2.8.1	Histórico.....	40
2.8.2	Princípio de funcionamento	41
2.8.3	Utilização	43
2.8.4	Ensaio.....	44
2.8.4.1	<i>Método pressiométrico</i>	44
2.8.4.2	<i>Ensaio com concreto endurecido</i>	45
2.8.5	Influência no concreto fresco.....	46
2.8.5.1	<i>Trabalhabilidade</i>	46
2.8.5.2	<i>Slump</i>	46
2.8.5.3	<i>Exsudação</i>	46
2.8.6	Influência no concreto endurecido.....	47
2.8.6.1	<i>Densidade</i>	47
2.8.6.2	<i>Resistência estrutural</i>	47
2.8.6.3	<i>Resistência a sulfatos</i>	48
2.8.6.4	<i>Resistência a ciclos de gelo-degelo</i>	48
2.8.6.5	<i>Propriedades térmicas</i>	50
2.8.7	Fatores que influenciam na ação do aditivo.....	50
2.8.7.1	<i>Cimento</i>	51
2.8.7.2	<i>Processo de mistura</i>	52
2.8.7.3	<i>Lançamento</i>	52
2.8.7.4	<i>Uso de outros aditivos</i>	53
2.8.7.5	<i>Temperatura</i>	53

2.8.7.6	<i>Natureza do aditivo</i>	53
2.8.8	Precauções.....	54
3	ESTUDO EXPERIMENTAL	55
3.1	Materiais	56
3.1.1	Concreto	56
3.1.2	Aditivo	58
3.2	Instrumentos	59
3.3	Procedimentos de ensaio	61
3.3.1	Confecção dos corpos de prova	61
3.3.2	Cura dos corpos de prova.....	63
3.3.3	Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	65
3.3.4	Determinação da densidade	67
3.3.5	Preparação das superfícies	68
3.3.6	Ensaio de resistência à compressão	71
3.4	Resultados	71
3.4.1	Abatimento.....	73
3.4.2	Densidade.....	77
3.4.3	Resistência à compressão	77
3.4.3.1	<i>Variação da resistência em 7 dias</i>	77
3.4.3.2	<i>Variação da resistência em 14 dias</i>	78
3.4.3.3	<i>Variação da resistência em 28 dias</i>	80
3.4.3.4	<i>Ganho de resistência com o tempo</i>	81
3.4.4	Correlação entre densidade e resistência à compressão.....	84
3.4.5	Correlação entre abatimento e resistência à compressão	84
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Identificação do tema

A Indústria da Construção Civil tem, ao longo dos séculos, desenvolvido de forma extremamente acelerada a tecnologia dos materiais utilizados. Grande parte das obras atuais se vale do concreto, haja vista que este possui relativamente fácil aplicação e moldagem, conferindo boa resistência e confiabilidade às mais diversas aplicações. Para que a indústria da Construção continue em desenvolvimento, novas técnicas devem ser criadas e testadas, de modo a garantir melhor desempenho estrutural e viabilidade econômica. Portanto, é essencial que novas misturas, com diferentes tipos e percentuais de aditivos e constituintes, sejam testadas. O grande diferencial do concreto é, nesse sentido, o fato de ser uma mistura de diversos materiais diferentes, constituindo um produto final que possui um controle de qualidade mais difícil.

Tão importante quanto a qualidade dos materiais constituintes (cimento, agregados e água) é o uso de aditivos e adições, que conferem certas características à mistura, com o intuito de realçar qualidades desejadas. Dentre estes aditivos, existe o Incorporador de Ar (IAR), que se encarrega de agregar pequenas bolhas de ar ao concreto, de dimensões inferiores a 1 milímetro. Este aditivo é usado principalmente em países frios, para aumentar a resistência do concreto à deterioração pelo efeito dos ciclos de gelo-degelo. Em países de clima quente, como o Brasil, o uso de Incorporadores de Ar é menos comum, sendo atrelado a outras características desejadas, tais como o aumento da trabalhabilidade ou conforto térmico de edificações. Contudo, este aditivo pode acarretar uma diminuição na resistência estrutural, particularmente na resistência à compressão do concreto.

É de grande relevância, para o avanço da ciência dos materiais, que o princípio de funcionamento dos aditivos seja bem conhecido em diversas misturas, empregando materiais das mais variadas fontes. Em países desenvolvidos, a grande maioria dos traços de concreto utiliza algum tipo de aditivo, e a mesma tendência ocorre no Brasil. O controle de qualidade do concreto fresco e endurecido tem se tornado mais rigoroso com o passar dos anos, o que requer a utilização de novos materiais e a busca de maior conhecimento sobre as tecnologias já existentes.

Sabe-se que o aditivo incorporador de ar deve ser adicionado à mistura com cautela, haja vista que, ainda que realce algumas características desejadas na mistura, outras propriedades podem ser severamente prejudicadas. Nesse sentido, é fundamental que se

analise como essas propriedades mudam, e o melhor meio para isto é por meio de estudos experimentais. O presente trabalho tem como finalidade, então, analisar a influência do Aditivo Incorporador de Ar (IAR) nas propriedades do concreto fresco e endurecido, bem como avaliar a viabilidade do seu uso. De forma mais específica, busca-se estabelecer uma correlação entre a resistência à compressão e a aplicação de aditivo IAR para um número significativo de misturas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Gerais

Contribuir para o avanço da ciência dos materiais e do conhecimento do uso de aditivo incorporador de ar, possibilitando que futuros avanços sejam feitos nesta área.

Fazer uma análise sobre o comportamento do aditivo incorporador de ar em misturas de concreto. Busca-se verificar, também, outros parâmetros do concreto fresco e endurecido, tais como a consistência (por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone), densidade e, por conseguinte, propriedades térmicas.

1.2.2 Específicos

Estabelecer, por meio de experimentos, uma correlação entre o uso de aditivo IAR e a variação da resistência estrutural do concreto em diferentes idades (7, 14 e 28 dias), para uma série de misturas, com diferentes teores de cimento e agregados. Verificar o real impacto da utilização desse aditivo na queda ou ganho de resistência, bem como a porcentagem de variação. Além disso, fazer uma correlação entre mudanças na consistência do concreto e a introdução de um sistema controlado de vazios por meio do aditivo incorporador de ar.

1.3 Justificativa

O uso do aditivo incorporador de ar data de um bom tempo em diversas regiões do mundo, sobretudo em países de clima frio, como Estados Unidos, Canadá e países da Europa, uma vez que concretos com ar incorporado possuem melhor resistência às bruscas variações térmicas presentes nesses lugares, e, portanto, são mais duráveis. No Brasil, entretanto, historicamente esse aditivo tem sido pouco utilizado, haja vista que suas outras características

eram pouco conhecidas. Torna-se necessário, dessa maneira, que se faça um estudo para verificar a influência do uso de aditivos IAR nas propriedades de diversas misturas de concreto.

É muito importante verificar a queda de resistência do concreto com o uso de aditivos incorporadores de ar, para ter conhecimento de como proceder para alterar a proporção dos constituintes da mistura, como forma de compensar a perda de resistência mecânica do concreto.

A principal finalidade deste trabalho é, então, buscar compreender a ação do aditivo incorporador de ar no concreto nos estados fresco e endurecido. Dessa maneira, novas tecnologias podem ser implementadas e aplicadas na Indústria da Construção Civil.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho monográfico englobará duas vertentes. A primeira parte englobará uma revisão bibliográfica, por meio de documentação indireta, através de consultas a fontes de embasamento técnico e informação. Após isso, procederá-se para estudo experimental em laboratório.

A fase de experimentos consistiu na obtenção dos dados empíricos e, posteriormente, análise destes.

1.4.1 Obtenção de dados em laboratório

Como forma de analisar a perda de resistência à compressão para um número de misturas de concreto, moldar corpos de prova de formato cilíndrico, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A proporção dos constituintes das misturas será definida em massa. A partir disso, moldar quatro corpos de prova para cada traço, a serem testados em diferentes idades. Realizar ensaio de abatimento do tronco de cone, para verificação da consistência, e determinar as dimensões e a massa dos corpos de prova cilíndricos.

1.4.2 Análise e interpretação dos resultados

Definir uma relação entre o uso de incorporador de ar e a variação da resistência do concreto à compressão. Utilizando todos os dados obtidos, realizar uma análise gráfica e avaliar a precisão dos resultados.

1.5 Limitações

A proporção entre os constituintes do concreto, feita segundo o procedimento de dosagem descrito pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), não considerou variações da umidade dos agregados, o que pode ter modificado ligeiramente o teor de água da mistura. Além disso, houve limitação no número de traços analisados. As misturas de concreto tiveram fatores A/C entre 0.45 e 0.60 (variando de 0.05), logo o comportamento do aditivo incorporador de ar em misturas com mais ou menos consumo de cimento não foi verificado. Apenas um tipo de aditivo incorporador de ar foi analisado, e outros testes poderiam ser realizados para melhorar a confiabilidade dos resultados apresentados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico do concreto

Mehta e Monteiro citam, no capítulo 1 de seu livro intitulado “Concreto: estrutura, propriedades e materiais” um texto de Brunauer e Copeland (1964), que afirmam que o material mais utilizado na construção civil é o concreto, sendo que este é geralmente formado de aglomerante (Cimento Portland), agregados e água. Além disso, em muitos países, o consumo de concreto pode chegar a ser dez vezes mais numeroso que o aço. De acordo com Brunauer e Copeland (1964), apenas a água é mais utilizada pelo homem que o concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), uma das principais razões para que o concreto seja mais utilizado que o aço, embora sua resistência estrutural seja significativamente inferior, é a hidraulicidade do concreto, ou seja, a sua capacidade de resistir à presença de água. O concreto, nesse sentido, é um material fundamental para estruturas em contato com a água, ao contrário, por exemplo, da madeira e do aço, que sofrem deterioração ao entrar em contato com esse líquido. Ao longo dos anos, portanto, nota-se que o uso do concreto vem aumentando por conta da sua confiabilidade e durabilidade quando aplicado em ambientes em que o aço e a madeira não seriam indicados, como construções próximas de águas agressivas e em regiões úmidas. Outra razão seria a facilidade de execução e moldagem de diversos tipos de elementos estruturais. Com isso, torna-se fácil e prático fabricar uma peça com as dimensões desejadas. Isto ocorre devido à plasticidade do concreto fresco, ou seja, a sua capacidade de fluir e se adequar às fôrmas. O último motivo é de ordem econômica: o concreto é, geralmente, o material menos dispendioso e possui alta disponibilidade, o que pode ser explicado pois os materiais são mais baratos e abundantes, e o consumo de energia para fabricação e mistura do concreto é consideravelmente inferior.

O surgimento do concreto armado está atrelado à criação do cimento Portland. De acordo com Carvalho (2008), o concreto armado foi utilizado pela primeira vez em 1849, por Joseph-Louis Lambot (1814-1887), beneficiado pela produção industrial de cimento, iniciada em 1791 por James Parker. Anos mais tarde, um engenheiro alemão chamado Gustav Wayss (1851-1917) começou a aplicar o concreto armado na construção de vários edifícios na França e na Alemanha.

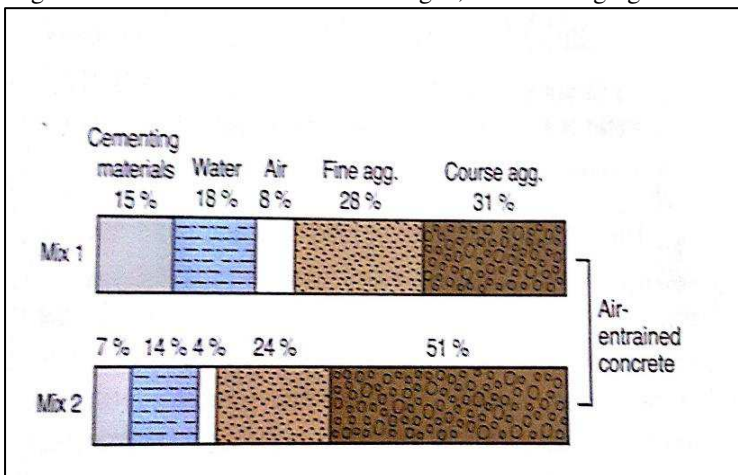
Os alemães definiram de forma mais completa a teoria aceita até hoje sobre o concreto armado, sustentada por ensaios e dados empíricos. Os primeiros métodos aceitos para dimensionamento de peças em concreto armado foram criados por E. Morsch. Suas

teorias, ainda utilizadas hoje, deram origem às primeiras normas de concreto armado (BASTOS, 2006).

2.2 Materiais constituintes do concreto

Como afirma Kosmatka et al. (2011), o concreto é, basicamente, o resultado da mistura de dois componentes principais, sendo eles: agregados e pasta. A pasta é geralmente composta de materiais aglomerantes (como o Cimento Portland), água e ar. Existem casos em que também se utilizam adições, para conferir certas propriedades e alterar o custo da mistura. A função da pasta é agir como uma cola, se encarregando de unir todos os componentes da mistura, e graças a uma série de reações químicas, endurecer e ligar os agregados. Já os agregados são compostos de agregados miúdos (areia) e agregados graúdos (pedra britada).

Figura 1 - Constituintes do concreto: água, cimento e agregados.



Fonte: Kosmatka et al. (2011).

2.2.1 Cimento Portland

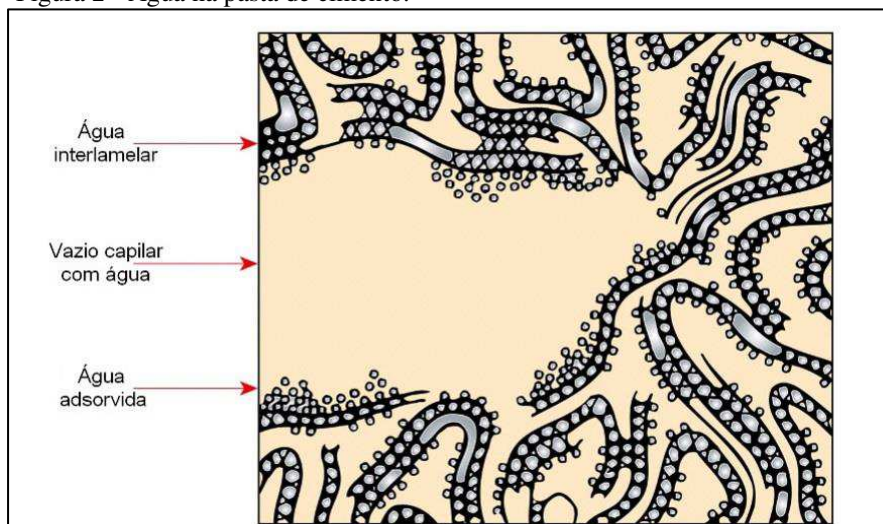
Segundo Mehta e Monteiro (1994), o Cimento Portland, principal componente da pasta de cimento presente no concreto, é um pó de cor cinza, e suas partículas possuem dimensão variando de 1 a 50 micrômetros (0,001 a 0,05 milímetros). É o resultado da moagem do clínquer, que corresponde a uma mistura de C_3S (silicato tricálcico ou alíta), presente na proporção de 45% a 60% no Cimento Portland, C_2S (silicato dicálcico ou belíta), com teor de 15% a 30%, C_3A (aluminato tricálcico ou celíta), correspondendo a de 6% a 12% do Cimento e C_4AF (ferroaluminato tetracálcico ou felíta). A propoção desses constituintes é intimamente relacionada com as características estruturais e a durabilidade do Cimento

Portland. Sabe-se, por exemplo, que o C_3S , ou silicato tricálcico, é responsável pela pega e o ganho inicial de resistência da mistura, ou seja, caso exista um teor maior de silicato tricálcico no cimento, a resistência aumenta nos primeiros dias. O C_2S (silicato dicálcico), por outro lado, contribui fortemente para o aumento de resistência do concreto após a primeira semana. Já cimentos com maior teor de C_3A possibilitam concretos com maior resistência a deterioração por sulfatos e solos agressivos, e o C_4AF é resultado do processo de fabricação do clínquer (KOSMATKA et al., 2011).

Uma vez na pasta, os principais componentes do cimento podem ser divididos em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio. Assim como ocorre no Cimento Portland, os teores dos componentes podem variar. O C-S-H, por exemplo, constitui de 50% a 60% dos sólidos encontrados na pasta de cimento, enquanto as outras fases estão presentes em concentrações menores. Deve-se tomar cuidado com o teor de sulfoaluminatos de cálcio, uma vez que este pode estar relacionado com a formação de etringita, que se correlaciona com a queda de resistência do concreto à presença de sulfatos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Outro constituinte da pasta de cimento é a água, como mostrado anteriormente. A presença deste líquido na pasta pode ser classificada dependendo de onde ele pode ser encontrado na pasta e no grau de dificuldade com que a água pode ser retirada da mistura. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a água pode ser encontrada nos estados seguintes: água adsorvida, água capilar, água interlamelar e água quimicamente combinada (parte dos componentes do cimento). A figura a seguir mostra um esquema de onde a água pode ser encontrada na pasta:

Figura 2 - Água na pasta de cimento.



Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

2.2.1.1 Tipos de cimento Portland

Segundo Silva (1991), assim que o cimento passou a ser vendido em nosso país, os aglomerantes adquiridos pelas empresas tinham as características especificadas por elas. Foi apenas depois de 1904, com o surgimento das primeiras normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que as fabricantes passaram a desenvolver uma linha padronizada de produtos.

No Brasil, os seguintes tipos são utilizados com frequência:

- (1) Cimento Portland comum;
- (2) Cimento Portland de alto-forno;
- (3) Cimento Portland de alta resistência inicial;
- (4) Cimento Portland pozolânico.

De acordo com a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), o cimento pode ser classificado da seguinte maneira:

- a) Cimento Portland Comum: é o tipo de cimento que pode ser utilizado em obras gerais, desde que não haja exposição a agentes agressivos, como sulfatos. Existem dois tipos: o CP-I e o CP-I-S, que se diferenciam pelo fato do último conter uma pequena porcentagem de material pozolânico.
- b) Cimento Portland Composto (CP II): possui resistência moderada a ataque de sulfatos, é um dos tipos de cimento mais utilizados na construção civil;
- c) Cimento Portland de Alto-Forno (CP III): também bastante aplicado na construção civil. Se diferencia dos tipos anteriores por levar adição de escória, garantindo baixo calor de hidratação e durabilidade;
- d) Cimento Portland Pozolânico (CP IV): possui adição de pozolana, o que confere melhor resistência aos concretos que levam este tipo de aglomerante;
- e) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI): possui maior teor de silicato tricálcico e partículas mais finas, possibilitando ganhos de resistência maiores nas primeiras idades do concreto;
- f) Cimento Portland Branco: se diferencia dos demais por apresentar uma cor mais clara. Devido a isso, é possível utilizar pigmentos para conferir diferentes colorações ao material;

g) Cimento Portland de Baixo Calor de hidratação;

h) Cimento Portland Resistente a Sulfatos: recomendado para uso em concretos sujeitos a ambientes agressivos (ABCP, 2016).

2.2.2 Agregados

Como explicado antes, os agregados presentes na mistura do concreto, representando grande parte do seu volume final, podem ser divididos, de acordo com as suas dimensões e propriedades, em agregados graúdos e agregados miúdos.

De acordo com a ABNT NBR 7211:2005, os agregados miúdos, normalmente a areia natural ou fabricada, são agregados cujas partículas passam pela peneira de 4,75 mm de abertura e ficam retidas na peneira de 0,150 mm. Considera-se que determinado agregado é graúdo quando os grãos passam pela peneira de abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm. Já para Kosmatka et al. (2011), agregados miúdos correspondem a partículas finas, com dimensão não superior a 10 mm, e agregados graúdos são constituídos de partículas com dimensões entre 1,25 mm e 150 mm, sendo a dimensão máxima comumente usada a de 20 mm.

Uma vez que o teor de agregados no concreto é da ordem de 60% a 75% do concreto em volume, é natural que a seleção destes materiais seja levada a sério, já que é de extrema importância para a qualidade do produto final. Os agregados devem ter resistência adequada e estar livres de partículas que possam causar deterioração aos outros componentes. Para o uso eficiente da pasta de cimento, faz-se necessário que os agregados tenham uma curva granulométrica contínua. Na escolha dos agregados, é fundamental observar determinadas características, de modo a garantir que a mistura será de boa qualidade e evitar problemas futuros. As principais características que se deve levar em conta são a resistência à abrasão e degradação, resistência a deterioração por sulfatos, distribuição granulométrica, densidade, densidade relativa, índice de absorção e resistências à compressão e à flexão (KOSMATKA et al., 2011)

2.3 Propriedades do concreto

As principais propriedades estudadas no concreto podem ser divididas de acordo com o tempo após a mistura. Sabe-se que estas propriedades são completamente diferentes

uma vez que o concreto endurece. Como consequência, as características desse material se dividem em propriedades do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido.

2.3.1 Propriedades do concreto fresco

2.3.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto fresco é uma forma de mensurar “[...] o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade” (ASTM C 125 apud MEHTA E MONTEIRO, 1994, p. 348).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade de uma mistura de concreto é função de dois componentes fundamentais, sendo eles a fluidez e a coesão. A fluidez do concreto fresco serve para descrever a facilidade de mover o concreto, enquanto a coesão mede a resistência à segregação e à exsudação.

É importante levar em consideração que a trabalhabilidade não é uma característica absoluta do concreto, uma vez que a mesma mistura pode ser considerada trabalhável ou não, dependendo do método de adensamento. Quando o adensamento é feito por vibradores, um concreto pode ser tido como bastante trabalhável. Este mesmo concreto poderia apresentar pouca trabalhabilidade em situações em que se utilize adensamento manual (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Existem 3 métodos bastante usados para medir a trabalhabilidade do concreto fresco: o ensaio de abatimento do tronco de cone, que mede a consistência da mistura, o ensaio Vebe e o ensaio do fator de compactação.

O ensaio de abatimento de tronco de cone, comumente chamado de *Slump Test*, é um método simples e prático de avaliar a consistência e a fluidez de determinada mistura, podendo ser realizado em laboratórios ou no próprio local de aplicação do concreto. Haja vista sua simplicidade, é um dos métodos mais usados ao redor do mundo.

Para a execução do ensaio, utiliza-se um tronco de cone de 300 mm de altura, com 200 mm de diâmetro na base e 100 mm de diâmetro na parte de cima. Preenche-se o tronco de cone com concreto, deixando a superfície superior plana. Após isso, o tronco de cone é suspenso, e mede-se com uma régua a diminuição de altura causada pelo peso do concreto. Esta diminuição é comumente chamada de abatimento, que é diretamente relacionado com a fluidez do concreto. Para misturas mais secas, o ideal é utilizar o ensaio de Vebe, uma vez que este se apresenta mais confiável. Contudo, o ensaio é mais difícil de ser realizado. (MEHTA;

MONTEIRO, 1994).

2.3.1.2 Tempo de pega

De maneira semelhante ao tempo de pega do cimento, o tempo de pega do concreto é o tempo que determina o começo do processo de solidificação do concreto fresco (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Pode-se dizer que a pega corresponde a uma fase de transição entre a fluidez do concreto e seu endurecimento, quando se atinge a sua rigidez. O método mais comumente utilizado para mensurar o tempo de pega do concreto é o descrito pela norma americana ASTM C 403, que mede a resistência à penetração em intervalos de tempo regulares. Quando a resistência à penetração se iguala a 3.4 MPa, tem-se o tempo de início de pega. O tempo de fim da pega ocorre quando se atinge a resistência de 27.6 Mpa. Fatores que afetam o tempo de pega são a temperatura, o fator água/cimento e a presença de aditivos (KOSMATKA et al., 2011).

2.3.2 Propriedades do concreto endurecido

2.3.2.1 Durabilidade

Como afirma Kosmatka et al. (2011), a durabilidade do concreto é a propriedade que se refere à capacidade deste de resistir às ações externas, bem como outras condições de exposição, tais como interferências do clima, ataque químico, abrasão e outros fatores com o passar do tempo, mantendo suas características durante o período de serviço da estrutura. A chave para a durabilidade do concreto é, mesmo em situações de severa exposição, o correto controle tecnológico.

Os mecanismos de ataque ao concreto são diversos. De acordo com Kosmatka et al. (2011), a maior parte dos processos agressivos ao concreto se dá pela presença de umidade, que se relaciona com a presença de íons dissolvidos, tais como sulfatos e cloretos. A maior parte dos processos de deterioração ao concreto se dá em duas etapas. A primeira etapa corresponde à entrada de substâncias agressivas ao concreto, que são transportadas pelos capilares do concreto. A segunda fase é a própria deterioração em si.

Os mecanismos de deterioração do concreto podem ser divididos em causas físicas e químicas. Para Mehta e Gerwick (1982), a deterioração do concreto por fatores físicos pode ser dividida em dois tipos: a fissuração, ou seja o aparecimento de trincas, que é

resultado da exposição a gradientes e extremos de temperatura, cargas estruturais e variações de volume; e o desgaste superficial, podendo ser causada pela erosão ou abrasão. Os fatores químicos, geralmente fluidos agressivos, reações álcali-agregados e ataques por sulfato são normalmente encontrados em conjunto com os fatores físicos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A cura adequada do concreto, em que é possível manter temperatura e umidades satisfatórias após a sua aplicação, bem como o uso de adições e um baixo fator água/cimento são essenciais para que se tenha um concreto durável. A fim de que se tenha menos permeabilidade, e, portanto, menor quantidade de vazios no concreto, é necessário que a quantidade de água na mistura seja menor, o que pode diminuir a chance de deterioração por agentes agressivos. Além de um correto controle tecnológico e dosagem, não devemos esquecer que uma boa durabilidade será alcançada se a estrutura passar por manutenções. Inspeções regulares são sempre necessárias para que se tenha segurança durante o tempo de vida da construção (KOSMATKA et al., 2011).

2.3.2.2 Densidade

A densidade do concreto, ou seja, a sua massa por unidade de volume (normalmente expressa em quilogramas por metro cúbico), é função de uma série de fatores. De acordo com Kosmatka et al. (2011), a densidade do concreto geralmente varia entre uma faixa de 2200 a 2400 quilogramas por metro cúbico, variando de acordo com a quantidade de ar aprisionado ou incorporado por meio de aditivos, a densidade dos constituintes da mistura, como os agregados, e os teores de água e aglomerante. Normalmente um aumento da densidade é esperado quando se diminui a porcentagem de cimento, uma vez que o teor de agregados aumenta.

A densidade do concreto influencia fortemente em outras propriedades, tais como a condutibilidade térmica e a resistência estrutural. Admite-se que uma queda na densidade se traduz em uma diminuição na resistência do concreto.

2.3.2.3 Estabilidade volumétrica

Mudanças de umidade, tensão e temperatura podem alterar as dimensões do concreto endurecido. Estas variações, em volume, podem variar de 0.01% a 0.08%. Quando sujeito à tensão, o concreto inicialmente se deforma elasticamente. Já mudanças do teor de umidade do concreto podem causar retração, que é uma propriedade inevitável e inerente do

concreto. Faz-se necessário, portanto, o controle do aparecimento de fissuras decorrentes da variação de volume do concreto endurecido, tais como o uso de ligações e armaduras para reduzir o tamanho das trincas decorrentes de tensões causadas por carregamento, temperatura e variações de umidade (KOSMATKA et al., 2011).

2.4 Dosagem do concreto

Segundo Kosmatka et al. (2011, p.219), “[...] a dosagem da mistura se refere ao processo de determinar os teores ou quantidades dos ingredientes constituintes do concreto, usando materiais locais, para alcançar certas características especificadas”. Além disso, uma mistura deve atender a alguns requisitos básicos, sendo eles: economia de material e energia, durabilidade, aparência uniforme do concreto, resistência e boa trabalhabilidade.

Para a seleção dos materiais constituintes, é necessário ter conhecimento de onde o concreto será usado, assim como as condições de exposição e as dimensões dos elementos estruturais. O primeiro passo é a seleção da razão entre água e aglomerante, uma vez que a qualidade do concreto está primariamente atrelada ao seu teor de cimento. Um grande número de constituintes no concreto pode causar dificuldade em controlar a mistura. Portanto, caso não haja um controle tecnológico rigoroso, a melhor escolha é trabalhar de forma simples, com poucos ingredientes, para não comprometer a qualidade e resistência do concreto (KOSMATKA et al., 2011).

Um dos principais objetivos da dosagem dos componentes do concreto é a obtenção de um produto final que apresente certos requisitos desejados, “[...] sendo a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido a uma idade definida, os requisitos normalmente mais importantes”. (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p.312).

Uma das maneiras mais utilizadas para determinar a qualidade do concreto endurecido é a medida da resistência estrutural, embora outras características também sejam importantes em situações de ambientes agressivos, como a durabilidade. A resistência à compressão é normalmente uma relação inversa entre o fator água/cimento: quanto maior o fator A/C , menor é a resistência estrutural da mistura (KOSMATKA et al., 2011). Ainda segundo Kosmatka et al. (2011, p.220), mantido o fator água/cimento constante, outros fatores que afetam a resistência do concreto são: (1) o uso de aditivos na mistura; (2) mudanças nas características do aglomerante, pois os tipos de cimento podem diferir; (3) teor de ar aprisionado ou ar incorporado ao concreto; (4) mudanças na distribuição granulométrica,

forma, dureza e textura dos agregados; e (5) a cura do concreto.

Como afirmam Mehta e Monteiro (1994), os processos de dosagem de materiais devem se valer por três princípios fundamentais, que são: (1) durabilidade e resistência; (2) custo; e (3) trabalhabilidade.

Para que se tenha boa trabalhabilidade, a opção natural é o aumento do fator água/cimento. Deve-se, contudo, ter cuidado para não tornar a mistura extremamente fluida, de modo a não comprometer a resistência. Em casos em que seja necessária uma grande fluidez e trabalhabilidade do concreto, o uso de aditivos para este fim deve ser encorajado, a fim de não aumentar excessivamente o teor de água da mistura, evitando o lançamento de mais água ao concreto, que pode gerar problemas de desempenho. (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No que se refere ao custo dos materiais, Mehta e Monteiro (1994) explicam que a escolha dos materiais deve ser feita maneira a conseguir o produto final mais barato, salvo em casos que, por motivos técnicos, decida-se utilizar outros materiais mais adequados. Outro ponto importante é considerar que o cimento tem um preço bem mais elevado que os agregados, logo o consumo de cimento deve ser controlado.

Existem diversos procedimentos de dosagem utilizados atualmente, que se dividem em duas categorias distintas: a dosagem racional e a dosagem empírica.

A dosagem empírica se refere ao processo de escolha dos percentuais da mistura (traço) sem um estudo sobre as características dos materiais. Este método é ainda bastante usado pela facilidade e praticidade, embora não seja tão exato. Por outro lado, a dosagem racional dos constituintes se vale das propriedades dos agregados e do cimento para atingir as especificações desejadas do produto final. Um dos procedimentos mais utilizados é o método criado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

2.4.1 Método de dosagem ABCP

Este método foi criado pelo Eng. Públio Penna Firme Rodrigues e publicado em 1984 pela ABCP, sendo uma adaptação do procedimento encontrado na norma americana ACI 211.1-81. (BOGGIO, 2000).

De acordo com Boggio (2000), este procedimento se divide em etapas, sendo elas:

- (1) Determinação da consistência do concreto fresco por meio do *slump test*, segundo a norma NBR NM 67. Os intervalos de abatimento variam conforme a

utilização do concreto;

- (2) Determinação da dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- (3) Com a ajuda de uma tabela e os valores de abatimento e dimensão dos agregados, encontrar um valor para a água de amassamento;
- (4) Emprego da Curva de Abrams para a determinação do fator água/cimento, em função da resistência especificada;
- (5) Cálculo do consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
- (6) Determinação das proporções entre o agregado graúdo e o agregado miúdo;
- (7) Definição da quantidade de areia na mistura, sabendo que o volume total do concreto é a soma dos seus constituintes: agregados, ar, cimento e água. Para que se tenha a quantidade de areia, a seguinte fórmula pode ser utilizada:

$$A = \left[1 - \left(\frac{C}{Y_c} + \frac{B}{Y_b} + \frac{Q}{Y_q} + Var \right) \right] \times Y_a$$

Em que:

Y_a = massa específica do agregado miúdo (em kg/ m³);

Y_b = massa específica do agregado graúdo (em kg/ m³);

Y_q = massa específica da água (em kg/ m³);

Y_c = massa específica do aglomerante (em kg/ m³);

Var = volume de vazios de ar (m³)

Q = massa de água por metro cúbico de concreto;

A = massa de areia por metro cúbico de concreto;

B = massa de brita por metro cúbico de concreto;

C = massa de cimento por metro cúbico de concreto.

- (8) determinação, em massa, da proporção dos constituintes da mistura.

2.5 Ensaio para o concreto

Como afirma Kosmatka et al. (2011, p.323, tradução nossa):

A construção em concreto de forma satisfatória exige que este possua propriedades específicas. De modo a assegurar que estas propriedades são obtidas, controle de qualidade e ensaios de aceitação são partes indispensáveis do processo de construção. Os resultados dos ensaios nos dão informações importantes para fazer quaisquer ajustes no traço.

Portanto, faz-se necessário que testes sejam feitos no concreto, para ter certeza de que este atenderá as suas especificações. Os ensaios podem ser classificados em ensaios destrutivos e não destrutivos.

2.5.1 Ensaio não destrutivos

Dentre os diversos métodos de ensaio disponíveis, testes dinâmicos e de vibrações, esclerometria e testes de resistência à penetração são bastante utilizados. Estes ensaios, também chamados de NDT (*nondestructive tests*), são usados principalmente para determinar a resistência do concreto aplicado na obra, avaliação de danos, localização das armaduras e análise do ganho de resistência de concreto com a idade (KOSMATKA et al., 2011).

A tabela a seguir nos mostra alguns ensaios não destrutivos e suas principais funções:

Tabela 1 - Propriedades vs. Métodos de Ensaio.

Propriedade	Métodos de ensaio recomendados
Resistência Mecânica	Esclerometria, teste de penetração
Uniformidade	Radiografia, ultrassom e esclerometria
Localização e dimensões das armaduras	Pacômetro, radiografia
Rigidez	Ultrassom
Presença de vazios internos	Radiografia, ultrassom

Fonte: Adaptado de ACI (2007) e Clifton (1985 apud KOSMATKA et al., 2011, p.344).

2.5.2 Ensaio de resistência à compressão

Este tipo de teste se encarrega de medir a resistência de um corpo-de-prova cilíndrico de uma amostra de concreto à compressão em determinado tempo, geralmente 28 dias. É um método bastante confiável para obter a resistência estrutural da mistura, sendo de fácil execução. No Brasil, a norma que descreve o ensaio é a ABNT NBR 5739 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos).

Os corpos de prova de formato cilíndricos devem possuir dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, com volume de concreto de aproximadamente 1.57 litros. A aparelhagem utilizada consiste, segundo a ABNT NBR 5739, da máquina de ensaio, pratos

de compressão (superior e inferior) e paquímetro, para medir as dimensões exatas dos corpos de prova.

A resistência estrutural após certa quantidade de dias é dada em MPa e obtida dividindo a carga mostrada na máquina de ensaio pela área da seção transversal do corpo-de-prova.

2.6 Adições

Adições, comumente referidas em inglês como *Supplementary cementing materials* (SCM), ou materiais suplementares do cimento, são todos aqueles materiais que não fazem parte do cimento comum, agregados, água e também não são aditivos. Existem para adicionar ou substituir parcialmente o cimento Portland, ou podem ser misturados junto a mistura, dependendo do efeito que se deseja alcançar. As adições existem para conferir determinadas características de aparência, resistência, durabilidade ou simplesmente trazer economia. Exemplos de adições comumente utilizadas ao redor do mundo são a sílica ativa, escória de alto forno, cinzas volantes e a pozolana. Cada um destes materiais pode modificar o comportamento do produto final desejado. De modo a determinar se a dosagem está correta e se a propriedade desejada está melhorando, ensaios devem ser realizados. (KOSMATKA et al., 2011).

2.6.1 Cinzas volantes

As cinzas volantes representam o tipo de material suplementar ou adição mais utilizado no concreto ao redor do mundo. Consistem de um resíduo pulverulento que se assemelha ao cimento, resultante da combustão do carvão em indústrias geradoras de energia. São constituídas principalmente de sílica, ferro, cálcio e alumina, com teores menores de outros metais, como magnésio, potássio e sódio. Quando adicionadas, podem aumentar a trabalhabilidade do concreto, diminuindo o fenômeno da exsudação. Portanto, o uso de cinzas volantes é recomendado em misturas com a presença de agregados com pouco percentual de partículas finas. Quando utilizadas, diminuem o calor de hidratação do cimento portland, assim como aumentam o tempo de pega do concreto. Além disso, geralmente são capazes de reduzir a permeabilidade e a absorção do concreto. (KOSMATKA et al., 2011).

2.6.2 Sílica ativa

A sílica ativa, também chamada de microsílica é um subproduto utilizado como adição no concreto, formado principalmente por dióxido de silício na forma amorfa (não cristalina). É formada de materiais extremamente finos, com diâmetro de aproximadamente 100 nanômetros. Este material suplementar é bastante indicado, portanto, quando se deseja aumentar a impermeabilidade do concreto, sendo usado em percentuais que variam entre uma faixa de 5% a 10% da massa total do aglomerante. (KOSMATKA et al., 2011).

Os principais efeitos do uso da sílica ativa no concreto são o aumento da capacidade de bombeamento da mistura, redução da segregação e exsudação de forma significativa, aumento da necessidade de água na mistura e maior dificuldade de finalização da superfície da estrutura, o que pode ser corrigido por meio de aditivos.

2.6.3 Escória de alto-forno

A escória de alto forno é um subproduto da fabricação do ferro e do aço, sendo também chamada de *Ground granulated blast furnace slag* (GGBFS). Consiste primariamente de aluminossilicatos e silicatos de cálcio, de consistência granular e dimensões inferiores a 45 micrômetros. Na América do Norte, a escória de alto-forno constitui uma grande porcentagem de todo o material constituinte do cimento. Algumas misturas de concreto chegam a possuir 70 % de escória de alto-forno em massa no cimento. Os efeitos comuns do uso desta adição como componente do concreto são a melhora da trabalhabilidade, aumento da exsudação e do tempo de pega do concreto, melhora da capacidade de bombeamento e possível ganho de resistência. (KOSMATKA et al., 2011).

De acordo com Malhotra (1996 apud KOSMATKA et al., 2011), a escória granulada de alto forno foi desenvolvida inicialmente no século XIX, na Alemanha, sendo usada, de acordo com Abrams (1925), desde o início do século XX como adição para o cimento.

2.6.4 Pozolana natural

A palavra pozolana vem de Pozzuoli, uma vila perto de Nápoles, Itália. O uso de cinzas de vulcão vem sido documentado desde 2000 a.C., e muitas construções usando esses materiais ainda existem até os dias atuais na Itália, Grécia e no Egito. Os efeitos da pozolana

natural no concreto fresco são o aumento da trabalhabilidade, assim como ocorre com a escória de alto forno e as cinzas volantes, apesar da influência no tempo de pega e no fenômeno de exsudação ser mínima. Já para o concreto no estado endurecido, a adição de pozolana pode afetar positivamente a durabilidade e resistência estrutural. (KOSMATKA et al., 2011)

2.7 Aditivos para concreto

De acordo com Silva (1991), aditivos são ingredientes adicionados à mistura para tornar mais desejáveis algumas características. A definição de aditivo também é dada pela ASTM C 125-93 (*Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*), segundo a qual aditivos são substâncias empregadas no concreto, adicionados aos outros ingredientes no processo de mistura ou antes dela. O descobrimento de que as propriedades do concreto, no estado fresco ou endurecido, poderia ser alterado com o uso dessas substâncias propiciou a expansão da indústria de aditivos. Hoje, em alguns países a maioria das misturas apresenta algum traço de aditivo. No Canadá e na Austrália, por exemplo, mais de 80 % do concreto utilizado na construção possui algum aditivo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Como afirma Kosmatka et al. (2011, p.125), o uso de aditivos é encorajado pelos seguintes motivos:

- (1) Manter a qualidade do concreto, tanto durante a mistura, quanto na utilização e no transporte até o local de aplicação;
- (2) Atingir características desejadas à mistura de uma forma prática;
- (3) Redução de custos.

Mais especificamente, é dito por Silva (1991) que por meio do uso de aditivos é indicado para alterar uma série de características, tais como aumento da resistência estrutural, ganho de compacidade, melhora da consistência e fluidez do concreto, alterações no peso, mudanças no tempo de pega, redução na permeabilidade e exsudação e aumento de resistência a ataques por líquidos agressivos.

Apesar de alterar e melhorar algumas propriedades no concreto, deve-se ter em mente que não se deve substituir um bom controle tecnológico e um bom traço pelo uso de aditivos. Além do seu uso, deve-se levar em conta uma série de fatores no concreto, como a porcentagem de cimento da mistura, forma e granulometria dos agregados graúdos e miúdos,

temperatura, consistência e quantidade de água, para ter certeza de que uma determinada mistura irá mudar suas propriedades como desejado. (KOSMATKA et al., 2011).

2.7.1 Classificação dos aditivos

Por variarem bastante a sua composição e propriedades, por vezes a classificação de um aditivo de acordo com sua funcionalidade se torna uma tarefa complexa. De acordo com a norma americana ASTM C 494 (*Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*), os aditivos químicos modificadores do tempo de pega e redutores de água se enquadram em sete classificações, sendo: (1) redutor de água; (2) retardador de pega; (3) acelerador de pega; (4) redutor de água e retardador de pega; (5) redutor de água e acelerador de pega; (6) redutor de água mais eficiente e (7) redutor de grande eficiência e acelerador de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para Kosmatka et al. (2011, p.125), uma simples classificação dos aditivos, de acordo com a sua função, pode ser a seguinte:

- (1) Aditivos incorporadores de ar;
- (2) Aditivos plastificantes;
- (3) Aditivos redutores de água;
- (4) Retardadores de pega;
- (5) Aceleradores de pega;
- (6) Inibidores de corrosão;
- (7) Redutores de retração;
- (8) Inibidores de reação álcali-sílica;
- (9) Aditivos que conferem cor ao concreto;
- (10) Controladores de hidratação;
- (11) Outros aditivos para permeabilidade, formação de espuma e melhora da trabalhabilidade.

Já a classificação dada por Silva (1991), separa os aditivos em incorporadores de ar, plastificantes, dispersores, impermeabilizantes, produtos de cura, modificadores de pega e formadores de espuma ou gás.

No que diz respeito à importância dos aditivos, Silva (1991, p. 70) afirma que: “As normas internacionais para aditivos, na sua classificação, mostram uma tendência a

classificar os aditivos em quatro grupos: redutores de água ou plastificantes; incorporadores de ar; retardadores; redutores de água e retardadores e aceleradores”.

A ABNT NBR 11768 – 2011 também possui um sistema de classificação dos principais aditivos, que se dividem em plastificante (ou redutor de água), superplastificante tipo I, superplastificante tipo II, acelerador de resistência (AR), acelerador de pega (AP), retardador de pega (RP), incorporador de ar (IA), hiperplastificantes e aditivos polifuncionais.

2.7.2 Aditivos tensoativos

Os aditivos tensoativos (em inglês, *surface-active admixtures*) , são geralmente do tipo redutores de água ou incorporadores de ar, constituindo de cadeias longas com duas extremidades distintas: uma hidrófoba e uma hidrófila, sendo absorvidos nas regiões de transição entre os constituintes da pasta de cimento. Os aditivos tensoativos que se encarregam de incorporar bolhas de ar ao concreto fresco são normalmente feitos de ácidos graxos, detergentes e sais de resinas vegetais, enquanto os redutores de água são compostos por ácidos carboxílicos, polissacarídeos ou ácidos lignossulfônicos. (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.7.2.1 Aditivos tensoativos redutores de água

Os tensoativos redutores de água, ou plastificantes, são aditivos responsáveis por aumentar a trabalhabilidade e fluidez do concreto, dado um mesmo fator água/cimento. Caso se queira manter a mesma consistência e trabalhabilidade, uma quantidade de água menor pode ser utilizada na mistura, contribuindo, dessa forma, em um ganho de resistência mecânica sem perda das características desejadas do concreto fresco.

Segundo Silva (1991) os aditivos plastificantes ou redutores de água possibilitam que se reduza a quantidade de água no concreto fresco na ordem de 5% a 10%, com um ganho de resistência a esforços mecânicos de entre 10% e 30%.

Contudo, deve-se ter em mente que apesar da diminuição do teor de água, o uso de aditivos redutores de água pode causar um aumento da retração, embora este seja apenas um fator causador desse fenômeno. Caso se mantenha o fator água/cimento, o uso de aditivo redutor de água pode causar uma pequena perda de resistência, enquanto o *slump* pode chegar a mais que dobrar (WHITING; DZIEDZIC, 1992 apud KOSMATKA et al., 2011).

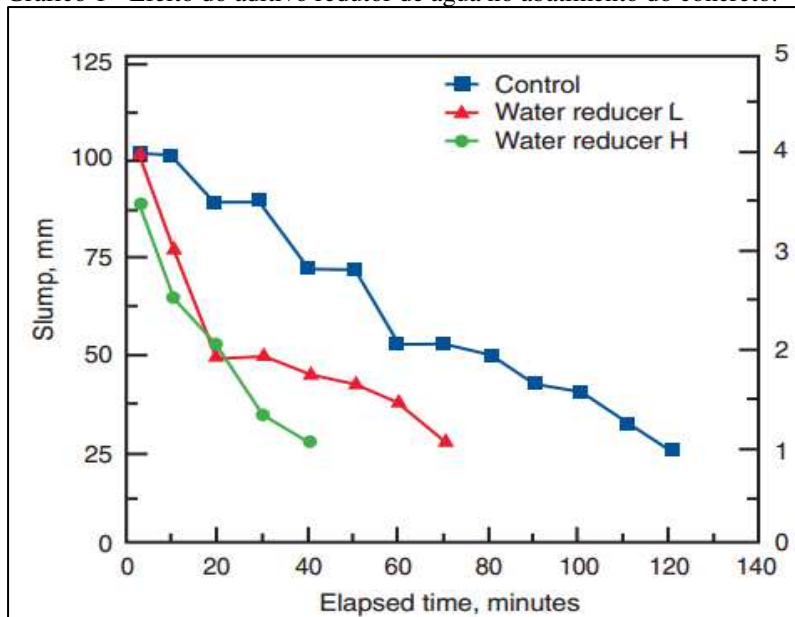
Tabela 2 - Aditivos redutores de água e seus efeitos.

Aditivo	Efeito Desejado
Redutor de água (ASTM C 494, tipo A)	Reduz o teor de água em pelo menos 5%
Redutor de água e retardador (ASTM C 494, tipo D)	Reduz o teor de água em no mínimo 5%, além de retardar a pega
Redutor de água e acelerador (ASTM C 494, tipo E)	Reduz o teor de água em pelo menos 5% e acelera a pega
Redutor de água de alta eficiência (ASTM C 494, tipo F)	Reduz o teor de água em pelo menos 12%
Redutor de água de alta eficiência e retardador (ASTM C 494, tipo G)	Reduz o teor de água em pelo menos 12% e tem a função de retardar a pega
Redutor de água de média eficiência	Reduz de 6% a 12% a porcentagem de água da mistura

Fonte: Adaptado de Kosmatka et al. (2011), tradução nossa.

Os aditivos redutores de água de média eficácia foram introduzidos em meados da década de 80, melhorando a capacidade desse tipo de aditivo, o que possibilitou o seu uso em menor proporção, sem prejudicar o tempo de pega do concreto fresco. Esse tipo de redutor de água é indicado quando houver adição de sílica ativa, o que pode tornar a massa mais difícil de trabalhar, uma vez que melhoram consideravelmente a trabalhabilidade. Recomenda-se que redutores de água normais sejam usados em concretos com abatimentos entre 100 e 125 milímetros. Já os redutores de água de média eficiência podem ser usados para misturas com *slump* inferior (NMAI; SCHLAGBAUM; VIOLETTA, 1998 apud KOSMATKA et al., 2011).

Gráfico 1 - Efeito do aditivo redutor de água no abatimento do concreto.

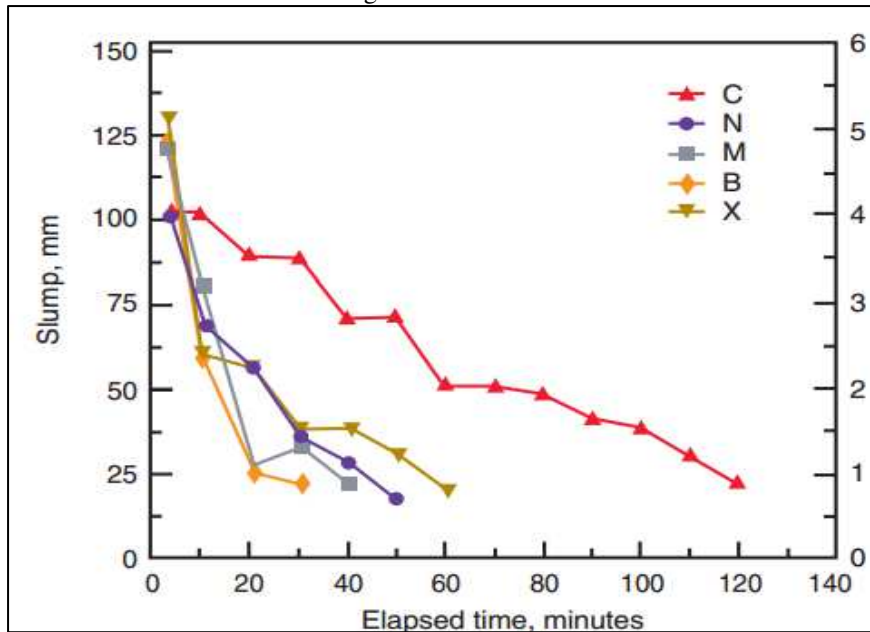


Fonte: Whiting e Dziedzic (1992 apud KOSMATKA et al., 2011, p. 128).

Já os redutores de água de alta eficiência, tais como os tipos F e G descritos na ASTM C 494 são capazes de reduzir o teor de água em porcentagens bem superiores, tornando mais fácil a tarefa de se conseguir uma mistura com baixo fator água/cimento. O resultado disso é que é possível conseguir concretos com elevadas resistências à compressão, aumento da resistência a penetração de cloretos e alto ganho de resistência inicial. Em lugares frios, contudo, deve-se ter cuidado, pois a resistência a ciclos de gelo-delelo geralmente diminui, pelo fato do sistema de vazios de ar se tornar menos eficiente (KOSMATKA et al., 2011).

A figura a seguir mostra o ganho de trabalhabilidade dos traços que utilizam aditivo redutor de água, principalmente nos primeiros minutos após a mistura:

Gráfico 2 - Efeito do redutor de água de alta eficiência no abatimento do concreto.



Fonte: Whiting e Dziedzic (1992, apud KOSMATKA et al., 2011, p. 130).

2.7.3 Modificadores de pega

Os aditivos modificadores de pega têm, como o próprio nome diz, a função primordial de alterar o tempo de início das reações químicas que levam ao endurecimento do concreto fresco, possibilitando que o tempo de trabalho do concreto seja alterado. Sabe-se que um dos fatores que altera o tempo de pega do cimento é a temperatura. Desse modo, em lugares muito quentes ou muito frios, faz-se necessário, por vezes, o uso desses aditivos na mistura.

Os modificadores podem acelerar ou retardar o tempo de pega. Quando se deseja aplicar o concreto em temperaturas superiores a 30°, ou em condições em que o concreto deve ser transportado por um tempo razoável, os retardadores de pega podem ser utilizados. Já para locais frios, o ideal é o uso do acelerador de pega, uma vez que as reações são consideravelmente mais lentas.

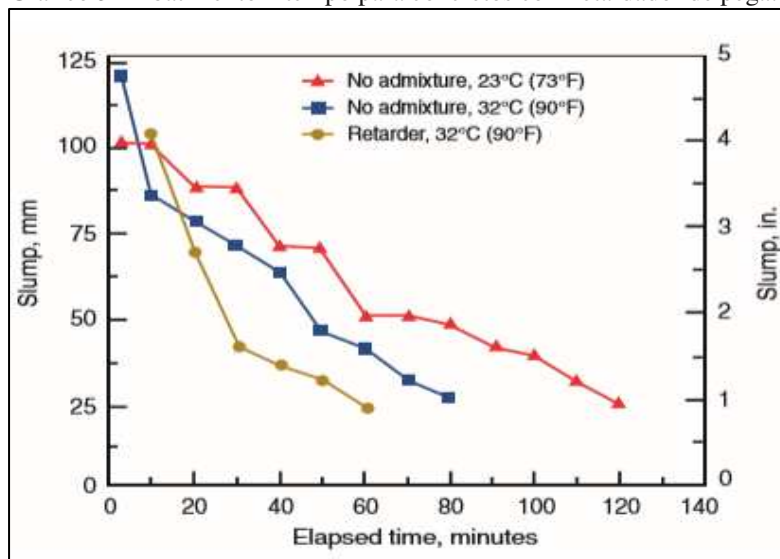
É preciso mencionar que certos componentes podem cumprir um papel de retardadora ou aceleradora, a depender da quantidade empregada. Um exemplo é em relação à massa de cimento, 0,3 % é retardadora, mas a partir de 1 % já possui ação aceleradora (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.7.3.1 Retardadores

Os aditivos retardadores de pega são comumente utilizados para tornar mais fácil a aplicação do concreto em certas situações, aumentando a quantidade de tempo disponível para trabalhar a mistura. Por outro lado, o fenômeno da segregação passa a ser mais presente com o uso desse aditivo (KOSMATKA et al., 2011).

Deve-se ter cuidado, pois ao contrário do que se pensa, o uso de retardadores de pega pode reduzir a fluidez do concreto com o tempo. Esse aditivo pode causar uma queda mais acentuada nos valores de abatimento de tronco de cone (WHITING; DZIEDZIC, 1992, apud KOSMATKA et al., 2011). A seguir, segue gráfico comparando a perda de fluidez do concreto com o tempo, para uma dada mistura de controle (sem aditivo), representada pelas cores azul e vermelho, e uma concreto- com aditivo retardador de pega, em amarelo.

Gráfico 3 - Abatimento x tempo para concretos com retardador de pega.



Fonte: Whiting e Dziedzic (1992 apud KOSMATKA et al., 2011, p.133).

2.7.3.2 Aceleradores

Os aditivos aceleradores de pega são usados com o propósito oposto ao dos retardadores de pega: o de aumentar a taxa de hidratação do concreto, possibilitando, dessa forma, um incremento no ganho de resistência nas primeiras idades. Seu uso é mais comum em países de clima frio.

Como comunica o ACI (1981 apud MEHTA; MONTEIRO, 1994), algumas das principais funções dos aceleradores de pega são: (1) diminuição do tempo de cura; (2)

melhora da eficácia de vedação; (3) acelerar outras etapas da obra. De acordo com Kosmatka et al. (2011), o principal material usado na construção civil para acelerar a pega do concreto é o Cloreto de Cálcio (CaCl_2). Este material, além de modificar essa propriedade, também é responsável pelo aumento da taxa de corrosão das armaduras do concreto e da retração.

Existem outros materiais que também podem causar um aumento do ganho inicial de resistência mecânica ao concreto, tais como o uso de cimento Portland de Alta Resistência Inicial, uso de um aditivo redutor de água e diminuição do fator água/cimento (KOSMATKA et al., 2011).

2.8 Aditivo Incorporador de Ar (IAR)

2.8.1 Histórico

Segundo Dodson (1990), os gregos e romanos já utilizavam materiais que tinham a capacidade de incorporar ar aos seus materiais, como a pozolana, adicionando sangue ou gordura animal para melhorar a trabalhabilidade da mistura. Até a década de 1930, ainda que fossem notadas as melhoras advindas do uso de incorporadores de ar, não se sabia exatamente que o ar era o responsável por isso.

Como afirmam Torrains e Ivey (1968), a aplicação de ar incorporado de forma intencional no concreto data da década de 30 do século XX, e desde então tem sido considerada uma das mais relevantes descobertas em termos de tecnologias aplicadas ao concreto. A principal razão para a incorporação de ar foi o seu uso para melhorar a resistência do concreto à deterioração causadas por ciclos de gelo-degelo, fenômeno muito comuns em países de clima frio. De acordo com Jackson (apud TORRANS; IVEY, 1968), uma série de testes realizados em pavimentos de concreto feitos por departamentos estaduais de estradas dos Estados Unidos levaram à conclusão que os aditivos incorporadores de ar poderiam ser utilizados no concreto para melhorar a sua durabilidade. A partir daí, grande parte do concreto que seria aplicado ambientes externos passou a se valer do efeito deste aditivo.

Com o passar do tempo, passou-se a relacionar o uso de aditivo incorporador de ar e a melhora da trabalhabilidade e durabilidade em ambientes frios (aumento da resistência ao congelamento). Portanto, fazia-se necessário que métodos de ensaio fossem utilizados para medir a quantidade de ar presente nas misturas frescas. Primeiro surgiram os testes gravimétrico e volumétrico, e logo após o método pressiométrico (DODSON, 1990).

2.8.2 Princípio de funcionamento

Os aditivos incorporadores de ar, assim como os redutores de água, são parte de um grupo de aditivos comumente descritos como tensoativos. Estes aditivos levam este nome por possuírem moléculas com duas extremidades em sua cadeia: uma hidrófoba e uma hidrófila (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os materiais utilizados como aditivos tensoativos incorporadores de ar são, na maioria das vezes, ácidos graxos (gorduras), materiais proteicos, sais de resinas de madeira e detergentes, em virtude das propriedades destes materiais de produzir bolhas de ar quando aplicadas ao concreto.

A tabela abaixo, adaptada de Whiting e Nagi (1998 apud KOSMATKA et al., 2011), mostra um resumo dos principais tipos de aditivos incorporadores de ar, bem como uma breve descrição de suas características químicas e de desempenho:

Tabela 3 - Classificação e desempenho de aditivos incorporadores de ar usuais.

Classificação	Descrição Química	Desempenho
Sais de resinas de madeira	Ácidos fenólicos, terpenos	Geração rápida de ar. Pouco ganho de ar no início da mistura. Perda de ar com mistura prolongada
Tall Oil	Ácidos graxos	Geração lenta de ar. Ganho de ar com mistura prolongada.
Ácidos de óleos vegetais	Ácidos graxos de côco, sais de alcanolamina	Geração lenta de ar. Bolhas de ar relativamente grandes. Perda de ar moderada com mistura.
Detergentes sintéticos	Sulfatos, alquil aril sulfonato de sódio	Rápida incorporação de ar. Bolhas relativamente grandes. Aplicável para concretos celulares.
Melhoradores sintéticos de trabalhabilidade	Alquil aril etoxilados	Usado principalmente em argamassas para alvenaria.

Fonte: Whiting e Nagi (apud KOSMATKA et al., 2011, tradução nossa).

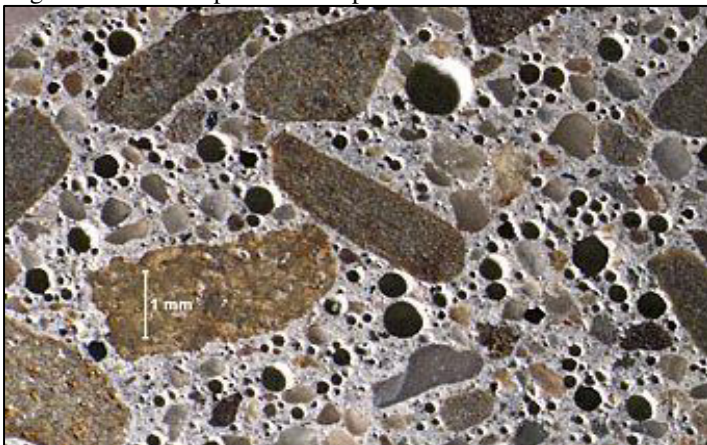
O mecanismo de incorporação de ar à pasta de cimento presente no concreto é descrita por Lea (1971, p. 596 apud MEHTA; MONTEIRO, 1994, p.278) a seguir:

Na interface ar-água os grupos polares estão orientados em direção à fase aquosa, diminuindo a tensão superficial, promovendo a formação de bolhas e neutralizando a tendência das bolhas a coalescerem. Na interface sólido-água, onde existem forças diretoras na superfície do cimento, os grupos polares ligam-se ao sólido, com os grupos não polares orientados para a água, tornando a superfície do cimento hidrófoba, de modo que o ar pode deslocar a água e permanecer ligado às partículas sólidas na forma de bolhas.

Como afirma Kosmatka et al. (2011), os aditivos incorporadores de ar aniônicos se caracterizam por serem carregados eletricamente e hidrofóbicos, em um sistema em que o aditivo forma um filme capaz de repelir a água, prevenindo os vazios de escaparem do sistema água/cimento, além de manter a água distante das bolhas de ar. Além disso, o agregado miúdo também tem a função de manter os vazios de ar dentro da mistura.

Convém ainda ter em mente que os vazios de ar incorporado decorrentes do uso de aditivo incorporador de ar (IAR) são geralmente diferentes dos vazios já presentes em concretos sem este aditivo. A diferença primordial diz respeito ao tamanho das bolhas: enquanto os vazios do concreto em decorrência do aditivo possuem dimensões entre 10 e 1000 micrômetros (na faixa de 0.01 e 1 milímetro), o ar aprisionado ao concreto em decorrência do processo de mistura e aplicação possui dimensões significativamente maiores (KOSMATKA et al., 2011). Portanto, pode-se classificar o ar presente no concreto em dois tipos diferentes, a depender de sua origem e dimensões: (1) vazios de ar aprisionado encontrados no concreto, independentemente do uso de aditivos IAR, em decorrência do manuseio e mistura dos materiais; e (2) bolhas de ar intencionalmente incorporadas ao concreto, com pequenas dimensões e bem próximas umas das outras. De acordo com Bauer (2000), as bolhas de ar incorporado, em sua maioria, possuem dimensões compreendidas entre 0.025 e 0.250 milímetros, enquanto a distância entre estas fica entre 0.100 e 0.200 milímetros.

Figura 3 – Ar incorporado e ar aprisionado ao concreto.



Fonte: Northern Concrete Inc., (2014).

A imagem acima mostra as diferenças entre os diâmetros das bolhas de ar aprisionado (existentes em qualquer mistura de concreto) e as bolhas de ar incorporado por meio de aditivos (menores e mais próximas umas das outras).

2.8.3 Utilização

Como mostrado anteriormente, este aditivo tem como principal objetivo incorporar ao sistema água/cimento partículas de ar de pequenas dimensões, como forma de realçar determinadas características desejadas.

Em países frios, o uso de misturas com incorporador de ar é amplamente encorajado, haja vista que a resistência à deterioração por ciclos de congelamento e descongelamento (gelo-degelo) aumenta consideravelmente. Portanto, concretos com IAR são comuns em calçadas e estruturas em ambientes externos, em peças sujeitas à variação brusca de temperatura.

Figura 4 – Deterioração do concreto por ciclos de gelo-degelo.



Fonte: CivilDigital (2016).

Já em países de clima mais quente, como o Brasil, os incorporadores de ar podem ser utilizados em estruturas que não demandem grande resistência estrutural, como edifícios residenciais de um pavimento. Misturas com ar incorporado, por serem significativamente mais leves, conferem economia, uma vez que menos material é gasto para produzir o mesmo volume de concreto, e, por conseguinte, vem sendo utilizados em algumas obras de conjuntos habitacionais em paredes de concreto.

Figura 5 - Sistema construtivo com concreto de baixa densidade (concreto celular).



Fonte: Ecopore (2013).

2.8.4 Ensaios

Para garantir um bom controle tecnológico do concreto com ar incorporado, recomenda-se que uma série de testes sejam feitos, tanto com concreto fresco quanto com concreto endurecido, de modo a garantir que certas características sejam atendidas.

Os principais parâmetros envolvendo o sistema de vazios do concreto que se deseja medir são o teor de ar incorporado (em percentual de volume) e o fator de espaçamento das bolhas de ar (distância média entre os vazios).

Os ensaios para o concreto fresco geralmente são capazes de medir apenas o teor de ar incorporado da mistura, sem, contudo, serem capaz de medir com eficácia outros parâmetros dos vazios, como o fator de espaçamento e a superfície específica. Por esse motivo, ensaios com concreto endurecido também são realizados, medindo não apenas o percentual de ar incorporado, como uma série de parâmetros que se relacionam com a durabilidade do concreto. Para o concreto fresco, os ensaios mais comuns são o gravimétrico, volumétrico e o pressiométrico, sendo este último o mais utilizado.

2.8.4.1 Método pressiométrico

Corresponde ao método mais usado atualmente para determinar o teor de ar incorporado na mistura de concreto fresco. É descrito pela norma americana ASTM C 231 (*Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*) e, no Brasil, pela NBR NM 47 (Concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressiométrico).

Este ensaio é baseado na lei de Boyle, que relaciona volume e pressão. Consiste em duas câmaras de diferentes volumes (KOSMATKA et al., 2011). Enche-se a câmara inferior com concreto e aplica-se sobre esta uma determinada pressão, o que irá determinar o percentual de ar presente na mistura.

Consiste em um método simples e confiável para análise do sistema de vazios do concreto fresco, levando cerca de 5 minutos para ser realizado.

Figura 6 – Aparelho pressiométrico para medição de ar incorporado.



Fonte: Controls Group.

2.8.4.2 Ensaio com concreto endurecido

Dependendo da aplicação do concreto com incorporador de ar, é necessário que se obtenha outros parâmetros além do percentual de ar incorporado. No caso do uso em estruturas sujeitas a variações bruscas de temperatura, a qualidade do sistema de vazios é essencial para a durabilidade do concreto. É necessário, então, que outros métodos de ensaio sejam utilizados, de modo a determinar parâmetros como o fator de espaçamento das bolhas, bem como o tamanho destas. Tais parâmetros podem ser obtidos por ensaio descrito na norma americana ASTM C 457 (*Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*) (ASTM, 2012). Por meio de análises microscópicas de uma superfície polida de uma amostra de concreto, é possível, através desse método, determinar o volume e a distribuição do ar incorporado (KOSMATKA et al., 2011).

2.8.5 Influência no concreto fresco

2.8.5.1 *Trabalhabilidade*

A incorporação de ar ao concreto aumenta a sua trabalhabilidade, deixando a massa mais fluida e com consistência mais líquida e espumosa. De acordo com Kosmatka et al (2011), o efeito dessa relação é maior em misturas pobres, ou seja, com menor teor de cimento. O efeito do uso de aditivo incorporador de ar na trabalhabilidade possibilita uma diminuição no fator água/cimento e uma redução do uso de areia na pista.

Segundo Kosmatka et al. (2011, p.177, tradução nossa):

O concreto fresco recém-misturado contendo ar incorporado é coesivo, tem o aspecto mais gorduroso e é mais trabalhável, sendo manuseável com facilidade. Por outro lado, teores altos de ar incorporado ao concreto podem tornar a mistura pegajosa e mais difícil de finalizar.

Como afirma Bauer (2000), quando se aumenta o teor de ar incorporado em uma determinada porcentagem (p), ganha-se trabalhabilidade de forma similar ao que aconteceria caso a quantidade de água aumentasse metade desta porcentagem (0.5 p).

2.8.5.2 *Slump*

Já que o slump se relaciona com a consistência do concreto fresco e, por conseguinte, com a sua trabalhabilidade, é de se esperar que o slump aumente à medida que o volume de ar incorporado sofra um aumento.

Espera-se que o abatimento de tronco de cone aumente por volta de 2.5 centímetros a cada 0.5% a 1% de aumento no teor de ar (KOSMATKA et al., 2011).

2.8.5.3 *Exsudação*

O fenômeno da exsudação é reduzido significativamente com o uso de aditivos incorporadores de ar. Não apenas o aumento do volume de ar é responsável por isso, como o próprio aditivo em si (BRUERE apud LAMOND; PIELERT, 2006).

2.8.6 Influência no concreto endurecido

2.8.6.1 Densidade

O uso de aditivo IAR causa uma redução na densidade do concreto, a depender do volume de ar incorporado, uma vez que o volume de vazios sofre um ganho.

2.8.6.2 Resistência estrutural

O uso de aditivo incorporador de ar reduz, na grande maioria dos casos, a resistência mecânica do concreto. Pinto e Hover (2001 apud KOSMATKA et al., 2011) afirmam que um aumento de 4 % no volume de ar incorporado pode causar uma queda de 10 MPa na resistência final do concreto, necessitando uma redução do fator água/cimento.

A redução de resistência no concreto é mais significativa para misturas mais ricas, ou seja, com maior teor de cimento, enquanto em misturas com teor muito baixo de aglomerante, a aplicação de incorporador de ar se mostrou benéfica para a resistência à compressão do concreto. Para concretos com resistência moderada, a queda de resistência à compressão tem sido na ordem de 2% a 9% para cada porcentagem de ar a mais na mistura (KOSMATKA et al., 2011).

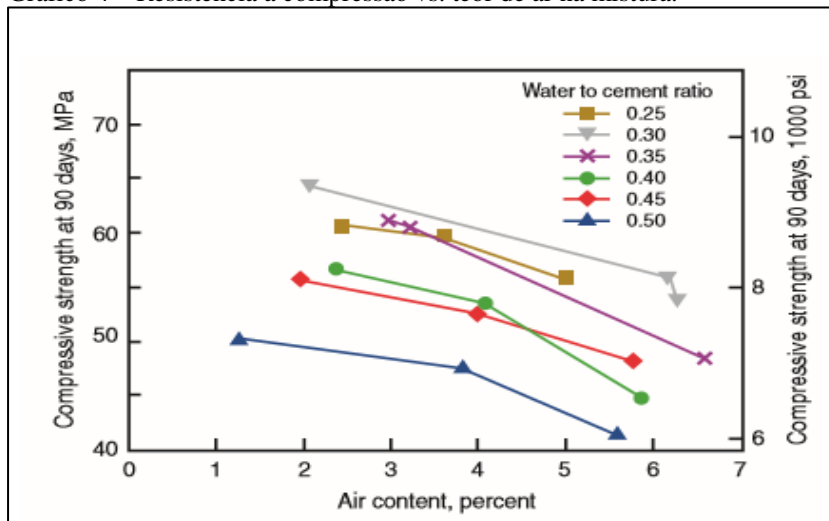
Como afirma Bauer (2000, p. 143), pode-se dizer que a resistência do concreto se correlaciona diretamente com a seguinte razão:

$$\text{Resistência} = f\left(\frac{\text{cimento}}{\text{água} + \text{vazios}}\right)$$

Ou seja, a resistência esperada do concreto é diretamente proporcional à quantidade de cimento e inversamente proporcional ao teor de água e vazios.

O gráfico a seguir mostra a relação entre a porcentagem de ar e a resistência a compressão para diferentes fatores água/cimento:

Gráfico 4 – Resistência a compressão vs. teor de ar na mistura.



Fonte: Pinto e Hover apud Kosmatka et al. (2011, p. 175).

Nota-se, pelo gráfico, que ainda que exista uma queda de resistência pelo uso de incorporador de ar, o traço pode ser corrigido, diminuindo o fator água/cimento, o que pode ser feito diminuindo a quantidade de água. Contudo, isso só deve ser feito caso os efeitos do incorporador de ar sejam desejados e a queda de resistência não seja tolerada. Neste caso, para manter a trabalhabilidade e fluidez, recomenda-se o uso de aditivo redutor de água.

2.8.6.3 Resistência a sulfatos

Como dito por Kosmatka et al. (2011), com o uso de aditivos IAR, a resistência do concreto ao ataque por sulfatos aumenta. Para tanto, pode-se diminuir o teor de água da mistura a ser utilizada (redução do fator água/cimento), possibilitando uma maior durabilidade e menor deterioração em peças de concreto sujeitas a ambientes agressivos.

2.8.6.4 Resistência a ciclos de gelo-degelo

Pode-se melhorar drasticamente a resistência do concreto ao fenômeno do gelo-degelo com a utilização de aditivos incorporadores de ar, sendo esta a principal razão para o uso bastante popular deste tipo de aditivo em diversos países frios.

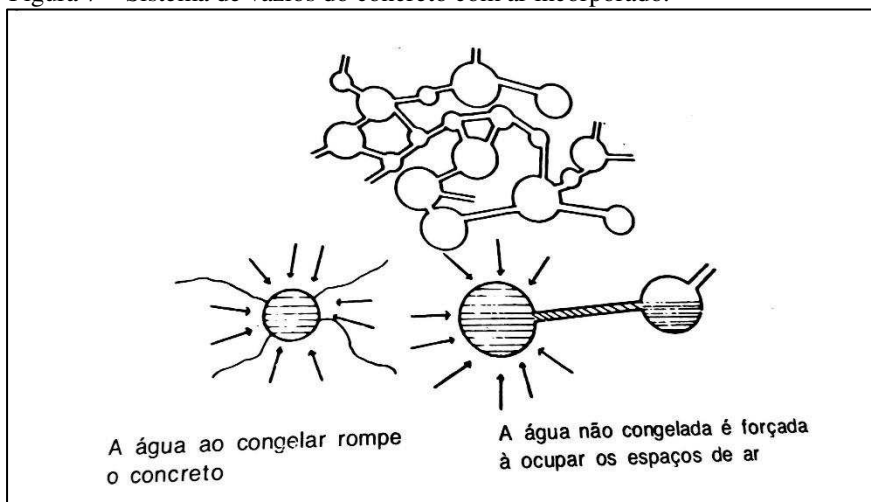
Com o inverno, a água presente no interior do concreto pode sofrer congelamento, criando pressões hidráulicas e osmóticas nos poros do sistema água/cimento, agregados e nos capilares. A ruptura ocorre quando essas pressões superam a resistência ao esforço de tração da pasta ou dos agregados (KOSMATKA et al., 2011).

Este fenômeno, ao se repetir com frequência e todos os anos, gera fissuras cada vez maiores no concreto, causando deterioração e levando a uma perda de durabilidade considerável, afetando não somente sua resistência estrutural, como acarretando uma diminuição da confiabilidade e segurança do material.

Nesse sentido, os vazios de ar incorporado se encarregam de agir de maneira análoga a canais vazios e interligados por onde a água pode se deslocar, diminuindo as tensões hidráulicas e osmóticas geradas com o congelamento. (KOSMATKA et al., 2011). Logo, com um bom sistema de vazios, com bolhas pequenas e próximas umas das outras, a resistência da pasta de cimento e dos agregados não é superada por essas tensões, prevenindo o aparecimento de trincas.

A figura abaixo mostra o mecanismo de ação dos vazios de ar:

Figura 7 – Sistema de vazios do concreto com ar incorporado.



Fonte: Bauer (2000, p. 149).

Como já dito anteriormente, um dos principais parâmetros para prever a resistência ao congelamento não é necessariamente o teor de ar incorporado, mas a distância entre os vazios e as dimensões das bolhas. Caso o concreto com ar incorporado seja utilizado para esse fim, é recomendável que testes sejam feitos com concreto endurecido para obtenção destes dados.

De acordo com Kosmatka et al. (2011), considera-se que o concreto terá desempenho satisfatório para resistir ao fenômeno do gelo-degelo quando o fator de espaçamento (pode ser entendido como a distância média entre as bolhas) não for superior a 0,230 milímetros (ou 230 micrômetros).

O fator de espaçamento entre as bolhas de ar se correlaciona de forma satisfatória com o percentual de ar incorporado no concreto. Ou seja, quanto maior a quantidade de vazios, menor é a distância média entre estes.

2.8.6.5 Propriedades térmicas

Segundo Bauer (2000), as características térmicas do concreto podem ser divididas em condutibilidade térmica, calor específico, dilatação térmica e capacidade de resistência ao fogo. Destas, pode-se dizer que a condutibilidade térmica é bastante afetada pelo teor de ar incorporado.

Como dito por Sinha (2014), a condutibilidade térmica de um material é um parâmetro capaz de medir a capacidade deste de transmitir calor ao longo de seu volume, podendo ser definida, então, como o quociente entre o fluxo de energia térmica (calor) pelo gradiente de temperatura. Como é de se esperar, a condutibilidade térmica do concreto é função dos materiais que constituem a mistura (água, cimento, agregados e ar). Portanto, cada constituinte tem uma função diferente sobre a condutibilidade do concreto.

Ainda de acordo com Sinha (2014), a água presente no concreto, por conduzir bastante calor, é responsável pelo aumento de condutibilidade térmica. Além disso, a condutibilidade térmica varia inversalmente em relação à densidade e à temperatura.

Bauer (2000) afirma que as misturas comuns de concreto se caracterizam por serem mais condutivas que os concretos leves. Portanto, misturas de concreto que apresentem baixa densidade, por apresentarem pouca condutibilidade térmica, tem desempenho melhor em relação ao isolamento térmico.

Como se sabe, o uso de aditivos incorporadores de ar diminui a densidade do concreto, uma vez que o volume deste aumenta sem ganho de massa. Portanto, quanto maior o teor de ar incorporado da mistura, menor será a sua condutibilidade térmica.

Espera-se que a condutibilidade térmica do concreto caia entre 1% e 3% para cada percentual de ar a mais na mistura (KOSMATKA et al., 2011).

2.8.7 Fatores que influenciam na ação do aditivo

Diversos fatores podem alterar a ação do aditivo sobre a mistura, trazendo a necessidade do uso de mais ou menos aditivo para alcançar o mesmo efeito desejado. De acordo com Bauer (2000), estes fatores podem ser: (1) a composição e o teor de aditivo; (2) a

natureza do cimento; (3) a dosagem do cimento; (4) a relação água/cimento; (4) o processo de mistura dos constituintes; (5) o uso de outros aditivos; (6) o lançamento do concreto e (7) temperatura.

Kosmatka et al. (2011) também cita o teor de agregados como um fator que pode afetar a ação do aditivo incorporador de ar.

2.8.7.1 Cimento

Como apontado por Kosmatka et al. (2011), uma vez que o consumo de cimento aumenta, o teor de aditivo a ser utilizado para manter a porcentagem de ar constante também deve ser aumentado. Logo, para misturas com fator água/cimento mais baixo, espera-se utilizar mais aditivo para que se atinja o mesmo efeito.

Além do consumo de cimento, as dimensões de suas partículas também influem na necessidade de utilizar mais ou menos aditivos.

A tabela a seguir mostra a influência da finura do cimento na demanda por aditivo em uma mistura em que se espera obter um percentual de ar de 6%:

Tabela 4 – Relação entre finura do cimento e teor de aditivo em argamassa 1:3.

Finura	2600 cm ² /g	3590 cm ² /g	5060 cm ² /g
(%) de aditivo	100	120	175

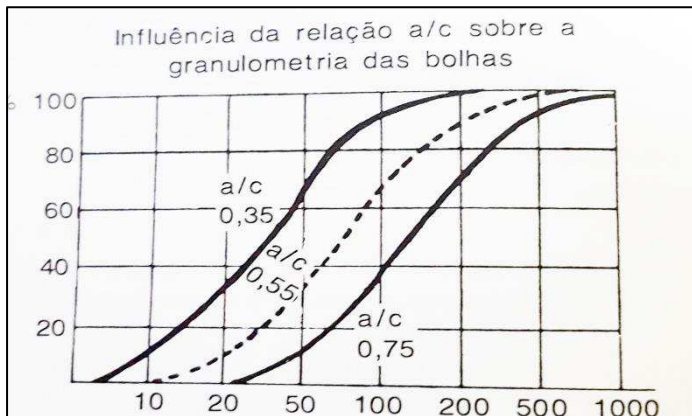
Fonte: Adaptado de Bauer (2000, p. 147).

Kosmatka et al. (2011) afirma que um teor maior de cimento (menor fator água/cimento) resulta em uma maior necessidade de aditivo. Ainda que o teor de vazios aumente, mantendo a quantidade de aditivo constante, as bolhas de ar ficam mais próximas à medida que mais cimento é utilizado na mistura.

Não apenas as bolhas de ar ficam mais próximas com mais uso de cimento, como o diâmetro delas diminui. De acordo com Bauer (2000), nota-se um aumento do tamanho dos vazios para fatores água/cimento maiores.

O gráfico a seguir mostra a distribuição dos vazios de ar incorporado, variando a dimensão de 0,01 milímetros (10 micrômetros) a 1 milímetro (1000 micrômetros). Verifica-se a influência da alteração no fator água/cimento no tamanho dos vazios.

Gráfico 5 - Fator A/C x dimensões dos vazios



Fonte: Bauer (2000, p. 148).

Portanto, um aumento no consumo de cimento e no teor de finos reduzirá o total de ar incorporado pelo aditivo, sendo necessário maior uso deste. Em contrapartida, as bolhas estarão mais próximas umas das outras e terão dimensões menores, o que pode ser vantajoso para a durabilidade do concreto em ambientes sujeitos a variação brusca de temperatura.

2.8.7.2 Processo de mistura

A influência do modo como a mistura dos constituintes do concreto é feita se dá em virtude da alteração de diversos parâmetros, como o modo de mistura, o tempo de mistura, volume e energia. Sabe-se que existe um tempo de mistura para o qual o teor de ar incorporado pelo aditivo é máximo. Após esse tempo, a quantidade de ar diminui, em virtude do desaparecimento das bolhas de maior dimensão (BAUER, 2000).

Ao trabalhar com aditivo incorporador de ar no concreto, é essencial ter cuidado com o processo de mistura. Caso a mistura seja deficiente e a massa fique heterogênea e sem uniformidade, as bolhas de ar não conseguirão se dispersar de forma correta (KOSMATKA et al., 2011).

2.8.7.3 Lançamento

O tempo entre a mistura dos constituintes e a aplicação pode levar a parte do ar incorporado ao concreto sofrer dissolução pela água (BAUER, 2000). Logo, é de se esperar que o concreto perca parte do ar incorporado até o início do seu lançamento.

A perda de ar incorporado entre o preparo e o lançamento fica entre 1 % e 2 %, sendo influenciada pela temperatura do local e condições de transporte. Quando o concreto

chega no local de aplicação, a tendência é que o percentual de ar permaneça constante, apesar de que o bombeamento do concreto na obra também pode reduzir o teor de ar. (KOSMATKA et al., 2011).

2.8.7.4 *Uso de outros aditivos*

O uso de outros aditivos, como redutores de água ou plastificantes, pode alterar a ação do aditivo incorporador de ar, seja incrementando o processo de incorporação de vazios ou diminuindo a eficácia do aditivo.

É necessário avaliar a influência de outros aditivos em conjunto com o aditivo incorporador de ar, a fim de que as características desejadas à mistura não sejam perdidas.

2.8.7.5 *Temperatura*

Quanto maior a temperatura do concreto no momento da mistura, menos ar é incorporado, ainda que outras características, como o fator de espaçamento e a superfície específica das bolhas, sejam mantidas constantes (KOSMATKA et al, 2011).

2.8.7.6 *Natureza do aditivo*

Como dito anteriormente, o aditivo incorporador de ar pode ter diversas classificações químicas. Cada uma delas age de forma distinta, incorporando ar com diferentes velocidades e quantidades. A tabela a seguir mostra a influência da natureza do aditivo e da temperatura na incorporação de ar:

Tabela 5 - Temperatura vs. Teor de ar incorporado para diferentes tipos de aditivos.

Temperatura °C	Sem aditivo	Resina vinsol	Aditivo à base de tetranolamina	Lignosulfato
5	1,2	6,4	5,7	4,3
21	1,6	6,0	5,2	4,0
33	1,2	4,7	4,4	3,3
50	1,8	4,5	4,4	4,3

Fonte: Adaptada de Bauer (2000, p.148)

2.8.8 Precauções

O uso de aditivo incorporador de ar em concretos que necessitem certa resistência estrutural deve sempre vir acompanhado de cautela e um controle tecnológico mais apropriado no traço da mistura. Sempre que possível, eventuais correções devem ser feitas, seja diminuindo o fator água/cimento ou melhorando a qualidade dos agregados miúdo e graúdo, bem como utilizando um aglomerante com maior resistência. Atenção especial deve ser dada nesses casos pelo fato da incorporação de ar poder, em determinadas situações, diminuir drasticamente a resistência esperada do concreto, o que pode comprometer a estabilidade da estrutura.

No caso de aplicações em que a resistência não for considerada um problema, o teor de ar incorporado deve, sempre que possível, ser verificado, seja pelo método pressiométrico, ou pela avaliação da densidade em amostras de concreto endurecido. A partir de um certo teor de ar incorporado, as características geralmente desejadas (melhora de trabalhabilidade, menor exsudação e segregação, melhora da resistência ao congelamento, isolamento térmico) não se alteram ou são pioradas, portanto é importante que se mantenha um percentual ideal de ar no concreto. Para tanto, ensaios devem ser realizados a fim de decidir a quantidade de aditivo a ser utilizada.

Além disso, deve-se sempre ter controle sobre o tempo da mistura, já que a ação do aditivo é bastante alterada por essa variável. O ideal é manter certo grau de consistência, com o objetivo de evitar variações nas características do concreto utilizado na mesma obra.

Outra precaução importante a ser tomada é analisar a influência de outros aditivos sobre o incorporador de ar, o que pode ser feito por meio de ensaios em laboratório. Como já explicado antes, certos aditivos tensoativos podem aumentar ou diminuir a demanda pelo aditivo IAR. De modo a evitar surpresas ou exageros, o ideal é sempre verificar a interação entre dois aditivos diferentes.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

Para a realização deste estudo, tomou-se como base quatro traços distintos, com diferentes fatores água/cimento, e foram analisadas as resistências à compressão destas misturas, sem aditivo e com aditivo. Procurou-se analisar a influência do aditivo IAR na variação das características do concreto fresco e endurecido.

Os traços foram calculados com base no método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), sem levar em conta o teor de umidade do agregado miúdo. O fator água/cimento variou de 0.45 a 0.60, aumentando o teor de areia da mistura e diminuindo a quantidade de cimento. Os traços foram definidos em massa e são especificados na tabela a seguir:

Tabela 6 – Traços utilizados no estudo experimental.

Traço	Fator A/C	Proporção (massa)	Abatimento esperado
1	0.45	1: 1.63 : 2.33 : 0.45	60-80 mm
2	0.50	1: 1.9 : 2.59 : 0.50	60-80 mm
3	0.55	1: 2.18 : 2.84 : 0.55	60- 80 mm
4	0.60	1: 2.45 : 3.11: 0.60	60- 80 mm

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em cada um dos traços acima, a quantidade de água utilizada foi a mesma (3.75 litros), assim como a massa de agregado graúdo. Todas as misturas estão na mesma faixa de abatimento esperado, ainda que o fator água/cimento tenha aumentado.

Calculou-se que a quantidade de concreto a ser utilizada em cada traço seria de aproximadamente 45.00 kg (Já levando em conta eventual desperdício), portanto a quantidade de cada material foi calculada como uma porcentagem deste peso, levando em consideração o traço por metro cúbico de concreto, dado a seguir:

Tabela 7 – Quantidade de materiais por m³ de concreto.

Traço	Quantidade de material (por metro cúbico)			
	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (l)
1	444	724	1035	200
2	400	762	1035	200
3	364	793	1035	200
4	333	819	1035	200

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para aproximadamente 45 kg de cada traço, as quantidades são as seguintes:

Tabela 8 – Quantidade de materiais utilizadas no traço.

Traço	Quantidade real de material			
	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (l)
1	8.32	13.57	19.40	3.75
2	7.50	14.29	19.40	3.75
3	6.85	14.87	19.40	3.75
4	6.24	15.36	19.40	3.75

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 Materiais

3.1.1 Concreto

Todas as matérias-primas constituintes do concreto foram adquiridas na cidade de São Luís, Maranhão, e são de origem local, exceto o aditivo incorporador de ar. O aglomerante usado foi o cimento Portland composto CP II-E-32, com tempo de início de pega de 1 hora e adição de escória de alto-forno. Os agregados miúdos e graúdos utilizados foram areia média e pedra britada do tipo 1, com dimensão máxima característica (DMC) de 19 mm.

Para o cálculo da proporção entre os constituintes segundo o método de dosagem da ABCP, considerou-se as seguintes propriedades dos materiais:

- a) Cimento: massa específica de 3100 kg/m^3 e resistência igual a 32 MPa.
- b) Agregado miúdo: areia.
- c) Brita 1: DMC de 19 mm.

A análise granulométrica da areia foi feita em laboratório, de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 9 – Análise granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Porcentagem retida (%)	
	Simples	Acumulada
2.36	0.8	0.8
1.18	0.9	1.7
0.60	6.6	8.3
0.30	54.2	62.5
0.15	28.2	90.7
Fundo	9.3	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores encontrados de densidade da areia foram de 2.60 g/cm^3 (densidade real) e 1.54 g/cm^3 (massa específica aparente). A areia apresentou umidade de 3.8 % e módulo de finura de 1.60.

No caso do agregado graúdo (Brita 1), a granulometria foi a seguinte:

Tabela 10 – Análise granulométrica do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Porcentagem retida (%)	
	Simples	Acumulada
19.00	4.3	4.3
12.50	70.3	74.6
9.50	19.1	93.7
6.30	3.2	96.9
4.75	1.7	98.6
2.36	1.2	99.8
Fundo	0.2	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

A densidade real da Brita 1 utilizada nos traços foi de 2.78 g/cm^3 , enquanto o valor da densidade aparente foi de 1.49 g/cm^3 .

Figura 8 – Materiais usados na mistura: agregados, cimento e aditivo.



Fonte: O autor.

3.1.2 Aditivo

O aditivo, utilizado nos traços para a análise experimental foi o TEC-NOL, desenvolvido pela Grace Construction, sendo um aditivo incorporador de ar e plastificante, podendo ser usado tanto para misturas de concreto quanto argamassas em geral. Possui massa específica de aproximadamente 1.020 g/cm^3 , natureza alcalina e é recomendado que se utilize entre 50 ml e 200 ml de aditivo a cada 100 kg de cimento Portland. (GRACE CONSTRUCTION, 2015).

Neste estudo, para cada um dos traços confeccionados, usou-se uma proporção de 200ml de aditivo para cada 100 kg de cimento, de modo a potencializar a ação do incorporador de ar e analisar a sua influência sobre o concreto fresco e após as primeiras idades. Uma vez que a massa de cimento diminui ao passo que o fator água/cimento aumenta, menos aditivo foi utilizado nos últimos traços. A quantidade de aditivo incorporador de ar é calculada sobre o teor de cimento pois o sistema de vazios criados por este se encontra principalmente na pasta.

Em cada um dos quatro traços (com fatores água cimento variando de 0.45 a 0.60), foi feito um traço de controle e um traço com ar incorporado. A tabela a seguir mostra a quantidade utilizada para cada um deles:

Tabela 11 – Volume de aditivo por traço.

Traço	Cimento (kg)	Aditivo (ml)
1	8.32	16.6
2	7.50	15.0
3	6.85	13.7
4	6.24	12.5

Fonte: Elaborada pelo autor.

É de se supor que volumes maiores de aditivo geram um percentual maior de ar incorporado. Isto nem sempre é verdade, já que, quanto menor o fator água/cimento, menor é efeito do incorporador de ar, devido ao aumento na quantidade de aglomerante. Logo, é possível que os teores de ar incorporado sejam similares para todos os traços analisados.

Na medição do volume de aditivo adicionado à mistura, utilizou-se uma proveta, para melhorar a precisão e a confiabilidade dos ensaios, como mostra a figura abaixo:

Figura 9 – Manuseio do aditivo incorporador de ar (IAR).



Fonte: O autor.

3.2 Instrumentos

Os traços utilizados no estudo experimental foram todos definidos em massa. Devido a isso, foi utilizada uma balança com precisão de 3 casas decimais para pesar os materiais. A mistura dos constituintes do concreto (brita, areia, cimento e água) foi feita em

uma betoneira com capacidade para 150 litros e velocidade de rotação de 34 RPM, em um tempo de 8 minutos, o que possibilitou uma boa homogeneização da massa e melhorou a precisão dos resultados.

Figura 10 – Betoneira usada para mistura.



Fonte: O Autor.

Outros instrumentos utilizados incluem:

- 1) Moldes para corpos de prova cilíndricos: os moldes foram feitos em material de Policloreto de vinila (PVC), com diâmetro nominal de 100 mm e altura de 200 mm, podendo ser reutilizados. Decidiu-se utilizar moldes deste tipo em virtude de melhor disponibilidade e facilidade de aquisição.
- 2) Haste para adensamento manual dos corpos de prova.
- 3) Molde para slump.
- 4) Colher de pedreiro.
- 5) Colher para concreto.
- 6) Abraçadeiras de plástico para corpos de prova cilíndricos;
- 7) Gesso para preparação das superfícies dos corpos de prova.
- 8) Espátula para mistura de gesso e cimento;
- 9) Prensa para ruptura dos corpos de prova;

- 10) Instrumento para capeamento;
- 11) Paquímetro para aferição das dimensões dos corpos de prova.
- 12) Recipiente e aparelho para capeamento.

3.3 Procedimentos de ensaio

Em cada um dos traços feitos, decidiu-se por moldar quatro corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para ensaios de resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias. Como forma de avaliar a resistência em 7 e 14 dias, um corpo de prova foi utilizado para cada traço, enquanto que para 28 dias, de modo a avaliar melhor a resistência final de cada mistura, 2 corpos de prova foram feitos. O objetivo do uso de quatro corpos de prova distintos é o de analisar não apenas a variação das características mecânicas do concreto devido à incorporação de ar, como também verificar como esta queda se dá durante o processo de ganho de resistência em diversas idades. Como consequência, os resultados se tornam mais confiáveis, e a curva de ganho de resistência com o tempo pode ser traçada em cada caso. A verificação da densidade das misturas também ocorre de forma mais precisa com o maior número de corpos de prova.

Além disso, procurou-se analisar a consistência do concreto no estado fresco, por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump), dada a sua facilidade, confiabilidade e popularidade como maneira de verificar a trabalhabilidade da mistura. Buscou-se comparar o ganho de trabalhabilidade devido ao uso de aditivo em cada um dos traços, verificando, também, a influência do fator água/cimento na variação da consistência da mistura.

3.3.1 Confeção dos corpos de prova

O processo de moldagem dos corpos de prova seguiu o descrito pela norma ABNT NBR 5738:2015 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova). Escolheu-se confeccionar os moldes com dimensões de 100 mm e 200 mm haja vista que são as dimensões comumente utilizadas no Brasil para este fim, bem como atenderem aos requisitos da NBR 5738:2015, segundo a qual o corpo-de-prova deve ter dimensão superior a pelo menos o triplo da DMC do agregado graúdo (neste caso, a Brita 1).

Antes da moldagem dos corpos-de-prova, é necessário revestir as paredes internas dos moldes com algum tipo de lubrificante, que pode ser um material constituído de óleo-

mineral (ABNT, 2015). Isso facilita a desmoldagem destes, diminuindo os riscos de danos.

Figura 11 – Moldes cilíndricos de PVC com óleo nas paredes internas.



Fonte: O autor.

Imediatamente após a mistura em betoneira, enche-se os corpos-de-prova pela metade e, utilizando o adensamento manual, 12 golpes devem ser dados. Após isso, completa-se os moldes com concreto, seguido pelo mesmo número de golpes, de acordo como a ABNT NBR 5738:2015 (2 camadas de 12 golpes cada).

No que concerne ao adensamento manual, a NBR 5738 comunina que:

A primeira camada deve ser atravessada em toda a sua espessura quando adensada com a haste, evitando-se golpear a base do molde. Os golpes devem ser distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde. Cada uma das camadas seguintes também deve ser adensada em toda sua espessura, fazendo com que a haste penetre aproximadamente 20 mm na camada anterior. (ABNT, 2015, p.5).

Após o adensamento manual para cada camada, usando haste metálica, é aconselhado que um certo número de golpes leves seja dado na face externa dos moldes, para retirar vazios de ar aprisionado. Depois do adensamento do concreto, faz-se o rasamento, ou seja, a finalização da superfície superior (ABNT, 2015). Para tornar parte de cima suficientemente plana, uma colher de pedreiro foi utilizada. Logo após a confecção dos corpos de prova, é aconselhável que estes sejam transportados o mínimo possível do local onde foram moldados.

Figura 12 – Corpos de prova após moldagem.



Fonte: O autor.

3.3.2 Cura dos corpos de prova

De acordo com Bauer (2000), o objetivo da cura é evitar que a água presente na mistura de concreto evapore. Caso isso aconteça, a hidratação do cimento fica prejudicada. Ademais, as características no concreto que geralmente se deseja, tais como durabilidade e resistência estrutural, são realçadas por meio do procedimento de cura. “Hoje em dia está perfeitamente estabelecido o fato de que, quanto mais perfeita e mais demorada for a cura do concreto, tanto melhores serão as suas características” (BAUER, 2000, p. 260).

Como afirmam Mehta e Monteiro (1994), a cura do concreto serve basicamente para mantê-lo em uma determinada temperatura e tornar a sua umidade constante, de modo que a resistência mecânica especificada seja atingida. “[...] como em todas as reações químicas, a temperatura tem um efeito acelerador sobre as reações de hidratação”. (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p.57).

Bauer (2000, p. 384) destaca que:

A cura do concreto tem importância preponderante nas características de resistências. A cura do concreto submerso em água permite a progressiva formação de gel na parte do cimento, tornando-o mais resistente e impermeável. [...] Cumpre ainda observar que a cura em água reduz a retração da peça na fase em que o concreto tem pouca resistência, fato este de fundamental importância, por evitar formação de fissuras de retração, que podem comprometer a impermeabilidade de todo o conjunto.

Dessa maneira, é essencial que, para avaliar de forma mais confiável as características mecânicas do concreto endurecido, o procedimento de cura adotado deve

favorecer o seu ganho de resistência. De acordo com Petrucci (1975 apud BAUER, 2000), há um ganho de 40% de resistência do concreto em 28 dias, ao compararmos uma amostra submetida à cura normal com outra deixada ao ar.

Conforme recomenda a ABNT NBR 5738:2015, os corpos de prova devem ser desmoldados entre 24 e 48 horas após a sua confecção. Nesse período inicial, devem permanecer sobre uma superfície plana e livre de imperfeições, para que as duas faces do cilindro permaneçam paralelas. Neste trabalho, os corpos de prova foram todos desmoldados com 24 horas após serem moldados, com exceção daqueles feitos com traço contendo incorporador de ar, que foram desmoldados depois de 24 a 30 horas, pois precisavam de um pouco mais de tempo para ganharem certa resistência e serem desmoldados sem serem danificados.

Os corpos de prova foram, após a desmoldagem, identificados nas laterais segundo o traço, idade de ruptura e fator água/cimento. Para a identificação do traço, a seguinte numeração foi adotada:

Tabela 12 – Identificação dos traços.

Traço	Fator A/C	Aditivo
1-A	0.45	Não
1-B	0.45	Sim
2-A	0.50	Não
2-B	0.50	Sim
3-A	0.55	Não
3-B	0.55	Sim
4-A	0.60	Não
4-B	0.60	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo a ABNT NBR 5738 (2015, p.7):

Imediatamente após sua identificação, os corpos de prova devem ser armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ou em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95 %. Os corpos de prova não podem ficar expostos ao gotejamento nem à ação de água em movimento.

Para os corpos de prova feitos nesta pesquisa, o procedimento de cura adotado foi a disposição das amostras em tanques de imersão contendo solução saturada de hidróxido de

cálcio, Ca(OH)_2 . Todos os corpos de prova foram deixados no tanque até o momento de preparação da superfície e rompimento, de modo a manter a consistência de resultados.

A figura a seguir mostra o procedimento de cura dos corpos de prova utilizado neste trabalho:

Figura 13 – Cura em tanque com solução saturada de Ca(OH)_2



Fonte: O autor.

3.3.3 Ensaio de abatimento do tronco de cone

Este é um ensaio de extrema importância para a avaliação da consistência de amostras frescas de concreto, por conta da sua rapidez e simplicidade, sendo também chamado de *Slump Test*. No Brasil, é descrito pela ABNT NBR NM 67: 1998 (Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone).

Os instrumentos a serem usados na realização do ensaio são uma haste metálica para compactação manual, molde em formato de tronco de cone e placa para a base. As dimensões do molde são de 200 mm de diâmetro na base, 100 mm de diâmetro no topo e 300 mm de altura, e a dimensão da haste de adensamento é de 600 mm (ABNT, 1998).

Figura 14 – Aparelhagem para execução do *slump test*.



Fonte: O autor.

Segundo a ABNT NBR NM 67:1998, o procedimento do ensaio consiste em:

- a) Umedecer a placa de base e o molde metálico;
- b) Encher o molde em 3 camadas de igual volume;
- c) Em cada uma das camadas, aplicar 25 golpes com a haste de socamento;
- d) Fazer a limpeza da placa de base;
- e) Retirar o molde verticalmente, em um período de tempo entre 5 e 10 segundos;
- f) Medir a diferença de altura (abatimento) do concreto em relação ao molde;
- g) Anotar o valor do abatimento em milímetros, com precisão de 5 mm.

Além de ser de grande importância para entender como o sistema de vazios do concreto interfere na sua consistência e fluidez, o teste de abatimento de tronco de cone também é muito usado para verificar se o traço está em conformidade com o que foi especificado. Por meio deste ensaio, que é amplamente usado em diversas obras devido à sua facilidade de execução, é possível também analisar variações na qualidade das misturas de concreto. Como afirmam Mehta e Monteiro (1994, p.349) :

A principal função deste ensaio é fornecer um método simples e conveniente para controlar a uniformidade da produção de concreto de diferentes betonadas. Por exemplo, uma variação fora do normal no resultado do abatimento pode significar uma mudança imprevista nas proporções da mistura (traço), granulometria do agregado ou teor de água do concreto. Desta forma, permite-se ao operador da central de concreto verificar e remediar a situação.

3.3.4 Determinação da densidade

De modo a determinar a densidade das amostras, foram utilizados os corpos de prova cilíndricos feitos para rompimento na prensa.

Bauer (2000, p. 286) afirma que “[...] a densidade dos concretos comuns realizados com os agregados normais varia segundo o processo de adensamento utilizado na sua fabricação”. É de se esperar, então que concretos adensados manualmente (como o caso dos corpos de prova analisados nesta pesquisa) possuam densidades ligeiramente inferiores às encontradas em traços semelhantes adensados por vibração.

Os valores normais para densidades de concreto vibrado variam entre 2,30 e 2,40 toneladas por metro cúbico, ao passo que para concreto socado (adensado manualmente), a densidade média varia por volta de 2,25 toneladas por metro cúbico. Já para concretos não adensados, os valores médios de densidade chegam a 2,10 t/m³ (BAUER, 2000).

De modo a calcular a densidade dos traços analisados, os seguintes instrumentos foram usados:

- a) Paquímetro digital, para medida do diâmetro inferior, diâmetro superior e altura dos corpos de prova cilíndricos;
- b) Balança com alta precisão.

Como forma de estimar o volume das amostras, considerou-se o diâmetro médio dos cilindros como a média entre duas medidas de diâmetro obtidas na metade da altura do corpo de prova, como recomendado pela norma ABNT NBR 5739:2007. O volume, então, foi calculado segundo a seguinte fórmula:

$$V = \frac{\pi \cdot (D_m)^2}{4} \cdot h$$

Em que:

V = volume;

D_m = diâmetro médio do corpo de prova;

h = altura do corpo de prova.

Para o cálculo da massa específica, divide-se a massa dos corpos de prova, obtida por meio da balança, pelo seu volume. A densidade pode ser dada em quilogramas por metro cúbico (kg / m³). A equação a seguir é usada para obtenção da densidade:

$$D = \frac{m}{V} \cdot 1000$$

Em que:

D = densidade do concreto (kg/m³);

m = massa do corpo de prova (g) ;

v = volume (cm³).

Figura 15 – Balança para os corpos de prova.



Fonte: O autor.

3.3.5 Preparação das superfícies

Como recomenda a ABNT NBR 5738:2015 , é de extrema importância preparar as bases dos corpos de prova, para que estes fiquem paralelos entre si e formem um ângulo de noventa graus com o eixo longitudinal do cilindro. Para tanto, existem dois métodos amplamente usados: o capeamento e a retificação.

A retificação corresponde ao processo de utilização de máquinas que, por meio do processo de abrasão, retiram uma parcela de material das extremidades do corpo de prova, de modo a tornar a superfície plana. (ABNT, 2015). Por sua vez, o capeamento, de acordo com a ABNT (2015, p.9):

Consiste no revestimento dos topos dos corpos de prova com uma fina camada de material apropriado, com as seguintes características: a) aderência ao corpo de prova; b) compatibilidade química com o concreto; c) fluidez, no momento de sua aplicação; d) acabamento liso e plano após endurecimento; e) resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

Nesta pesquisa, optou-se pelo uso do capeamento, dada a facilidade de aquisição da aparelhagem necessária e a fácil execução. Tendo em vista que os moldes dos corpos de prova, por serem feitos de PVC, apresentam certas irregularidades na base, o processo de capeamento foi feito no topo e na base dos corpos de prova.

Os instrumentos utilizados para a execução do capeamento foram:

- a) Espátula;
- b) Colher de pedreiro;
- c) Recipiente para mistura do material de capeamento;
- d) Capeador.

O material escolhido para o capeamento foi uma mistura de gesso e cimento Portland CP II-E na proporção de 1:1 adicionada de água, por atender de forma satisfatória os requisitos de aderência, compatibilidade química, acabamento, resistência e fluidez recomendados pela NBR 5738 e descritos acima.

Primeiro, mistura-se o gesso e o cimento em recipiente adequado. Após certo período de tempo (aproximadamente 5 minutos), despeja-se o conteúdo do material e as faces do corpo de prova são imersas, sendo retiradas até ganharem certa aderência.

Figura 16 – Processo de capeamento dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

Depois da preparação das superfícies dos corpos de prova, estes eram deixados para secar ao sol por um período de aproximadamente duas horas, para que o material do capeamento perdesse água.

3.3.6 Ensaio de resistência à compressão

O teste de resistência à compressão no concreto endurecido consiste na verificação, por meio de prensa hidráulica, da resistência mecânica do concreto sujeito a um

carregamento axial de compressão em uma determinada idade. Este ensaio é descrito detalhadamente pela especificação da ABNT NBR 5739:2007 (Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). Após o período de cura em tanque, e com as superfícies finalizadas, já é possível realizar este teste. No caso desta pesquisa, as idades analisadas foram as de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

Os instrumentos a serem utilizados durante o ensaio são pratos inferior e superior e prensa hidráulica. Como é recomendado pela ABNT (2007, p. 4):

Antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e do corpo-de-prova devem ser limpas e secas antes do corpo-de-prova ser colocado em posição de ensaio. O corpo-de-prova deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior, com o auxílio de círculos concêntricos de referência, observando-se o sentido de moldagem.

Com a realização do ensaio de resistência à compressão, o valor da carga máxima de ruptura é obtida em toneladas, como mostra a figura abaixo:

Figura 17 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O autor.

Após isso, a carga de leitura da prensa é corrigida, segundo a seguinte equação:

$$y = a \cdot x + b$$

Em que:

$a = 0,995748025$;

$b = 90,48117943$;

x = carga lida na prensa (transformada para kgf);

y = valor da carga corrigida (em kgf).

Levando em consideração o valor do diâmetro médio obtido com o uso do paquímetro, é possível encontrar o valor da resistência (em MPa), utilizando a fórmula a seguir, como comunica a ABNT (2007, p.5):

$$f_c = \frac{4 \cdot y}{\pi \cdot D_m^2}$$

Sendo:

f_c = resistência à compressão do concreto (dado em MPa);

y = carga corrigida (em Newtons);

D_m = diâmetro médio do corpo de prova cilíndrico (em mm).

3.4 Resultados

3.4.1 Abatimento

Verificou-se um aumento significativo na consistência do concreto com a utilização de aditivo incorporador de ar. Isso pode ser explicado pela melhora da fluidez, pois o ar incorporado é capaz de substituir parte da água no concreto e aumentar a sua trabalhabilidade.

Tabela 13 – Abatimento de diferentes traços de concreto.

Traço	Fator A/C	Aditivo	Slump (mm)
1-A	0.45	Não	60
1-B	0.45	Sim	130
2-A	0.50	Não	100
2-B	0.50	Sim	150
3-A	0.55	Não	90
3-B	0.55	Sim	170
4-A	0.60	Não	90
4-B	0.60	Sim	170

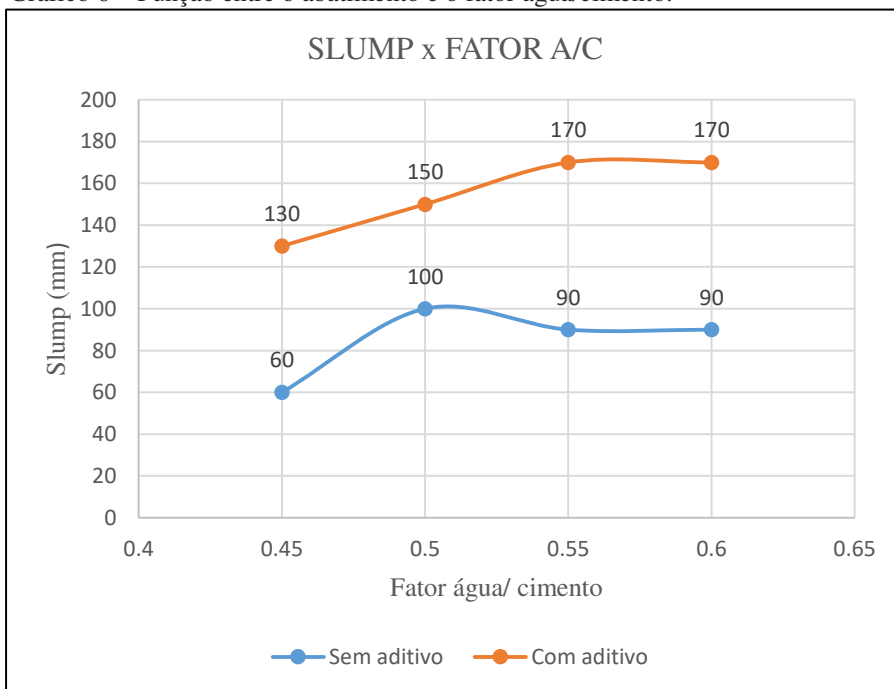
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível deduzir por meio da tabela, os valores de abatimento aumentaram em 116.67 % para o traço 1, 50% para o traço 2 e 88.89 % nos traços 3 e 4. O aumento maior do slump no traço 1 pode ser explicado pelo uso de maior quantidade de aditivo incorporador de ar. A razão pela qual o abatimento no traço 2 aumentou em apenas 50 % talvez seja uma pequena variação na umidade dos agregados, particularmente a areia, haja vista que não houve controle de umidade do agregado miúdo durante a confecção dos traços.

É possível deduzir também que, na maior parte dos casos, um aumento no fator A/C provoca um ganho de abatimento, melhorando a consistência do concreto. Isto se deve ao fato da água ser uma das grandes responsáveis pela fluidez e trabalhabilidade da mistura.

O gráfico abaixo mostra como se dá a relação entre o fator água/cimento e o abatimento obtido para os traços confeccionados com aditivo e sem aditivo:

Gráfico 6 – Função entre o abatimento e o fator água/cimento.



A figura a seguir ilustra o ganho de consistência a partir do uso de aditivo IAR, o que pode ser constatado por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone:

Figura 18 – Influência do aditivo incorporador de ar no abatimento do concreto.



Fonte: O autor.

3.4.2 Densidade

É de se esperar que, por meio da introdução de um sistema controlado de vazios, a densidade do concreto caia. Os corpos de prova utilizados para avaliação da resistência à compressão foram medidos e pesados, obtendo os seguintes resultados:

Tabela 14 – Dimensões dos corpos de prova rompidos em 7 dias

Traço	Corpos de prova – 7 dias			
	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)
1-A	97.65	98.11	97.88	199.90
1-B	98.12	97.84	97.98	199.10
2-A	98.05	97.98	98.02	199.70
2-B	98.01	97.69	97.85	199.50
3-A	97.33	97.91	97.62	200.20
3-B	98.43	97.56	98.00	199.30
4-A	97.59	97.98	97.79	200.10
4-B	98.01	98.12	98.07	200.30

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Densidade das misturas para amostras testadas em 7 dias.

Traço	Corpos de prova – 7 dias			
	Área (cm²)	Volume (cm³)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
1-A	75.21	1503.39	3652.7	2429.65
1-B	75.36	1500.43	3238.3	2158.25
2-A	75.41	1506.03	3637.1	2415.03
2-B	75.16	1499.46	3225.8	2151.31
3-A	74.81	1497.65	3705.7	2474.34
3-B	75.38	1502.40	3140.1	2090.06
4-A	75.06	1501.97	3684.5	2453.11
4-B	75.49	1512.09	3221.3	2130.36

Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se, portanto, uma diminuição de densidade de 11.2 % para o traço 1 (A/C = 0.45), 10.9 % no traço 2 (A/C = 0.50) , 15.5 % no traço 3 (A/C = 0.55) e 13.2 % no traço 4 (A/C = 0.60).

Tabela 16 – Dimensões dos corpos de prova rompidos em 14 dias.

Traço	Corpos de prova – 14 dias			
	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)
1-A	98.11	98.05	98.08	200.20
1-B	97.65	98.23	97.94	199.80
2-A	97.46	98.02	97.74	200.10
2-B	97.71	97.86	97.79	200.30
3-A	97.99	98.06	98.03	199.80
3-B	97.83	98.01	97.92	200.40
4-A	97.52	97.94	97.73	199.40
4-B	98.15	97.83	97.99	199.60

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Densidade das misturas para amostras testadas em 14 dias.

Traço	Corpos de prova – 14 dias			
	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (kg/m ³)
1-A	75.51	1511.80	3663.2	2423.07
1-B	75.30	1504.48	3208.3	2132.50
2-A	74.99	1500.59	3653.4	2434.65
2-B	75.06	1503.47	3293.4	2190.53
3-A	75.43	1507.09	3665.9	2432.44
3-B	75.27	1508.38	3116.8	2066.33
4-A	74.98	1495.03	3671.6	2455.87
4-B	75.37	1504.50	3261.7	2167.96

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos corpos de prova rompidos em 14 dias, a redução de densidade foi de 11.9 % para o traço 1, 10.02 % no traço 2, 15.05 % no traço 3 e 11.72 % no traço 4.

No caso dos corpos de prova rompidos em 28 dias, os resultados de densidade foram os seguintes:

Tabela 18 – Dimensões dos corpos de prova rompidos em 28 dias.

Traço	Corpos de prova – 28 dias			
	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)
1-A (1)	98.15	97.84	98.00	200.60
1-A (2)	98.01	98.66	98.33	200.40
1-B (1)	98.33	98.05	98.19	199.60
1-B (2)	98.13	97.48	97.81	199.90
2-A (1)	98.76	97.43	98.10	200.20
2-A (2)	98.45	97.11	97.78	201.30
2-B (1)	97.54	97.79	97.67	200.50
2-B (2)	98.19	97.43	97.81	202.20
3-A (1)	97.65	98.21	97.93	199.50
3-A (2)	98.32	98.01	98.17	200.10
3-B (1)	97.84	97.65	97.75	202.10
3-B (2)	98.55	98.21	98.38	200.40
4-A (1)	98.11	98.03	98.07	199.70
4-A (2)	97.44	97.81	97.63	200.90
4-B (1)	98.65	97.90	98.28	201.70
4-B (2)	98.02	97.33	97.68	200.10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Densidades das misturas para amostras testadas em 28 dias.

Traço	Corpos de prova – 28 dias			
	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (kg/m ³)
1-A (1)	75.39	1512.32	3675.8	2430.57
1-A (2)	75.90	1521.04	3646.9	2397.64
1-B (1)	75.68	1510.57	3213.9	2127.61
1-B (2)	75.10	1501.25	3203.8	2134.09
2-A (1)	75.54	1512.31	3685.5	2437.00
2-A (2)	75.05	1502.50	3660.5	2436.27
2-B (1)	74.88	1501.34	3259.3	2170.93
2-B (2)	75.10	1518.52	3231.5	2128.06
3-A (1)	75.28	1501.83	3693.5	2459.33
3-A (2)	75.65	1513.75	3689.9	2437.59
3-B (1)	75.00	1515.75	3141.7	2072.70
3-B (2)	75.98	1522.64	3141.8	2063.39
4-A (1)	75.50	1516.79	3685.4	2429.73
4-A (2)	74.82	1503.13	3684.6	2451.28
4-B (1)	75.82	1529.29	3257.1	2129.81
4-B (2)	74.90	1498.75	3230.8	2155.66

Fonte – Elaborada pelo autor.

As tabelas a seguir mostram, separadamente, a densidade média dos corpos de prova nos concretos sem aditivo incorporador de ar e com incorporador de ar:

Tabela 20 – Densidades médias das misturas sem IAR.

Traço	Fator A/C	Densidade média
1-A	0.45	2420.23 kg/m ³
2-A	0.50	2430.74 kg/m ³
3-A	0.55	2450.92 kg/m ³
4-A	0.60	2447.49 kg/m ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Densidades médias das misturas com IAR.

Traço	Fator A/C	Densidade média
1-B	0.45	2138.11 kg/m ³
2-B	0.50	2160.21 kg/m ³
3-B	0.55	2073.12 kg/m ³
4-B	0.60	2145.95 kg/m ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se uma diminuição na ordem de 10 a 15 % na densidade do concreto com o uso de aditivo incorporador de ar em todas as misturas, utilizando o teor de aditivo na ordem de 200 ml a cada 100 kg de cimento.

3.4.3 Resistência à compressão

Percebeu-se, para todos os traços testados, uma redução significativa na resistência à compressão, que se manteve em todas as idades analisadas (7, 14 e 28 dias).

3.4.3.1 Variação da resistência em 7 dias

Para essa idade, os resultados foram os seguintes:

Tabela 22 – Resistências à compressão em 7 dias.

Traço	Resistência à compressão – 7 Dias			
	Carga de ruptura (ton)	Carga de ruptura corrigida (ton)	Área do corpo de prova (cm²)	Resistência à compressão - fc (MPa)
1-A	18.45	18.46	75.21	24.55
1-B	6.23	6.29	75.36	8.35
2-A	11.06	11.10	75.41	14.72
2-B	6.39	6.45	75.16	8.59
3-A	14.08	14.11	74.81	18.86
3-B	5.06	5.13	75.38	6.80
4-A	8.42	8.47	75.06	11.29
4-B	4.52	4.59	75.49	6.08

Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se que grande parte dos traços apresentou uma grande diminuição na resistência à compressão na idade de 7 dias, superando, em alguns casos, uma perda de 50 % de resistência. Como esperado, o traço que apresentou maior resistência foi o traço 1 (fator A/C = 0.45), enquanto o de menor resistência foi o traço 4 (fator A/C = 0.60).

Em cada uma das misturas, a perda de resistência devido ao uso de aditivo incorporador de ar (200 ml por 100 kg de cimento ou 0.2 % por massa de cimento) foi a seguinte:

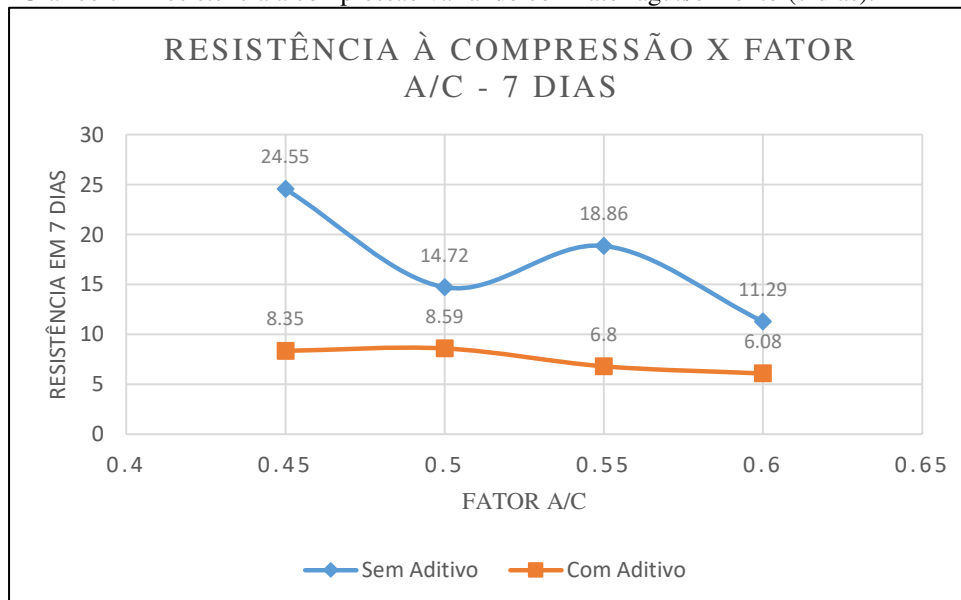
Tabela 23 – Variação da resistência à compressão em 7 dias decorrente do uso de aditivos.

Traço	Perda de resistência em 7 dias
1	65.98 %
2	41.68 %
3	63.93 %
4	46.13 %

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico a seguir mostra esta perda:

Gráfico 7 – Resistência à compressão variando com fator água/cimento (7 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3.2 Variação da resistência em 14 dias

Em 14 dias, os resultados foram similares, com um leve ganho de resistência para todas as amostras.

Tabela 24 – Resistências à compressão em 14 dias.

Traço	Resistência à compressão – 14 Dias			
	Carga de ruptura (ton)	Carga de ruptura corrigida (ton)	Área do corpo de prova (cm ²)	Resistência à compressão - fc (MPa)
1-A	20.60	20.60	75.51	27.28
1-B	6.85	6.91	75.30	9.18
2-A	12.30	12.34	74.99	16.45
2-B	7.43	7.49	75.06	9.98
3-A	16.45	16.47	75.43	21.84
3-B	5.52	5.59	75.27	7.42
4-A	14.22	14.25	74.98	19.01
4-B	5.48	5.55	75.37	7.35

Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma semelhante, as perdas de resistência foram as seguintes:

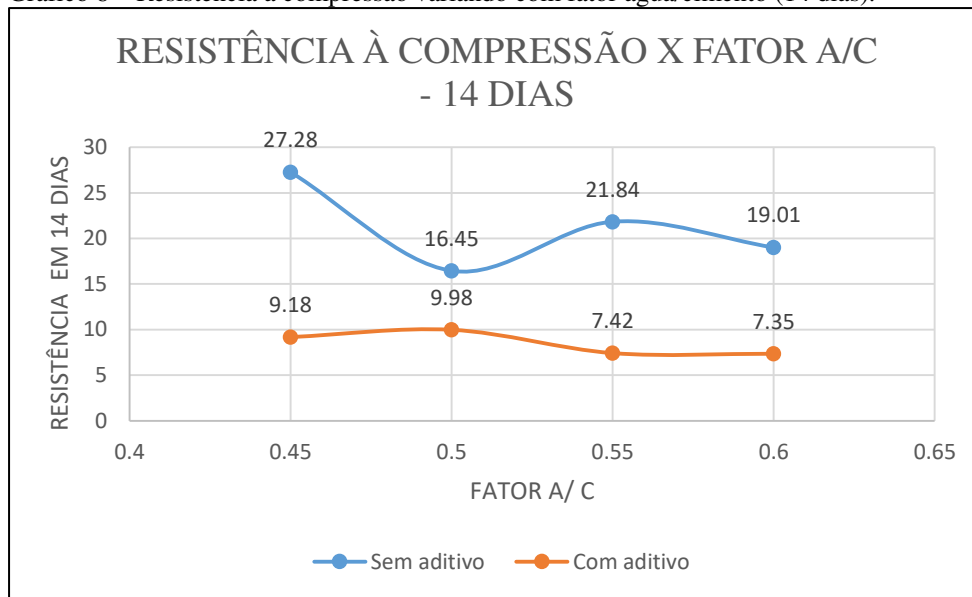
Tabela 25 – Variação da resistência à compressão em 14 dias decorrente do uso de aditivos.

Traço	Perda de resistência em 7 dias
1	66.36 %
2	39.36 %
3	66.00 %
4	61.33 %

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de perda de resistência em cada traço se mostraram semelhantes aos vistos em 7 dias. No decorrer deste tempo, o traço 4 sem aditivo apresentou maior ganho de resistência à compressão (dos 7 aos 14 dias), enquanto o traço 1 segue sendo o mais resistente.

Gráfico 8 – Resistência à compressão variando com fator água/cimento (14 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3.3 Variação da resistência em 28 dias

Em 28 dias, para cada traço, dois corpos de prova foram testados. Os resultados dos valores de resistência à compressão foram os seguintes:

Tabela 26 – Resistências à compressão em 28 dias.

Traço	Resistência à compressão – 28 Dias			
	Carga de ruptura (ton)	Carga de ruptura corrigida (ton)	Área do corpo de prova (cm ²)	Resistência à compressão - fc (MPa)
1-A (1)	25.55	25.53	75.39	33.86
1-A (2)	26.14	26.11	75.90	34.41
1-B (1)	9.60	9.65	75.68	12.75
1-B (2)	9.04	9.09	75.10	12.10
2-A (1)	17.92	17.93	75.54	23.74
2-A (2)	16.48	16.50	75.05	21.98
2-B (1)	9.23	9.28	74.88	12.39
2-B (2)	9.36	9.41	75.10	12.53
3-A (1)	21.72	21.72	75.28	28.85
3-A (2)	19.33	19.34	75.65	25.56
3-B (1)	5.89	5.96	75.00	7.95
3-B (2)	6.57	6.63	75.98	8.73
4-A (1)	19.52	19.53	75.50	25.87
4-A (2)	17.71	17.73	74.82	23.70
4-B (1)	5.51	5.58	75.82	7.36
4-B (2)	6.22	6.28	74.90	8.39

Fonte: Elaborada pelo autor.

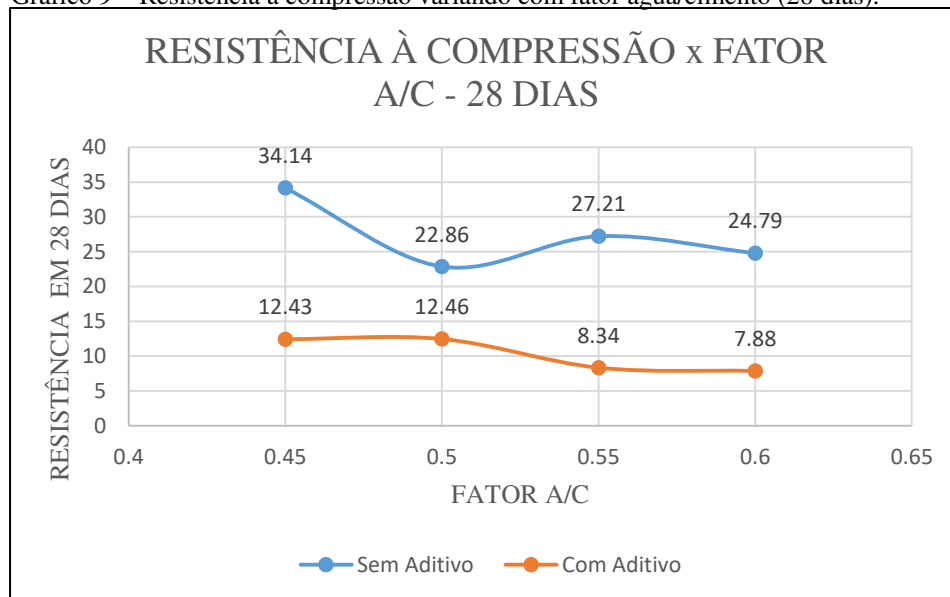
Portanto, as resistências médias obtidas para cada traço, considerando a média aritmética entre os resultados dos dois corpos de provas, são dadas a seguir:

Tabela 27 – Resistência em 28 dias.

Traço	Fc (28 dias) - MPa
1-A	34.14
1-B	12.43
2-A	22.86
2-B	12.46
3-A	27.21
3-B	8.34
4-A	24.79
4-B	7.88

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 9 – Resistência à compressão variando com fator água/cimento (28 dias).

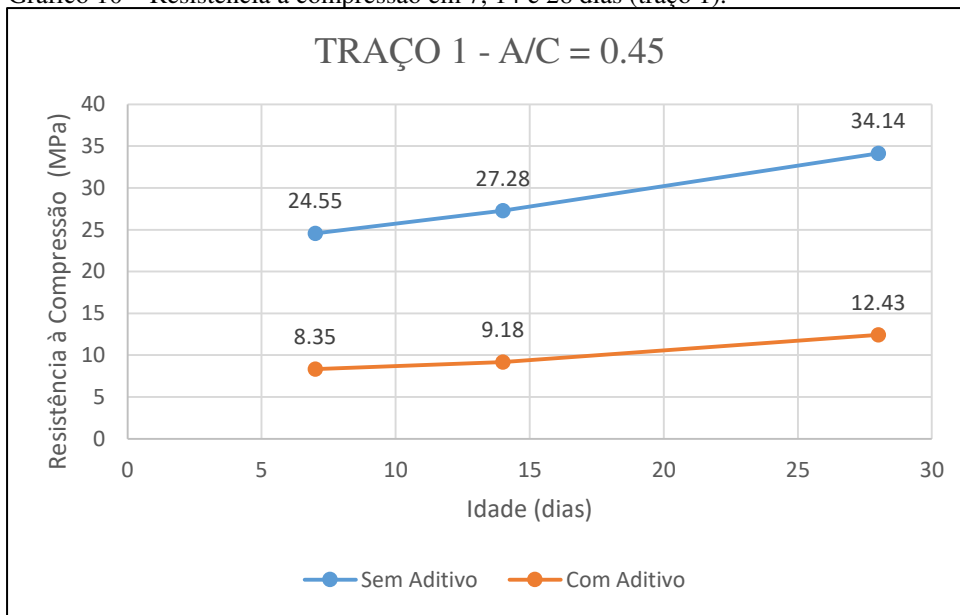


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3.4 Ganho de resistência com o tempo

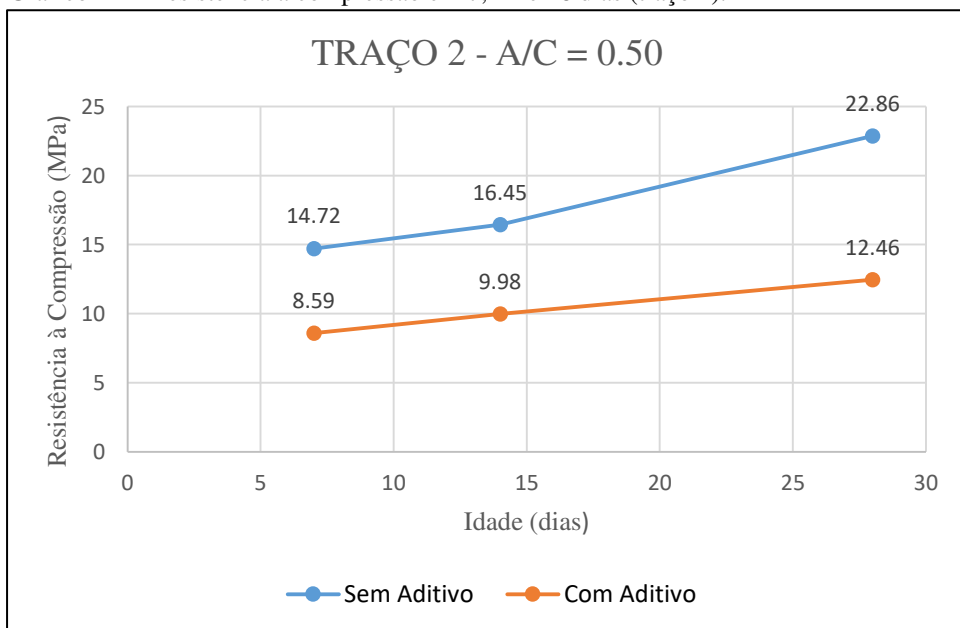
Para todos os traços de concreto, o ganho de resistência ao longo de 28 dias se deu da seguinte maneira:

Gráfico 10 – Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 1).



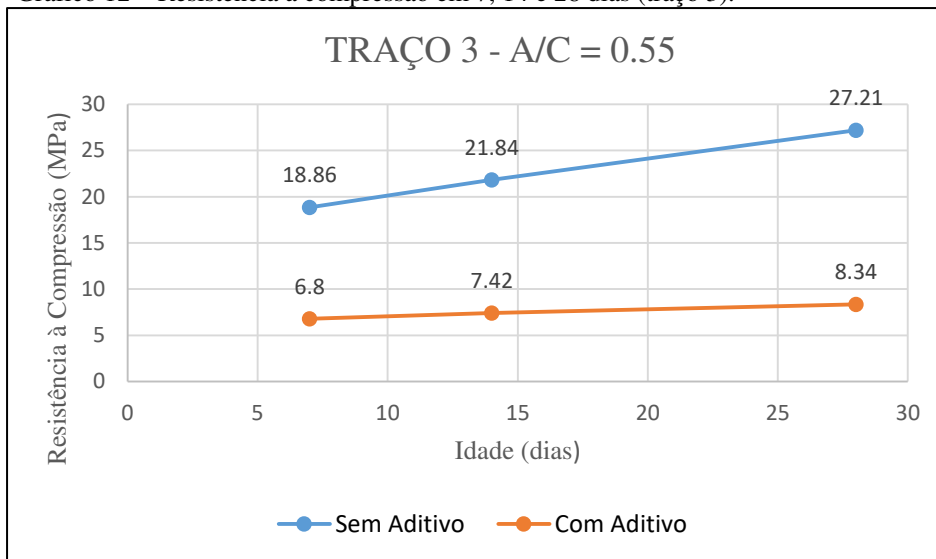
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 2).



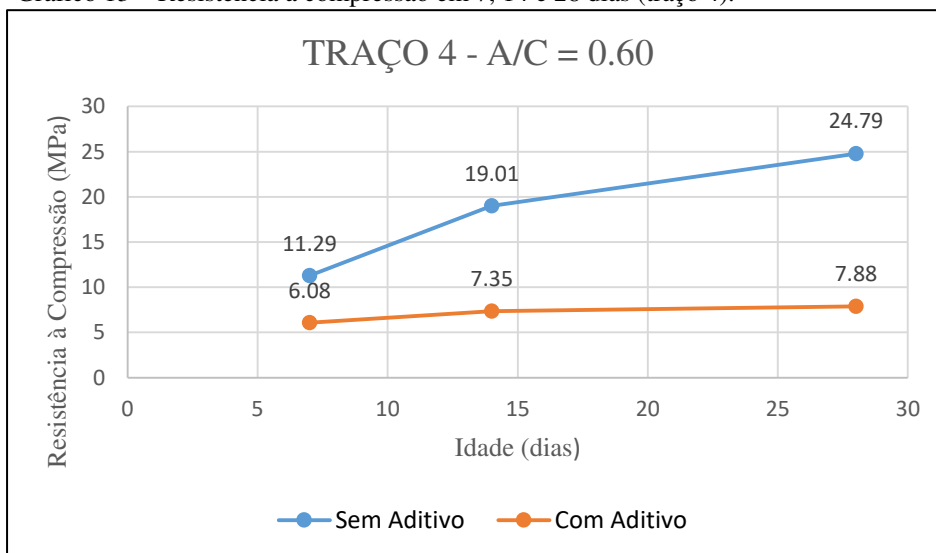
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 – Resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias (traço 4).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se, então, que em todas as misturas de concreto, houve uma significativa redução de resistência à compressão com o uso do aditivo incorporador de ar. Esta queda foi acentuada principalmente nos traços 1, 3 e 4. No caso do traço 2, a diminuição da resistência, apesar de significativa, foi menor em comparação com os demais traços. Uma explicação para isso é uma possível variação da umidade da areia em laboratório, o que pode alterar o fator A/C.

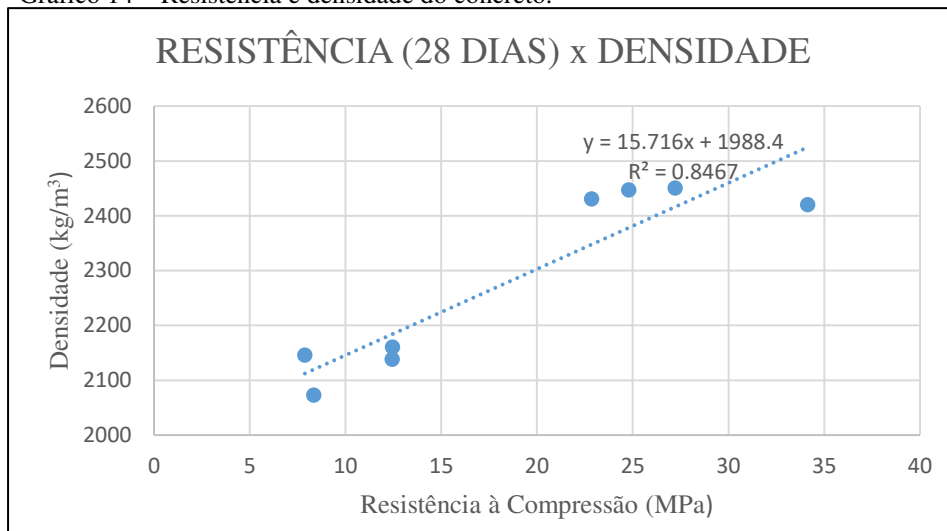
Ademais, é possível perceber que a redução da resistência em função do uso de incorporador de ar foi maior do que a redução decorrente do aumento do fator A/C, o que leva à conclusão de que a simples correção do fator A/C para compensar a perda de resistência

devido ao uso de aditivo IAR não deve ser a única medida tomada. Nos traços analisados, o aumento do consumo de cimento no concreto não foi capaz de compensar o decréscimo na resistência à compressão causado pela incorporação de ar.

3.4.4 Correlação entre densidade e resistência à compressão

De maneira geral, a resistência à compressão se mostrou diretamente proporcional à densidade do concreto, com um bom coeficiente de correlação entre as duas variáveis. O gráfico a seguir mostra essa tendência:

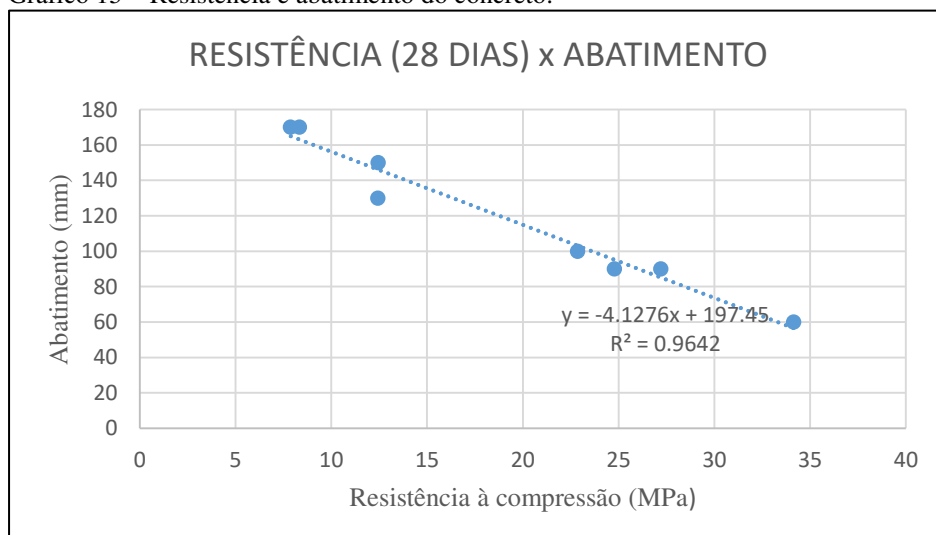
Gráfico 14 – Resistência e densidade do concreto.



Fonte – Elaborado pelo autor.

3.4.5 Correlação entre abatimento e resistência à compressão.

Gráfico 15 – Resistência e abatimento do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se, pelo gráfico anterior, que a resistência à compressão diminui uma vez que a consistência e a fluidez do concreto aumentam. Nos casos vistos antes, isso pode ser explicado pela variação no fator água/cimento ou pelo uso de aditivo incorporador de ar.

O coeficiente de correlação entre estas duas variáveis é de aproximadamente 0.96, o que indica uma forte relação entre o abatimento e a resistência. Entretanto, isso nem sempre é aplicável para todas as misturas existentes, uma vez que podem haver casos de traços com boa fluidez e alta resistência à compressão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho monográfico possibilitou a busca por um entendimento sobre o funcionamento do aditivo incorporador de ar (IAR) nas características do concreto fresco e endurecido, com um foco maior na resistência à compressão. Buscou-se analisar um aditivo em diversos traços de concreto, com 4 fatores água/cimento. A importância deste estudo se deu pelo uso desse aditivo quando se deseja certas características desejadas, tais como a melhora no desempenho térmico do concreto, trabalhabilidade e resistência à deterioração. Este uso, contudo, deve vir acompanhado de testes para verificar possíveis pioras em outras características.

Para analisar a influência do aditivo incorporador de ar, testes de resistência à compressão, abatimento e verificação da densidade foram realizados. A partir da coleta dos resultados, estes foram agrupados de modo a tirar as devidas conclusões. No que tange a variação da resistência mecânica, a conclusão é a de que o uso de aditivo incorporador de ar pode causar uma grande diminuição, como foi verificado nas quatro misturas testadas. As causas dessa variação podem estar atreladas a perda da densidade, característica também bastante alterada pela adição de um sistema controlado de vazios ao concreto. No caso da queda da resistência, conclui-se que o uso de aditivo incorporador de ar na proporção de 200 ml para cada 100 kg de cimento Portland gera um decréscimo na resistência estrutural à compressão que não pode ser compensado pelo maior uso de aglomerante na mistura. No traço 1 ($A/C = 0.45$), por exemplo, o uso de aditivo incorporador de ar gerou um concreto com resistência de 12.43 MPa em 28 dias, ao passo que para o traço 4 ($A/C = 0.60$), a resistência à compressão para um concreto sem aditivo foi de 24.79 MPa na mesma idade. Portanto, no caso do teor de aditivo usado nos testes desta pesquisa, a simples diminuição no fator água/cimento não é capaz de compensar a perda de resistência estrutural decorrente da incorporação de ar. Contudo, podem haver casos em que a diminuição da resistência pode ser corrigida unicamente por um consumo maior de cimento, em situações com uso de aditivo em menor proporção.

Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento do tronco de cone mostram um aumento considerável na fluidez do concreto com o uso de aditivo. Isto pode ser explicado pelo fato das bolhas de ar agirem de maneira análoga à água no concreto, tornando a massa mais trabalhável. Esta é uma das principais vantagens do incorporador de ar em países de clima quente, onde o ganho de resistência ao congelamento advindo do uso de aditivo IAR não é tão relevante.

Já para a densidade, os valores obtidos com ar incorporado foram significativamente inferiores aos obtidos nos traços de controle, o que mostra o potencial do incorporador de tornar o concreto mais leve. Como resultado, em situações em que a resistência não seja um fator preponderante para confecção do traço, o uso de aditivo incorporador de ar pode conferir bastante economia, possibilitando um ganho de volume de concreto, com a mesma quantidade de material utilizada.

Apesar das conclusões interessantes no que diz respeito à ação do aditivo incorporador de ar, outras pesquisas são necessárias e devem ser encorajadas no sentido de explicar de forma mais detalhada a sua ação no concreto. Sugere-se, então, que em novos trabalhos, alguns pontos sejam discutidos, como:

- 1) Averiguar, para uma quantidade maior de misturas, a influência de diferentes teores de aditivo incorporador de ar no concreto.
- 2) Realizar diferentes ensaios para verificar as propriedades térmicas do concreto com um sistema controlado de vazios de ar.
- 3) Verificar a variação da resistência mecânica em concretos com mais de um aditivo.
- 4) Analisar a influência do tempo de mistura no processo de incorporação de ar.
- 5) Ampliar o número de amostras analisadas, com outros fatores água/cimento.
- 6) Examinar a diferença entre diferentes aditivos incorporadores de ar.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1-81.** Detroit, EUA, The Institute, 1981.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Definitions of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM C 125.** Philadelphia, EUA, ASTM, 1993.

_____. **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM C 494.** West Conshohocken, EUA, ASTM International, 2016.

_____. **Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. ASTM C 231.** West Conshohocken, EUA, ASTM International, 2014.

_____. **Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. ASTM C 457.** West Conshohocken, EUA, ASTM International, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Cimentos: tipos de cimento.** São Paulo. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. NBR 11768.** Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

_____. **Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248: 2003.** Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

_____. **Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211.** Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67.** Rio de Janeiro, ABNT, 1998.

_____. **Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressiométrico. NBR NM 47.** Rio de Janeiro, ABNT, 2002.

_____. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, NBR 5739.** Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

_____. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, NBR 5738.** Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

BASTOS, Paulo S.S. Fundamentos do Concreto Armado. **Universidade Estadual Paulista,** Bauru, SP, p.13, 2006. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>>. Acesso em: 10 Out. 2016.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12575>>. Acesso em: 15 Nov. 2016.

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. The Chemistry of Concrete. **Scientific American**, v.210, n.4, p.80-92, 1964.

CARVALHO, João. Sobre as Origens e Desenvolvimento do Concreto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, p. 19-28, 2008. Disponível em: <duem.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/download/8169/5163>. Acesso em: 11 Out. 2016.

CIVILDIGITAL. **Freeze Thaw Damage of Concrete – Effects & Preventive Measures**. 2016. Disponível em: <<http://civildigital.com/freeze-thaw-damage-concrete-effects-preventive-measures/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

CONTROLS GROUP. **Air entrainment meters**. Disponível em: <<http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/air-entrainment-meters.php>>. Acesso em: 16 out. 2016.

DODSON, V. H. **Concrete Admixtures**. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer US, 1990.

ECORE. **Concreto Celular & Concreto Leve ECOPORE**. 2013. Disponível em: <<http://www.ecopore.com.br/concreto-celular/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

GRACE CONSTRUCTION. Aditivo para Concreto. **Tecnol: Aditivo plastificante e incorporador de ar para concreto e argamassa**. Janeiro, 2015. Disponível em: <https://gcpat.com/construction/pt-br/Documents/TecNol_BR_2014.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2016.

KOSMATKA, S. H. et al. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 8. ed. Ottawa, Ontário, Canadá: Cement Association of Canada, 2011.

LAMOND, J.E.; PIELERT, J.H. **Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Making Materials**. West Conshohocken, Estados Unidos: ASTM International, 2006.

MEHTA, P. Kumar; GERWICK Jr., B. C. **Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment**. Vol. 4, n. 10, pp. 45-51, 1982.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NORTHERN CONCRETE INC. **Air entrained concrete–what is it?**. 2014. Disponível em: <<http://northernconcreteinc.com/air-entrained-concrete-what-is-it/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

SILVA, M. Ribas. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 1991.

SINHA, Deepa A. Thermal Properties of Concrete. **Paripex – Indian Journal of Research.** Gujarat, Índia, v.3, p.90-91, 2014. Disponível em:
<https://www.worldwidejournals.com/paripex/file.php?val=February_2014_1392717710_0c336_27.pdf> Acesso em: 15 Jun. 2016.

TORRANS, Patrick; Ivey, Don L. **Review of Literature on Air-Entrained Concrete.** College Station, Texas: Texas Transportation Institute, 1968.