



**VERIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA RELAÇÃO AR INCORPORADO
E RELAÇÃO A/C NA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

SÃO PAULO
2022



BRUNO RAMOS DE SOUZA

DEISE GALBIATTI

ESTELA CRISTINA DENK

**VERIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA RELAÇÃO AR INCORPORADO
E RELAÇÃO A/C NA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Tecnologia do Concreto, Pós-Graduação *lato sensu*, do IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

SÃO PAULO
2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, inicialmente, uns ao outros; pela dedicação, integração, paciência, generosidade, troca e, enfim, pela amizade.

À equipe Conereserv por abrir as portas, fornecer conhecimento, materiais, disponibilizar equipe de apoio e equipamentos, além de nos permitir tanto aprendizado.

Ao colega André Zago Matos pelo apoio moral, técnico e braçal inicial.

Ao consultor Roberto Dakuzaku, por entender o que queríamos e compartilhar parte da sua experiência.

Ao Zenildo Denk, pai da Estela, por parar, pensar conosco e nos abrir o pensamento para outras formas de buscar a solução.

Aos professores do IDD, em especial ao nosso orientador Luís César De Luca e aos coordenadores André Figueiró e Ricardo, pelas críticas precisas e orientativas.

Por fim, à equipe do Controle Tecnológico da Falcão Bauer pelo apoio, pelo trabalho e pelo cuidado as nossas preciosas amostras.

RESUMO

A possibilidade de redução da parcela do cimento utilizado na composição do concreto é objeto de diversos estudos no Brasil e no mundo, visando a sustentabilidade e a melhora da durabilidade do material. Este trabalho visou analisar a possibilidade dessa redução através da incorporação de ar no concreto pelo uso de aditivo incorporador de ar, partindo da hipótese que há uma relação entre o teor de ar incorporado e redução da relação água/cimento que contribui para a trabalhabilidade e para o desempenho de resistência à compressão no concreto. O estudo também avaliou a variação da absorção de água por capilaridade e a velocidade das ondas ultrassônicas em concretos com diferentes teores de ar incorporado. O plano experimental foi definido através de estudos piloto que permitiram avaliar as condições dos materiais utilizados no traço e os resultados preliminares da adição de incorporador de ar na mistura, possibilitando assim a definição de uma dosagem adequada para avaliação dos parâmetros propostos. Os resultados, tanto dos ensaios de trabalhabilidade e resistência à compressão, quanto de absorção por capilaridade e ultrassom, validaram a hipótese do estudo, verificando que deve haver uma relação ótima de redução da relação água/cimento e incorporação de ar que permite o máximo ganho de resistência com a mínima perda de abatimento. O que demonstrou também a possibilidade de redução do consumo de cimento na mistura, contribuindo de forma ainda mais significativa para o estudo.

Palavras chave: incorporação de ar no concreto, aditivo incorporador de ar, parede de concreto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medida do abatimento. (Fonte: NBR NM 67:1998).....	23
Figura 2 – Diagrama esquemático do Medidor tipo B. (Fonte: ABNT NBR NM 47:2002).....	24
Figura 3 – Influência da porosidade na resistência relativa de diversos materiais. (Fonte: Neville, 2016)	27
Figura 4 – Relação entre a permeabilidade e a porosidade capilar da pasta de cimento. (Fonte: Neville, 2016)	28
Figura 5 – Requisitos dos aditivos incorporadores de ar. (ABNT 11768-1:2019)	38
Figura 6 – Ilustração do efeito da presença de incorporador de ar na pasta cimentícia. (Fonte: ROMANO, 2013)	39
Figura 7 – Equipamentos empregados no estudo e instalação do laboratório.	40
Figura 8 – Síntese das características petrográficas. (Fonte: Conereserv).....	43
Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica da brita. (Fonte: Conereserv)	45
Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica da areia artificial. (Fonte: Conereserv).....	46
Figura 12 - Curva de distribuição granulométrica da areia artificial. Fonte: (Conereserv)	47
Figura 13 - Aditivo redutor de água tipo 2 (esquerda) e aditivo incorporador de ar (AIA). Fonte: Autores.	49
Figura 14 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).	54
Figura 15 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).	57
Figura 16 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).	57

Figura 17 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).	60
Figura 18 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).	60
Figura 19 – Fluxograma de plano de ensaios definitivo.	63
Figura 20 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c Referência, na sequência os traços 1,2,3 e 4.	66
Figura 21 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Referência, na sequência os traços 1,2,3 e 4.	67
Figura 22 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c Redução 3%, na sequência os traços 5,6,7 e 8.....	69
Figura 23 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Redução 3%, na sequência os traços 5,6,7 e 8.	69
Figura 24 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c redução 3%, na sequência os traços 9,10,11 e 12.....	70
Figura 25 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Redução 3%, na sequência os traços 9,10,11 e 12.	71
Figura 26 – Ultrassom: Relação entre velocidade de propagação e as condições do concreto. (Whitehurst, 1966.).....	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina. (Fonte: Concreseerv).....	44
Gráfico 2 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com relação água/cimento de referência. (Fonte: Autores)....	73
Gráfico 3 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com redução da relação água/cimento em 3%. (Fonte: Autores)	73
Gráfico 4 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com redução da relação água/cimento em 7%. (Fonte: Autores)	73
Gráfico 5 – Comparativo de resultados gerais e variáveis combinadas – sem escala. (Fonte: Autores).....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Controle de qualidade do cimento apresentado no Boletim Técnico do fornecedor Tupi.	41
Tabela 2 - Resultado da composição granulométrica da brita. (Fonte: Conereserv)	44
Tabela 3 – Resultado da composição granulométrica da areia artificial. (Fonte: Conereserv).....	45
Tabela 4 - Resultado da composição granulométrica da areia de quartzo. Fonte: (Conereserv)	46
Tabela 5 – Dosagem de referência utilizada pela usina dosadora de concreto.	53
Tabela 6 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 1. (Fonte: Autores).....	54
Tabela 7 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 1. (Fonte: Autores).....	55
Tabela 8 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 2. (Fonte: Autores).....	56
Tabela 9 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 2. (Fonte: Autores).....	58
Tabela 10 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 3. (Fonte: Autores).....	59
Tabela 11 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 3. (Fonte: Autores).....	61
Tabela 12 – Plano geral de ensaios de acordo com as respectivas normas brasileiras ABNT.	64
Tabela 13 – Parâmetros de dosagem final – a/c referência. (Fonte: Autores)	65
Tabela 14 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Referência. (Fonte: Autores)	66
Tabela 15 – Parâmetros de dosagem final – a/c Redução 3%. (Fonte: Autores)	67
Tabela 16 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Redução 3%. (Fonte: Autores)	68
Tabela 17 – Parâmetros de dosagem final – a/c Redução 7%. (Fonte: Autores)	69
Tabela 18 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Redução 7%. (Fonte: Autores)	70
Tabela 13 – Resultados obtidos de teor de aditivo e ar incorporado à mistura. (Fonte: Autores)	72
Tabela 14 – Resultados obtidos de abatimento dos concretos com redução de relação a/c com e sem aditivo incorporador de ar. (Fonte: Autores)	74

Tabela 15 – Resultados obtidos de ar incorporado, resistência à compressão e densidade. (Fonte: Autores).....	74
Tabela 16 – Resultados de resistência à compressão e densidade das dosagens com redução da a/c em comparação a dosagem de referência. (Fonte: Autores)	75
Tabela 17 – Resultados obtidos de altura de ascensão capilar e ar incorporado. (Fonte: Autores)	79

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE GRÁFICOS	9
LISTA DE TABELAS.....	10
SUMÁRIO.....	12
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos.....	17
1.3. HIPÓTESE	17
1.4. JUSTIFICATIVAS	17
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	21
2.1.1. Trabalhabilidade	21
2.1.1.1. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	22
2.1.1.2. Determinação do ar incorporado no concreto	23
2.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	25
2.2.1. Resistência à compressão e fatores que a influenciam.....	25
2.2.1.1. Relação água/cimento	25
2.2.1.2. Porosidade	26
2.2.2. Permeabilidade	27
2.2.3. Avaliação do concreto no estado endurecido.....	29
2.2.3.1. Determinação da resistência à compressão	29
2.3. AR INCORPORADO NO CONCRETO	29
2.3.1. Variáveis que interferem na incorporação de ar no concreto	30

2.3.1.1. Cimento e materiais finos.....	31
2.3.1.2. Agregado miúdo	31
2.3.1.3. Condições de mistura dos materiais	32
2.3.2. Comportamento do concreto com ar incorporado.....	32
2.3.2.1. Trabalhabilidade.....	33
2.3.2.2. Permeabilidade e Porosidade	33
2.3.2.3. Massa específica.....	34
2.3.2.4. Isolamento térmico e acústico	34
2.3.2.5. Resistência à compressão	35
2.4. ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO.....	36
2.4.1. Aditivo Incorporador de Ar	38
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	40
3.1 LABORATÓRIO E INSTALAÇÕES UTILIZADAS	40
3.2 MATERIAIS	41
3.2.1 Cimento.	41
3.2.2 Agregados.....	42
3.2.2.1 Brita.....	42
3.2.2.2 Areia Artificial	45
3.2.2.3 Areia de Quartzo	46
3.2.3 Água.....	47
3.2.4 Aditivos químicos	48
3.2.4.1 Aditivo redutor de água.....	48
3.2.4.2 Aditivo incorporador de ar	48
3.3 METODOLOGIA DE DOSAGEM.....	49
3.4 DOSAGEM DE CONCRETO REFERÊNCIA E DESENVOLVIMENTO DE DOSAGEM PILOTO	52
3.4.1 Dosagem Piloto – Parte 1	53
3.4.2 Dosagem Piloto – Parte 2	56
3.4.3 Dosagem Piloto – Parte 3	59
3.5 PLANO DE EXPERIMENTOS DEFINITIVO	62

3.5.1	Plano de ensaios.....	64
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1	RESULTADOS.....	65
4.1.1	Dosagem com relação água/cimento Referência	65
4.1.2	Dosagem com redução de 3% na relação água/cimento.....	67
4.1.3	Dosagem com redução de 7% na relação água/cimento.....	69
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	71
4.2.1	Ar Incorporado.....	71
4.2.2	Abatimento.....	72
4.2.3	Resistência à compressão.....	74
4.2.4	Relação entre incorporação de ar, relação água/cimento, abatimento e resistência à compressão	75
4.2.5	Parâmetros específicos.....	77
4.2.5.1	Absorção de água por capilaridade	77
4.2.5.2	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ultrassom)	79
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	83
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como temática principal avaliação das características do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido, considerando-se o teor de ar incorporado, através do uso de aditivos incorporadores de ar, e da variação da relação água/cimento da mistura, verificando-se sua resistência à compressão e sua trabalhabilidade.

A alta demanda de produção de concreto no mundo tem como consequência altos índices de utilização de recursos minerais naturais e altos índices de emissões atmosféricas, principalmente em função do processo de produção do clínquer, material básico para fabricação do cimento. O Instituto Internacional de Energia (IEA) afirmou em 2018 que cerca de 7% das emissões de CO₂ no mundo estariam associadas à produção de cimento e que a indústria seria a terceira maior consumidora de energia industrial no mundo.

A possibilidade de redução da parcela do cimento utilizado na composição do concreto é objeto de diversos estudos no Brasil e no mundo. Seja por meio de utilização de adições minerais, de melhoria da composição granulométrica da mistura (empacotamento de partículas) e também da utilização de aditivos químicos.

Além dos benefícios ambientais, a redução do consumo de cimento é benéfica para outras propriedades do concreto, como por exemplo a redução das fissuras por retração na secagem, o que traz como consequência o aumento da durabilidade da estrutura.

A tecnologia dos aditivos químicos permite ajustes e controles que dificilmente seriam possíveis sem sua utilização na produção do concreto. Melhorar a trabalhabilidade sem aumento do consumo de água, acelerar e retardar a pega são algumas das características possíveis com o uso de tecnologias químicas.

A utilização de aditivos incorporadores de ar é uma prática comum em regiões em que o concreto está exposto a condições de gelo e degelo (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018), o que inclusive é especificado em normas como a ACI

318 e a EN 206, respectivamente normas norte-americana e europeia para projetos de estruturas de concreto. Os benefícios do parâmetro de incorporação de ar, no entanto, podem ser adicionais aos da sua utilização em ambientes de clima frio. Um deles é a possibilidade de redução no consumo de cimento, em função da melhoria da trabalhabilidade concomitante à redução no consumo de água, proporcionando a obtenção de maior resistência na zona de transição na interface agregado-pasta cimentícia (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Diversos autores, no entanto, descrevem a relação inversamente proporcional entre a massa específica do concreto, reduzida também em função da incorporação de ar, e sua resistência à compressão.

Neville (2016) relaciona a resistência do concreto com o volume de todos os vazios, afirmando que a proporção de vazios não interfere negativamente apenas no material concreto, mas também em outros materiais como o próprio metal. A mesma afirmação é feita por Mehta & Monteiro (2014).

Considerando-se as afirmações citadas, estima-se que haja um teor de ar ótimo que pode permitir uma redução considerável no consumo de água. O ajuste desta relação seria capaz de manter ou até aumentar a resistência à compressão do concreto com a possibilidade de serem mantidos os mesmos parâmetros de trabalhabilidade.

Desta forma, a incorporação de ar pode significar, além da redução do consumo de cimento, contribuição direta para o aumento da durabilidade do concreto.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A relação entre o ar incorporado e a relação água/cimento possui interferência na trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto?

1.2. OBJETIVOS

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar a interferência da relação ar incorporado e relação água/cimento na trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar a variação da absorção de água por capilaridade do concreto com diferentes teores de ar incorporado;
- b) Avaliar por ondas ultrassônicas o volume de vazios no concreto com diferentes teores de ar incorporado.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que há uma relação entre o teor de ar incorporado e a redução da relação água/cimento que contribui para a trabalhabilidade e para o desempenho de resistência à compressão no concreto.

1.4. JUSTIFICATIVAS

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), até 2050, o mundo terá chegado em 9,7 bilhões de habitantes. Um aumento de 2 bilhões de pessoas em comparação ao ano de 2019.

Aliadas a estes dados, necessariamente estão associadas demandas por aumento e melhoria da infraestrutura e moradias de um modo geral. No Brasil, a Fundação João

Pinheiro, que calcula o déficit habitacional no Brasil desde 1995, informou que, em 2019, o Brasil apresentava uma demanda por 5.876.699 de moradias para a sua população.

Considerando-se a situação geral de demanda, como o produto mais utilizado na construção (MEHTA & MONTEIRO, 2014), o consumo de concreto tem uma tendência de aumento considerável nestes próximos 30 anos.

A composição básica do concreto é uma mistura de agregados naturais, cimento e água, sendo que o cimento é derivado de recursos minerais naturais. A produção da massa depende diretamente da extração e utilização de recursos minerais naturais.

Neste cenário, é visível que a rápida evolução da oferta e da demanda em sentidos opostos é o grande desafio para o desenvolvimento sustentável da cadeia de produção da construção.

Além das otimizações relacionadas às novas construções, um fator imprescindível para a redução do consumo dos recursos na cadeia de produção do concreto é a durabilidade do material. Produtos duráveis não demandam reconstrução, ou seja, consumo de novos materiais.

A dosagem com abordagem em sustentabilidade é uma vertente em que vem avançando a tecnologia do concreto. Alinhado a isto, o desenvolvimento de aditivos químicos para este material é uma das alternativas tecnológicas que possibilitam grande contribuição ao desempenho do produto como um todo.

Entre as modificações proporcionadas pelos aditivos químicos desenvolvidos atualmente, a incorporação de ar demonstra possuir características que podem trazer benefícios consideráveis para o concreto, tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido. Podem-se destacar melhorias relacionadas à trabalhabilidade, coesão, exsudação, consumo de cimento, assim como permitir a redução de carga nas estruturas e da pressão nas fôrmas do concreto (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

Em uso crescente no Brasil, as paredes produzidas em concreto moldado in loco vêm ganhando destaque na produção de habitações populares, grande mercado da

construção civil nacional. Em 2014, a parede de concreto esteve presente em cerca de 36% das unidades produzidas pelo programa Minha Casa Minha Vida (MAYOR, A.V.; MONGE, R.; SILVA, J. B. R., 2018). O ganho de produtividade e a redução no desperdício de materiais vem destacando os benefícios desta metodologia frente à utilização da alvenaria estrutural, por exemplo. O concreto com ar incorporado é uma das alternativas utilizadas nesta aplicação. Entre os benefícios associados ao seu uso estão a redução do peso próprio da estrutura e também melhores características relacionadas à trabalhabilidade, importantes para as condições necessariamente esbeltas das paredes.

O aumento dos teores de ar incorporado na mistura, no entanto, esbarra em limitações como o controle requerido do processo produtivo e a qualidade dos materiais empregados (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018). Além disso, pode apresentar grande interferência na redução da resistência à compressão do material.

Estudar os limites do aumento do teor de ar e da redução da relação água/cimento e os impactos destas variáveis na resistência à compressão do concreto pode permitir um aumento na utilização desta alternativa tecnológica. Como consequência, a possibilidade de desenvolvimento de um produto mais eficiente e durável.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento do estudo em questão, com foco nos objetivos estabelecidos, será detalhado e realizado um programa experimental. O escopo do trabalho será realizar um estudo de dosagem e executar os ensaios especificados. Desta forma, serão obtidos resultados que devem permitir análises posteriores nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O **Capítulo 1** apresenta informações introdutórias do estudo. Descreve o problema de pesquisa e os objetivos associados ao trabalho. Aborda justificativas acerca do tema e detalha a metodologia a ser seguida.

O **Capítulo 2** detalha os fundamentos teóricos em que são baseadas as hipóteses, os métodos adotados, os ensaios propostos. Ou seja, embasa a teoria do trabalho a ser desenvolvido. Tem início nas propriedades do concreto fresco e endurecido e evolui para as alternativas e ajustes possíveis através da utilização de aditivos químicos. Relaciona especificamente aspectos da microestrutura com a incorporação de ar, e os impactos que este ajuste pode proporcionar às propriedades da mistura.

O **Capítulo 3** estabelece o programa experimental do trabalho. Com base na teoria discutida, propõe uma sequência na busca por informações, escolha e caracterização de materiais. Define as premissas, detalha o estudo de dosagem e a lógica adotada na variação dos teores de ar incorporado no concreto. Propõe a sequência de ensaios para atendimento aos objetivos especificados, que serão utilizados para testar a hipótese determinada.

O **Capítulo 4** apresenta todos os resultados obtidos a partir da implantação do programa experimental. A partir daí detalha a análise dos efeitos provocados pela proposital incorporação de ar no concreto. Então haverá uma discussão sobre a teoria desenvolvida, ou seja, se há comprovação da hipótese, ou não.

O **Capítulo 5** faz considerações finais sobre o trabalho como um todo e apresenta possibilidades para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as principais considerações que foram tomadas para compreensão e desenvolvimento de análises nos estudos propostos, a partir das propriedades do material concreto e seus constituintes, desde suas características no estado fresco, posteriormente estado endurecido e através de quais mecanismos é possível modificar seu comportamento que são pertinentes ao presente trabalho.

2.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As principais características do material concreto podem ser categorizadas em seus dois estados de uso: estados fresco e endurecido. Para se obter de forma plena as necessidades de seu uso quando endurecido, é necessário também abordar suas condições no estado fresco, como as propriedades de trabalhabilidade, coesão, resistência à segregação, exsudação, teor de ar incorporado, etc. Ao se avaliar estes aspectos é possível controlar seu comportamento e definir parâmetros para que sejam alcançadas as propriedades solicitadas além de sua resistência mecânica final.

2.1.1. Trabalhabilidade

Segundo Mehta & Monteiro (2014), a *trabalhabilidade* do concreto é definida pela ASTM C 125 como a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. No Brasil, podem ser consideradas para classificação e avaliação da trabalhabilidade as normas ABNT NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, e ABNT NBR 15823-1 – Concreto auto-adensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação, e ABNT NBR 15823-2 – Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams, para concretos auto-adensáveis.

Mehta e Monteiro também define que o termo *manusear* inclui as operações de primeiras idades como lançamento, adensamento e acabamento. O esforço necessário para lançar o concreto é principalmente determinado pelo esforço total necessário para iniciar e manter o fluxo, o que, por um lado, depende das propriedades reológicas do lubrificante (pasta de cimento) e do atrito interno entre as partículas dos agregados e, por outro lado, do atrito externo entre o concreto e a superfície da fôrma.

Para Neville (2016), o principal fator que interfere na trabalhabilidade é o *teor* de água na mistura (quantidade de água no concreto por metro cúbico expresso em quilogramas). Esta é uma propriedade vital em relação ao produto acabado, pois o concreto deve ter uma trabalhabilidade que permita o máximo adensamento possível com uma quantidade razoável de energia ou com a quantidade de esforço que seja possível aplicar em determinadas condições.

Por fim, Neville (2016) diz que, a quantidade de água na mistura pode ser reduzida ao ser inserido ar incorporado, assunto este que será descrito nos itens subsequentes.

2.1.1.1. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

A norma ABNT NBR NM 67:1998 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, define que é possível determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra. Este método pode ser aplicado para concretos plásticos e coesivos, que apresentem um assentamento igual ou superior a 10mm, como resultado do ensaio realizado com a respectiva norma, não sendo aplicável para concretos cujo agregado graúdo apresente dimensão nominal máxima superior à 37,5mm.

Para o ensaio normatizado, é necessário um molde de corpo-de-prova de ensaio, em formato de tronco de cone oco, com dimensões de $200\text{mm} \pm 2\text{mm}$ na base inferior e $100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ na base superior, possuindo $300\text{mm} \pm 2\text{mm}$ de altura. Também é necessária uma haste de aço ou material adequado, com diâmetro de 16mm e

comprimento de 600mm de extremidades arredondadas, e também é utilizado para apoio uma placa base, também metálica, plana, quadrada ou retangular, com dimensão não inferior a 500mm e espessura igual ou superior a 3mm, devendo a mesma ser apoiada sobre local rígido, plano, horizontal e livre de vibrações. A norma técnica prescreve que no procedimento de ensaio, deve-se umedecer tanto o molde quanto a placa de base e apoiar o molde sobre a placa. Em seguida, preencher rapidamente o molde com o concreto a ser ensaiado, em três camadas, onde em cada camada deve ser realizada a compactação com 25 golpes por camada no concreto, utilizando a haste de socamento. Após a finalização da compactação, rasar a superfície de concreto, e por fim retirar o molde do concreto, levantando-o cuidadosamente na direção vertical. Deve-se, então, aferir a medição do abatimento, determinado pela diferença de altura entre a altura do eixo do corpo-de-prova e o molde. A Figura 1 ilustra a finalização do ensaio e seus respectivos equipamentos necessários:

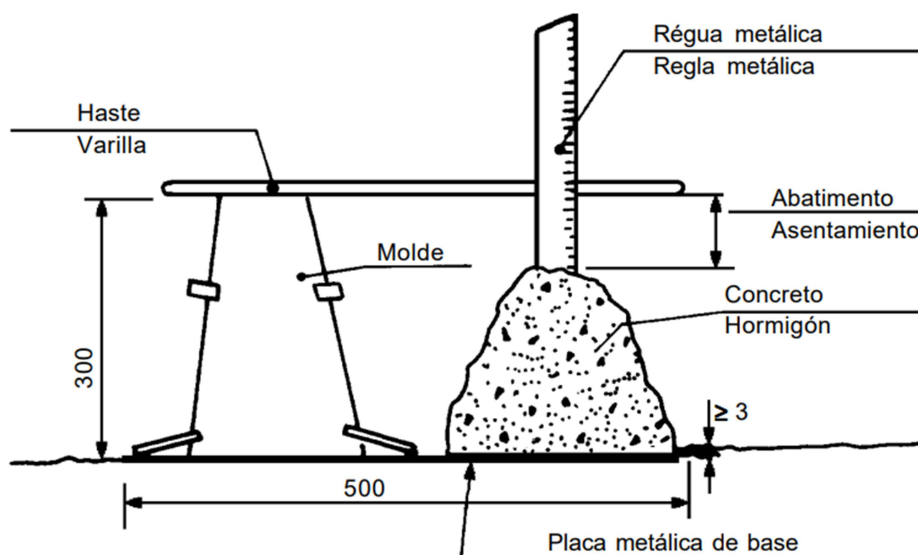


Figura 1 – Medida do abatimento. (Fonte: NBR NM 67:1998)

2.1.1.2. Determinação do ar incorporado no concreto

Segundo a norma ABNT NBR NM 47:2002 – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico, é possível determinar o teor de ar na

massa de concreto a partir da mudança de seu volume devido à uma mudança na pressão. Este método é adequado para utilização em concretos dosados com agregados normais ou densos, para os quais é possível determinar satisfatoriamente o fator de correção mediante o procedimento indicativo em seu Anexo B, quando necessário. A norma também prescreve que o método não é aplicável em concretos com agregados leves, escórias de alto-forno esfriadas ao ar, ou agregados de alta porosidade.

Para este ensaio são necessários um medidor de ar, onde a norma define duas alternativas, tipo A e tipo B de medidores, um recipiente de medida cilíndrico, de aço ou outro material rígido que não seja atacável pela pasta de cimento, de diâmetro entre 0,75 e 1,25 vezes a altura do recipiente, e capacidade mínima de 5dm³, e os demais equipamentos para realização do ensaio como haste de adensamento, martelo de borracha, placa de vidro e régua. A amostra de concreto deve ser obtida de acordo com a NM 33.

A Figura 2 ilustra o medidor de ensaio utilizado, do tipo B da norma:

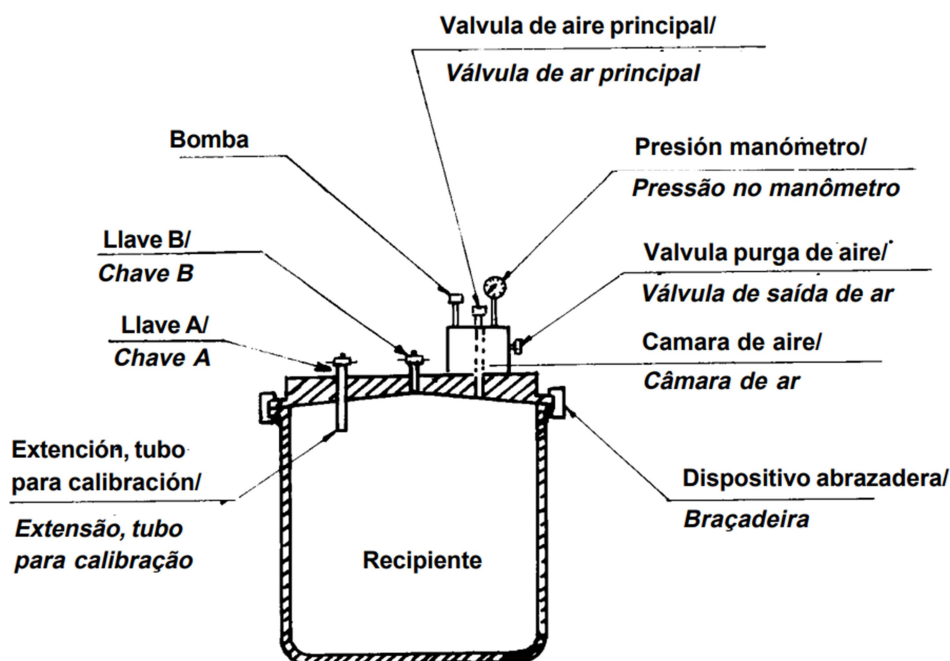


Figura 2 – Diagrama esquemático do Medidor tipo B. (Fonte: ABNT NBR NM 47:2002)

2.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Segundo Neville (2016), a resistência do concreto normalmente é considerada a sua propriedade mais importante, embora em muitas situações práticas, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade possam ser mais relevantes. Desta forma, serão abordados a seguir, propriedades acerca da proposta de estudos da presente pesquisa.

2.2.1. Resistência à compressão e fatores que a influenciam

De acordo com Mehta & Monteiro (2014), a resistência mecânica à compressão do concreto é a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros de controle de qualidade. Nos sólidos, existe uma relação inversa fundamental entre porosidade (fração de volume de vazios) e resistência.

Mehta & Monteiro também diz que, conseqüentemente, em materiais multifásicos como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode se tornar um fator limitante para a resistência. Assim, agregados naturais são geralmente densos e fortes, e desta maneira a porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e agregado gráúdo normalmente determinam a resistência característica do concreto de densidade normal.

2.2.1.1. Relação água/cimento

Neville (2016) considera que, na prática, a resistência do concreto em uma determinada idade, quando submetido à cura úmida, a uma temperatura específica, depende principalmente apenas de dois fatores: a relação água/cimento e o grau de adensamento.

Ainda segundo Neville (2016), na circunstância do concreto plenamente adensado, sua resistência é considerada inversamente proporcional à relação

água/cimento, relação esta que foi estabelecida por Duff Abrams em 1919, que descobriu que a resistência é igual a:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Onde:

a/c = relação água/cimento

K₁ = constante empírica

K₂ = constante empírica

f_c = resistência à compressão

Para Mehta & Monteiro (2014), a relação água/cimento é, sem dúvida, o fator mais importante, porque, independente de outros fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado gráudo.

2.2.1.2. Porosidade

Segundo Neville (2016), a princípio, a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios: ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e, se utilizado, ar incorporado. A Figura 3 demonstra esta influência para materiais além do concreto, exemplificando que este fenômeno é fator determinante na propriedade mecânica. Ainda de acordo com Neville, além do volume, a forma e a dimensão dos poros também influenciam o desempenho mecânico. Há também influência da forma das partículas sólidas e de seu módulo de elasticidade na distribuição de tensões e, portanto, na concentração de tensões no interior do concreto.

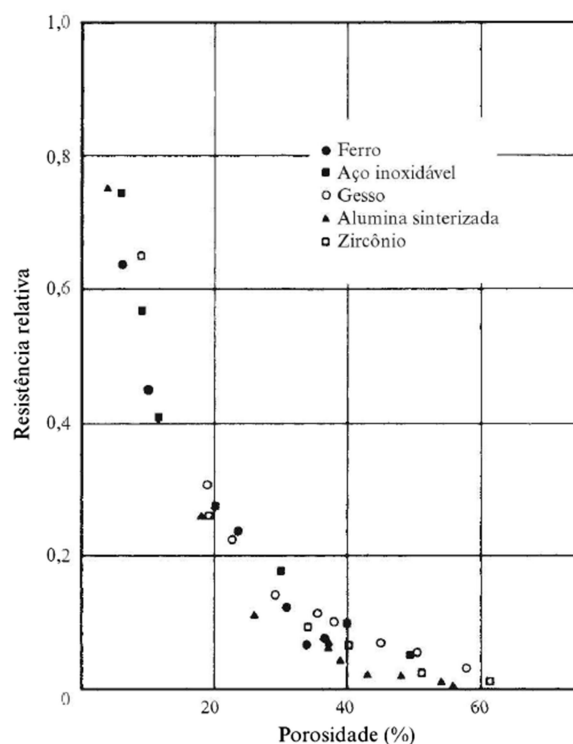


Figura 3 – Influência da porosidade na resistência relativa de diversos materiais. (Fonte: Neville, 2016)

Para Mehta & Monteiro (2014), os vazios podem ser caracterizados através de suas dimensões e natureza de origem, de forma crescente, iniciando-se pelo espaço interlamelar no C-S-H, seguindo para os vazios capilares, de dimensões até 50 nm, chamados de microporos e os vazios maiores que 50nm, os macroporos. Os vazios de ar incorporado variam entre 100µm e 1mm, e os de ar aprisionado podem chegar a 3mm. Os microporos geram interferência nos efeitos de retração por secagem e na fluência e os macroporos apresentam maior influência nas características de resistência e impermeabilidade.

2.2.2. Permeabilidade

Mehta & Monteiro (2014) definem *permeabilidade* como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso.

Conforme expõe Neville (2016), a permeabilidade do concreto é uma propriedade que não depende somente de sua porosidade, mas também da dimensão,

da forma, da tortuosidade e da continuidade dos poros. Ele complementa ainda, afirmando que embora o gel de cimento tenha uma porosidade de 28%, sua permeabilidade é de somente $7 \times 10^{-16} \text{ m/s}$, que é explicado pela textura muito fina da pasta de cimento endurecida: os poros e as partículas sólidas são muito pequenas e numerosas, enquanto que nas rochas, ainda que possua menor número, seus poros são muito maiores, o que promove uma maior permeabilidade. Assim sendo, a água pode fluir mais facilmente através dos poros capilares do que através dos poros muito menores de gel. A pasta de cimento como um todo é de 20 a 100 vezes mais permeável do que o gel em si. Conclui-se, então, que a permeabilidade da pasta de cimento endurecida é controlada pela porosidade capilar. A Figura 4 demonstra a relação entre estas duas grandezas:

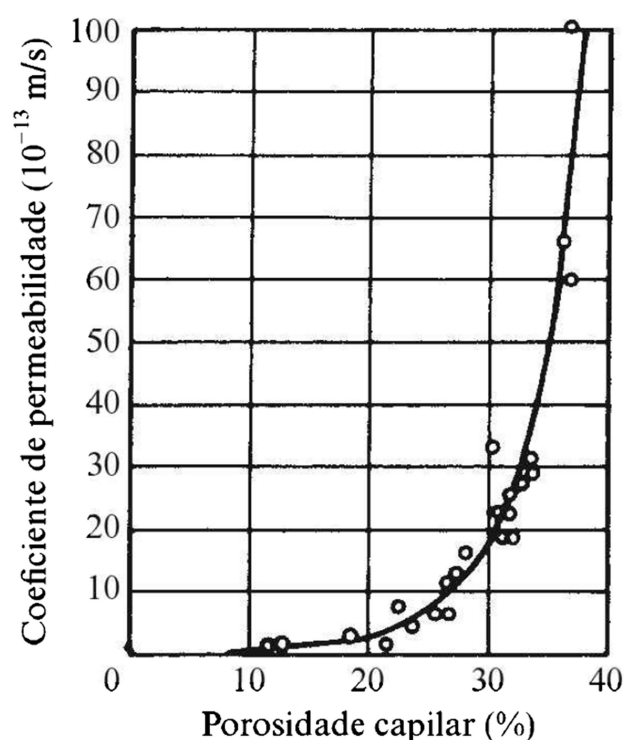


Figura 4 – Relação entre a permeabilidade e a porosidade capilar da pasta de cimento. (Fonte: Neville, 2016)

Do ponto de vista de durabilidade, a permeabilidade é um dos fatores mais importantes a serem considerados no concreto. Segundo Mehta & Monteiro (2014), a água é necessária para as reações de hidratação do cimento e parte dela usada somente

como facilitador da mistura dos materiais constituintes. Gradualmente, de acordo com as condições do ambiente, parte da água evaporável (capilar e parte da água adsorvida), é perdida para a atmosfera e passa a deixar poros vazios ou não saturados, que podem vir a re-saturar, dependendo das condições do meio em que o concreto se encontra inserido.

2.2.3. Avaliação do concreto no estado endurecido

Neste subitem são apresentados os ensaios que são abordados no presente estudo para análise de seus respectivos resultados no material dosado.

2.2.3.1. Determinação da resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão do concreto, a norma brasileira ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, especifica o método de ensaio e procedimentos a serem realizados para que seja obtido os resultados que possam representar as características mecânicas quanto à capacidade de resistir à compressão do concreto determinada amostra ensaiada. Na referida norma, contam em seus Anexo A os tipos de ruptura dos corpos de prova ensaiados, que posteriormente podem compor na análise e comportamento do concreto no estado endurecido, e em seu Anexo B possui como informativo procedimentos para avaliação estatística de desempenho dos ensaios, levando em consideração as possíveis variações dos resultados de resistência à compressão e como estes podem ser classificados.

2.3. AR INCORPORADO NO CONCRETO

Segundo Kosmatka et al (2002), o desenvolvimento do concreto com ar incorporado em meados de 1930 foi um dos maiores avanços na tecnologia do

concreto. Atualmente, a incorporação de ar é recomendada principalmente para melhorar a resistência a ciclos de gelo-degelo, pois os vazios são ocupados pela água que se expande no processo de congelamento. No entanto há outros benefícios importantes da incorporação de ar no concreto, tanto do estado fresco como endurecido.

É importante diferenciar que no concreto pode-se encontrar vazios preenchidos com ar de duas formas: ar incorporado e ar aprisionado. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as bolhas de ar incorporado possuem dimensões entre 100µm e 1mm de diâmetro, enquanto os vazios de ar aprisionado são maiores, ficando entre 1mm e 10mm.

Segundo Agnesini (1988) concretos convencionais contêm em seu interior teores de 1% a 3% de seu volume na forma de ar aprisionado, mesmo sem o uso de aditivos incorporadores de ar. No caso de concretos produzidos em centrais e transportados por caminhões betoneiras este percentual pode chegar a 4%.

Os vazios de ar aprisionado são geralmente originados por deficiência nas dosagens e escolha dos materiais, e afetam a qualidade final do concreto, podendo comprometer as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Já as bolhas de ar incorporado podem ser geradas no concreto de forma natural ou com o auxílio de aditivos incorporadores de ar.

A quantidade de ar incorporado no concreto está relacionada à maneira pela qual o cimento, a água e as bolhas de ar ocupam os espaços entre os agregados, ou seja, depende do empacotamento dos agregados. Isso também está relacionado com o distanciamento proporcionado entre as partículas de cimento, da quantidade de pasta que separam os agregados miúdos, e da quantidade de argamassa que separam os agregados graúdos. (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

2.3.1. Variáveis que interferem na incorporação de ar no concreto

A incorporação de ar é, claro, dependente do aditivo incorporador de ar utilizado, mas é um processo extremamente complexo, e é influenciado também pelo tipo e dimensão do cimento e de outros materiais finos, dos agregados miúdos, pelo tipo e grau de adensamento aplicado e pela temperatura e tempo de mistura do concreto. Estes fatores são apresentados nos itens a seguir.

2.3.1.1. Cimento e materiais finos

A quantidade de cimento e a presença de outros finos na mistura, como a cinza volante, sílica ativa ou até frações finas de areia, afetam negativamente a incorporação de ar no concreto.

Isso ocorre pelo fato de os materiais finos possuírem maior área superficial e então requererem uma maior quantidade de água durante a mistura. Esse aumento da área superficial aumenta também sua área de absorção, fazendo com que uma maior quantidade de água e parte do aditivo seja absorvido, reduzindo assim a formação das bolhas de ar e dificultando sua estabilização.

Kosmatka et al (2002) aponta ainda que a incorporação de ar é afetada também pela alcalinidade do cimento. Um cimento de baixo teor alcalino pode exigir 20% a 40% (ocasionalmente até 70%) mais agente incorporador de ar do que um cimento de alto teor alcalino para atingir um teor de incorporação de ar equivalente.

2.3.1.2. Agregado miúdo

A quantidade de agregado miúdo afeta diretamente a quantidade de ar incorporado. Isto porque, como citado, está diretamente relacionado com o empacotamento dos agregados. De acordo com Dolch (1995) o agregado miúdo tem a função de prender as bolhas de ar durante a mistura. Ele proporciona espaços que contêm pasta e bolhas de ar, de forma que as bolhas são geradas com maior eficiência. Assim, quanto maior a proporção de areia em relação ao total de agregados, maior é a quantidade de ar incorporada ao concreto.

2.3.1.3. Condições de mistura dos materiais

A operação de mistura também afeta significativamente no teor final de ar incorporado no concreto. Há um tempo mínimo de mistura necessário para total espalhamento do aditivo, mas tempos muito longos também podem afetar negativamente. De acordo com Neville (2016) um tempo excessivo de mistura expulsa, gradualmente, parte do ar, ou seja, existe um tempo de mistura ótimo. Esse prolongamento do tempo de mistura também afeta a incorporação de ar, pois, parte da água livre presente na mistura é perdida, restando menos água para a geração e estabilização das bolhas de ar.

Os efeitos das proporções da mistura na entrada de ar são bem complexos. De acordo com Du (2005), a incorporação de ar é um processo dinâmico em quais novas bolhas de ar aparecem e as mais antigas desaparecem ao mesmo tempo. Durante a mistura, o cisalhamento localizado, compressão, extensão, torção e ações de compactação são afetados por todos os componentes e suas quantidades na mistura, incluindo as bolhas de ar existentes. Todas essas ações afetam a quantidade de bolhas e distribuições de tamanho.

A temperatura é outro fator que influencia a incorporação de ar. Fortes (1994) aponta que a temperatura da água ou do ambiente afeta diretamente a formação e a estabilidade das bolhas, pois altera a viscosidade da solução, diminuindo a espessura e a resistência mecânica das películas que envolvem as bolhas de ar, facilitando a coalescência.

2.3.2. Comportamento do concreto com ar incorporado

Como citado anteriormente, a incorporação de ar é utilizada principalmente para o aumento da resistência do concreto aos ciclos de congelamento e

descongelamento. No entanto, ela também afeta outros parâmetros, como a trabalhabilidade, a porosidade, a resistência à compressão, etc. Além disso, segundo Neville (2016) outras motivações que levam à incorporação de ar aos concretos são a obtenção de massa específica menor, o isolamento térmico ou absorção acústica. A seguir, são descritos alguns dos efeitos benéficos da incorporação de ar, bem como os possíveis efeitos negativos sobre a resistência do concreto.

2.3.2.1. Trabalhabilidade

Um dos principais aspectos afetados positivamente pela incorporação de ar no concreto é a trabalhabilidade. Segundo Neville (2016), a razão para a melhora da trabalhabilidade com o uso de ar incorporado provavelmente se deve ao fato de as bolhas de ar, mantidas esféricas pela tensão superficial, atuarem como um agregado miúdo de atrito superficial muito baixo e de considerável elasticidade. A incorporação de ar ao concreto faz com que ele se comporte como se houvesse excesso de areia, e por esse motivo, a adição de ar incorporado deve ser acompanhada pela redução do teor de areia. Essa alteração possibilita uma redução adicional da quantidade de água do concreto, ou seja, outra compensação para a perda de resistência devida à presença de vazios.

Essa melhora na trabalhabilidade é acentuada em concretos mais pobres, quando se compara a mesma mistura sem o uso do ar incorporado, que em concretos mais ricos, onde o efeito da incorporação de ar sobre a trabalhabilidade é menor.

Além disso, a incorporação de ar também reduz a segregação durante o manuseio e o transporte, pois a mistura de concreto fica mais coesa, no entanto, a segregação ocasionada pelo excesso de vibração ainda pode ocorrer, pois, nessa condição, as bolhas de ar são expelidas. (NEVILLE, 2016)

2.3.2.2. Permeabilidade e Porosidade

Propriedades como porosidade e permeabilidade estão intrinsecamente relacionadas entre si e são afetadas diretamente pela incorporação de ar no concreto. Estas propriedades impactam na durabilidade do concreto. O conhecimento da influência do ar incorporado e dos possíveis processos de deterioração, permite definir com maior segurança sua aplicação.

Neville (2016) aponta, contudo, que a permeabilidade não é uma função simples da sua porosidade, pois também depende da dimensão, da forma, da tortuosidade e da continuidade dos poros. Assim, a incorporação de ar por meio de bolhas não conectadas entre si, apesar de aumentar a porosidade, diminui a permeabilidade. Além disso, pode haver melhoria mais acentuada na permeabilidade quando a incorporação de ar permitir a redução da relação água/cimento.

2.3.2.3. Massa específica

A incorporação de ar afeta diretamente a massa específica do concreto, pois a mesma apresenta uma correlação com a inclusão de vazios. A relação entre o conteúdo de ar aprisionado intencionalmente e a massa específica é bastante direta; um aumento no volume do ar promove uma redução nos valores de massa específica, mantendo-se a mesma relação de materiais. Desta forma, a diminuição das massas específicas dos concretos é obtida através da inclusão destes vazios em seu interior.

2.3.2.4. Isolamento térmico e acústico

A incorporação de ar no concreto promove benefícios sobre o isolamento térmico e acústicos do material. A condutividade térmica do concreto é influenciada pela massa específica. Assim, quanto maior a massa específica, maior a condutividade térmica do concreto. Segundo Demirboga e Gul (2003), a condutividade térmica do concreto está relacionada à sua densidade aparente, pois decorre das diferenças em sua

porosidade. A estrutura de poros dos concretos leves com ar incorporado os tornam melhores no isolamento térmico e sonoro, quando comparados com os concretos convencionais, pois a condutividade térmica está diretamente relacionada à quantidade e distribuição dos poros no concreto.

2.3.2.5. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é diretamente relacionada com sua massa específica, ou seja, quanto maior a quantidade de vazios maior será a redução da resistência. Isso é válido apenas, contudo, nos casos em que nenhum outro parâmetro da mistura é alterado.

Neville (2016) ressalta que a resistência é influenciada pelo volume total de todos os vazios presentes, ou seja, do ar aprisionado, do ar incorporado, dos poros capilares e dos poros de gel. Quando há ar incorporado no concreto, o volume total de poros capilares é menor, devido a parte do volume bruto da pasta de cimento endurecida ser constituída por ar incorporado.

Isso ocorre justamente porque a quantidade de água na pasta é reduzida, sendo substituída pelo ar incorporado para obtenção da mesma consistência, ou seja, há redução na formação dos poros capilares. Segundo o autor, esse não é um fator desprezável, tendo em vista que o volume de ar incorporado representa uma proporção significativa do volume bruto da pasta de cimento endurecida.

Deste modo, mesmo com o aumento do volume de vazios ocasionados pela incorporação de ar no concreto, não há uma perda da resistência tão pronunciada, pois há também aumento da trabalhabilidade, como citado no item anterior. E esse aumento da trabalhabilidade permite a redução da quantidade de água na mistura e consequente alteração na relação água/cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), melhorando-se a trabalhabilidade e a compacidade da mistura, o ar incorporado tende a aumentar a resistência da zona de transição na interface (especialmente nas dosagens com muito baixos consumos de

água e cimento) e, dessa forma, melhora-se a resistência do concreto. Ainda segundo o autor, em dosagens de concreto com baixo consumo de cimento, quando o ar incorporado é acompanhado por uma redução significativa do teor de água, o efeito adverso do ar incorporado na resistência da matriz é mais do que compensado pelo efeito benéfico sobre a zona de transição.

Além disso, a incorporação de ar no concreto também pode ser benéfica para estruturas como concreto massa, em que o desenvolvimento do calor de hidratação, e não a resistência, é o principal aspecto, pois possibilita o uso de misturas com menores consumos de cimento e, portanto, uma menor elevação de temperatura.

2.4. ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO

Um aditivo pode ser definido como um produto químico que, exceto em casos especiais, é adicionado ao concreto em quantidades máximas de 5%, em relação à massa de cimento, durante a mistura ou durante uma mistura complementar antes do lançamento do concreto, com o objetivo de obter uma alteração específica, ou alterações, nas propriedades normais do concreto. (NEVILLE, 2016)

A ABNT NBR 11768:2019 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos, lista os principais aditivos utilizados no Brasil e os classifica conforme abaixo:

- Redutor de água: aditivo que, sem modificar a consistência do concreto, permite reduzir o conteúdo de água; ou que sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez; ou ainda, aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente;
- Controlador de hidratação: aditivo que controla a hidratação do cimento;
- Acelerador de pega: aditivo que promove a redução dos tempos de pega do concreto;

- Acelerador de resistência: aditivo que aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais do concreto, com ou sem modificação do início de pega;
- Compensador de retração: aditivo que ao reagir com o cimento e água, produz etringita ou hidróxido de cálcio e outros, levando ao aumento do volume, que induz o concreto a expandir e compensar as forças de retração total;
- Redutor de retração: aditivo que possui como função principal a redução da retração autógena, atuando na diminuição da tensão superficial da água presente no concreto;
- Acelerador de pega para concreto projetado: aditivo que altera imediatamente a reologia do concreto projetado, promovendo aderência ao substrato e, posteriormente, acelera a hidratação do cimento aumentando as resistências iniciais;
- Incorporador de ar: aditivo que incorpora intencionalmente, durante o amassamento do concreto, uma quantidade de microbolhas de ar separadas entre si, uniformemente distribuídas, estáveis e que mantenham estas características no estado endurecido.
- Modificador de viscosidade e retentor de água: aditivo que retém a água dentro do concreto diminuindo o efeito de exsudação.

A mesma norma também especifica os requisitos mínimos de desempenhos de cada tipo de aditivo. Para aditivos redutores de água, a quantidade máxima de ar incorporado permitida é de até 2%, já para incorporadores de ar o valor mínimo é de 2,5%, sendo estipulado também o espaçamento entre os poros e o valor mínimo de resistência à compressão com 28 dias conforme apresentado na Figura 5.

Propriedade	Método de ensaio	Requisito ^a
Teor de ar no concreto fresco	ABNT NBR NM 47	Concreto em ensaio $\geq 2,5$ % em volume acima do concreto de referência Teor de ar total do concreto de ensaio: 4 % a 6 % ^b
Características dos poros de ar no concreto endurecido (facultativo)	EN 480-11 ^c	Fator de espaçamento na mistura em ensaio $\leq 0,200$ mm
Resistência à compressão aos 28 dias, do concreto	ABNT NBR 5739	IM $\geq 0,75$
^a Os ensaios previstos nesta tabela devem ser realizados com o concreto de referência preparado conforme o Anexo A, sendo realizadas determinações comparativas entre misturas com e sem aditivo. ^b A dosagem do aditivo deve ser ajustada para obter o teor de ar desejado. ^c A determinação das características dos poros de ar no concreto endurecido, quando for requerida a comprovação da durabilidade do concreto a ciclos de gelo/degelo, pode ser realizada pelo método descrito na EN 480-11.		

Figura 5 – Requisitos dos aditivos incorporadores de ar. (ABNT 11768-1:2019)

2.4.1. Aditivo Incorporador de Ar

Agentes incorporadores de ar e redutores de água são aditivos classificados como compostos tensoativos, que são, de forma geral e em sua maioria, aniônicos, ou seja, formados por moléculas de cabeça e cauda com cargas opostas. Um aditivo tensoativo é composto essencialmente de moléculas orgânicas de cadeia longa com uma extremidade hidrofílica (que atrai água) e outra hidrofóbica (que repele água). Os que usam cadeia apolar servem como incorporadores de ar, os demais servem como aditivos redutores de água. (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Segundo Mehta e Monteiro (2014) os compostos incorporadores de ar atuam de forma que na interface ar-água os grupos polares estão orientados na direção da fase aquosa, reduzindo a tensão superficial, promovendo a formação de bolhas. Na interface sólido-água, onde existem forças direcionadoras na superfície do cimento, os grupos polares ligam-se ao sólido mantendo os grupos apolares orientados para a fase aquosa, tornando a superfície do cimento hidrofóbica e assim o ar pode deslocar a água e permanecer ligado às partículas sólidas em forma de bolhas.

É este mesmo mecanismo que impede as bolhas de coalescerem, pois a película hidrófila formada ao redor de cada bolha de ar impede essa união, conferindo-lhes certo grau de repulsão. Ressalta-se que a estabilidade das bolhas formadas é de

fundamental importância para determinar a qualidade de um aditivo e para que o concreto apresente a resistência e durabilidade esperados.

Contudo, o efeito do aditivo incorporador de ar é mais complexo, segundo Romano (2013), as moléculas dos aditivos em suspensão podem apresentar os seguintes comportamentos:

- Formar bolhas que são ancoradas na superfície do cimento;
- Formar bolhas livres na pasta (sem ancoramento), as quais coalescem e colapsam facilmente;
- Estar livres sem a formação das bolhas;
- Estar ancorados na interface cimento-ar;
- Formar aglomerados de bolhas sem ancoramento no cimento; e
- Formar aglomerados de bolhas ancorados nas partículas.

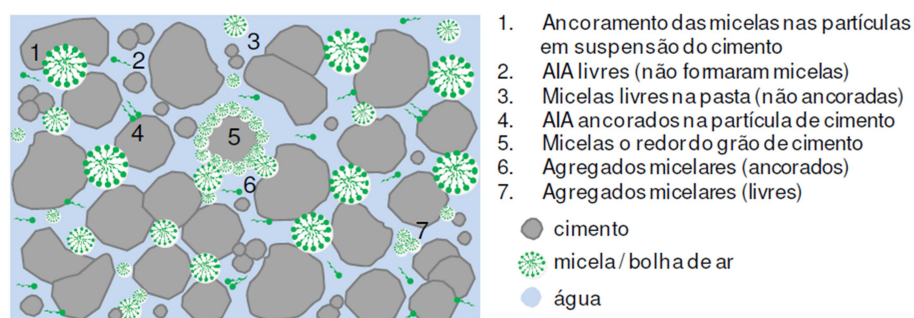


Figura 6 – Ilustração do efeito da presença de incorporador de ar na pasta cimentícia. (Fonte: ROMANO, 2013)

Segundo o mesmo autor, a maior parte dos aditivos permanece ancorada na superfície do cimento na forma de bolhas, mas, mesmo em pequenas quantidades livres na solução, é suficiente para alterar a tensão superficial da água de amassamento. As bolhas não ancoradas apresentam maior mobilidade entre as partículas e, por isso, colapsam mais rapidamente.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado de forma detalhada o programa experimental desta pesquisa para verificar as correlações entre a redução da relação água/cimento de um concreto e a incorporação de ar nessa mistura para que seja mantida a mesma trabalhabilidade. A partir desta prerrogativa avaliar o impacto destas variáveis na resistência à compressão do concreto.

O estudo partirá de uma especificação de referência escolhida a partir da aplicação em paredes de concreto produzidas com material proveniente de uma usina fornecedora de concreto na cidade de São Paulo.

3.1 LABORATÓRIO E INSTALAÇÕES UTILIZADAS

Para execução dos estudos experimentais propostos no presente trabalho, foram utilizados os equipamentos, instalações e materiais concedidos pela usina dosadora de concreto que também forneceu sua dosagem de concreto para paredes de concreto. Estas instalações e equipamentos são demonstradas nas Figura 7.



Figura 7 – Equipamentos empregados no estudo e instalação do laboratório.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados tanto nas dosagens piloto como no estudo prático serão os mesmos já utilizados pela concreteira. Nos tópicos seguintes são apresentados os dados dos boletins e laudos fornecidos para cada um dos insumos.

3.2.1 Cimento.

As características do cimento foram obtidas através dos Boletins Técnicos fornecidos pela cimenteira. O cimento utilizado foi CP II-E-40 RS do fornecedor Cimento Tupi, apresentando resultados dos parâmetros químicos, físicos e a resistência à compressão conforme a Tabela 1.

Ensaio Químico					
Parâmetro	Unid.	Média	Desvio	Norma aplicada	Limites NBR 16.697
Perda ao fogo (P.F.)	(%)	2,97	0,15	NBR NM 18	≤ 8,5
Óxido de cálcio (CaO)	(%)	53,22	0,39	NBR NM 14656	Não Aplicável
Trióxido de enxofre (SO ₃)	(%)	3,35	0,31	NBR NM 16	≤ 4,5
Óxido de Magnésio (MgO)	(%)	3,06	0,13	NBR NM 14	Não Aplicável
Resíduo Insolúvel (R.I.)	(%)	1,83	0,32	NBR NM 15	≤ 5

Ensaio Físico					
Parâmetro	Unid.	Média	Desvio	Norma aplicada	Limites NBR 16.697
Blaine	(cm ² /g)	4,532		NBR 16372	Não Aplicável
Finura #325 (40 µm)	(%)	2,80	0,25	NA	Não Aplicável
Finura #200 (75 µm)	(%)	0,35	0,13	NBR 11579	≤ 10
Início de pega	min	214	12	NBR NM 65	≥ 60
Fim de pega	min	307	13	NBR NM 65	Não Aplicável
Expansibilidade quente	a mm	0,67	0,58	NBR 11582	Não Aplicável
Água da consistência	(%)	30,0	0,1	NBR NM 43	Não Aplicável

Resistência à Compressão (MPa)				
Parâmetro	Média	Desvio	Norma aplicada	Limites NBR 16.697
Resistência 1 dia	8,6	1,49	NBR 7215	Não Aplicável
Resistência 3 dias	25,6	1,58	NBR 7215	≥ 15
Resistência 7 dias	37,0	1,91	NBR 7215	≥ 25
Resistência 28 dias	49,1	1,41	NBR 7215	≥ 40

Tabela 1 – Controle de qualidade do cimento apresentado no Boletim Técnico do fornecedor Tupi.

3.2.2 Agregados.

O traço definido para o estudo utiliza brita, areia artificial e areia de quartzo. As características de cada um dos agregados são apresentadas a seguir.

3.2.2.1 Brita

A brita utilizada foi testada para a reatividade álcali-agregado conforme a ABNT NBR 15577-3/18 Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto e ABNT NBR 15577-4/18 Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

A análise petrográfica foi realizada primeiramente ao microscópio estereoscópico, sendo complementada por observações de lâmina delgada ao microscópio óptico de luz transmitida. A Figura 8 apresenta as principais características da brita.

Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato
	Subordinada	Biotita, opacos, clorita
	Reativa/ deletéria	Quartzo microgranular (<1%)
Cor		Cinza
Estrutura		Maciça
Textura		Granoblástica
Granulação		Média a grossa
Deformação do agregado		Pouco deformado com alguma recristalização
Feldspatos (texturas potencialmente reativas)		Mirmequitas presentes
Quartzo deformado (< extinção ondulante)		Presentes
Quartzo microgranular (%)		<1%
Microfissuração		Fraca
Tipo		Pedra britada
Grau de alteração		Sã
Propriedades físico-mecânicas		Rocha coerente
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Gnaiss
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

Figura 8 – Síntese das características petrográficas. (Fonte: Conereserv)

A rocha é constituída principalmente por quartzo e feldspato carbonatos com presença secundária de biotita, opacos e clorita. Esses minerais estão dispostos em uma textura granoblástica podendo-se classificar a rocha como um gnaiss. Por meio do estudo petrográfico a amostra foi considerada potencialmente inócua com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto, uma vez que não foram identificados elementos reativos (quartzo micro granular) em teores superiores ao limite especificado pela ABNT NBR 15577 parte 3.

Pelos resultados dos ensaios referentes à determinação da reatividade álcali-agregado pelo método preconizado pela ABNT NBR 15577 parte 4, observa-se que o valor médio de expansão das barras de argamassa aos 28 dias de cura em solução alcalina da amostra de Brita 1 – Origem: Granito foi de 0,14%, conforme apresentado no Gráfico 1, indicando que o agregado é potencialmente inócuo (grau R0) segundo os critérios estabelecidos.

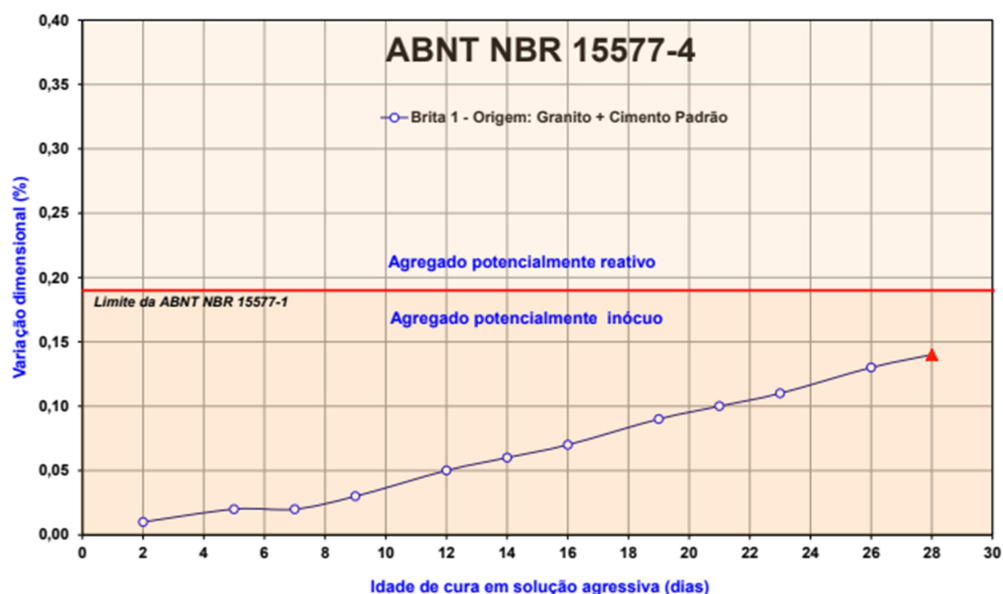


Gráfico 1 – Evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina. (Fonte: Conereserv)

A granulometria da brita foi analisada conforme a NBR NM 248/03 – Agregados – Determinação de Composição Granulométrica e NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação. A Tabela 2 apresenta os resultados da análise granulométrica.

	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	Fundo	Soma
Retido (g)	0,0	0,0	0,0	201	664,5	113,3	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	1000
Retido (%)	0,0	0,0	0,0	20,1	66,5	11,3	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100
Acumulado (%)	0,0	0,0	0,0	20,1	86,6	97,9	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	100	100

Tabela 2 - Resultado da composição granulométrica da brita. (Fonte: Conereserv)

A Figura 9 apresenta a curva de distribuição granulométrica da brita, elaborada conforme os dados da Tabela 2.

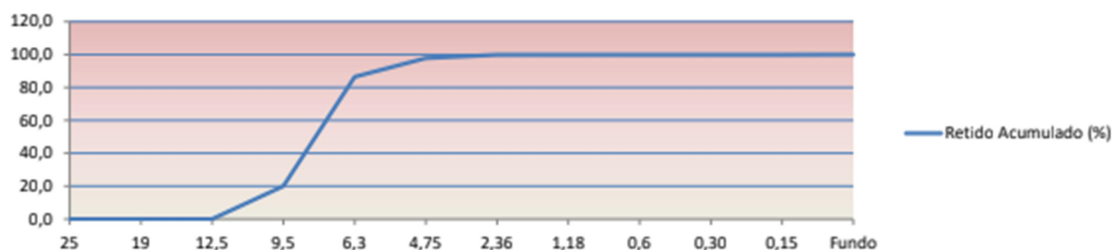


Figura 9 - Curva de distribuição granulométrica da brita. (Fonte: Conereserv)

O relatório também apresenta os dados de diâmetro máximo de 12,5 mm, módulo de finura de 6,17, massa específica absoluta igual a 2,68 e percentual de material pulverulento de 0,20%.

3.2.2.2 Areia Artificial

A granulometria da areia artificial foi analisada conforme a NBR NM 248/03 – Agregados – Determinação de Composição Granulométrica e NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação.

A composição granulométrica obtida pelo relatório de ensaio da usina é apresentada na Tabela 3.

	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	Fundo	Soma
Retido (g)	0,0	0,0	0,0	44	220,5	134,7	222,9	122,9	92,5	63,1	35,8	64,1	1000
Retido (%)	0,0	0,0	0,0	4,4	22,1	13,5	22,3	12,3	9,3	6,3	3,6	6,4	100
Acumulado (%)	0,0	0,0	0,0	4,4	26,4	39,9	62,2	74,5	83,7	90,0	93,6	100,0	100

Tabela 3 – Resultado da composição granulométrica da areia artificial. (Fonte: Conereserv)

A Figura 10 apresenta a curva de distribuição granulométrica da brita, elaborada conforme os dados da Tabela 3.

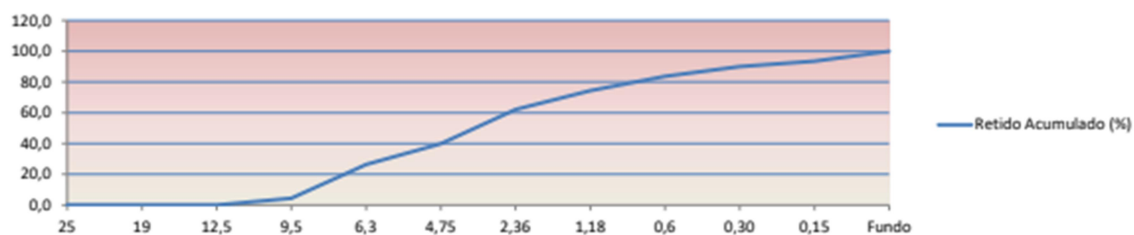


Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica da areia artificial. (Fonte: Conceserv)

O relatório também apresenta os dados de diâmetro máximo de 9,5 mm, módulo de finura de 4,48, massa específica absoluta igual a 2,76 e percentual de material pulverulento de 7,61%.

3.2.2.3 Areia de Quartzo

A granulometria da areia natural foi analisada conforme a NBR NM 248/03 – Agregados – Determinação de Composição Granulométrica e NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação.

A composição granulométrica obtida pelo relatório de ensaio da usina dosadora de concreto é apresentada na Tabela 4.

	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	Fundo	Soma
Retido (g)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,9	68,0	379,3	424,8	124,8	1000
Retido (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	6,8	37,9	42,5	12,5	100
Acumulado (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	7,1	45,0	87,5	100,0	100

Tabela 4 - Resultado da composição granulométrica da areia de quartzo. Fonte: (Conceserv)

A Figura 11 apresenta a curva de distribuição granulométrica da brita, elaborada conforme os dados da Tabela 4.

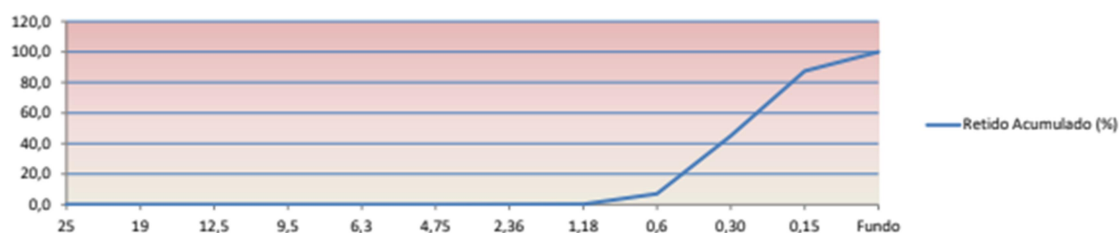


Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica da areia artificial. Fonte: (Concreserv)

O relatório também apresenta os dados de diâmetro máximo de 1,18 mm, módulo de finura de 1,40, massa específica absoluta igual a 2,64 e percentual de material pulverulento de 0,65%.

3.2.3 Água

A água utilizada nos ensaios é oriunda da rede de abastecimento público, e conforme a ABNT NBR 15900-1 - Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos, esta água é considerada adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada.

3.2.4 Aditivos químicos

3.2.4.1 Aditivo redutor de água

Para as dosagens piloto e para o estudo prático foram utilizados três tipos de aditivos redutores de água, segundo os fornecedores compatíveis com todos os tipos de cimento Portland e que atendem os requisitos da norma ABNT NBR 11768-1:2019.

O primeiro aditivo foi o já utilizado pela usina, do fornecedor Matchem. Segundo boletim técnico o produto Maxifluid L 2030 é um aditivo redutor de água tipo 2 à base de policarboxilatos.

Os outros dois aditivos são do fornecedor Tecnomor. O produto Tecnos Mid 1555 é um aditivo à base de policarboxilatos e naftalenos, definido como redutor de água tipo 1 e o Tecnos Flow 3010 é um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos redutor de água tipo 2.

3.2.4.2 Aditivo incorporador de ar

O aditivo incorporador de ar utilizado foi o Tecnos MBA do fornecedor Tecnomor. O produto é um composto a base de tensoativos compatível com todos os tipos de cimento Portland.



Figura 12 - Aditivo redutor de água tipo 2 (esquerda) e aditivo incorporador de ar (AIA). Fonte: Autores.

3.3 METODOLOGIA DE DOSAGEM

O presente trabalho utilizou como referência e base o modelo de dosagem IPT/EPUSP, que se utiliza de correlações e equações primárias para estipular parâmetros a serem seguidos no estudo de dosagem.

A partir das equações das leis de Lyse (1), da equação do teor de argamassa (2), e da associação da equação do consumo de cimento por metro cúbico (3), foi desenvolvido no presente estudo uma relação direta de parâmetros de dosagem, onde pode manter-se fixo os valores de consumo por metro cúbico de cimento, água e aditivo, e ao modificar quaisquer destes valores, os agregados de dosagem são reajustados preservando sua proporção, conforme é demonstrado na Equação 4.

$$H(\%) = \frac{a/c}{1+m} \quad (1)$$

Equação 1 – Equação de lei de Lyse.

Onde:

$H(\%)$ = teor de água total do traço

a/c = relação água/cimento do traço

m = consumo total de agregados

$$\alpha(\%) = \frac{1+a}{1+m} \quad (2)$$

Equação 2 – Equação de determinação de teor de argamassa.

Onde:

α = teor de argamassa

a = teor de areia total

m = teor de agregados totais

$$C = \frac{1 - V_{ar}}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{A1\%}{\gamma_{A1}} + \frac{A2\%}{\gamma_{A2}} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{a/c}{\gamma_{H2O}} + \frac{adt}{\gamma_{adt}}} \quad (3)$$

Equação 3 – Equação de determinação do consumo de cimento por metro cúbico.

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico

V_{ar} = volume de vazios da dosagem

γ_c = massa específica do cimento

$A1\%$ = teor de agregado miúdo 1

γ_{A1} = massa específica do agregado miúdo 1

$A2\%$ = teor de agregado miúdo 2

γ_{A2} = massa específica do agregado miúdo 2

b = teor de agregado graúdo

γ_b = massa específica do agregado graúdo

a/c = relação água/cimento

γ_{H2O} = massa específica da água

adt = teor de aditivo

γ_{adt} = massa específica do aditivo

A partir das equações (1), (2) e (3), para o presente estudo foi desenvolvida a Equação 4, que determina o teor de agregado miúdo em função da dosagem dos demais materiais.

$$A = \frac{\frac{1 - V_{ar}}{Cc} - \frac{1}{\gamma_c} + \frac{a/c}{\gamma_{H2O}} - \frac{1}{\alpha \times \gamma_b} + \frac{1}{\gamma_b}}{\frac{\%A1}{\gamma_{A1}} + \frac{\%A2}{\gamma_{A2}} + \frac{1 - \alpha}{\alpha \times \gamma_b}}$$

Equação 4 – Determinação de consumo de agregado miúdo em função da variação da relação água/cimento e consumo de cimento por metro cúbico.

Onde:

A = teor de agregado miúdo total

V_{ar} = teor de ar incorporado da dosagem

Cc = consumo de cimento por metro cúbico

γ_c = massa específica do cimento

A1% = teor de agregado miúdo 1

γ_{A1} = massa específica do agregado miúdo 1

A2% = teor de agregado miúdo 2

γ_{A2} = massa específica do agregado miúdo 2

b = teor de agregado graúdo

γ_b = massa específica do agregado graúdo

a/c = relação água/cimento

γ_{H_2O} = massa específica da água

α = teor de argamassa da dosagem

Com base nesta padronização, o presente estudo desenvolveu dosagens pilotos, sob a condição de utilização de valor fixo de cimento por metro cúbico, valor este definido através de uma dosagem de referência. Os demais valores foram modificados, com o objetivo de reduzir o consumo de água e a relação água/cimento, e avaliar o comportamento do material através dos ensaios previstos. Após estas modificações, este trabalho propõe a utilização da incorporação de ar pelo incremento de aditivo responsável por proporcionar esta característica ao concreto, chegando assim às dosagens a serem estudadas em laboratório.

3.4 DOSAGEM DE CONCRETO REFERÊNCIA E DESENVOLVIMENTO DE DOSAGEM PILOTO

A partir do que foi identificado no presente estudo quanto à finalidade do concreto com maior teor de ar incorporado em sua composição, foi adotado como dosagem de referência uma mistura utilizada por uma usina dosadora, que fornece o material para obras de paredes de concreto. A dosagem referência pode ser observada na Tabela 5:

Traço referência				
Materiais	Consumo de material kg/m³	Consumo unitário	Massa específica kg/m³	Volume unitário
Cimento	340	1	3020	0,113
Areia 1	615	1,809	2630	0,234
Areia 2	361	1,062	2740	0,132
Brita 0	818	2,406	2700	0,303
Água	190	0,559	1000	0,190
Aditivo	2,72	0,80%	1180	0,002
Ar (%)	0,029			2,90%

Tabela 5 – Dosagem de referência utilizada pela usina dosadora de concreto.

A partir desta referência, foram iniciados os testes definidos como “Pilotos”. Estes testes iniciais foram idealizados com o objetivo de permitir a análise do comportamento do concreto no estado fresco com redução de água e incorporação de ar. Esta análise torna-se um primeiro passo que possibilita uma estimativa lógica de alterações no traço de referência, considerando-se a redução de água e a inclusão de aditivo incorporador de ar.

3.4.1 Dosagem Piloto – Parte 1

No primeiro plano de ensaios realizados, foram executadas três dosagens de concreto, com o objetivo de avaliar o comportamento do traço de referência, a variação deste reduzindo-se o consumo de água e utilizando-se um teor de aditivo incorporador de ar. Os traços ensaiados constam na Tabela 6.

Traços piloto para dosagem			
Materiais	Traço 1 (Ref)	Traço 2 (Red)	Traço 3 (AIA)
Cimento	1	1	1
Areia 1	1,81	1,848	1,848
Areia 2	1,06	1,086	1,086
Brita 0	2,41	2,445	2,445
Água	0,559	0,520	0,52
Aditivo	0,80%	0,80%	0,80%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,00%	0,03%

Tabela 6 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 1. (Fonte: Autores)

Com os dados de dosagem definidos, foi realizado este primeiro plano piloto de testes, para avaliar o comportamento dos materiais em laboratório, e verificar as características do concreto em sua dosagem de referência e sua variação de mistura com o aditivo incorporador de ar.

A Figura 13 ilustra o resultado de abatimento obtido das três dosagens realizadas.



Figura 13 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).

As dosagens e seus resultados no estado fresco estão descritas na Tabela 7.

Identificação	Descrição da dosagem	Relação a/c	Teor AIA	Abatimento (mm)	Ar Inc.
Piloto1-Ref	Dosagem de Referência reproduzida em laboratório	0,559	0%	235	6,5%
Piloto1-Red	Redução de 7% na relação água / cimento	0,520	0%	205	4,4%
Piloto1-AIA	Redução de 7% na relação água / cimento e inserção de 0,02% de Aditivo Incorporador de Ar	0,520	0,03%	225	15,5%

Tabela 7 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 1. (Fonte: Autores)

Com base nos valores apresentados na Tabela 7, foram constatadas as seguintes considerações:

- I. O traço referência fornecido pela usina dosadora atendeu as condições no estado fresco com relação a sua trabalhabilidade, estando dentro de sua classificação de abatimento S220, sendo assim aceito para seguimento dos testes;
- II. O traço de referência, contudo, apresentou valor elevado de incorporação de ar em sua mistura, valor este que interfere na avaliação do presente estudo que tem como objetivo modificar este parâmetro, e que, portanto, deverá ser ajustado;
- III. O traço com redução do consumo de água e incremento do aditivo incorporador de ar demonstrou uma variação no aspecto do concreto no estado fresco, indicando maior coesão, porém uma redução no abatimento, devendo assim ser revisado seu teor a ser utilizado na mistura em associação com a redução do consumo de água.

3.4.2 Dosagem Piloto – Parte 2

A partir do que foi constatado em laboratório durante os estudos de dosagem piloto Parte 1, foi definido que seria necessário realizar a mudança no aditivo plastificante anteriormente utilizado. Isto por conta deste material promover um incremento no teor de ar incorporado significativo, influenciando desta forma os valores que seriam obtidos ao longo dos testes para análise do comportamento do concreto no estado fresco.

Sendo assim, foi feita a troca do aditivo plastificante da dosagem de referência para um de desempenho similar, a base de naftaleno, que pudesse promover a mesma consistência sob uma dosagem próxima. A Tabela 8 demonstra os parâmetros de dosagem definidos, assim como os seus respectivos resultados obtidos no estado fresco durante os ensaios realizados no laboratório.

Traços piloto para dosagem			
Materiais	Traço 1 (Ref)	Traço 2 (Red)	Traço 3 (AIA)
Cimento	1	1	1
Areia 1	1,81	1,848	1,848
Areia 2	1,06	1,086	1,086
Brita 0	2,41	2,445	2,445
Água	0,559	0,520	0,52
Aditivo	1,20%	1,20%	1,20%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,00%	0,03%

Tabela 8 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 2. (Fonte: Autores)

A Figura 14 ilustra o resultado de abatimento obtido das três dosagens realizadas.

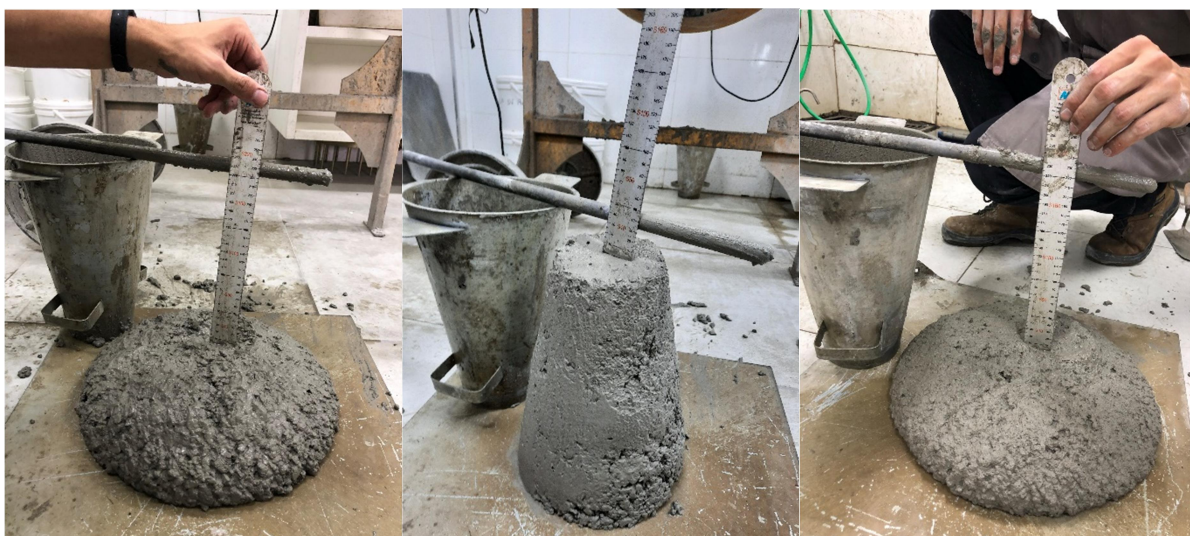


Figura 14 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).

A Figura 15 ilustra o resultado obtido no ensaio de determinação teor de ar no concreto pelo método pressométrico.



Figura 15 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).

As dosagens e suas respectivas características no estado fresco estão descritas na Tabela 9.

Identificação	Característica	Relação a/c	Teor APBN	Teor AIA	Abatimento (mm)	Ar Inc. (%)
Piloto2-Ref Naftaleno	Teste do teor de aditivo base naftaleno – manutenção do abatimento da Referência	0,559	1,2%	0%	220	2,75%
Piloto2-Red	Dosagem de Referência com o ajuste do aditivo Superplastificante	0,559	1,2%	0%	35	3,30%
Piloto2-AIA	Redução de 7% na relação água / cimento	0,520	1,2%	0,03%	220	14,00%

Tabela 9 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 2. (Fonte: Autores)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9, foram feitas as seguintes considerações:

- I. Com a mudança de aditivo plastificante responsável por proporcionar o abatimento com classe S220, o resultado de teor de ar incorporado foi baixo, desta forma gerando menor interferência na avaliação de dosagens com aditivo incorporador de ar;
- II. Ao executar a dosagem com redução do consumo de água, a eficiência de redução do aditivo plastificante foi baixa, não permitindo manter um abatimento aceitável no concreto dosado;
- III. Ao executar a dosagem com redução do consumo de água e o incremento do aditivo incorporador de ar, por conta da baixa eficiência de redução de consumo de água do aditivo plastificante, mesmo inserindo um valor elevado de ar incorporado, o abatimento obtido não foi satisfatório.

3.4.3 Dosagem Piloto – Parte 3

Após a execução da Dosagem Piloto Parte 2, foi realizada a troca do aditivo plastificante a base de naftaleno, por um aditivo superplastificante, a base de policarboxilato, que possui superior eficiência em redução do consumo de água. A Tabela 10 demonstra os parâmetros de dosagem definidos, assim como os seus respectivos resultados obtidos no estado fresco durante os ensaios realizados no laboratório.

Traços piloto para dosagem			
Materiais	Traço 1 (Ref)	Traço 2 (Red)	Traço 3 (AIA)
Cimento	1	1	1
Areia 1	1,81	1,848	1,848
Areia 2	1,06	1,086	1,086
Brita 0	2,41	2,445	2,445
Água	0,559	0,520	0,52
Aditivo	0,40%	0,40%	0,40%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,00%	0,01%

Tabela 10 – Parâmetros de dosagem piloto – Parte 3. (Fonte: Autores)

A Figura 16 ilustra o resultado de abatimento obtido das três dosagens realizadas.



Figura 16 – Resultado de ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).

A Figura 17 ilustra o resultado obtido no ensaio de determinação teor de ar no concreto pelo método pressométrico.

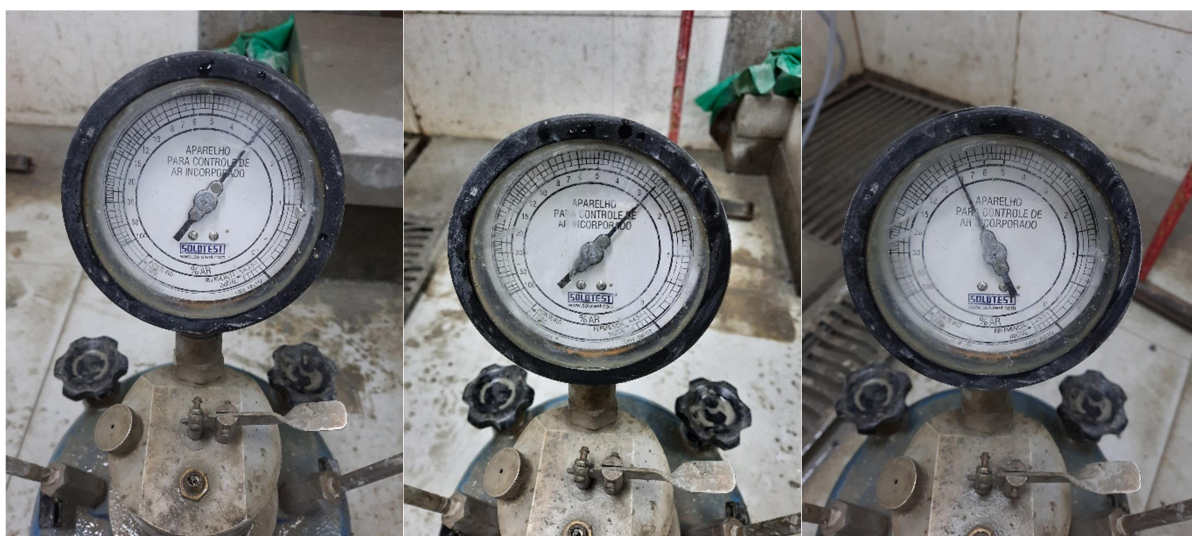


Figura 17 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços referência (esquerda), redução de água (meio), e com aditivo incorporador de ar (direita).

As dosagens e suas respectivas características no estado fresco estão descritas na Tabela 11.

Identificação	Característica	Relação a/c	Teor ASP	Teor AIA	Abatimento (mm)	Ar Inc.
Piloto3-Ref	Dosagem de Referência com o ajuste do aditivo Superplastificante	0,559	0,4%	0%	225	3,0%
Piloto3-Red	Redução de 7% na relação água / cimento	0,520	0,4%	0%	205	2,75%
Piloto3-AIA	Redução de 7% na relação água / cimento e inserção de 0,01% de Aditivo Incorporador de Ar	0,520	0,4%	0,01%	240	8,0%

Tabela 11 – Resultados obtidos da dosagem piloto – Parte 3. (Fonte: Autores)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 11, foram feitas as seguintes considerações:

- I. Com a utilização do aditivo superplastificante a base de policarboxilato, foi possível executar uma dosagem para o concreto de referência, atendendo as condições do material no estado fresco, e ao teor de incorporação de ar inferior ao primeiro teste realizado;
- II. Ao executar a dosagem com a redução do consumo de água, foi possível constatar que o superplastificante foi capaz de manter sua eficiência na redução de água, permitindo obter uma baixa variação do resultado de abatimento em relação à dosagem de referência;
- III. Ao executar a dosagem com redução do consumo de água e incremento do aditivo incorporador de ar, foi possível constatar que devido à eficiência superior do aditivo superplastificante, o aditivo incorporador de ar pôde promover um aumento no abatimento do concreto, aumentando assim sua trabalhabilidade.

3.5 PLANO DE EXPERIMENTOS DEFINITIVO

Após a realização dos estudos prévios para reconhecimento do material e análise do comportamento do concreto em seu estado fresco, foi definido um plano de experimentos definitivo, já com a definição dos teores de redução de água e de aditivo incorporador de ar a ser inserido na mistura.

As estruturas da Figura 18 apresentam a sequência das dosagens estudadas, as características de cada uma delas, os ensaios realizados no estado fresco e as quantidades de corpos de prova moldados para realização de ensaios em estado endurecido.

Figura 18 – Fluxograma de plano de ensaios definitivo.

3.5.1 Plano de ensaios.

A Tabela 12 apresenta o plano definido para os ensaios do concreto nos estados fresco e endurecido, conforme normas ABNT aplicáveis:

PLANO DE ENSAIOS							
Fase de Ensaios	Ensaio	Objetivo do Ensaio	Método	Número de amostras por idade (dias)			
				0	1	7	28
Fase 1: Estado Fresco	Consistência pelo abatimento do tronco de cone	Conhecer as características e permitir análise comparativa entre os concretos de referência e os concretos com ar incorporado	ABNT NBR NM 67	Amostras: 12 CPs: 0	-	-	-
	Determinação da massa específica pelo método gravimétrico	Conhecer as características e permitir análise comparativa entre os concretos de referência e os concretos com ar incorporado	ABNT NBR 9833	Amostras: 12 CPs: 0	-	-	-
	Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico	Conhecer as características e permitir análise comparativa entre os concretos de referência e os concretos com ar incorporado	ABNT NBR 16887	Amostras: 12 CPs: 0	-	-	-
Fase 2: Estado Endurecido	Resistência à compressão axial simples	Analisar a influência da incorporação de ar e redução do consumo de água na resistência à compressão do concreto em estudo	ABNT NBR 5739	-	Amostras: 12 CPs: 24	Amostras: 12 CPs: 24	Amostras: 12 CPs: 24
	Absorção de água por capilaridade	Analisar a influência da incorporação de ar e redução do consumo de água na capilaridade dos concretos em estudo	ABNT NBR 9779	-	-	-	Amostras: 12 CPs: 36
	Determinação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Analisar a influência da incorporação de ar e redução do consumo de água nos vazios gerados nos concretos em estudo	ABNT NBR 8802	-	-	-	Mesmas amostras / CPs utilizados no ensaio de resistência à compressão

Tabela 12 – Plano geral de ensaios de acordo com as respectivas normas brasileiras ABNT.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir das dosagens piloto e da definição do plano experimental definitivo, foram executadas as dosagens finais e os ensaios para obtenção dos resultados afim de verificar a hipótese deste estudo.

4.1 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir estão segmentados de acordo com a relação água/cimento de cada traço. Na sequência, o item 4.2 apresenta a análise geral de todos os ensaios realizados.

4.1.1 Dosagem com relação água/cimento Referência

Os primeiros traços rodados possuem a relação água/cimento referência de 0,559. Eles foram analisados sem o uso de aditivo incorporador de ar e com o aditivo em diferentes dosagens conforme apresentado na Tabela 13.

Traços finais para dosagem				
Materiais	Traço 1 (Referência)	Traço 2 (Referência + AIA 0,01%)	Traço 3 (Referência + AIA 0,02%)	Traço 4 (Referência + AIA 0,03%)
Cimento	1	1	1	1
Areia 1	1,81	1,81	1,81	1,81
Areia 2	1,06	1,06	1,06	1,06
Brita 0	2,41	2,41	2,41	2,41
Água	0,559	0,559	0,559	0,559
Aditivo	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%

Tabela 13 – Parâmetros de dosagem final – a/c referência. (Fonte: Autores)

A Tabela 14 apresenta os resultados de teor de ar incorporado, abatimento e densidade obtidos no concreto no estado fresco durante os ensaios realizados no laboratório e os resultados de resistência à compressão, velocidade de propagação e absorção de água por capilaridade. Neste último ensaio não foram obtidos os resultados de todos os traços.

Resultados Dosagens Finais - Referência						
Identificação	Ar Inc. (%)	Abatimento (mm)	Densidade (kg/m ³)	Resistência à compressão 29d (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	Altura de ascensão capilar máxima interna (cm)
Traço 1 (Referência)	1,85	230	2388,26	37,5	4794	8,5
Traço 2 (Referência + AIA 0,01%)	7,0	235	2247,67	38,7	4632	-
Traço 3 (Referência + AIA 0,02%)	9,25	250	2165,44	35,3	4553	-
Traço 4 (Referência + AIA 0,03%)	11,0	250	2120,35	28,8	4453	6,5

Tabela 14 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Referência. (Fonte: Autores)

A Figura 19 ilustra os ensaios de abatimento para os traços com relação água/cimento Referência.



Figura 19 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c Referência, na sequência os traços 1,2,3 e 4.

As aferições dos teores de ar incorporado no concreto pelo método pressométrico estão apresentadas na Figura 20.

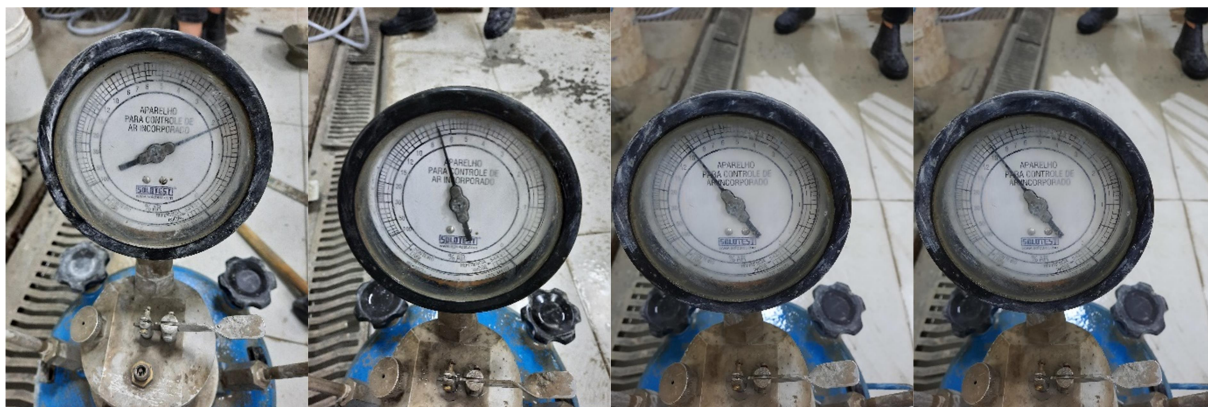


Figura 20 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Referência, na sequência os traços 1,2,3 e 4.

4.1.2 Dosagem com redução de 3% na relação água/cimento

A primeira alteração na relação água/cimento foi analisada considerando redução de 3%, ou seja, 0,542. A Tabela 15 apresenta os traços finais e, para este caso também foram analisados sem o uso de aditivo incorporador de ar e com o aditivo em diferentes dosagens.

Traços finais para dosagem – Redução a/c 3%				
Materiais	Traço 5 (Redução 3%)	Traço 6 (Redução 3% + AIA 0,01%)	Traço 7 (Redução 3% + AIA 0,02%)	Traço 8 (Redução 3% + AIA 0,03 %)
Cimento	1	1	1	1
Areia 1	1,83	1,83	1,83	1,83
Areia 2	1,07	1,07	1,07	1,07
Brita 0	2,42	2,42	2,42	2,42
Água	0,542	0,542	0,542	0,542
Aditivo	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%

Tabela 15 – Parâmetros de dosagem final – a/c Redução 3%. (Fonte: Autores)

A Tabela 16 apresenta os resultados para os traços com redução de 3% na relação água/cimento referente ao teor de ar incorporado, abatimento e densidade obtidos no concreto no estado fresco e os resultados de resistência à compressão, velocidade de propagação e absorção de água por capilaridade obtidos através dos corpos de prova moldados. Neste último ensaio não foram obtidos os resultados de todos os traços.

Resultados Dosagens Finais - Redução a/c 3%						
Identificação	Ar Inc. (%)	Abatimento (mm)	Densidade (kg/m ³)	Resistência à compressão 29d (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	Altura de ascensão capilar máxima interna (cm)
Traço 5 (Redução 3%)	2,10	225	2398,87	41,8	4910	8,5
Traço 6 (Redução 3% + AIA 0,01%)	4,70	235	2324,60	40,1	4685	7,5
Traço 7 (Redução 3% + AIA 0,02%)	8,50	240	2213,19	33,6	4544	-
Traço 8 (Redução 3% + AIA 0,03%)	11,75	235	2107,09	30,3	4427	6,5

Tabela 16 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Redução 3%. (Fonte: Autores)

A Figura 21 ilustra os ensaios de abatimento para os traços com relação água/cimento com redução de 3%.



Figura 21 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c Redução 3%, na sequência os traços 5,6,7 e 8.

As aferições dos teores de ar incorporado no concreto pelo método pressométrico estão apresentadas na Figura 22.

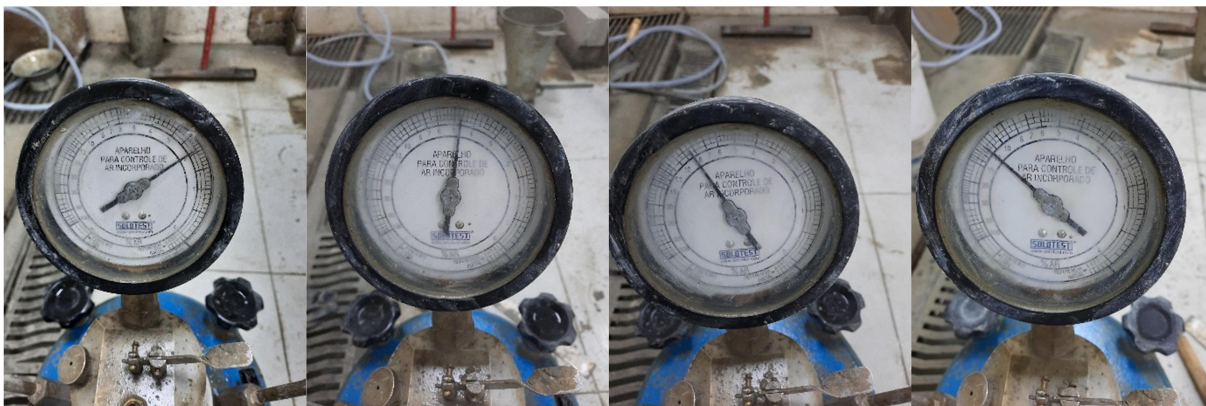


Figura 22 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Redução 3%, na sequência os traços 5,6,7 e 8.

4.1.3 Dosagem com redução de 7% na relação água/cimento

A segunda proposta para análise de redução foi de 7% na relação água/cimento. A Tabela 17 apresenta os traços finais e, para este caso também foram analisados sem o uso de aditivo incorporador de ar e com o aditivo em diferentes dosagens.

Traços finais para dosagem – Redução a/c 7%				
Materiais	Traço 9 (Redução 7%)	Traço 10 (Redução 7% + AIA 0,01%)	Traço 11 (Redução 7% + AIA 0,02%)	Traço 12 (Redução 7% + AIA 0,03%)
Cimento	1	1	1	1
Areia 1	1,85	1,85	1,85	1,85
Areia 2	1,09	1,09	1,09	1,09
Brita 0	2,45	2,45	2,45	2,45
Água	0,52	0,52	0,52	0,52
Aditivo	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Adt. Inc. Ar	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%

Tabela 17 – Parâmetros de dosagem final – a/c Redução 7%. (Fonte: Autores)

A Tabela 18 apresenta os resultados de teor de ar incorporado, abatimento e densidade obtidos no concreto no estado fresco durante os ensaios realizados no laboratório e os resultados de resistência à compressão, velocidade de propagação e absorção de água por capilaridade. Neste último ensaio não foram obtidos os resultados de todos os traços.

Resultados Dosagens Finais - Redução a/c 7%						
Identificação	Ar Inc. (%)	Abatimento (mm)	Densidade (kg/m³)	Resistência à compressão 29d (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	Altura de ascensão capilar máxima interna (cm)
Traço 9 (Redução 7%)	2,25	180	2401,52	47,0	4797	-
Traço 10 (Redução 7% + AIA 0,01%)	6,0	200	2290,11	42,6	4685	6,5
Traço 11 (Redução 7% + AIA 0,02%)	10,25	220	2178,71	39,4	4631	-
Traço 12 (Redução 7% + AIA 0,03%)	11,00	225	2112,38	32,2	44605	-

Tabela 18 – Resultados obtidos da Dosagem Final – a/c Redução 7%. (Fonte: Autores)

A Figura 23 ilustra os ensaios de abatimento para os traços com relação água/cimento com redução de 7%.



Figura 23 – Ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços com a/c redução 7%, na sequência os traços 9,10,11 e 12.

As aferições dos teores de ar incorporado no concreto pelo método pressométrico estão apresentadas na Figura 24 .

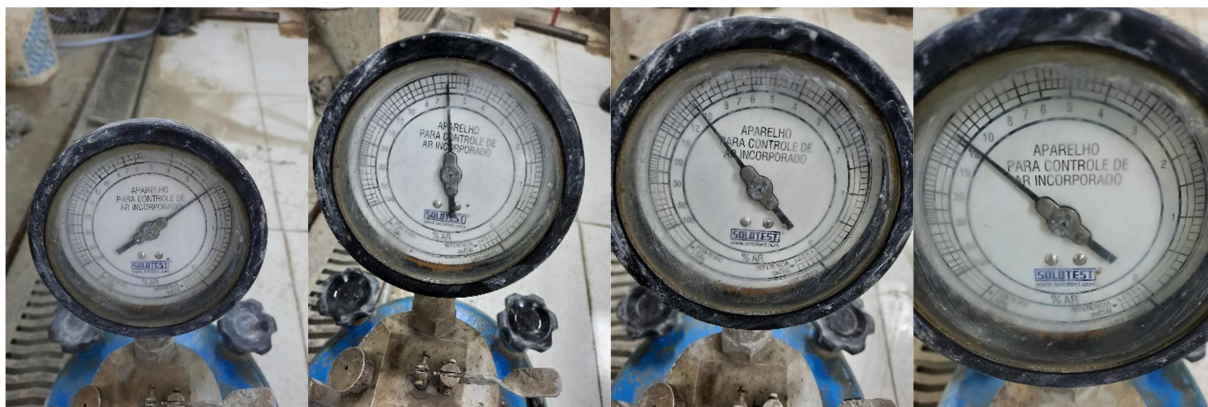


Figura 24 – Aferição de teor de ar incorporado dos traços com a/c Redução 7%, na sequência os traços 9,10,11 e 12.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados no item 4.1, foi possível observar a interferência da incorporação de ar em todos os parâmetros propostos para análise. Também foi evidente que há uma relação entre o aumento no teor de ar e a redução da relação água / cimento que permite que sejam mantidos os parâmetros de abatimento e resistência à compressão, objetivo principal deste trabalho.

Os itens a seguir apresentam as observações relacionadas a cada parâmetro avaliado nos ensaios realizados.

4.2.1 Ar Incorporado

A incorporação de ar no concreto é, de fato, um processo que não depende apenas da aplicação de uma determinada quantidade de aditivo incorporador de ar. É claro, ela tende a aumentar com o acréscimo de aditivo, mas pode variar em função de diversos fatores como tempo de mistura, quantidade de água do traço, finura e granulometria do material. A campanha de estudos de dosagem realizada com os

mesmos materiais e, no caso do programa definitivo, em um mesmo dia, contribuiu para a uniformidade e tendência de resultados dentro do que seria esperado: variação crescente de ar na mistura em função do aumento da dosagem de aditivo.

A Tabela 19 apresenta resultados comparativos demonstrando o volume de ar medido no concreto fresco em função da quantidade de aditivo adicionado à mistura. Para análise dos resultados também foi adicionada a diferença de ar incorporado a cada incremento de 0,01% de aditivo. Apesar da dispersão de resultados, é possível notar uma tendência de redução da incorporação conforme é aumentada a quantidade de aditivo utilizado. Este resultado demonstra que, a partir de uma determinada quantidade de aditivo na mistura, não há alterações consideráveis no parâmetro de ar incorporado.

Identificação	AIA 0,000%	AIA 0,010%	AIA 0,020%	AIA 0,030%
Referência	1,85%	7,00%	9,25%	11,00%
Diferença de incorporação a cada teor	0,00%	5,15%	2,25%	1,75%
Redução 3%	2,10%	4,70%	8,50%	11,75%
Diferença de incorporação a cada teor	0,00%	2,60%	3,80%	3,25%
Redução 7%	2,25%	6,00%	10,25%	11,00%
Diferença de incorporação a cada teor	0,00%	3,75%	4,25%	0,75%

Tabela 19 – Resultados obtidos de teor de aditivo e ar incorporado à mistura. (Fonte: Autores)

4.2.2 Abatimento

Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento do tronco de cone, considerando-se as variações dos teores de ar incorporado, demonstram exatamente o conteúdo teórico estudado. O ar proporciona melhores resultados de trabalhabilidade quando feita comparação com misturas semelhantes sem a utilização do artifício. É possível verificar, no entanto que, a partir de uma determinada condição, apesar de haver incremento do volume de ar, não há mais ganho em termos de abatimento. Esta estabilização de resultados pode ser verificada nos Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4. Com resultados de abatimento, resistência à compressão e teor de ar incorporado, os

gráficos demonstram o desempenho obtido em função da relação água/cimento utilizada em cada dosagem.

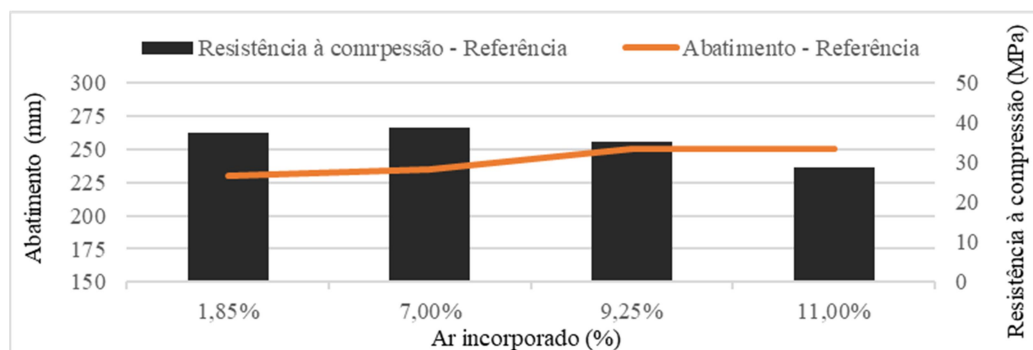


Gráfico 2 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com relação água/cimento de referência. (Fonte: Autores)

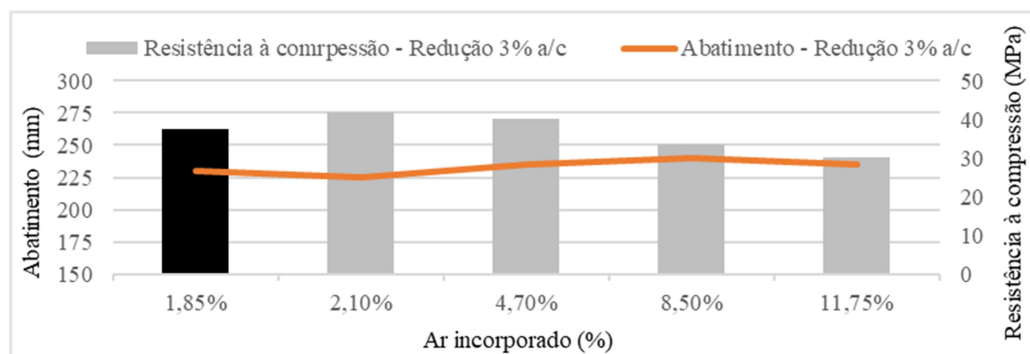


Gráfico 3 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com redução da relação água/cimento em 3%. (Fonte: Autores)

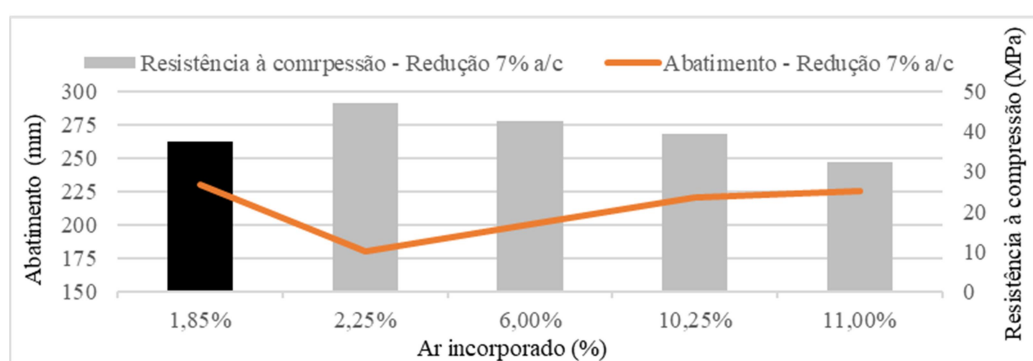


Gráfico 4 – Resultados de resistência à compressão, abatimento e teor de ar incorporado – Concreto com redução da relação água/cimento em 7%. (Fonte: Autores)

Os ensaios de abatimento também demonstraram que a redução da relação água/cimento impacta negativamente neste parâmetro na mistura, confirmando,

também, o conteúdo teórico associado. Estes resultados podem ser verificados na Tabela 20.

Abatimento por traço	
Identificação do traço	Abatimento (mm)
a/c Referência	230
Redução 3%	225
Redução 7%	180
a/c Referência + AIA 0,010%	235
Redução 3% + AIA 0,010%	235
Redução 7% + AIA 0,010%	200
a/c Referência + AIA 0,020%	250
Redução 3% + AIA 0,020%	240
Redução 7% + AIA 0,020%	220
a/c Referência + AIA 0,030%	250
Redução 3% + AIA 0,030%	235
Redução 7% + AIA 0,030%	225

Tabela 20 – Resultados obtidos de abatimento dos concretos com redução de relação a/c com e sem aditivo incorporador de ar. (Fonte: Autores)

4.2.3 Resistência à compressão

A análise da incorporação de ar no concreto de maneira isolada confirma a teoria de que a massa específica possui uma relação direta com a resistência à compressão. Ou seja, quanto maior a densidade, maior a resistência. Desta forma, o simples incremento de ar na mistura reduzirá a resistência à compressão do concreto.

A Tabela 21 apresenta os resultados de ar incorporado, resistência à compressão e densidade das dosagens de referência.

Identificação	Resistência (MPa)	Ar incorporado (%)	Densidade (kg/m³)
a/c Referência	37,5	1,85%	2388
a/c Referência + AIA 0,010%	38,7	7,00%	2248
a/c Referência + AIA 0,020%	35,3	9,25%	2165
a/c Referência + AIA 0,030%	28,8	11,00%	2120

Tabela 21 – Resultados obtidos de ar incorporado, resistência à compressão e densidade. (Fonte: Autores)

Um dos ensaios realizados, no entanto, demonstrou um resultado de resistência à compressão ligeiramente superior para o concreto com 7% de ar incorporado em comparação ao concreto de referência, com teor de ar de 1,85%. Este resultado pode ser considerado como pontual e consequente da condição da baixa amostragem de ensaios.

Também com relação à resistência à compressão, pode-se observar a ocorrência do aumento desta propriedade em decorrência da redução da relação água / cimento, em concordância com a *Lei de Abrams*. A Tabela 22 apresenta os resultados de resistência à compressão para os concretos de referência e com relação água/cimento reduzida.

Identificação	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)
a/c Referência	37,5	2388
Redução 3%	41,8	2399
Redução 7%	47,0	2402

Tabela 22 – Resultados de resistência à compressão e densidade das dosagens com redução da a/c em comparação a dosagem de referência. (Fonte: Autores)

4.2.4 Relação entre incorporação de ar, relação água/cimento, abatimento e resistência à compressão

Apesar de alguns resultados pontuais e a amostragem limitada dificultarem uma conclusão consistente dos impactos da incorporação de ar na mistura, a análise geral das variáveis combinadas demonstra que, de fato, há uma relação entre o teor de ar incorporado e a redução da relação água/cimento que contribui para a trabalhabilidade e para o desempenho de resistência à compressão no concreto.

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos ensaios organizados pelo traço ensaiado e suas características. A análise comparativa permite a confirmação da proposta do

trabalho, considerando os parâmetros estabelecidos e os ensaiados, como: consumo de cimento, abatimento, resistência à compressão, ultrassom e o teor de ar incorporado em si.

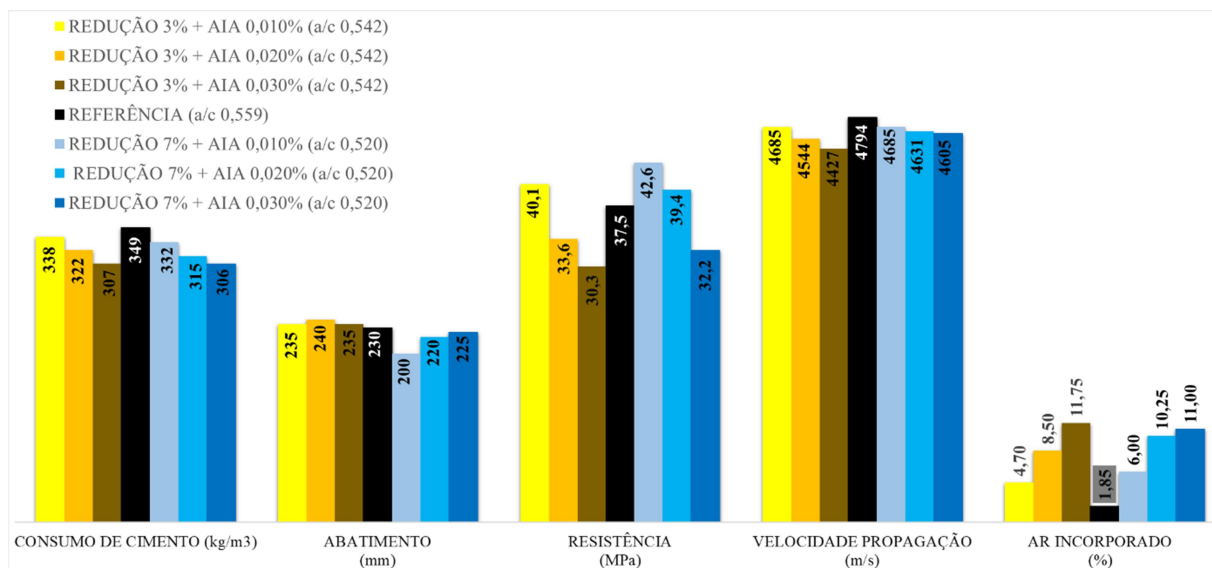


Gráfico 5 – Comparativo de resultados gerais e variáveis combinadas – sem escala. (Fonte: Autores)

O traço de referência apresentou consumo de cimento de 349 kg/m³ de concreto, resistência à compressão de 37,5 MPa e abatimento de 230mm. Considerando-se estes parâmetros de referência para comparação de resultados, é possível destacar que:

- Teores de ar incorporado a partir de 8% não mantiveram os resultados de resistência dentro do mesmo nível da referência quando a relação água / cimento é reduzida em 3%, mas manteve-se para os casos em que a relação água / cimento foi reduzida em 7%. Em ambos os casos, a classe de abatimento S220 é atendida;
- A redução da relação água/cimento em 7% permitiu atendimento aos parâmetros de resistência e classe de abatimento inclusive para teores de ar incorporado acima de 10%;
- Teores de ar incorporado em torno de 6% mantiveram os resultados de resistência dentro do mesmo nível da referência quando a relação água /

cimento foi reduzida em 7%, porém, para estes casos, a classe de abatimento S220 não foi atendida.

- Teores de ar incorporado em torno de 5% mantiveram os resultados de resistência dentro do mesmo nível da referência quando a relação água / cimento foi reduzida em 3% e também em 7%. No entanto, a classe de abatimento S220 foi atendida apenas para o caso com redução de água / cimento em 3%.

De modo geral, ainda é possível afirmar que outras combinações de valores de ar incorporado e relação água/cimento podem promover atendimento aos parâmetros de resistência à compressão e abatimento especificados.

Além disso, para todos os casos apresentados no Gráfico 5 houve redução do consumo de cimento por metro cúbico de concreto em relação ao concreto de referência, o que demonstra o importante e positivo aspecto da incorporação de ar.

4.2.5 Parâmetros específicos

Além do objetivo geral da pesquisa, que tratou da análise dos resultados de resistência à compressão e abatimento relacionados à redução da relação água/cimento e aumento do teor incorporado em dosagens de concreto, foram realizados ensaios adicionais a fim de avaliar o comportamento destes concretos em ensaios de ultrassom e capilaridade, conforme apresentado na Tabela 12.

4.2.5.1 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram prejudicados por problemas logísticos com os corpos de prova. Ainda assim, nos ensaios realizados, foi possível observar a redução da absorção capilar nos concretos com ar incorporado. A Tabela 23 apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de capilaridade realizados.

Identificação	a/c	Ar incorporado (%)	Altura de ascensão capilar máxima interna (cm)
Redução a/c 7% + AIA 0,010%	0,520	6,00%	6,5
Redução 3%	0,542	2,10%	8,5
Redução a/c 3% + AIA 0,010%	0,542	4,70%	7,5
Redução a/c 3% + AIA 0,030%	0,542	11,75%	6,5
a/c Referência	0,559	1,85%	8,5
a/c Referência + AIA 0,030%	0,559	11,00%	6,5

Tabela 23 – Resultados obtidos de altura de ascensão capilar e ar incorporado. (Fonte: Autores)

É possível observar que houve diminuição da absorção capilar em todos os concretos que tiveram ar incorporado à mistura, inclusive para misturas com a mesma relação água/cimento. As reduções chegaram a mais de 20% nesta propriedade física do concreto.

Estes resultados também demonstram e confirmam o conteúdo teórico de que as microbolhas podem interromper a absorção de água promovida pela porosidade capilar do concreto.

4.2.5.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ultrassom)

Os ensaios de ultrassom foram realizados nos mesmos corpos de prova utilizados para os ensaios de resistência à compressão.

O concreto referência com 11% de ar incorporado e o concreto com redução de a/c em 3% com 11,75% de ar incorporado foram os únicos que apresentaram resultados que indicam a condição do concreto como “BOA”, segundo os critérios apresentados na Figura 25. Todos os demais concretos apresentaram resultados que indicam a condição do concreto como “EXCELENTE”.

De fato, os maiores valores obtidos para a velocidade de propagação foram os concretos com os menores teores de ar incorporado. Estes 3 concretos não receberam aditivo incorporador de ar e apresentaram resultados acima de 4700 m/s.

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m/s)	CONDIÇÕES DO CONCRETO
SUPERIOR a 4.500	EXCELENTE
De 3.500 a 4.500	BOM
De 3.000 a 3.500	REGULAR (DUVIDOSO)
De 2.000 a 3.000	GERALMENTE RUIM
INFERIOR a 2.000	RUIM

Figura 25 – Ultrassom: Relação entre velocidade de propagação e as condições do concreto.
(Whitehurst, 1966.)

Além disso, é importante destacar que o ensaio de ultrassom demonstra um aumento nos vazios no concreto endurecido em função do aumento do teor de ar incorporado na mistura (redução na velocidade de propagação). No entanto, é possível verificar um ganho de resistência à compressão em 3 das amostras ensaiadas com incorporador de ar. Este fato pode demonstrar que as características promovidas pela incorporação de ar não dependem apenas do volume adicionado, mas também da forma, da disposição e do tamanho das bolhas, que são efeitos causados pela inserção do aditivo incorporador de ar na mistura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, foi possível verificar que sim, há sentido na teoria desenvolvida a partir do problema e da hipótese estabelecidos, ou seja: a relação entre ar incorporado e água/cimento em um concreto interfere em sua trabalhabilidade e também em sua resistência à compressão. Além disso, deve haver uma relação ótima de redução da relação água/cimento e incorporação de ar que permite o máximo ganho de resistência com a mínima perda de abatimento.

Esta análise foi possível pelo sucesso no desenvolvimento tanto dos ensaios previstos nos objetivos gerais (ar incorporado, trabalhabilidade e resistência à compressão) quanto nos específicos (ultrassom e absorção capilar).

Com relação às justificativas descritas como base do estudo, a redução da relação água/cimento concomitantemente à incorporação de ar em um concreto também demonstra a possibilidade de redução do consumo de cimento na mistura, o que contribui de forma ainda mais significativa para o estudo. Avaliando a aplicação abordada, no caso estruturas de paredes de concreto, o estudo fornece dados relevantes para seu aproveitamento na prática, com a possível redução do peso próprio e outros benefícios já citados anteriormente, assim como a economia a partir da redução de material aglomerante.

A partir da etapa de execução do programa experimental, podemos destacar a importância e quais aspectos foram identificados como fundamentais no desenvolvimento e aprendizado deste trabalho:

- Sob a restrição de somente utilizar os materiais fornecidos pela usina dosadora, foi necessário avaliar o comportamento em condições práticas no laboratório, experimentando o traço referência da empresa para conhecer suas especificidades, condições de uso e desempenho;

- Sem as características aplicáveis para o estudo, a dosagem de referência precisou de ajustes, através de experimentações piloto e substituição do aditivo plastificante, que demandou da equipe análises sobre os resultados obtidos, para assim intervir da maneira mais coerente possível, até atingir condições aceitáveis para desenvolvimento do programa;
- Para o desenvolvimento do estudo em laboratório de forma plena e visando menores riscos de interferências nos resultados, foi foco desta equipe a execução em campanha única de ensaios (dosagens ensaiadas e analisadas no mesmo dia, sob mesmas condições de umidade, temperatura e estado dos materiais utilizados), que demonstraram avaliação positiva;
- Após as constatações durante os experimentos no laboratório, nota-se que quanto menor a quantidades de variáveis envolvidas no processo executivo da dosagem, maior a confiabilidade e consistência dos resultados obtidos que se apresentam com menor variabilidade. Sendo assim, a reprodução de um estudo com a utilização de ar incorporado demanda uma necessidade de maior reprodutibilidade para garantir valores estáveis.

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para estudos futuros, sugere-se que sejam avaliadas demais propriedades do concreto como o módulo de elasticidade, e a substituição dos materiais na dosagem, visando um aprimoramento no efeito de lubrificação das partículas sólidas pelas bolhas de ar incorporado, que promove um aumento da fluidez e trabalhabilidade do concreto ainda fresco, assim como a redução da densidade com utilização de EPS, argila expandida, entre outros agregados. Recomenda-se também a alternância entre diferentes tipos de aditivos plastificantes e os incorporadores de ar, para avaliar se há alteração nas características e desempenho do concreto no estado fresco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023 – Informação e Documentação: Referência- Elaboração.** Rio de Janeiro, 1982.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833 – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

IEA - International Energy Agency. **Global Status Report for Buildings and Construction**. Paris, 2019.

IEA - International Energy Agency. **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris, 2018.

DOLCH, W. L. Air-Entraining Admixtures. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 2nd ed. New Jersey: Noyes Publications, 1995.

DU, L., FOLLIARD, K. J. **Mechanisms of air entrainment in concrete**. Cement and Concrete Research, 35 (2005).

FERREIRA, F. M. M. **Influência da incorporação de ar em concreto autoadensável para paredes de concreto moldadas no local**. 2019. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional e inadequação de moradias no Brasil - Principais resultados para o período de 2016 a 2019**. Belo Horizonte, 2021.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PARANAESE, W. C. **Design and control of concrete mixtures**. 14th ed. Skokie: PCA, 2003.

MALHOTA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook of Nondestructive Testing of Concret**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MAYOR, A.V.; MONGE, R.; SILVA, J. B. R. G. A construção de um sistema de sucesso. In: **Revista Concreto & Construções**. Ed. IBRACON. n.90. São Paulo, p 42-46, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5ª Edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

ROMANO, R. C. O; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento**. Ambient. constr., Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, Abr. 2018. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212018000200289&lng=en&nrm=iso. Acesso em 24/09/2020 às 21 horas.

Whitehurst, E. A. **Evaluation of concrete properties from Sonic test**. Detroit, American Concrete Institute, 1966. 84 p.