UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Priscila da Rosa

CONCRETO COM AR INCORPORADO: VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE MISTURA DOS MATERIAIS

Porto Alegre

dezembro 2013

PRISCILA DA ROSA

CONCRETO COM AR INCORPORADO: VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE MISTURA DOS MATERIAIS

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Paula Kirchheim
Coorientadora: Cristina Vitorino da Silva

Porto Alegre

dezembro 2013

PRISCILA DA ROSA

CONCRETO COM AR INCORPORADO: VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE MISTURA DOS MATERIAIS

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Professoras Orientadoras e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2013

Ana Paula Kirchheim
Doutora pela UFRGS
Orientadora

Cristina Vitorino da Silva
Mestre pela UFRGS
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mauricio Mancio (UNISINOS)
Dr. pela Universidade da Califórnia, Berkeley

Eduardo Polesello (UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Cristina Vitorino da Silva (URI)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Acelino e Lúcia, que
sempre me apoiaram e especialmente durante o período do
meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.
E ao Diego, por todos esses anos de companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Acelino e Lúcia, que sempre me incentivaram e apoiaram para que eu chegasse ao final deste curso.

Agradeço ao meu namorado, Diego, pelo apoio e compreensão durante todo o curso em especial nesta etapa final.

Agradeço à professora Ana Paula Kirchheim pela disponibilidade de me orientar e por sempre estar disposta a dar sugestões para tornar este trabalho melhor.

Também agradeço à minha coorientadora Cristina Vitorino, por me auxiliar quando eu tinha dúvidas e sempre me incentivar.

Agradeço à professora Carin Maria Schmitt por todo o auxílio e dedicação para aperfeiçoar este trabalho.

Agradeço aos laboratoristas do Norie/Lamtac, Airton, Gilmar e Nei pelo auxílio na realização das moldagens e ensaios.

Agradeço também aos meus amigos, Tânia Batistela, Édina Quissini e Felipe Malacarne por sempre estarem por perto.

É melhor lançar-se à luta, alcançar o triunfo,
mesmo exposto ao insucesso,
do que formar fila com os fracos, pobres de espírito,
que nem sofrem muito, nem gozam muito,
porque vivem nessa penumbra cinzenta
que não conhece derrota, nem vitória.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

Conhecido por sua alta resistência à compressão, o concreto é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo. Frequentemente é possível alterar algumas das propriedades deste material pela incorporação de aditivos à sua mistura. Existe um grande número de produtos para este fim disponíveis no mercado. Os efeitos desejados são descritos pelos fabricantes, contudo alguns de seus efeitos podem não ser conhecidos. Desta forma, um estudo cauteloso que inclua ensaios de desempenho dos compósitos produzidos com novos aditivos é bastante desejável. Diante do exposto, este trabalho avaliou do ponto de vista mecânico, o concreto produzido com um novo aditivo incorporador de ar importado da Alemanha. O fabricante recomenda o uso deste aditivo em concretos expostos à presença de água. Segundo ele, o aditivo torna o material mais resistente à penetração da água, reduzindo possíveis manifestações patológicas. Em relação ao desenvolvimento da pesquisa, primeiramente, foi definida a utilização de um traço intermediário, com relação 1:5 (cimento:agregados). A partir de um estudo piloto experimental, foi definido em 0% (referência) e 0,15% o teor de aditivo incorporador de ar em relação à massa de cimento. Procurando entender a interferência do tempo total de mistura dos materiais nas propriedades mecânicas destes concretos, foram fixados quatro diferentes tempos de mistura: 5, 20, 45 e 90 minutos. Os corpos de prova foram moldados para cada um dos teores de aditivo e tempo de mistura e permaneceram em cura úmida até o momento do ensaio. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, para os concretos estudados, a adição do aditivo incorporador de ar reduziu em média 50% a resistência à compressão, 43% a resistência à tração e 33% o módulo de elasticidade. Já o tempo de mistura mostrou-se significativo principalmente na resistência à compressão do traço com 0,15% de aditivo, onde todos os tempos estudados diferiram entre si. Nos resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade os tempos de 5, 20 e 45 minutos, não apresentaram diferenças significativas nos traços com aditivo.

Palavras-chave: Aditivo Incorporador de Ar. Concreto com Ar Incorporado. Propriedades Mecânicas do Concreto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática para o delineamento da pesquisa 17

Figura 2 – Tipo mais comum de agente incorporador de ar 22

Figura 3 – Orientação do tensoativos na superfície da bolha de ar 22

Figura 4 – Relação entre percentual de agregados finos e ar incorporado no concreto ... 24

Figura 5 – Relação entre tempo de mistura e ar incorporado 25

Figura 6 – Influência da saturação do concreto sobre a resistência ao congelamento 28

Figura 7 – Efeito do ar incorporado e do ar acidental sobre a resistência do concreto 29

Figura 8 – Seção polida de concreto 30

Figura 9 – Representação diagramática da zona de transição 32

Figura 10 – Efeito da finura do cimento na resistência à compressão de um concreto com relação água/cimento de 0,4 36

Figura 11 – Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) 39

Figura 12 – Variáveis dependentes e independentes da pesquisa 41

Figura 13 – Ensaio de teor de ar incorporado 52

Figura 14 – Ensaio de tração por compressão diametral 54

Figura 15 – Ensaio de módulo de elasticidade 55

Figura 16 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0% de aditivo 58

Figura 17 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0,15% de aditivo 58

Figura 18 – Média dos resultados de resistência à compressão uniaxial aos 28 dias..... 61

Figura 19 – Efeito isolado do teor de aditivo na resistência à compressão uniaxial..... 63

Figura 20 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial 64

Figura 21 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial 65

Figura 22 – Média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral 68

Figura 23 – Efeito isolado do teor de aditivo na resistência à tração por compressão diametral 69

Figura 24 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à tração por compressão diametral 70

Figura 25 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais na resistência à tração por compressão diametral 71

Figura 26 – Média dos resultados de módulo de elasticidade 73

Figura 27 – Efeito isolado do teor de aditivo no módulo de elasticidade 75

Figura 28 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais no módulo de elasticidade 76
Figura 29 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais no módulo de elasticidade 77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Imagens obtidas com a lupa estereoscópica 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre as resistências à compressão e à tração do concreto 33
Tabela 2 – Resultados da concretagem experimental 43
Tabela 3 – Matriz experimental da pesquisa 44
Tabela 4 – Número de corpos de prova por ensaio 45
Tabela 5 – Composição do cimento empregado na pesquisa, segundo o fabricante 45
Tabela 6 – Caracterização química do cimento empregado na pesquisa 46
Tabela 7 – Caracterização mecânica do cimento empregado na pesquisa 46
Tabela 8 – Caracterização física do cimento empregado na pesquisa 47
Tabela 9 – Resultados da determinação do teor de argamassa 48
Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo 49
Tabela 11 – Resultados da determinação do teor de argamassa 50
Tabela 12 – Resultados encontrados para o teor de ar incorporado..... 56
Tabela 13 – Resultados encontrados para o ensaio slump test 59
Tabela 14 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias 60
Tabela 15 – Resistência à compressão uniaxial aos 7 dias..... 61
Tabela 16 – Análise de variância para a resistência à compressão uniaxial..... 62
Tabela 17 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias 67
Tabela 18 – Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral.. 68
Tabela 19 – Módulo de elasticidade aos 28 dias 72
Tabela 20 – Análise de variância para o módulo de elasticidade 74

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Institute for Testing and Materials

Deciv – Departamento de Engenharia Civil

EE – Escola de Engenharia

Lamtac – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR – Norma Brasileira

Norie – Núcleo Orientado para a Inovação na Construção

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – tensão aplicada (MPa)

σ_a – tensão de carregamento (MPa)

ε – deformação instantânea do material

D – diâmetro do corpo de prova (mm)

E_{ci} – módulo de deformação tangente inicial (GPa)

f_c – resistência à compressão (MPa)

$f_{ct,\ sp}$ – resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F – força máxima alcançada (N)

ℓ – comprimento do corpo de prova (mm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA 16
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA 16
2.3 PRESSUPOSTO 16
2.4 PREMISSAS 16
2.5 DELIMITAÇÕES 16
2.6 LIMITAÇÕES 17
2.7 DELINEAMENTO 17
3 CONCRETOS COM AR INCORPORADO 19
3.1 USO DE ADITIVOS NOS CONCRETOS 19
3.2 ADITIVOS INCORPORADORES DE AR 21
3.2.1 Agentes incorporadores de ar e mecanismos de ação 21
3.2.2 Produção de concretos com ar incorporado 22
3.3 FATORES QUE AFETAM A INCORPORAÇÃO DE AR 23
3.3.1 Quantidade e dimensão do agregado miúdo 23
3.3.2 Quantidade de material fino 24
3.3.3 Condições de mistura dos materiais 24
3.4 EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AR NO CONCRETO..... 25
3.4.1 Efeito em concretos submetidos a ciclos de congelamento 26
3.4.1.1 Ação do congelamento na pasta de cimento endurecida 26
3.4.1.2 Fatores que influenciam na resistência ao congelamento 27
3.4.2 Efeito sobre a trabalhabilidade 28
3.4.3 Efeito sobre a resistência 29
4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO 30
4.1 MICROESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA 30
4.2 RESISTÊNCIA 33
4.2.1 Fatores que interferem na resistência 34
4.2.2 Ensaio de compressão uniaxial 36
4.2.3 Ensaio de tração por compressão diametral 37
4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE 38
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL 40
5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 40

5.1.1 Variáveis dependentes 42
5.1.2 Variáveis independentes 42
5.1.3 Matriz experimental 44
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS 45
5.2.1 Cimento 45
5.2.2 Agregados 47
5.2.2.1 Agregado miúdo 47
5.2.2.2 Agregado graúdo 48
5.2.3 Água 49
5.2.4 Aditivo 49
5.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS..... 50
5.4 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS 51
5.4.1 Abatimento 51
5.4.2 Teor de ar incorporado 52
5.4.3 Resistência à compressão 53
5.4.4 Resistência à tração por compressão diametral 53
5.4.5 Módulo de elasticidade 54
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... 56
6.1 TEOR DE AR INCORPORADO E ABATIMENTO 56
6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL 60
6.2.1 Efeito do teor de aditivo 62
6.2.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais 64
6.2.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo 65
6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 66
6.3.1 Efeito do teor de aditivo 69
6.3.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais 70
6.3.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo 71
6.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE 72
6.4.1 Efeito do teor de aditivo 74
6.4.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais 75
6.4.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo 76
7 CONCLUSÕES 78
REFERÊNCIAS 80

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo. Sua grande versatilidade, aliada a fatores como resistência e durabilidade, são alguns dos determinantes que o fazem tão popular. Frequentemente faz-se necessário modificar algumas das propriedades do concreto de forma a obter o melhor desempenho possível frente à condição em que ele estará exposto. Tais modificações podem ser obtidas a partir do uso de aditivos junto à mistura do material. Os efeitos desejados para os aditivos normalmente são indicados pelo próprio fabricante, contudo, podem existir efeitos desconhecidos, capazes de interferir negativamente em outras propriedades do compósito cimentício.

Desta forma, é essencial um estudo cauteloso dos novos aditivos, de modo que se possa não somente comprovar os efeitos descritos pelos fabricantes, mas também apontar efeitos que possam comprometer o desempenho do concreto. Assim, frente ao contexto exposto, este trabalho faz parte de um estudo maior que tem como objetivo avaliar, tanto do ponto de vista mecânico quanto de durabilidade, o concreto produzido com um aditivo incorporador de ar importado da Alemanha. O objeto deste trabalho é a avaliação das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com este novo aditivo. O produto será comercializado no Brasil com a expectativa de proporcionar ao concreto uma redução na entrada de água, diminuindo possíveis manifestações patológicas. Cabe ressaltar que não foram fornecidas informações que possam comprova a real diferença deste aditivo em relação aos demais aditivos incorporadores de ar.

O aditivo incorporador de ar é conhecido por incorporar durante o amassamento do concreto uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar. A quantidade de bolhas de ar incorporadas ao compósito depende da duração da etapa de mistura, sendo que, tempos de mistura muito curtos não incorporam ar suficiente e tempo extremamente longos expulsam parte do ar. O tempo de mistura é, portanto, um dos grandes responsáveis pela quantidade de ar incorporada ao compósito.

Deve-se, entretanto, atentar para a quantidade de vazios de ar incorporados à mistura, pois, segundo Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa) existe uma relação inversa entre a quantidade de vazios e a resistência de sólidos. Quanto maior o número de vazios no concreto,

menos resistente ele será. Deste modo, é essencial o estudo da interferência da incorporação de ar na resistência mecânica do concreto com ar incorporado. Em projetos de estruturas de concreto, a propriedade normalmente especificada é a resistência à compressão, por conta de sua relativa facilidade de ensaio, porém, outras propriedades também são de grande importância como a resistência à tração e o módulo de elasticidade logo, suas variações devido ao uso do aditivo também devem ser avaliadas.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram executados concretos com e sem o uso do novo aditivo incorporador de ar, variando o tempo total de mistura de cada um deles. Sendo que, o teor de aditivo mais adequado foi definido juntamente com o representante do produto no Brasil a partir dos resultados de uma concretagem experimental. Os corpos de prova obtidos foram ensaiados no estado endurecido para módulo de elasticidade, resistências à tração e à compressão e no estado fresco para massa específica e teor de ar incorporado. Todo o processo foi realizado em laboratório de acordo com as normas específicas.

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro aquele que apresenta esta introdução. O segundo capítulo apresenta as diretrizes da pesquisa, incluindo a questão de pesquisa, os objetivos, as delimitações, limitações e o delineamento da pesquisa. Os capítulos três e quatro são constituídos de uma revisão bibliográfica acerca dos concretos com ar incorporado e das propriedades mecânicas do concreto. O quinto capítulo apresenta o programa experimental da pesquisa, com a definição das variáveis dependentes e independentes, materiais e métodos adotados. No sexto capítulo são apresentados os resultados e é feita a análise dos mesmos e, no sétimo capítulo as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: definido o teor de aditivo incorporador de ar estudado, que variações podem ser verificadas nas propriedades mecânicas dos concretos, com e sem aditivo, em relação ao tempo de mistura dos materiais?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal do trabalho é a verificação da variação dos valores de módulo de elasticidade, resistências à compressão e à tração, para concretos, com e sem aditivo incorporador de ar estudado, em relação ao tempo de mistura dos materiais.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios realizados são válidos tanto para concretos convencionais quanto para concretos com aditivos do tipo incorporador de ar.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o estudo dos novos aditivos comercializados é indispensável, pois deste modo, é possível obter informações sobre suas características, desempenho e comportamento frente ao compósito em que está inserido.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se à comparação de um traço de concreto, executado com e sem o uso do aditivo incorporador de ar estudado, frente a quatro diferentes tempos de mistura dos materiais.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

a) a determinação do teor de aditivo através de uma concretagem experimental;

b) a realização dos seguintes ensaios: trabalhabilidade, teor de ar incorporado, módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração;

c) a utilização de aditivo incorporador de ar fornecido pela empresa interessada em analisar o produto.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir as quais estão representadas na figura 1 e descritas nos próximos parágrafos:

a) pesquisa bibliográfica;

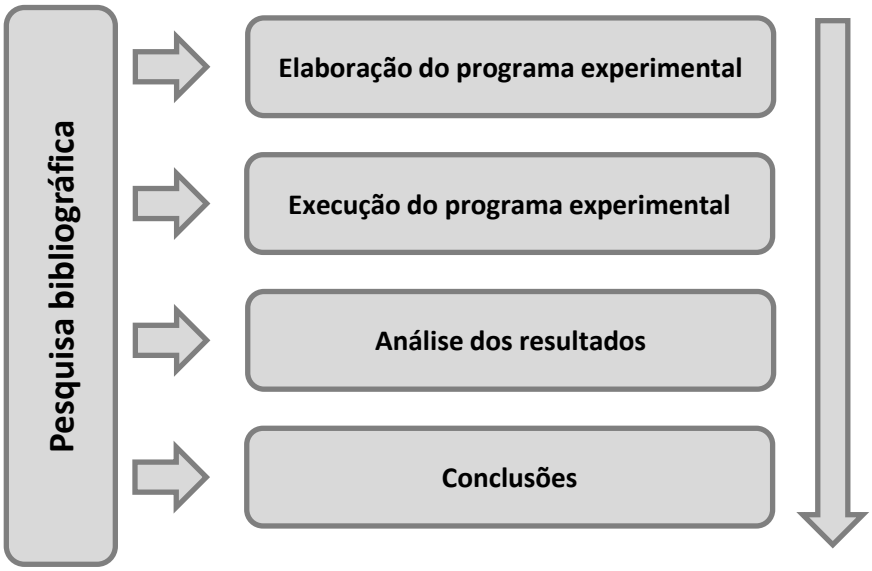
b) elaboração do programa experimental;

c) execução do programa experimental;

d) análise dos resultados;

e) conclusões.

Figura 1 – Representação esquemática para o delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A etapa da **pesquisa bibliográfica** esteve presente durante todo o desenvolvimento do trabalho. Esta etapa teve como objetivo prover a fundamentação teórica e prática necessária para a realização dos experimentos, bem como o embasamento teórico para a compreensão de seus resultados. A primeira etapa da revisão bibliográfica consistiu em aprofundar o conhecimento sobre os aditivos incorporadores de ar, seu funcionamento dentro da matriz cimentícia e seus principais usos na indústria da construção civil. Fez-se necessário também o estudo sobre as propriedades mecânicas do concreto, bem como, os principais fatores que interferem nessas propriedades.

Posteriormente, na fase de **elaboração do programa experimental**, foram definidos todos os ensaios a serem realizados, assim como, o tamanho das amostras e o período de ensaio de cada uma delas. Durante esta etapa também foi estabelecido que a determinação do teor de aditivo fosse feita juntamente com o representante do produto no Brasil e embasada nos resultados de uma concretagem experimental utilizando o produto.

Após a definição de todo o planejamento experimental, teve-se início a etapa de **execução do programa experimental**. Primeiramente se iniciou a determinação do teor de argamassa para o traço escolhido. Com estas informações se pôde moldar os corpos de prova, para que fossem ensaiados no tempo pré-definido. A etapa de moldagem dos CP seguiu as determinações da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) e os ensaios subsequentes foram realizados de acordo com as respectivas normas.

Tendo sido obtidos os resultados da fase de realização dos experimentos, deu-se início a etapa de **análise dos resultados.** Neste momento foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos, através do método de análise de variância, com o objetivo de compreender melhor a influência das variáveis no comportamento mecânico dos concretos estudados na pesquisa. Por fim, na última fase foram feitas as **conclusões,** de forma a o encerrar o trabalho. Durante esta fase foi feita uma análise crítica dos dados obtidos, buscando compreender os mecanismos que levaram ao comportamento mecânico apresentado pelos corpos de prova.

3 CONCRETOS COM AR INCORPORADO

O concreto consiste basicamente de uma mistura de Cimento Portland, água e agregados. A mistura do cimento à água forma uma pasta que envolve as partículas dos agregados produzindo um material que, enquanto fresco, é capaz de se moldar às mais variadas formas. A resistência mecânica da mistura, que é adquirida ao longo do tempo através das reações de hidratação do cimento, confere ao composto endurecido excelente desempenho estrutural (HELENE; ANDRADE, 2007, p. 920).

Mas para que o concreto atinja a especificação desejada, algumas vezes, se faz necessário o uso de aditivos e adições na mistura. Entre os mais comuns, destacam-se, os aditivos incorporadores de ar e redutores de água. A utilização de incorporadores de ar nos concretos é muito valorizada, principalmente em países de clima frio, onde a durabilidade dos elementos de concreto é visivelmente melhorada com a presença dos vazios de ar na pasta endurecida (NEVILLE, 1982).

O concreto com ar incorporado apresenta em sua estrutura bolhas de ar finamente espaçadas. E, diferentemente dos outros vazios encontrados no concreto, a presença dessas bolhas traz importantes benefícios ao concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (KOSMATKA et al., 2003, p. 129, tradução nossa). Assim sendo, este capítulo aborda o uso dos aditivos no concreto, aditivos incorporadores de ar, os fatores que afetam a incorporação de ar e os efeitos dessa incorporação no concreto.

3.1 USO DE ADITIVOS NOS CONCRETOS

Segundo Neville (1982), os mesmo materiais responsáveis por produzir um “bom” concreto, com desempenho mecânico e características desejáveis, também podem produzir um concreto ruim, a diferença entre eles está no conhecimento empregado na produção. O autor ressalta que um concreto de qualidade é aquele que, no estado fresco, apresenta consistência adequada e coesão suficiente para não causar a segregação da mistura e, no estado endurecido, tem resistência à compressão suficiente para atender às solicitações a que está submetido além de apresentar a durabilidade adequada.

Além disso, dependendo das condições de utilização e de exposição dos elementos de concreto, outras características são desejáveis além daquelas que definem um concreto de qualidade. Para que se obtenham as características desejadas, em alguns casos, se faz necessária à utilização de aditivos junto à mistura convencional do concreto (MEHTA; MONTEIRO, c2006, p. 281, tradução nossa). De acordo com a norma ASTM C125 – *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013, tradução nossa) o aditivo, que pode ser adicionado antes ou durante a mistura, consiste em um material capaz de modificar as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido.

A NBR 11.768 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011a) listou os principais aditivos utilizados atualmente no Brasil:

a) plastificante: aditivo que aumenta o abatimento e a fluidez de argamassas ou concretos frescos sem o uso de água adicional; ou que, para um mesmo abatimento permite reduzir a quantidade de água necessária à mistura;

b) superplastificante tipo I: aditivo que aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez de argamassas ou concretos frescos sem o uso de água adicional; ou que, para um mesmo abatimento permite reduzir significativamente a quantidade de água necessária à mistura;

c) superplastificante tipo II: aditivo que aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez de argamassas ou concretos frescos sem o uso de água adicional; ou que, para um mesmo abatimento permite uma elevadíssima redução na quantidade de água necessária à mistura;

d) acelerador de pega: reduzem o tempo de transição entre o estado plástico e o estado endurecido do concreto;

e) retardador de pega: aumentam o tempo de transição entre o estado plástico e o estado endurecido do concreto;

f) acelerador de resistência: aditivo que aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais do concreto, podendo ou não modificar o tempo de pega;

g) incorporador de ar: aditivo que permite incorporar, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar.

Neville (1982, p. 96) ressalta que apesar dos efeitos dos aditivos serem descritos pelos fabricantes “[...] o desempenho de cada aditivo deve ser cuidadosamente verificado antes de ser usado.” de forma que seja feito o melhor aproveitamento possível de suas propriedades.

3.2 ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

O aditivo incorporador de ar pode ser considerado um dos grandes avanços na tecnologia do concreto. Desenvolvido na década de 1930, ele introduz no concreto bolhas de ar de tamanho microscópico. Essas bolhas são capazes de melhorar significativamente a durabilidade de concretos submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento além de proporcionar maior trabalhabilidade ao concreto no estado fresco (KOSMATKA et al., 2003, p. 129, tradução nossa).

Neville (1982 p. 265) define o ar incorporado como o "[...] ar introduzido intencionalmente, por meio de um agente apropriado.". Além da definição básica, o ar incorporado pode ser diferenciado dos outros vazios existentes no concreto, tais como os vazios de ar aprisionado, pelo tamanho de suas bolhas. Kosmatka et al. (2003, p. 129, tradução nossa) afirmam que bolhas de ar incorporado são extremamente pequenas, com diâmetro na maioria das vezes entre 10 e 100 µm enquanto bolhas de ar aprisionado tem um diâmetro de no mínimo 1000 µm. O autor ainda ressalta que um bom aditivo incorporador de ar deve produzir, imediatamente após sua adição na mistura, uma espuma finamente dividida e estável, de forma que garanta a separação entre as bolhas de ar.

3.2.1 Agentes incorporadores de ar e mecanismos de ação

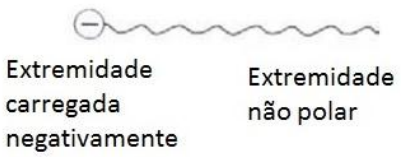
A descoberta dos incorporadores de ar, segundo Rixom e Mailvaganam (1999, p. 166, tradução nossa), ocorreu por acaso. Observou-se que o concreto feito com cimento que utilizava bolas de gordura animal como agente de moagem, apresentou maior durabilidade que o concreto produzido com cimento que não utilizava esse agente. O autor lista ainda alguns dos tensoativos mais utilizados na indústria para a formulação de agentes incorporadores de ar, sendo eles:

a) resinas de madeira neutralizadas;
b) sais de ácidos graxos;
c) alquilaril sulfonatos;
d) alquil sulfatos;
e) fenóis-etoxilatos.

Segundo Mehta e Monteiro (c2006, p. 284), os agentes incorporadores de ar e os redutores de água podem ser classificados como tensoativos (figura 2). Os compostos tensoativos possuem em sua estrutura molecular grupos com caraterísticas antagônicas. Ou seja, em todas as moléculas há um grupamento polar que possui afinidade com água, chamado hidrófilo, e outro que não possui tal afinidade, chamado hidrófobo. A diferença entre incorporar ar ou fluidificar o sistema é dada pela orientação da molécula. De acordo com Edmeades e Hewlett (c1998, p. 843, tradução nossa), os aditivos incorporadores de ar, consistem de uma cadeia de hidrocarbonetos com extremidade terminada em um grupo polar hidrófilo.

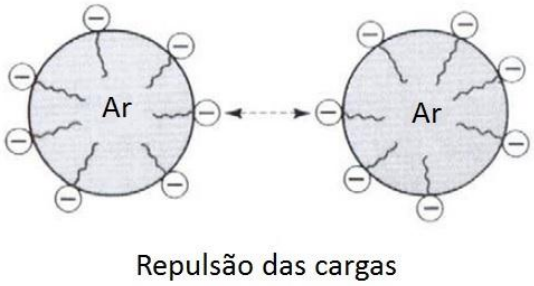
Sendo assim, a formação das bolhas de ar se dá quando os tensoativos, que compõem o aditivo, direcionam sua extremidade hidrófila para a água, diminuindo a tensão superficial e favorecendo a formação de bolhas (figura 3). Esse mesmo mecanismo impede que as bolhas se unam, pois a película hidrófila formada ao redor de cada bolha de ar impede essa união. A extremidade hidrófila é então atraída para os grãos de cimento e agregados carregados positivamente formando assim uma ponte agregado-ar-cimento-ar-agregado (EDMEADES; HEWLETT, c1998, p. 844, tradução nossa).

Figura 2 – Tipo mais comum de agente incorporador de ar



(fonte: adaptado de EDMEADES; HEWLETT, c1998, p. 844)

Figura 3 – Orientação do tensoativos na superfície da bolha de ar



(fonte: adaptado de EDMEADES; HEWLETT, c1998, p. 844)

3.2.2 Produção de concretos com incorporadores de ar

Para a produção de concretos com ar incorporado, pode-se utilizar, tanto o aditivo incorporador de ar durante a mistura do concreto, quanto os cimentos já comercializados com o aditivo, chamados de “cimentos com ar incorporado”. Ambos os métodos possuem

vantagens e desvantagens que devem ser analisadas de acordo com a mão de obra envolvida, materiais utilizados entre outros.

A incorporação do aditivo durante a mistura garante uma maior flexibilidade na alteração do teor de ar incorporado. Contudo, a quantidade geralmente manipulada é pequena, variando entre 0,005% a 0,05% da massa do cimento, sendo necessário então diluí-lo em água para facilitar a sua colocação na betoneira. No canteiro de obras, onde muitas vezes, não há um controle adequado na produção do concreto, o uso de cimentos com ar incorporado pode ser atraente, pois elimina a possibilidade de erro durante a colocação do aditivo na mistura do concreto. Porém, o teor de ar incorporado está restrito à quantidade de aditivo adicionada durante a fabricação do cimento, sendo necessário, em algumas situações, a complementação com o aditivo durante a mistura para se obter o teor ideal de ar (NEVILLE, 1982, p. 453).

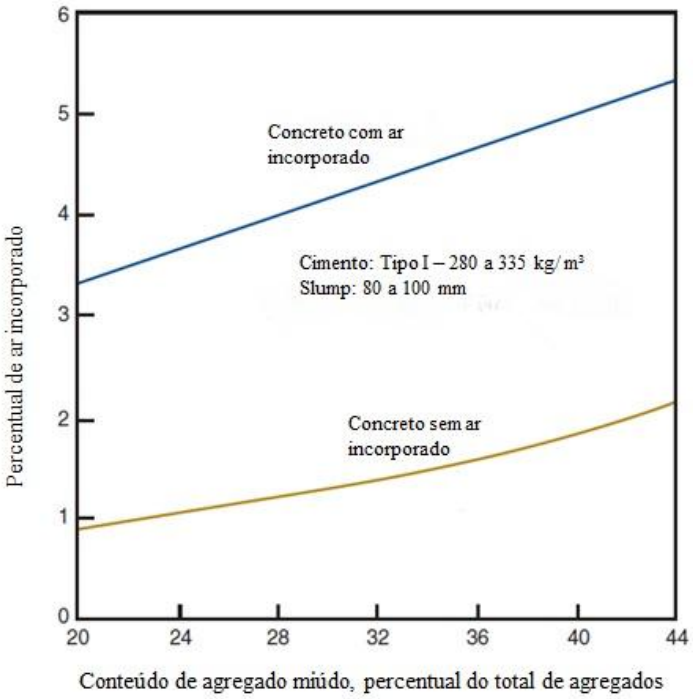
3.3 FATORES QUE AFETAM A INCORPORAÇÃO DE AR

De acordo com Kosmatka et al. (2003, tradução nossa), existem diversos fatores que podem afetar o teor de ar incorporado e, embora esse teor não seja o único parâmetro que deve ser analisado, ele é o único que pode ser medido no estado fresco. A NBR NM 47 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002) descreve o método para a determinação do teor de ar em concretos. Entre os fatores que afetam o teor de ar, pode-se citar a quantidade e dimensão do agregado miúdo, a quantidade de materiais finos e as condições de mistura dos materiais. Estes fatores são apresentados nos itens a seguir.

3.3.1 Quantidade e dimensão do agregado miúdo

Dolch (1995, p. 528, tradução nossa) afirma que 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 eficiência. Quanto maior a proporção de areia em relação ao total de agregados, maior é a quantidade de ar incorporada ao concreto. Pode-se observar este efeito na figura 4. O autor ressalta ainda que, além da proporção entre os agregados, a dimensão do agregado miúdo afeta a incorporação de ar, especialmente em concretos magros. Segundo Kosmatka et al. (2003, tradução nossa), areias médias, entre 0,6 e 0,15 mm, são mais eficientes na incorporação de ar. Contudo, a influência da dimensão do agregado não é tão significativa em misturas mais ricas.

Figura 4 – Relação entre percentual de agregados finos e ar incorporado no concreto



(fonte: adaptado de DOLCH, 1995, p. 529)

3.3.2 Quantidade de materiais finos

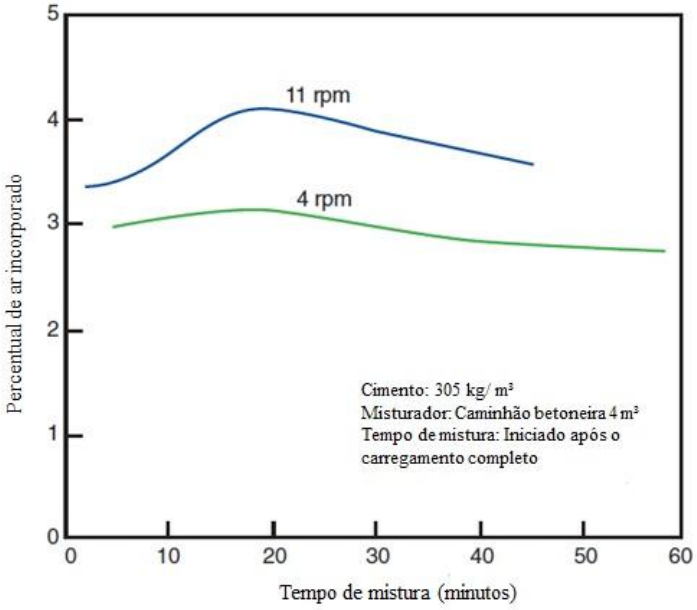
Quanto aos materiais finos, observa-se que sua presença causa uma redução na quantidade de bolhas de ar, sendo necessário então, um aumento na quantidade de aditivo incorporador de ar na mistura. Materiais como cinza volante, sílica ativa, frações finas de areia e o próprio cimento podem interferir negativamente na incorporação das bolhas. Estes materiais geram dois efeitos sobre a mistura, ambos devido ao fato dos materiais finos possuírem maior área superficial e necessitarem de uma maior quantidade de água durante a mistura. O primeiro efeito é a maior absorção de água da mistura por estes materiais. Isso faz com que a quantidade de água disponível para a geração e estabilização das bolhas seja menor. O segundo efeito é a absorção do aditivo incorporador de ar pelos materiais finos. Este efeito faz com que a quantidade de aditivo disponível para a incorporação das bolhas seja menor, e consequentemente o teor de ar (DOLCH, 1995, tradução nossa).

3.3.3 Condições de mistura dos materiais

A operação de mistura também tem grande influência no teor final de ar. Se o tempo de mistura for insuficiente, o aditivo não será totalmente espalhado. Mas, tempos de mistura

muito longos tendem a expulsar parte do ar. Desta forma existe um tempo de mistura considerado ótimo. Na prática, o tempo de mistura é fixado como sendo um pouco menor que o mínimo necessário para o espalhamento total do aditivo. Além disso, maiores rotações aumentam a quantidade de ar incorporado, como pode-se observar na figura 5 (EDMEADES; HEWLETT, c1998, p. 844, tradução nossa).

Figura 5 – Relação entre tempo de mistura e ar incorporado



(fonte: adaptado de DOLCH, 1995)

Contudo, ao se utilizar concretos dosados em central, o tempo de mistura pode ser muito maior que o tempo necessário para o espalhamento do aditivo. A NBR 7212 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), o tempo máximo para que o caminhão seja descarregado (aplicado) é de 150 min, sendo que, o transporte da mistura não pode ultrapassar o tempo de 90 minutos. Este prolongamento do tempo de mistura 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 (DOLCH, 1995, tradução nossa).

3.4 EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AR NO CONCRETO

A incorporação de ar no concreto, como citado anteriormente, pode ser feita por diferentes razões, sendo as principais: o aumento de resistência aos ciclos de congelamento e descongelamento e o aumento na trabalhabilidade. Tais benefícios se devem às bolhas de ar,

incorporadas durante a mistura (DOLCH, 1995, p. 104, tradução nossa), as quais se encontram isoladas umas das outras por uma pequena camada de pasta. Contudo, a presença das bolhas de ar vem acompanhada de uma redução significativa na resistência à compressão do concreto, pois a resistência é uma função direta da porosidade dos materiais. A seguir, são descritos os efeitos benéficos da incorporação de ar, bem como o efeito negativo que ela tem sobre a resistência do concreto.

3.4.1 Efeito em concretos submetidos a ciclos de congelamento

O objetivo principal da incorporação de ar é a obtenção de concretos resistentes aos ciclos de congelamento e descongelamento. Essa característica se faz necessária principalmente em países do norte da Europa, Canadá e alguns estados no norte dos Estados Unidos, onde os invernos são mais rigorosos. Nestes países o uso dos incorporadores de ar é quase uma regra para pavimentos de concreto, muros de arrimo e tabuleiros de pontes, pois o custo de reparo e substituição dessas estruturas é bastante elevado (KOSMATKA et al., 2003, tradução nossa). Além disso, no Sul do Brasil, onde no inverno, frequentemente são registradas temperaturas negativas, o uso de aditivos incorporadores de ar se mostra atraente. Como outra aplicação no Brasil, pode-se citar o piso de câmaras frigoríficas. Na sequência é feita uma pequena abordagem sobre a ação do congelamento na pasta de cimento endurecida e os principais fatores responsáveis pelo congelamento.

3.4.1.1 Ação do congelamento na pasta de cimento endurecida

Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa) destacam que os danos por congelamento no concreto podem se manifestar de diferentes formas. O descascamento, que consiste na escamação de uma superfície já acabada, ocorre devido à exposição do elemento ao congelamento e degelo na presença de umidade, e à utilização de produtos para o degelo. Enquanto que a fissuração e o destacamento do concreto, que são os danos mais comuns, são causados pela expansão progressiva da matriz de cimento devido aos repetidos ciclos de congelamento e descongelamento.

A expansão da matriz de cimento pode ocorrer devido a duas causas distintas. A primeira delas é devido ao aumento de volume que acompanha o congelamento da água. De acordo com Powers (1955, tradução nossa), durante o congelamento há um aumento, em torno de 9%, no volume da água que está presente nos poros capilares do concreto. Esse aumento

requer uma dilatação do mesmo tamanho nas cavidades em que a água se encontra ou a saída do excesso de água através das fronteiras do material. Durante o processo de fuga do excesso de água, surge uma pressão hidráulica. A grandeza dessa pressão depende da taxa de formação do gelo, da permeabilidade do material e da distância até um vazio que possa acomodar o excesso de água. Em pastas saturadas, a distância, entre a cavidade em que a água se encontra e o vazio no qual o excesso pode se acomodar, deve ser de no máximo 0,8 mm. Desta forma, não surgem pressões grandes o bastante a ponto de desagregar o concreto.

A segunda causa de expansão está relacionada à presença de sais, tanto na água aprisionada no concreto quanto na superfície do mesmo, ao se utilizar agentes para o degelo. A água que se encontra nos poros capilares do concreto não é pura. Em sua composição estão presentes várias substâncias solúveis tais como, álcalis, cloretos e hidróxido de cálcio. Essas soluções congelam a temperaturas mais baixas do que a água pura, separando a água congelada (pura) da solução. O aumento na concentração de soluto leva ao surgimento de uma pressão osmótica. Essa pressão traz como consequência a difusão da água, provocando o crescimento no número de porções de gelo dentro do concreto. Os sais utilizados para o degelo de pavimentos também contribuem para o surgimento da pressão osmótica. Parte dos sais é absorvida pela parte superior do concreto, dando início a uma movimentação da água para a região mais fria, na qual ocorre o congelamento, provocando também um aumento nas porções de gelo dentro do concreto (MEHTA; MONTEIRO, c2006, tradução nossa).

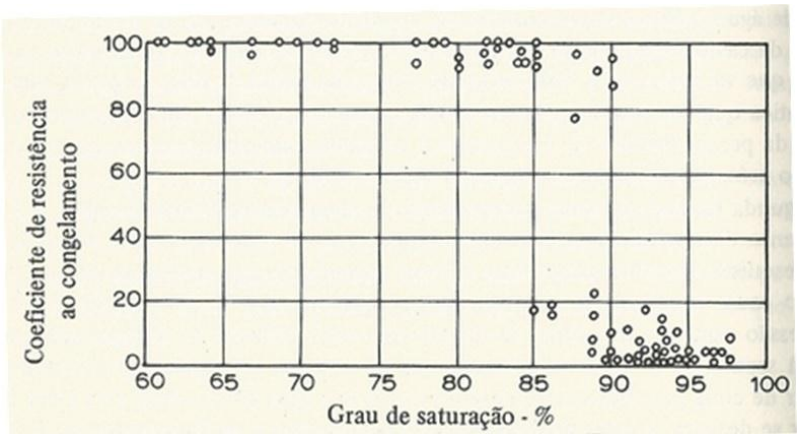
3.4.1.2 Fatores que influenciam na resistência ao congelamento

Segundo Powers (1955, p. 183, tradução nossa), o efeito do congelamento depende principalmente do grau de saturação do elemento de concreto, ou seja, da quantidade de água que está presente no mesmo. Ainda de acordo com o autor, existe um valor crítico de saturação, em que concretos que se encontram abaixo deste valor são bastante resistentes à ação do congelamento e os que se encontram acima são mais suscetíveis ao ataque do gelo (figura 6). Em um corpo poroso como o concreto, a saturação crítica depende do tamanho deste corpo, da sua homogeneidade e da taxa de congelamento.

Ao se utilizar incorporadores de ar, a pasta do concreto é dividida pelas bolhas em camadas muito pequenas, de forma que não há um ponto de saturação crítica. Ou seja, os vazios que vão acomodar a água expulsa estarão suficientemente próximos da cavidade em que o gelo está se formando, não permitindo que o congelamento da água nos poros expanda a pasta de

concreto. Sendo assim, o fator realmente importante a ser observado, em concretos com incorporadores de ar que estão sujeitos à ação do congelamento, é o espaçamento entra as bolhas, ou seja, a espessura de pasta entre dois vazios adjacentes. Segundo Neville (1982), um espaçamento de 0,25 mm é suficiente para a proteção completa contra os danos causados pelo congelamento.

Figura 6 – Influência da saturação do concreto sobre a resistência ao congelamento



(fonte: NEVILLE, 1982, p. 440)

3.4.2 Efeito sobre a trabalhabilidade

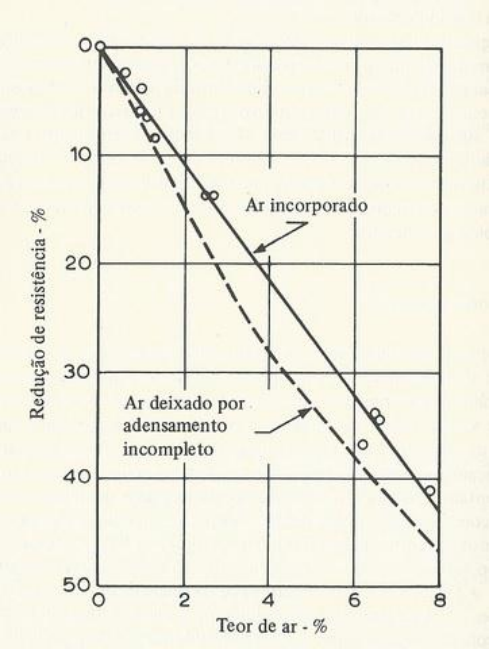
A incorporação de ar tem um efeito considerado benéfico sobre a trabalhabilidade do concreto. A trabalhabilidade, segundo Caldarone (2009, tradução nossa), refere-se à facilidade com que o concreto pode ser transportado, lançado, adensado e finalizado. Para uma mesma relação água/cimento, em concretos mais pobres, a incorporação de ar possibilita uma maior trabalhabilidade, comparativamente a mesma mistura sem o uso do ar incorporado. Contudo, em concretos mais ricos, o efeito da incorporação de ar sobre a trabalhabilidade é menor. De acordo com Neville (1982), em geral, um teor de ar incorporado de 5% aumenta o fator de adensamento em torno de 0,03 a 0,07.

A melhoria na trabalhabilidade está relacionada ao fato de que as bolhas de ar incorporado se mantêm esféricas, devido à tensão superficial. Deste modo, elas atuam como um agregado miúdo com baixo atrito superficial e elevada elasticidade. O concreto se comporta então, como se houvesse um excesso de agregado miúdo. Desta forma, a incorporação de ar permite uma redução no teor de areia e consequente redução no teor de água, compensando em parte, a perda de resistência devido aos vazios (KOSMATKA et al., 2003, tradução nossa).

3.4.3 Efeito sobre a resistência

Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa) afirmam que a resistência está baseada na parte sólida de um material, sendo assim, os vazios devido à incorporação de ar são prejudiciais à resistência. Analisando-se a figura 7, pode-se notar que ao incorporar ar no concreto, sem qualquer outra alteração nas proporções dos materiais da mistura, há uma redução na resistência. Essa redução é proporcional ao volume de ar presente, e isso vale tanto para vazios devido à incorporação de ar quanto para vazios devido ao mau adensamento.

Figura 7 – Efeito do ar incorporado e do ar acidental sobre a resistência do concreto



(fonte: NEVILLE, 1982, p. 460)

Entretanto, o ar incorporado tem um efeito benéfico sobre a trabalhabilidade do concreto, e este é um dos principais motivos pelo qual a redução na resistência não é ainda maior ao se utilizar incorporadores de ar. Kosmatka et al. (2003, tradução nossa) ressalta que esta melhoria na trabalhabilidade possibilita uma redução da quantidade de água necessária à mistura, o que leva a um aumento de resistência que compensa em parte a perda ocasionada pela presença dos vazios de ar. Contudo, em misturas de maior resistência, nas quais a relação água/cimento é mais baixa, a incorporação de ar permite apenas uma pequena redução na quantidade de água. Desta forma, a presença dos vazios tem um efeito muito mais pronunciado em concretos de resistência mais elevada.

4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

As propriedades mecânicas dos materiais definem o seu comportamento quando sujeitos à aplicação de cargas e a sua capacidade de resistir ou distribuir essas cargas sem se fraturar ou deformar de forma incontrolada. As principais propriedades dos concretos são: resistências à compressão e à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são influenciadas não somente pela proporção dos materiais na mistura do concreto, mas também pelas características microestruturais da sua pasta (CALDARONE, 2009, tradução nossa). Assim sendo, neste capítulo são abordados alguns aspectos da microestrutura da pasta de cimento endurecida, bem como as principais propriedades mecânicas do concreto.

4.1 MICROESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA

Microestrutura é o termo empregado para se referir a uma porção da macroestrutura aumentada microscopicamente. Sendo o concreto uma estrutura bastante heterogênea e complexa, o entendimento de sua estrutura interna é fundamental para que se obtenha algum controle sobre suas propriedades mecânicas. A observação do concreto a olho nu permite que sejam diferenciadas duas fases (figura 8), a primeira fase consiste nas partículas de agregado, com forma e tamanho variados, e a segunda consiste em uma massa contínua, formada pela pasta de cimento endurecida (MEHTA, MONTEIRO, c2006, tradução nossa).

Figura 8 – Seção polida de concreto

(fonte: BGC CONCRETE, [2013])

Segundo Mindness et al. ([2003], tradução nossa), a fase agregado é a principal responsável pela massa específica, estabilidade dimensional e módulo de elasticidade do concreto. Essas características dependem basicamente das propriedades físicas do agregado, tais como: volume, tamanho e distribuição dos poros. Características como tamanho e forma do agregado podem afetar indiretamente a resistência do concreto. Agregados maiores e mais lamelares tendem a acumular mais água na sua superfície, isso contribui para o enfraquecimento do compósito.

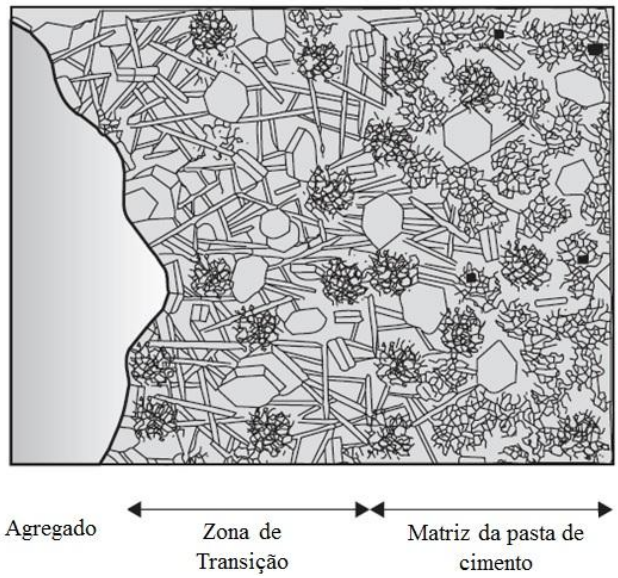
A fase da pasta endurecida é composta de outras quatro fases sólidas, formadas a partir da hidratação do cimento Portland. Sendo elas: silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio (etringita e monosulfato) e grãos de clínquer não hidratados. A primeira fase, silicato de cálcio hidratado, conhecida como C-S-H, é a principal responsável pela determinação das propriedades da pasta, pois constitui cerca de 50% a 60% dos volumes de sólidos na pasta hidratada. As outras fases também contribuem para a resistência da pasta, mas de maneira menos significativa (NEVILLE, 1982).

Analisando microscopicamente a estrutura, percebe-se que o concreto possui muito mais heterogeneidades do que as duas fases vistas a olho nu. Nas proximidades do agregado graúdo, a estrutura da pasta de cimento apresenta uma diferenciação em relação ao resto da matriz. Essa diferença leva ao surgimento de uma terceira fase, denominada zona de transição. Segundo Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa), essa fase representa a região interfacial entre a pasta e as partículas do agregado graúdo. Formada por uma camada entre 0,01 e 0,05 mm ao redor do agregado graúdo, a zona de transição é muito mais fraca do que as outras duas fases do concreto. Os autores relacionam o enfraquecimento da zona entre a pasta e o agregado (zona de transição) com o filme de água que se forma ao redor das partículas do agregado graúdo, logo após a compactação do concreto. Essa maior relação água/cimento próxima ao agregado faz com que os produtos formados pela hidratação do cimento sejam maiores. Consequentemente, a estrutura formada na proximidade do agregado é mais porosa do que o restante da matriz, comprometendo assim a resistência do material.

Além de ser bastante porosa, a zona de transição também apresenta microfissuras ao logo de sua extensão, contribuindo ainda mais para o enfraquecimento da região. Fatores como, por exemplo, teor de cimento, condições de cura, relação água/cimento e umidade ambiente, são responsáveis pela determinação da quantidade de microfissuras. Desta forma, a zona de

transição, que funciona como uma ponte entre a matriz de argamassa e os agregados graúdos, pode ser considerada a fase de resistência limite do concreto. Na figura 9, pode-se observar a matriz de cimento, mais densa e com uma presença muito maior de cristais de C-S-H, e a zona de transição, menos densa e com menor quantidade de cristais de C-S-H.

Figura 9 – Representação diagramática da zona de transição



(fonte: adaptado de MEHTA; MONTEIRO, c2006)

A pasta de cimento contém, além das fases sólidas descritas acima, diferentes tipos de vazios como: espaços intralamelares, vazios capilares e vazios de ar incorporado e aprisionado. Em geral, a presença de vazios é considerada um ponto desfavorável em relação à resistência à compressão dos concretos. De acordo com Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa), os vazios formados pelos espaços intralamelares do C-S-H são tão pequenos (18 Å) que não chegam a ter um efeito negativo sobre a resistência e a permeabilidade da pasta. Os vazios capilares representam o espaço que não foi preenchido pelo cimento ou pelos produtos de hidratação. Em pastas bem hidratadas, com baixa relação água/cimento os vazios capilares podem variar entre 10 e 50 nm. Vazios maiores que 50 nm, conhecidos como macroporos, têm bastante influência na determinação de características como resistência e permeabilidade. Além disso, os vazios de ar incorporado, que podem variar entre 0,05 e 0,2 mm, e os vazios de ar aprisionado, que podem chegar até 3 mm, também são capazes de afetar negativamente a resistência e a impermeabilidade da pasta.

4.2 RESISTÊNCIA

A resistência pode ser definida como a capacidade que um material tem de resistir às tensões sem ruptura. Em materiais como o concreto, a propriedade mais valorizada pelos engenheiros e projetistas é a resistência à compressão. Além desta propriedade ser facilmente ensaiada, ela também pode ser empregada para estimar outras propriedades dos concretos (CALDARONE, 2009, tradução nossa). Embora os concretos não sejam suficientemente resistentes a esforços de tração, esta propriedade também deve ser considerada ao se realizar um estudo mais criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando se faz o uso de novos materiais.

As resistências à compressão e à tração estão intimamente relacionadas, contudo não há uma proporcionalidade direta entre elas. Segundo Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa), à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a intensidade desse aumento decresce. Ou seja, quanto maior a resistência à compressão, menor é a relação entre elas. Isso pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre as resistências à compressão e à tração do concreto

Resistência do concreto (MPa)		
Compressão	Tração na flexão	Tração direta
7	1,6	0,8
14	2,6	1,4
21	3,3	1,9
28	4	2,3
34	4,7	2,8
41	5,3	3,2
48	5,9	3,6
55	6,4	4
62	7	4,3

(fonte: adaptado de PRICE[1], 1951 apud MEHTA; MONTEIRO, c 2006)

[1] PRICE, W. H. Factors influencing concrete strength, **ACI Journal Proceedings,** [S. l.], v. 47, n. 2, p. 417-432, 1951.

Segundo Neville (1982), a resposta do concreto às tensões aplicadas depende de como diferentes fatores afetam a porosidade dos diferentes componentes do compósito. As propriedades e proporções dos materiais e as condições de cura são alguns destes fatores. Diante do exposto, a seguir são abordados alguns dos fatores que influem na resistência do concreto, bem como os ensaios aplicados para a determinação das resistências à compressão e à tração.

4.2.1 Fatores que interferem na resistência

A resistência é considerada como a propriedade mais importante do concreto. Ela é influenciada por diversos fatores, dentre os quais pode-se citar: a relação água/cimento da mistura, os vazios devido à incorporação de ar ou mal adensamento, o tipo de cimento utilizado e o processo de cura (NEVILLE, 1982).

Sabendo que a relação água/cimento é um dos grandes responsáveis pela porosidade da pasta de cimento, e que, quanto maior a porosidade menor é a resistência do compósito, Abrams, em 1918, formulou uma lei que relaciona a resistência do concreto com o fator água/cimento da mistura (fórmula 1).

$$f_c = K_1 / K_2^{a/c} \qquad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:
f_c = resistência à compressão (MPa);
K_1 e K_2 = constantes empíricas;
a/c = relação água/cimento da mistura.

Segundo esta lei a resistência do concreto diminui com o aumento da relação água/cimento da mistura. Ela é uma ferramenta bastante útil na prática, apesar de ser uma simplificação pois não considera fatores como grau de hidratação, ar incorporado e efeitos dos agregados (MINDESS et al., c2003).

Outro fator que exerce influência na resistência do concreto é a quantidade de vazios presentes na matriz de cimento devido a fatores externos. A utilização de aditivos

incorporadores de ar pode levar a uma significativa redução na resistência do material. Essa é uma das grandes dificuldades encontradas ao se trabalhar com este tipo de aditivo. A realização de um adensamento ineficiente também contribui para a redução na resistência (MEHTA; MONTEIRO, c2006, tradução nossa).

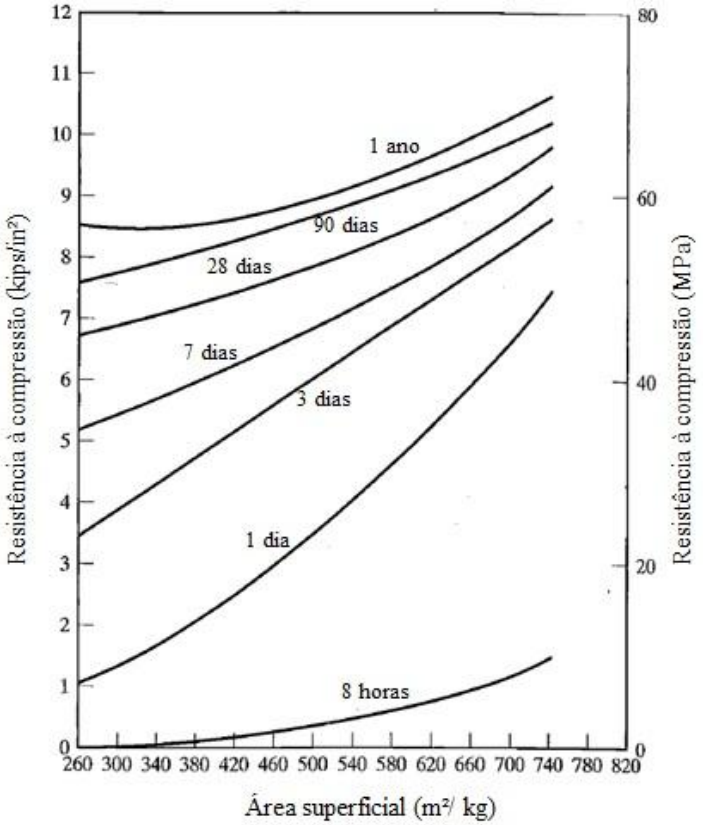
O cimento Portland utilizado na mistura exerce uma grande influência na resistência do material. O efeito depende da composição química do cimento e também de sua finura. Cimentos com maiores teores de silicato tricálcico[2] (C_3S) conferem ao concreto um maior ganho de resistência nas primeiras idades, contudo, em idades mais avançadas o ganho de resistência é menor. Já os cimentos com maiores teores de silicato dicálcico[3] (C_2S), produzem concretos com menor resistência inicial e maior resistência nas idades mais avançadas. A finura do cimento também é um fator que deve ser avaliado já que a taxa de hidratação do cimento aumenta com o incremento da sua área superficial. Esse aumento na taxa de hidratação do cimento leva a um aumento no ganho de resistência. Isso pode ser observado na figura 10, na qual, com o aumento da área superficial, se nota um aumento significativo na resistência à compressão em diferentes idades (MINDESS et al., c2003, tradução nossa).

Segundo Mehta e Monteiro (c2006, p. 61, tradução nossa), a cura do concreto "[...] trata dos procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento [...] imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas.". O processo de cura, desta forma, pretende manter condições de umidade e temperatura favoráveis, para que o máximo desenvolvimento das propriedades do concreto seja alcançado. A cura, além de evitar a perda de umidade, pode fornecer uma quantidade adicional de água para que a matriz cimentícia seja hidratada da forma correta. Segundo os autores, para uma mesma relação água/cimento, concretos curados sob condições continuamente úmidas, apresentam aos 180 dias resistência três vezes maior do que concretos submetidos à secagem ao ar. O processo de cura influencia diferentes propriedades do concreto endurecido, como as resistências à compressão e à tração, o módulo de elasticidade e a permeabilidade.

[2] Silicato tricálcico, composto responsável pelo ganho de resistência nas primeiras idades.

[3] Silicato dicálcico, composto responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas.

Figura 10 – Efeito da finura do cimento na resistência à compressão de um concreto com relação água/cimento de 0,4



(fonte: adaptado de MINDESS et al., c2003)

4.2.2 Ensaio de compressão uniaxial

No Brasil, a obtenção da resistência à compressão do concreto é feita com base nas determinações da NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), que prescreve o método de ensaio para os corpos de prova cilíndricos. A norma estabelece que os corpos de prova a serem ensaiados devem possuir relação altura/ diâmetro entre 1,94 e 2,02. No caso da relação ser menor que 1,94, um coeficiente de correção deve ser aplicado conforme estabelece o item 6.1.2 dessa Norma. O cálculo da resistência à compressão deve ser de acordo com (fórmula 2):

$$f_c = 4 \,.\, F / (\pi \,.\, D^2) \qquad \text{(fórmula 2)}$$

Onde:
f_c = resistência à compressão (MPa);
F = força máxima alcançada (N);
D = diâmetro do corpo de prova (mm).

Os corpos de prova devem ser moldados e curados segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a).

4.2.3 Ensaio de tração por compressão diametral

A NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011b) é a responsável por dar as diretrizes para a realização de ensaios de tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos. A Norma permite a utilização de corpos de prova com relação comprimento/diâmetro entre 1 e 2. Também é permitida a utilização de um dispositivo auxiliar para o posicionamento do corpo de prova conforme item 3.2 dessa Norma. A tração por compressão diametral deve ser calculada pela expressão (fórmula 3):

$$f_{ct,\,sp} = 2 \,.\, F / (\pi \,.\, D \,.\, \ell) \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:
$f_{ct,\,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);
F = força máxima alcançada (N);
D = diâmetro do corpo de prova (mm);
ℓ = comprimento do corpo de prova (mm).

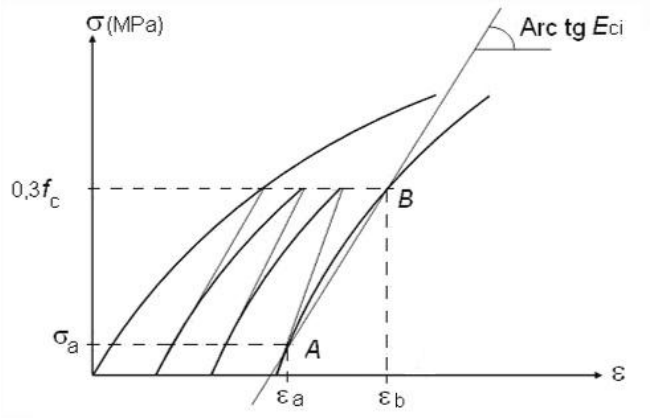
4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez de um sólido, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, menos deformável é o material. O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais que depende de fatores como composição química e microestrutura. De acordo com Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa, p. 93), em materiais homogêneos, a massa específica está diretamente relacionada ao módulo de elasticidade. Contudo, em materiais heterogêneos, como o concreto, o módulo de elasticidade depende de fatores como: massa específica, módulo de elasticidade dos materiais constituintes e características da zona de transição.

A porosidade das fases componentes do concreto, agregado, matriz cimentícia e zona de transição, é o principal fator que afeta o módulo de elasticidade do compósito. A porosidade do agregado graúdo tem grande interferência no módulo de elasticidade porque a rigidez do agregado é afetada pela presença dos poros. Em geral, quanto maior a quantidade de agregado graúdo, com alto módulo de elasticidade, maior é o módulo de elasticidade do concreto. A porosidade da matriz cimentícia também afeta o módulo de elasticidade, sendo que, os fatores que interferem na quantidade de poros da matriz também interferem no módulo de elasticidade do concreto. O mesmo também ocorre na zona de transição matriz-agregado, uma zona mais densa, com menor número de vazios e microfissuras contribui para um incremento no valor do módulo de elasticidade do conjunto (MEHTA; MONTEIRO, c2006, tradução nossa).

Segundo Caldarone (2009, tradução nossa), o módulo de elasticidade pode ser obtido da relação entre a tensão aplicada (σ) e a deformação instantânea do material (ε). No concreto, essa relação não é linear, pois quando o compósito é submetido a uma carga acima de 30% de sua carga última, as microfissuras já existentes na zona de transição começam a aumentar em comprimento, largura e número, desviando sensivelmente a curva de uma linha reta. Desta forma, a NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) estabelece a determinação do módulo de elasticidade a partir do coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação, entre uma carga inicial (σ_a) e 30% da carga última. O ensaio é realizado repetindo o carregamento e descarregamento seguidas vezes, de forma a reduzir a fluência, e, consequentemente, a curvatura do diagrama tensão-deformação. Isso pode ser observado na figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci})



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008)

Essa Norma possibilita o uso de duas metodologias diferentes para a determinação do módulo de elasticidade. Na primeira delas, a tensão de carregamento é fixa e a deformação é medida e, na segunda, a deformação é fixa e faz-se a leitura da tensão de carregamento necessária para atingir essa deformação.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental pode ser caracterizada como uma sequência de ensaios que possibilita a determinação da relação entre a causa e o efeito de um determinado fenômeno. Em pesquisas na área de materiais de construção civil, os experimentos normalmente envolvem um grande número de fatores. Desta forma, o planejamento do programa experimental de forma organizada e estruturada é indispensável para o bom andamento da pesquisa.

Buscando-se entender o comportamento de concretos produzidos com este novo aditivo incorporador de ar, foi desenvolvido um programa experimental, a partir das variáveis dependentes e independentes escolhidas e dos materiais e métodos selecionados. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA).

O programa experimental foi dividido nas seguintes etapas:

a) concretagem experimental;
b) determinação do teor de aditivo;
c) moldagem dos corpos de prova e determinação do teor de ar incorporado;
d) cura;
d) ruptura.

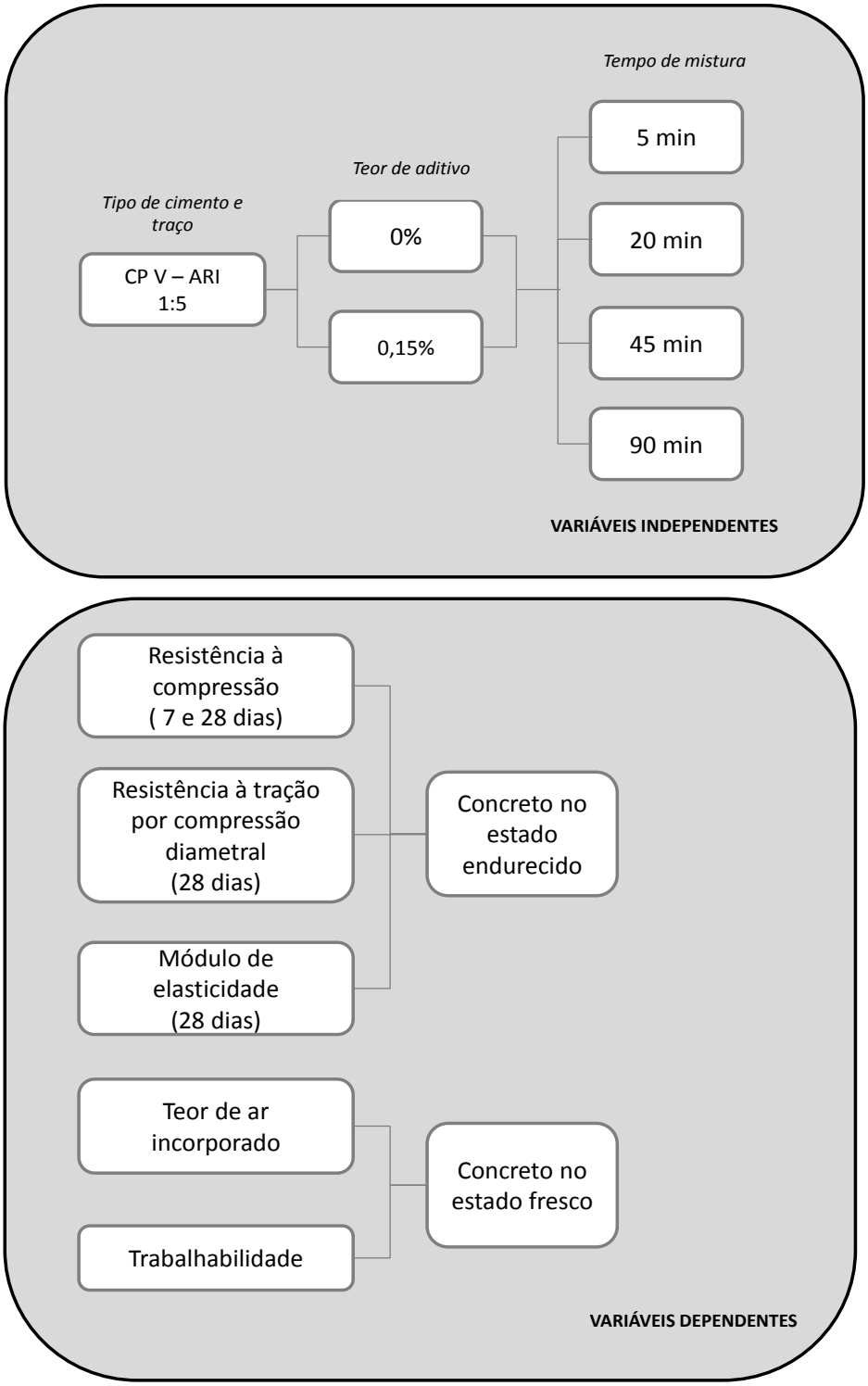
A seguir é descrito o planejamento experimental da pesquisa, seguido dos materiais utilizados, produção dos concretos e experimentos realizados.

5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A execução adequada do planejamento experimental garante maior eficiência na obtenção de informações, quando comparado a uma sequência de ensaios desestruturados, além de otimizar os recursos e tempo empregados no desenvolvimento da pesquisa. Desta maneira se pode assegurar a confiabilidade na interpretação dos dados obtidos, permitindo a realização de uma análise estatística eficiente e coerente.

Nesta fase, foram definidas as variáveis dependentes e independentes empregadas na pesquisa. Estas variáveis são apresentadas resumidamente na figura 12.

Figura 12 – Variáveis dependentes e independentes da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

Definidas as variáveis dependentes e independentes da pesquisa, pôde-se montar a matriz experimental do trabalho. O processo de escolha das variáveis e montagem da matriz experimental é melhor apresentado nos itens que seguem.

5.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, determinadas como objeto de estudo deste trabalho, têm relação com as características da qualidade do produto estudado, no caso, o concreto. Estas variáveis estão vinculadas às propriedades mecânicas do material. As variáveis dependentes selecionadas para esta pesquisa foram:

a) trabalhabilidade;
b) teor de ar incorporado;
c) resistência à compressão;
d) resistência à tração por compressão diametral;
e) módulo de elasticidade.

Cabe salientar que os parâmetros de qualidade dos concretos estudados não estão limitados somente a essas variáveis dependentes. Entretanto, devido aos recursos e tempo limitados para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se por estudar essas propriedades, as quais podem mostrar resultados coerentes e significativos frente à influência do aditivo incorporador de ar estudado e do tempo de mistura nas propriedades mecânicas do concreto.

5.1.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes são um subconjunto de parâmetros que podem exercer influência sobre as variáveis dependentes. Foram definidas como variáveis independentes nesta pesquisa:

a) teor de aditivo incorporador de ar estudado: 0 e 0,15%;
b) tempo de mistura dos materiais: 5, 20, 45 e 90 minutos;

A escolha destas variáveis independentes baseou-se em diferentes motivos. Em relação ao teor de aditivo utilizado, uma concretagem experimental foi realizada variando o teor de aditivo ao longo do tempo de mistura dos materiais e retirando amostras para cada um dos

teores. A partir disso, pode-se verificar o teor de incorporação de ar e a resistência à compressão para diferentes teores de aditivo (tabela 2) de forma a estabelecer o teor de aditivo a ser utilizado na pesquisa. Devido à indisponibilidade do cimento recomendado pelo fabricante, que deveria ser o mais puro possível, no caso CP V-ARI, a concretagem experimental foi realizada utilizando cimento CP V - ARI RS, de forma a não comprometer o cronograma da pesquisa, entretanto, para o desenvolvimento de toda a pesquisa, foi utilizado o cimento recomendado pelo fabricante (CP V - ARI RS). A partir da concretagem experimental, decidiu-se, juntamente com o representante do aditivo no Brasil, que o teor a ser utilizado na pesquisa seria de 0,15% sobre a massa de cimento. Ficou assim decidido porque o teor de aditivo recomendado pela empresa fabricante (0,2% de aditivo sobre a massa de cimento) é direcionado aos traços de concreto dosados no país de origem do aditivo (Alemanha), sendo este o primeiro estudo realizado com este aditivo no Brasil. Dessa forma, se entendeu que um estudo inicial com um teor ligeiramente menor de aditivo é válido, pois, o comportamento do aditivo em concretos dosados com materiais nacionais era desconhecido. Entretanto, é válido ressaltar que, ao analisar os resultados encontrados na concretagem experimental, o teor aditivo de 0,1% se mostra mais atraente economicamente, por empregar uma quantidade de aditivo inferior e proporcionar teores de ar semelhante ao gerados pelo teor de aditivo 0,2%. Paralelamente a isso, foi estipulado que um traço de referência com 0% de aditivo também seria produzido, auxiliando na compreensão dos resultados.

Tabela 2 – Resultados da concretagem experimental

Teor de aditivo (%)	**Teor de ar incorporado (%)**	**Resistência potencial aos 14 dias (MPa)**
0	2,1	22,4
0,1	9,1	11,7
0,2	9,35	9,8
0,3	11	9,0

(fonte: elaborado pela autora)

Enquanto isso, os tempos de mistura foram determinados com base na possibilidade de utilização deste concreto com ar incorporado por centrais de distribuição de concreto. É sabido que, o tempo necessário para descarregar um caminhão betoneira pode variar desde alguns minutos a até mesmo horas sem, contudo, ultrapassar o tempo de fim de pega do

concreto. Sendo assim, os tempos de mistura escolhidos (5, 20, 45 e 90 minutos) pretendem simular a utilização deste concreto com aditivo incorporador de ar em obras de porte variado, onde se faz uso de concretos dosados em central.

5.1.3 Matriz experimental

Com a definição das variáveis dependentes e a escolha das independentes, elaborou-se a matriz experimental adotada nesta pesquisa. A tabela 3 apresenta a matriz experimental enquanto que a tabela 4 apresenta o número de corpos de prova utilizados para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 3 – Matriz experimental da pesquisa

Traço (1:5)	**Betonada**	**FATORES CONTROLÁVEIS**		**VARIÁVEIS DE RESPOSTA**			
		Teor de aditivo (%)	**Tempo de mistura (min)**	**Resistência à compressão**	**Resistência à tração**	**Módulo de elasticidade**	**Teor de ar incorporado**
T1B1T1	1	0%	5	7 e 28 dias	28 dias	28 dias	Concreto em estado fresco
T1B1T2			20				
T1B1T3			45				
T1B1T4			90				
T1B2T1	2		5				
T1B2T2			20				
T1B2T3			45				
T1B2T4			90				
T2B1T1	1	0,15%	5				
T2B1T2			20				
T2B1T3			45				
T2B1T4			90				
T2B2T1	2		5				
T2B2T2			20				
T2B2T3			45				
T2B2T4			90				

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 4 – Número de corpos de prova por ensaio

Ensaio	Normas[4]	Idades de ensaio (dias)	Número de CP
Resistência à compressão	NBR 5739/2007	7 e 28	2 e 3
Resistência à tração	NBR 7222/2011b	28	3
Módulo de elasticidade	NBR 8522/2008	28	3
Teor de ar incorporado	NBR NM 47/2002	estado fresco	1

(fonte: elaborado pela autora)

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes do estado do Rio Grande do Sul, enquanto que o cimento e o aditivo têm como origem respectivamente o estado de Minas Gerais e a Alemanha. Na sequência está apresentada a caracterização de cada material empregado nesta pesquisa.

5.2.1 Cimento

A recomendação do fabricante do aditivo quanto ao cimento a ser utilizado no concreto com ar incorporado é de que ele deveria ser o mais puro possível. Desta forma, o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) foi escolhido para esta pesquisa. A tabela 5 apresenta um resumo da composição do cimento empregado nesta pesquisa conforme a NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991).

Tabela 5 – Composição do cimento empregado na pesquisa, segundo o fabricante

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			Norma
		Clinquer	Gesso	Calcário	
Alta resistência inicial	CP V – ARI	92	3	5	NBR 5733/1991

(fonte: adaptado de BRENNAND CIMENTOS, 2013a, [p. 1])

[4] As referências estão na lista de referências.

As tabelas 6 a 8 apresentam respectivamente a caracterização mecânica, química e física do cimento. As informações, obtidas junto ao fabricante, foram comparadas com as exigências da NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991). Complementarmente aos resultados do fabricante, foi feita a determinação da massa específica do cimento no Lamtac/Norie (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído do Núcleo Orientado para a Inovação na Construção). O resultado obtido foi de 3,08 g/cm³, estando dentro dos limites de variabilidade aceitos pela norma.

Tabela 6 – Caracterização mecânica do cimento empregado na pesquisa

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA			
Características avaliadas		**CP V - ARI**	
		Resultados obtidos	**Exigências da NBR 5733/1991**
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	30,9	≥ 14
	3 dias	45,5	≥ 24
	7 dias	50,7	≥ 34
	28 dias	55,6	-

(fonte: adaptado de BRENNAND CMENTOS, 2013b [p. 1])

Tabela 7 – Caracterização química do cimento empregado na pesquisa

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA		
Parâmetros avaliados (% da massa)	**CP V - ARI**	
	Resultados do fabricante	**Exigências da NBR 5733/1991**
MgO	1,22	≤ 6,5
SO_3	2,73	≤ 4,5
CO_2	2,53	≤ 3,0
Perda ao Fogo	3,47	≤ 4,5

(fonte: adaptado de BRENNAND CMENTOS, 2013b [p. 1])

Tabela 8 – Caracterização física do cimento empregado na pesquisa

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA		
Parâmetros avaliados	**CP V - ARI**	
	Resultados do fabricante	**Exigências da NBR 5733/1991**
Massa específica (g/cm³)	3,09	-
Área específica - Blaine (cm²/g)	4687	≥ 3000
Resíduo na Peneira #200 μm (%)	0,04	≤ 6,0
Resíduo na Peneira #325 μm (%)	0,65	-
Consistência normal (%)	30,7	-
Tempo de início de pega (min)	120	≥ 60
Tempo de fim de pega (min)	178	≤ 600
Expansão à quente (mm)	0	≤ 5,0

(fonte: adaptado de BRENNAND CMENTOS, 2013b [p. 1])

5.2.2 Agregados

Para o preparo dos concretos foi utilizado agregado graúdo e miúdo, ambos provenientes do estado do Rio Grande do Sul. Estes materiais são especificados e caracterizados nos itens a seguir.

5.2.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa consiste de uma areia de origem quartzosa natural, com distribuição granulométrica contínua. Esta foi caracterizada quanto a suas propriedades físicas, segundo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003b), determinação da massa unitária (NM 45/2006) e determinação da massa específica (NBR NM 52/2009a) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b, 2006, 2009a). Para a realização dos ensaios de caracterização as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento, possibilitando que as mesmas representassem a totalidade do material Os ensaios de caracterização foram executados no Lamtac/Norie. Na tabela 9, estão apresentados os resultados da caracterização física do agregado miúdo.

Tabela 9 – Caracterização do agregado miúdo

AGRAGADO MIÚDO		
Abertura das peneiras (mm)	**Média Retida (%)**	**Média Retida Acumulada (%)**
4,75	1	1
2,36	4	5
1,18	7	12
600µ	22	35
300µ	36	70
150µ	27	98
< 150µ	2	100
Módulo de finura		2,2
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Massa unitária (g/cm³)		1,5
Massa específica (g/cm³)		2,64

(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados da caracterização física do agregado atendem as especificações prescritas pela NBR 7211(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

5.2.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado nesta pesquisa consiste de uma brita de origem basáltica. Esta foi caracterizada quanto a suas propriedades físicas, segundo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003b), determinação da massa unitária (NM 45/2006) e determinação da massa específica (NBR NM 53/2009c). Para a realização dos ensaios de caracterização as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento, possibilitando que as mesmas representassem a totalidade do material (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b, 2006, 2009c).

Os ensaios de caracterização foram executados no Lamtac/Norie, na UFRGS. Os resultados encontrados para a caracterização física do agregado graúdo estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo

AGREGADO GRAÚDO		
Abertura das peneiras (mm)	**Média Retida (%)**	**Média Retida Acumulada (%)**
19	12	12
9,5	79	91
4,75	9	100
2,36	0	100
1,18	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo	0	100
Módulo de finura		7,11
Dimensão máxima característica (mm)		25
Massa unitária (g/cm³)		2,98
Massa específica (g/cm³)		1,38

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.3 Água

A água utilizada na dosagem dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento pública da cidade de Porto Alegre (RS).

5.2.4 Aditivo

O aditivo químico utilizado nas misturas é um incorporador de ar inorgânico em pó para concretos, a base de sais aniônicos. A quantidade de aditivo adicionada no traço do concreto estudado foi definida, como mencionado anteriormente, após uma concretagem experimental. Ficando então fixada em 0 e 0,15% de aditivo sobre a massa de cimento.

Como forma de melhor caracterizar o aditivo quanto as suas propriedades físicas, foi feita uma análise granulométrica do mesmo no Lacer (Laboratório de Cerâmicos). O diâmetro médio das partículas foi de 40,65μm.

5.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para este estudo foi definido um traço unitário intermediário (1:5), visto o interesse em testar o produto em um traço de concreto comumente utilizado na cidade de Porto Alegre, de forma a facilitar o entendimento das propriedades do aditivo em concretos convencionais produzidos na região. Foi então realizada uma determinação experimental do teor de argamassa (α), pelo método do IPT/EPUSP, o qual foi estabelecido em 53%. Para atingir o abatimento de 80 mm estabelecido inicialmente, a relação água/cimento da mistura foi de 0,48. A tabela 11 apresenta um resumo dos parâmetros da dosagem realizada na pesquisa.

Tabela 11 – Resultados da determinação do teor de argamassa

Traço unitário (1:m)	Teor de argamassa (5)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência potencial (MPa)	Consumo de cimento (kg/m³)	H (%)	Abatimento (mm)
1:5	53	0,48	48,7	383	8	80

(fonte: elaborado pela autora)

Para verificar o comportamento do aditivo na mistura, optou-se por fixar a relação água/cimento dos concretos e avaliar, pelo método *slump test*, a variação de abatimento proporcionado pelo aditivo. Desta forma, não foi tomada nenhuma medida de forma a manter o abatimento do concreto ao longo da mistura. Deve-se ressaltar também, que uma relação a/c fixa, proporcionou aos concretos um ambiente semelhante para a geração e estabilização das bolhas de ar. No trabalho de Polesello (2012) pode-se verificar o comportamento do abatimento de concretos misturados em períodos superiores ao desta pesquisa utilizando aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade.

O processo de mistura dos materiais foi efetuado em uma betoneira de eixo inclinado, previamente imprimada com uma mistura de cimento, areia e água. A escolha da betoneira de eixo inclinado foi feita tentando reproduzir a produção dos concretos dosados em central. A colocação dos materiais na betoneira seguiu a mesma ordem para todos os traços. A ordem de mistura se deu da seguinte forma: agregado graúdo; 30% de água; cimento; 30% de água; agregado miúdo; 40% da água; e aditivo incorporador de ar (quando presente).

O tempo de mistura estudado foi contabilizado imediatamente após a adição de toda a água. Quando a mistura continha aditivo este era rapidamente adicionado após a colocação de toda

a água e então se iniciava a contagem do tempo. A contagem do tempo se deu da seguinte forma: mistura durante 5 minutos, pausa para a retirada do material necessário para a moldagem dos corpos de prova e ensaio de teor de ar incorporado, mistura por mais 15 minutos, nova pausa para retirada do material, mistura por mais 25 minutos seguida de pausa para coleta do material e por fim mais 45 minutos de mistura, totalizando 90 minutos de mistura. As pausas foram extremamente rápidas (cerca de 180 segundos), de forma a evitar interferências no resultado final. Deste modo, visando agilizar o processo de retirada de material, optou-se por não realizar o ensaio de *slump test* para todos os tempos de mistura. Em relação à temperatura, os traços 1 e 2 foram moldados sob temperaturas de 11,7 e 13,3ºC respectivamente e umidade relativa de 74 e 70%. A baixa temperatura registrada no momento das moldagens pode ter retardado o início das reações.

As moldagens foram feitas com fôrmas metálicas, com o objetivo de minimizar prováveis perdas de pasta de cimento e de variabilidade dimensional entre os traços analisados. Para o adensamento foi utilizado um vibrador de imersão e o tempo de vibração foi o mesmo para todos os corpos de prova. Os corpos de prova (CP) referentes a cada traço foram moldados em duas diferentes concretagens, executadas no mesmo dia, uma logo após a outra. Isso foi necessário devido a grande quantidade de corpos de prova necessários para a realização de toda pesquisa, não sendo suficiente a realização de apenas uma concretagem por traço. Dessa forma, os CP ensaiados são provenientes de duas betonadas de mesmo traço. Os corpos de prova foram então identificados com relação ao traço, T1 e T2, respectivamente sem e com aditivo; em relação à betonada, B1 e B2; e em relação ao tempo de mistura, T1, T2, T3 e T4, respectivamente 5, 20, 45 e 90 minutos de mistura.

5.4 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os métodos dos ensaios empregados neste programa experimental são explicitados nos itens a seguir.

5.4.1 Abatimento

A determinação do abatimento de tronco de cone do concreto foi feita de acordo com a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). O ensaio foi realizado com o concreto no estado fresco no tempo inicial, logo após a colocação de todo o

material, e ao final da mistura, aos 90 minutos. No traço com aditivo, o ensaio também foi realizado aos 5 minutos de mistura, de forma a avaliar a modificação do abatimento devido à introdução do aditivo. Como mencionado anteriormente, o ensaio do *slump test* não foi realizado para todos os tempos de forma a não interferir na logística da retirada dos corpos de prova.

5.4.2 Ar incorporado

A determinação do ar incorporado foi feita de acordo com a NBR NM 47/2002. Conforme a Norma, neste ensaio se utilizou um aparelho de medição de ar incorporado com capacidade para 8 litros de concreto (figura 15). A execução do concreto foi feita seguindo as prescrições da NBR 5738/2003a. O ensaio foi realizado no concreto em estado fresco, ao mesmo tempo em que os corpos de prova cilíndricos eram moldados. No programa experimental, tem-se um total de 8 combinações relacionando o tempo de mistura e o teor de aditivo utilizado, contudo, devido à divisão dos traços em duas betonadas, foram ensaiados um total de 16 corpos de prova para o teor de ar incorporado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, 2003a).

Figura 13 – Ensaio de teor de ar incorporado

(fonte: foto da autora)

Além do ensaio de teor de ar incorporado, foram feitas imagens das amostras aos 28 dias utilizando uma lupa estereoscópica de forma a compreender melhor a distribuição dos poros no interior do compósito.

5.4.3 Resistência à compressão uniaxial

O método de ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto seguiu as determinações da NBR 5739/2007. Os corpos de prova cilíndricos utilizados neste ensaio foram moldados e, posteriormente retificados, de acordo com a NBR 5738/2003a. Foram ensaiados dois corpos de prova à compressão aos 07 dias e cinco aos 28 dias. Os dois primeiros CP rompidos aos 28 dias foram utilizados para determinar a carga que seria utilizada no ensaio de módulo de elasticidade. Os outros três corpos de prova foram utilizados primeiramente no ensaio de módulo de elasticidade e após isso foram rompidos à compressão, conforme determina a NBR 8522/2008. No total foram 56 corpos de prova rompidos à compressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, 2007, 2008).

Após a moldagem os corpos de prova foram cobertos por um plástico, não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto para o ambiente externo. Estes foram armazenados em superfície horizontal rígida e em ambiente fechado, livre da ação de intempéries, durante as primeiras 24 horas. Na sequência, os CP foram desmoldados e mantidos em cura úmida (UR ≥ 95% e temperatura de 23 ± 2 ºC) até o momento da realização do ensaio. Por conta de problemas com o equipamento utilizado, o traço com 0,15% de aditivo foi rompido aos 28 dias em um equipamento diferente dos demais, sendo possível que pequenas alterações sejam encontradas nos seus resultados.

5.4.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com NBR 7222/2011b. Conforme a norma os corpos de prova empregados nesse ensaio foram moldados de acordo com a NBR 5738/2003a. Foram ensaiados três CP à tração por compressão diametral, aos 28 dias, para cada combinação de tempo de mistura, totalizando 24 corpos de prova. Da mesma maneira como para o ensaio de resistência à compressão, os CP foram revestidos por um plástico imediatamente após o processo de moldagem, no local onde seriam armazenados durante as primeiras 24 horas. Após isso, os CP foram desmoldados e mantidos em cura úmida (UR ≥ 95% e temperatura de 23 ± 2 ºC) até o momento da realização do ensaio. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é apresentado na figura 13 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, 2011b).

Figura 14 – Ensaio de tração por compressão diametral

(fonte: foto da autora)

5.4.5 Módulo de elasticidade

O método utilizado no ensaio de módulo de elasticidade segue as prescrições da NBR 8522/2008. Conforme a norma os corpos de prova utilizados nesse ensaio foram produzidos de acordo com a NBR 5738/2003a. Foram ensaiados, aos 28 dias, três corpos de prova por combinação de tempo de mistura e teor de aditivo, totalizando 24 CP. Após a moldagem os corpos de prova foram cobertos por um plástico, não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto para o ambiente externo. Estes foram armazenados em superfície horizontal rígida e em ambiente fechado, livre da ação de intempéries, durante as primeiras 24 horas. Na sequência, os CP foram desmoldados e mantidos em cura úmida (UR ≥ 95% e temperatura de 23 ± 2 ºC) até o momento da realização do ensaio. A metodologia de ensaio utilizada é metodologia B da norma, cujas tensões são fixas e é medida a deformação do corpo-de-prova. Finalizado o ensaio de módulo de elasticidade os corpos de prova foram rompidos à compressão de acordo com a NBR 5739/2007. Este ensaio também foi afetado por problemas com o equipamento, sendo os resultados do traço com 0,15% de aditivo obtidos a partir de um equipamento diferente do utilizado no ensaio com 0% de aditivo. Na figura 14, observa-se o equipamento utilizado no ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, 2007, 2008).

Figura 15 – Ensaio de módulo de elasticidade

(fonte: foto da autora)

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados referentes aos ensaios de teor de ar incorporado, resistência à compressão uniaxial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

6.1 TEOR DE AR INCORPORADO E ABATIMENTO

A resposta do concreto as tensões aplicadas depende de como diferentes fatores afetam a porosidade dos diferentes componentes do compósito. Desta forma, a quantidade de vazios presentes na pasta de cimento pode ser um bom indicativo do comportamento do concreto quando submetido a carregamentos. Concretos com grande quantidade de ar incorporado tendem a ser menos resistentes e mais deformáveis, de forma que, ao se projetar elementos de concreto que utilizem incorporadores de ar, essas variações de resistência e rigidez devem ser consideradas.

A seguir, na tabela 12, são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de teor de ar incorporado.

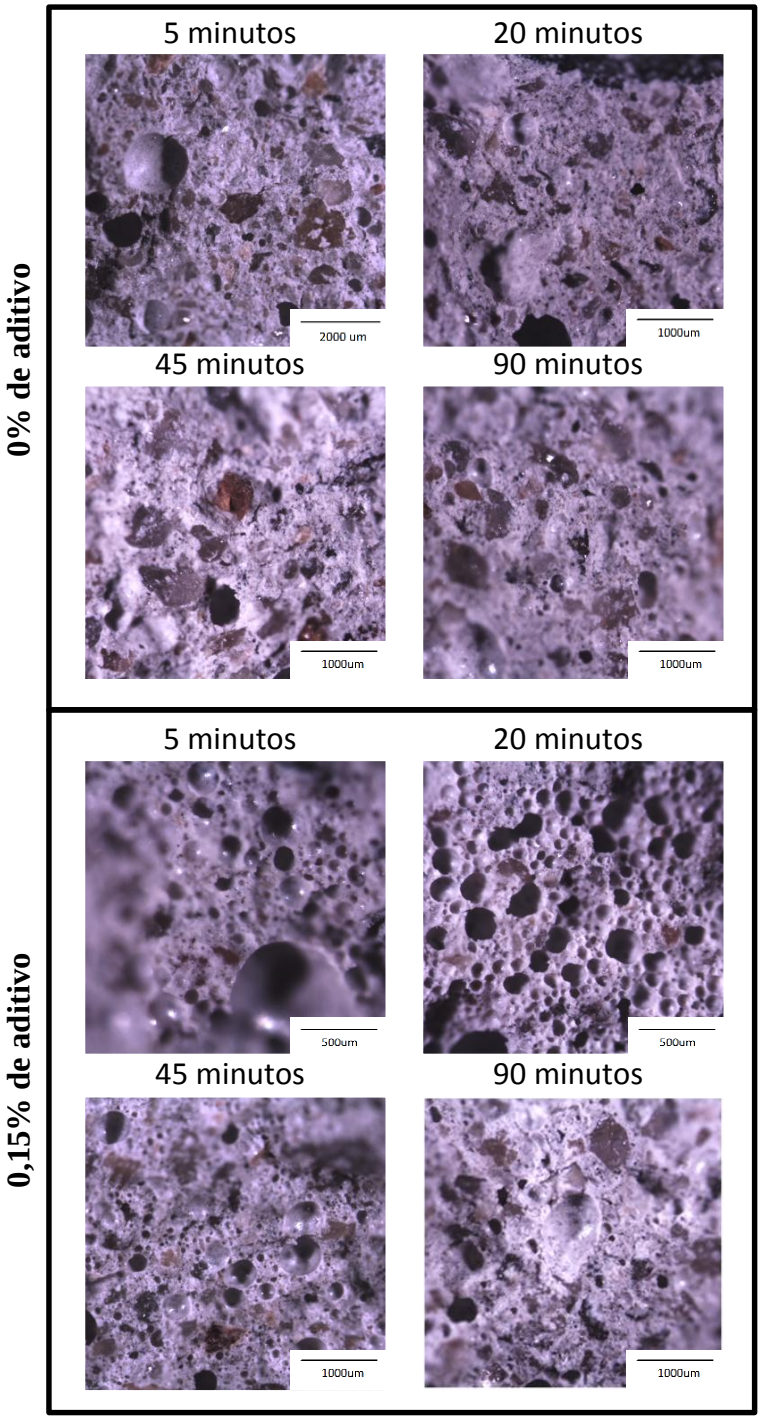
Tabela 12 – Resultados encontrados para o teor de ar

Teor de ar (%)						
Tempo de mistura (min)	**Traço 1 (0% de aditivo)**			**Traço 2 (0,15% de aditivo)**		
	Betonada 1	**Betonada 2**	**Média**	**Betonada 1**	**Betonada 2**	**Média**
5	2,6	2,5	2,55	9,5	9,9	9,7
20	2,5	2,5	2,5	11,0	11,5	11,3
45	3,2	3,4	3,3	8,8	10,0	9,4
90	5,4	5,8	5,6	4,9	5,4	5,2

(fonte: elaborado pela autora)

No quadro 1 é possível comparar as imagens encontradas para as amostras com aditivo em relação ao concreto de referência.

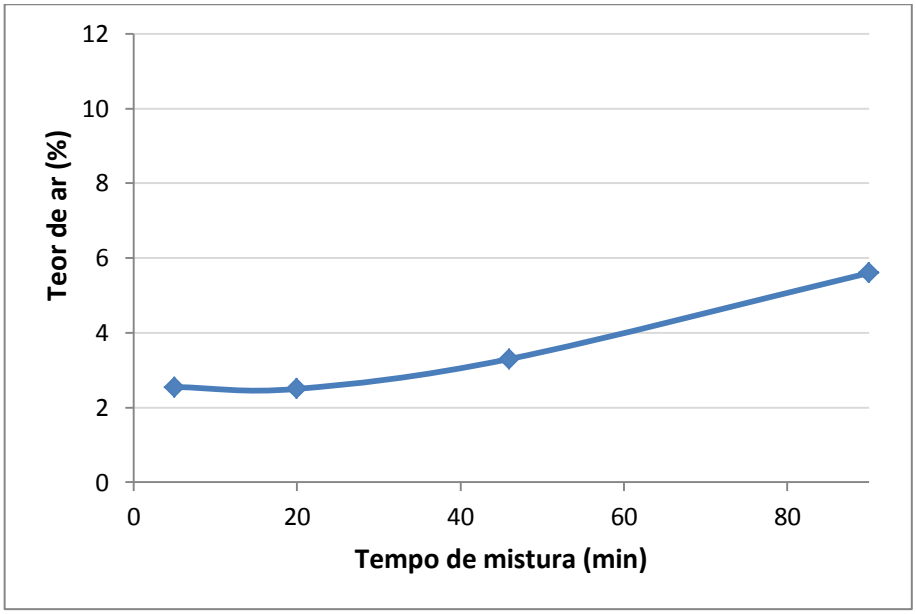
Quadro 1 – Imagens obtidas com a lupa estereoscópica



(fonte: elaborado pela autora)

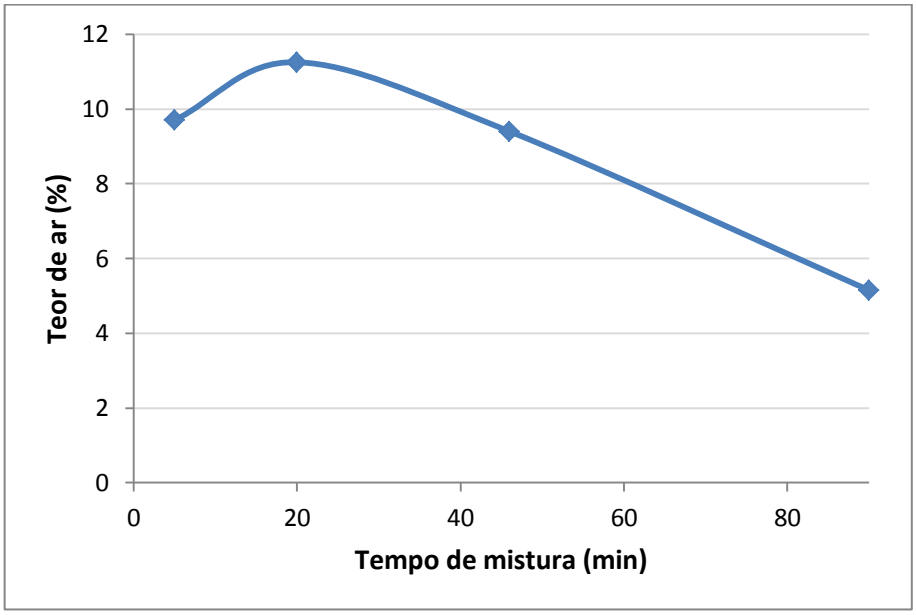
Nas figuras 16 e 17, é possível verificar as variações encontradas nos resultados para o teor de ar incorporado ao longo da mistura.

Figura 16 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0% de aditivo



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 17 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0,15% de aditivo



(fonte: elaborado pela autora)

Analisando o comportamento das curvas encontradas é possível concluir que, para o concreto de referência, o teor de ar aumentou com o aumento do tempo de mistura, diferentemente do traço com aditivo. O traço com aditivo apresentou o comportamento esperado em relação ao teor de ar, mostrando um acréscimo até o tempo de 20 minutos, seguido de uma redução para

os demais tempos avaliados. A diminuição pode estar associada com a perda de parte da água de amassamento ao longo da mistura, comprometendo a geração e estabilização das bolhas de ar. Segundo o ACI 211.2-98 – *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete* (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, tradução nossa), o teor de ar total recomendado, para um concreto dosado sem aditivo e com dimensão máxima de agregado de 20 mm, é de 2%. Aos 90 minutos, no traço de referência, foi encontrado um valor de 5,6% para o teor de ar, tal aumento pode ter sido consequência de adensamento insuficiente. Como o tempo de adensamento foi fixo para todos os traços, ele pode não ter sido suficiente para o tempo de 90 minutos, pois neste ponto a mistura estava visivelmente mais seca devido à possível perda de parte da água de amassamento.

A perda de água de amassamento foi comprovada com a realização do ensaio de *slump test* no tempo final de 90 minutos. O ensaio foi realizado neste momento, pois somente após 45 minutos de mistura o concreto apresentou-se visualmente comprometido. Os valores encontrados no ensaio de *slump test*, tanto no inicio quanto no final da mistura, estão apresentados na tabela 13, onde também é possível verificar o efeito do aditivo sobre o abatimento do concreto.

Tabela 13 – Resultados encontrados para o ensaio *slump test*

Slump (mm)				
Tempo de mistura (min)	**Traço 1 (0% de aditivo)**		**Traço 2 (0,15% de aditivo)**	
	Betonada 1	**Betonada 2**	**Betonada 1**	**Betonada 2**
Antes	80	80	90*	100*
5	-	-	165	160
90	0	0	35	25

* Antes da adição do aditivo

(fonte: elaborado pela autora)

Segundo Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa), a diminuição do abatimento é um fenômeno normal e ocorre quando a água livre de uma mistura de concreto é consumida pelas reações de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e por evaporação. Sob condições normais, nos primeiros 30 minutos de mistura, a perda de abatimento é insignificante. Após este período, o concreto passa a perder abatimento a uma determinada taxa que é função principalmente da hidratação, da temperatura, da composição do cimento e dos aditivos presentes.

Os resultados apresentados para o teor de ar incorporado e abatimento, serviram de embasamento para a análise das propriedades mecânicas dos concretos estudados. Sem estes resultados a análise dos parâmetros se tornaria mais difícil. Desta forma, as análises apresentadas na sequência fazem uso dos resultados apresentados neste item.

6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão é uma propriedade de extrema importância na avaliação das estruturas de concreto, pois fornece uma boa indicação da qualidade do material. Logo, ela é o parâmetro mais utilizado em projetos estruturais, pois está relacionada com a capacidade do concreto em resistir aos esforços sem colapsar. Os resultados para a resistência à compressão uniaxial aos 28 dias para os concretos estudados encontram-se na tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias

CP	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
T1B1T1	51,2	50,5	1,4	2,70
T1B2T1	49,0			
T1B2T1	51,5			
T1B1T2	50,9	53,3	2,1	4,01
T1B1T2	54,1			
T1B2T2	55,0			
T1B1T3	48,2	50,6	2,2	4,25
T1B2T3	51,6			
T1B2T3	52,2			
T1B1T4	53,7	55,6	1,8	3,20
T1B1T4	57,3			
T1B2T4	55,9			
T2B1T1	27,6	26,7	1,1	4,05
T2B2T1	25,5			
T2B2T1	26,9			
T2B1T2	18,3	18,3	1,1	5,86
T2B1T2	17,3			
T2B2T2	19,4			
T2B1T3	23,1	22,1	0,9	4,19
T2B2T3	21,9			
T2B2T3	21,2			
T2B1T4	44,1	44,5	1,3	2,85
T2B1T4	43,5			
T2B2T4	45,9			

(fonte: elaborado pela autora)

Na tabela 15, estão apresentados os valores obtidos para a resistência à compressão aos 7 dias, servindo como uma forma de controle do ganho de resistência dos concretos.

Tabela 15 – Resistência à compressão uniaxial aos 7 dias

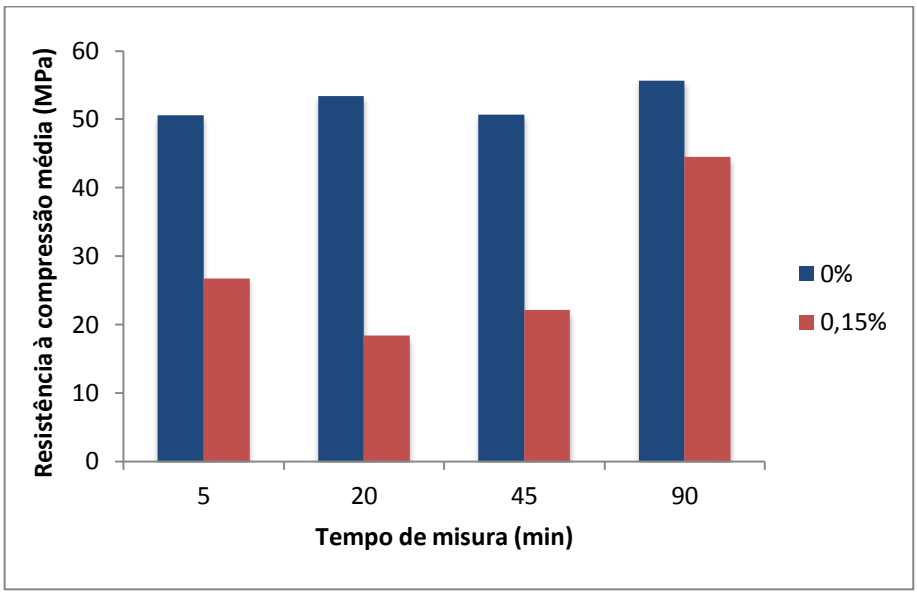
CP	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	CP	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
T1B1T1	33,5	T2B1T1	24,8
T1B2T1	40,0	T2B2T1	22,7
T1B1T2	42,0	T2B1T2	17,4
T1B2T2	42,4	T2B2T2	19,4
T1B1T3	41,6	T2B1T3	17,7
T1B2T3	43,9	T2B2T3	19,8
T1B1T4	44,7	T2B1T4	33,5
T1B2T4*	31,6	T2B2T4	33,1

* Valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados apresentados nas tabelas 14 e 15 mostram que aos 7 dias o concreto já havia atingido em média 80% da resistência final. Condição esperada para o cimento utilizado (CP V-ARI). Na figura 18 pode-se observar um comparativo das médias aos 28 dias dos resultados encontrados para os concretos produzidos com e sem aditivo incorporador de ar em relação aos tempos de mistura.

Figura 18 – Média dos resultados de resistência à compressão uniaxial aos 28 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Após a obtenção dos resultados, foi realizado um tratamento dos dados obtidos, onde se buscou excluir os valores espúrios. O parâmetro utilizado para tal foi o desvio padrão global das amostras. Amostras fora do intervalo de [-1,5*desvio padrão global; +1,5*desvio padrão global] foram consideradas espúrias. Na análise dos dados obtidos para a resistência à compressão, não foram encontrados valores espúrios.

Os resultados faram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Esta análise buscou avaliar se as variáveis independentes e sua interação causam efeito significativo na variável dependente estudada, neste caso, resistência à compressão uniaxial. Os resultados obtidos pelo método ANOVA podem ser encontrados na tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância para a resistência à compressão uniaxial

	GLD	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Teor de aditivo	1	3646,73	1534,06	0,000000	S
Tempo de mistura	3	266,76	112,22	0,000000	S
Teor*Tempo	3	152,89	64,32	0,000000	S
Erro	16	2,38			

GLD: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática FC: valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo
Se p < 5% = valor significativo

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando a tabela 16 é possível verificar que, entre os efeitos isolados das variáveis independentes ou controláveis, tanto o teor de aditivo, quanto o tempo de mistura dos materiais foram significativos na variável dependente analisada. Além disso, a interação entre as duas variáveis de controle também se mostrou significativa.

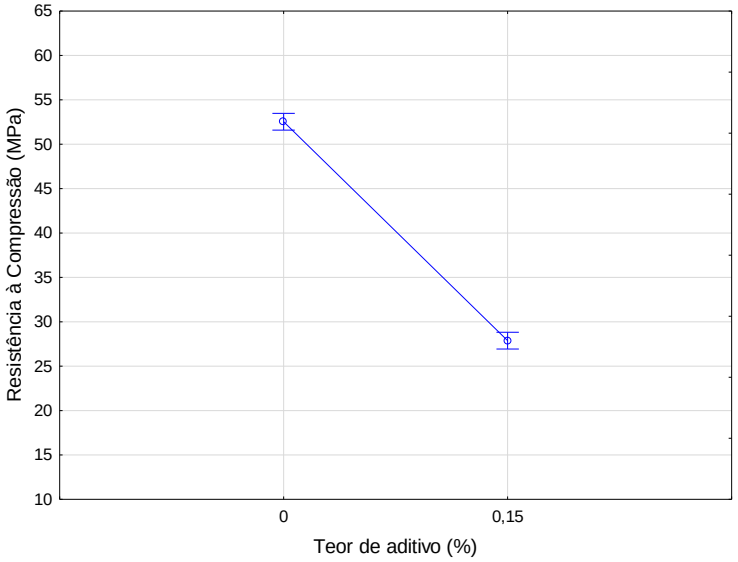
A seguir serão analisados os efeitos das variáveis independentes, bem como de sua interação.

6.2.1 Efeito do teor de aditivo

Os aditivos incorporadores de ar são conhecidos por gerar, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar. Apesar da presença das bolhas trazer alguns benefícios ao compósito, como aumento da trabalhabilidade e resistência à ciclos de congelamento e descongelamento, uma das principais preocupações associadas ao seu uso é o efeito sobre a resistência à compressão do concreto.

A figura 19 mostra a tendência de comportamento para o teor de aditivo na resistência à compressão dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 5.3, a relação água/cimento foi mantida constante (0,48) nos diferentes traços estudados.

Figura 19 – Efeito isolado do teor de aditivo na resistência à compressão uniaxial



(fonte: elaborado pela autora)

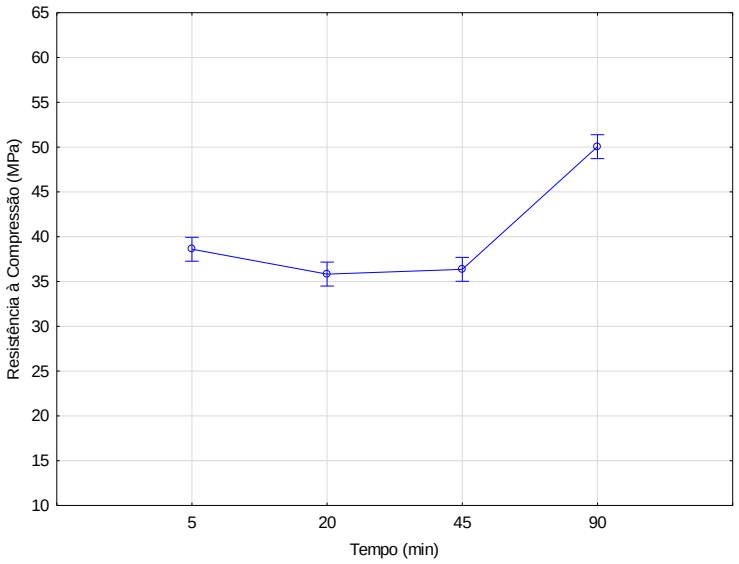
Através da figura é possível verificar a influência do teor de aditivo na resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados, para uma mesma relação água/cimento. A análise de variância mostra que os resultados encontrados para os concretos produzidos com um teor de 0,15% de aditivo diferem significativamente do traço de referência dosado sem aditivo (0%). Segundo o ACI 211.1-91 – *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002, tradução nossa), para um concreto relação a/c de 0,48, dosado com aditivo incorporador de ar, a resistência à compressão média é de aproximadamente 27 MPa. Aos 5 minutos de mistura, com um teor de ar de 9,7%, o concreto com aditivo apresentou uma resistência média semelhante à descrita na norma, 26,7 MPa mesmo com a maior incorporação de ar. Contudo para um teor semelhante de ar, aos 45 minutos, a resistência média atingiu valores mais baixos, em torno de 22 MPa.

Cabe salientar que os resultados desta análise apresentam somente uma tendência de comportamento para o fator de controle, teor de aditivo, frente à variável dependente resistência à compressão.

6.2.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais

A figura 20 mostra a influência do tempo de mistura dos materiais para cada um dos teores de aditivo estudados. Tal figura foi obtida através dos resultados de resistência à compressão dos traços estudados, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Para a análise de significância entre os tempos de mistura, foi realizado o teste de Fisher.

Figura 20 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial



(fonte: elaborado pela autora)

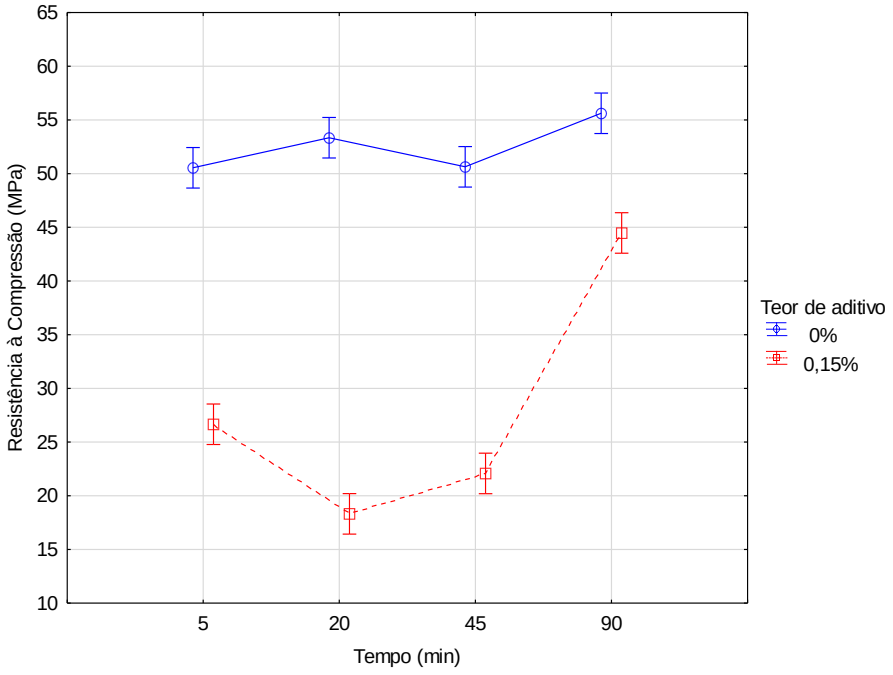
Através da figura e dos resultados obtidos com o teste de Fisher, pode-se observar que apenas os tempos de 20 e 45 minutos não diferiram significativamente entre si, todos os outros tempos apresentaram diferenças significativas entre si. Além disso, observa-se que o tempo de 90 minutos apresentou resistência superior aos demais tempos estudados. Tal fato pode estar associado com a perda de parte da água ao longo da mistura, que resultou em uma maior resistência à compressão. Mehta e Monteiro (c2006, tradução nossa) afirmam que a perda de água até os 30 minutos de mistura, em condições normais, é insignificante. Devido à logística

de retirada dos corpos de prova, não foi possível confirmar se aos 45 minutos houve perda significativa de abatimento, contudo, neste tempo o concreto ainda estava visualmente aceitável.

6.2.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo

A figura 21 apresenta o efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais frente à resistência à compressão uniaxial do concreto. A figura foi obtida através dos resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

Figura 21 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial



(fonte: elaborado pela autora)

Através da figura, evidencia-se que os concretos produzidos utilizando o aditivo incorporador de ar estudado atingiram resistências significativamente mais baixas que o traço de referência (0% de aditivo). Em relação ao traço de referência, o teste de Fisher demonstrou que os tempos de 5 e 45 minutos e 20 e 90 minutos não apresentaram diferenças significativas entre si. Para o traço com 0,15% de aditivo, todos os tempos apresentarem diferenças significativas,

não existindo uma tendência clara de comportamento entre os resultados obtidos. No entanto, é possível realizar algumas observações. O tempo com menor resistência à compressão foi o de 20 minutos, esta baixa resistência pode ser justificada pelo teor de incorporação de ar atingido neste tempo 11,3%, o maior teor encontrado (vide tabela 12). Aos 90 minutos, registrou-se o menor teor de incorporação de ar para este traço, 5,2%, o que pode ser justificado pela menor quantidade de água disponível para a geração e estabilização das bolhas de ar. Tal perda de água ao final da mistura também foi comprovada com o ensaio do *slump test*, que indicou um abatimento de 30 mm. Cabe salientar que, para o traço referência, tal comportamento também foi verificado com o mesmo tempo de mistura.

Neville (1982, tradução nossa) estima que, para um teor de ar de 8%, a redução na resistência pode chegar a mais de 40%, sendo que, até este ponto ela decresce linearmente com o aumento do teor de ar incorporado. O concreto produzido com o aditivo estudado mostrou resultados semelhantes aos descritos por Neville. Aos 5 minutos de mistura, com um teor de ar médio de 9,7% a redução de resistência foi de 47%, chegando aos 65% aos 20 minutos com teor de ar de 11,3%.

6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Embora o concreto não seja suficientemente resistente a esforços de tração, esta propriedade também deve ser avaliada ao se realizar um estudo mais criterioso. Tal propriedade é um indicativo da qualidade do concreto, uma vez que está diretamente ligada às propriedades da pasta de cimento endurecida. Em projetos estruturais esta propriedade deve ser considerada, pois está relacionada com a capacidade do elemento em resistir aos esforços de tração sem entrar em colapso.

Os resultados para a resistência à tração por compressão diametral para os concretos estudados encontram-se na tabela 17. Na figura 22 pode-se observar um comparativo das médias dos resultados encontrados para os concretos produzidos com e sem aditivo incorporador de ar em relação aos tempos de mistura estudados.

Tabela 17 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

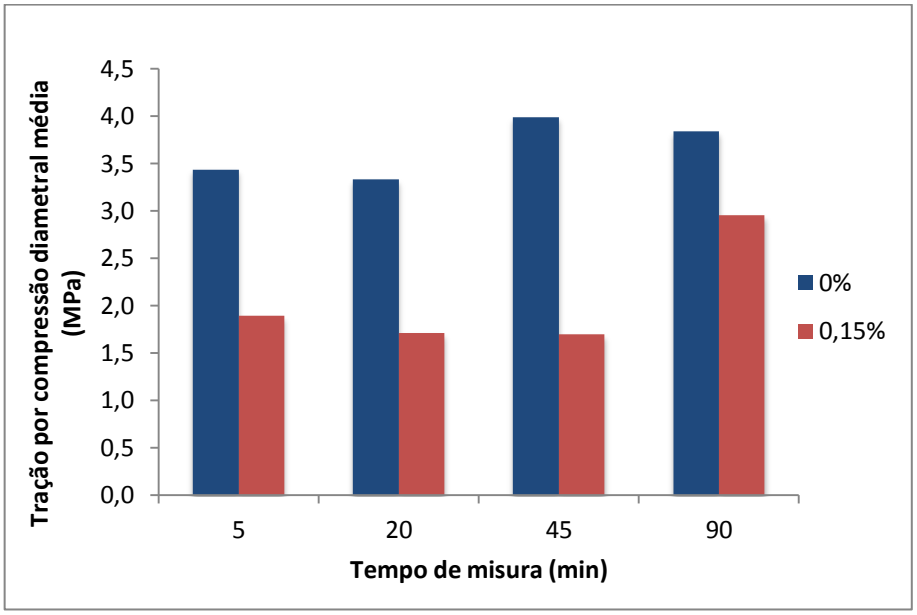
CP	Resistência à tração aos 28 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
T1B1T1	3,7	3,4	0,3	7,75
T1B1T1	3,1			
T1B2T1	3,5			
T1B1T2	3,5	3,3	0,2	4,77
T1B2T2	3,2			
T1B2T2	3,3			
T1B1T3	4,1	4,0	0,1	2,59
T1B1T3	3,9			
T1B2T3	4,0			
T1B1T4	2,4*	3,4	0,8	25,14
T1B2T4	4,0			
T1B2T4	3,7			
T2B1T1	2,1	1,9	0,3	13,26
T2B1T1	1,6			
T2B2T1	2,0			
T2B1T2	1,5	1,7	0,2	9,25
T2B2T2	1,8			
T2B2T2	1,8			
T2B1T3	1,6	2,0	0,5	27,73
T2B1T3	1,7			
T2B2T3	2,6*			
T2B1T4	3,1	3,0	0,4	12,85
T2B2T4	3,3			
T2B2T4	2,5			

* Valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

Após a obtenção dos resultados, foi realizado um tratamento dos dados obtidos, onde se buscou excluir os valores espúrios. O parâmetro utilizado para tal foi o desvio padrão global das amostras. Amostras fora do intervalo de [-1,5*desvio padrão global; +1,5*desvio padrão global] foram consideradas espúrias. Na análise dos dados obtidos para a resistência à tração, foram considerados espúrios os resultados encontrados para as amostras T1B1T4 e T2B2T3. Ao excluir estas resultados os novos valores encontrados para os conjuntos de amostras são respectivamente 3,8 MPa e 1,7 MPa para a média, 0,25 MPa e 0,07 MPa para o desvio padrão e 6,56% e 4,23% para o coeficiente de variação.

Figura 22 – Média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Esta análise buscou avaliar se as variáveis independentes e sua interação causam efeito significativo na variável dependente resistência à tração por compressão diametral. Os resultados obtidos pelo método ANOVA podem ser encontrados na tabela 18.

Tabela 18 – Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral

	GLD	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Teor	1	13,64	255,68	0,000000	S
Tempo	3	0,76	14,18	0,000159	S
Teor*tempo	3	0,42	7,93	0,002475	S
Erro	14	0,05			

GLD: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática FC: valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo
Se p < 5% = valor significativo

(fonte: elaborado pela autora)

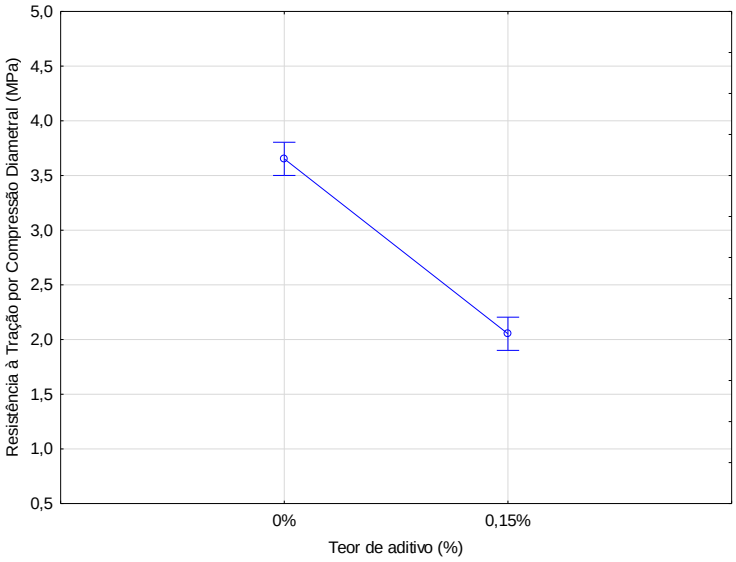
Analisando a tabela 18 é possível verificar que, entre os efeitos isolados das variáveis independentes, tanto o teor de aditivo, quanto o tempo de mistura dos materiais foram significativos na variável dependente analisada. Além disso, a interação também se mostrou significativa.

A seguir serão analisados os efeitos das variáveis independentes, bem como de sua interação.

6.3.1 Efeito do teor de aditivo

A figura 23 mostra a tendência de comportamento para o teor de aditivo na resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 5.3, a relação água/cimento foi mantida constante (0,48) nos diferentes traços estudados.

Figura 23 – Efeito isolado do teor de aditivo na resistência à tração por compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)

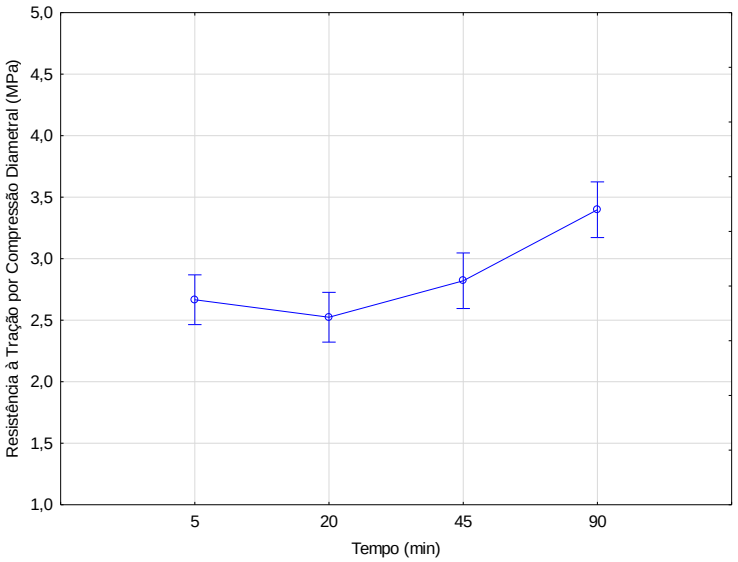
Através da figura é possível verificar a influência do teor de aditivo na resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados. A análise de variância mostra que os resultados encontrados para os concretos feitos com um teor de 0,15% de aditivo diferem significativamente do traço de referência que não utilizou aditivo (0%). Tal comportamento mostrou que o aditivo, assim como os demais incorporadores de ar, introduziu no compósito uma quantidade significativa de vazios de ar, comprometendo assim sua resistência à tração por compressão diametral. A redução de resistência apresentada pelo traço com 0,15% de aditivo foi de aproximadamente 43% em relação ao traço de referência.

Cabe salientar que os resultados desta análise apresentam somente uma tendência de comportamento para o fator de controle, teor de aditivo, frente à variável dependente tração por compressão diametral.

6.3.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais

A figura 24 mostra a influência do tempo de mistura dos materiais Tal figura foi obtida através dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos traços estudados, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Para a análise de significância entre os tempos de mistura foi realizado o teste de Fisher.

Figura 24 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à tração por compressão diametral



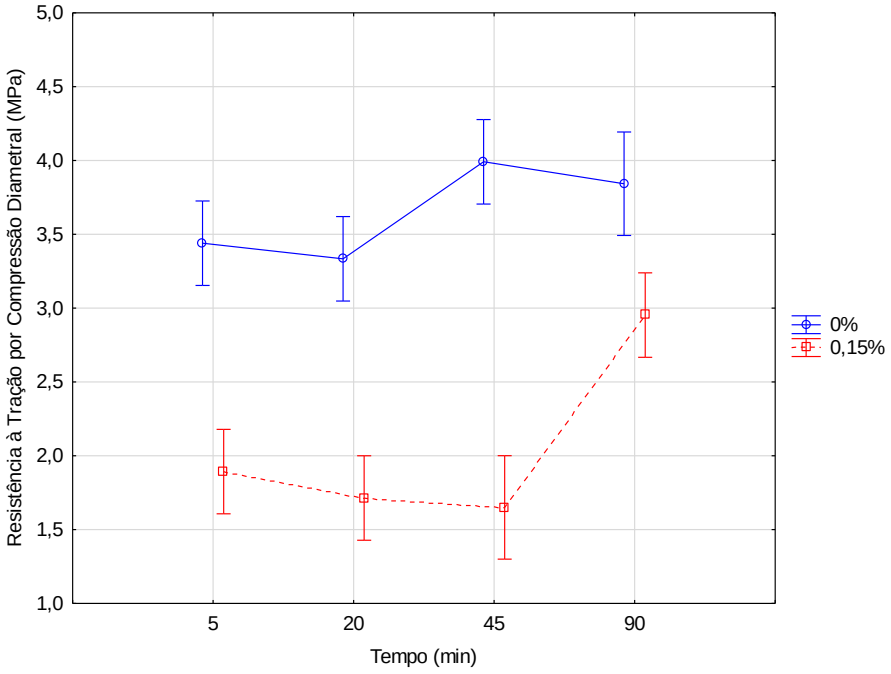
(fonte: elaborado pela autora)

Através da figura 24 e dos resultados obtidos através do teste de Fisher percebe-se que não houve diferenças significativas entre os tempos de 5 e 20 minutos e 45 e 90 minutos. Além disso, observa-se que o aumento do tempo de mistura resultou em um ganho de resistência. Este fato, como explicado anteriormente, pode estar relacionado com a redução da relação água/cimento à medida que o tempo de mistura aumenta.

6.3.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo

A figura 25 apresenta o efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais frente à resistência à tração por compressão diametral do concreto. Tal figura foi obtida através dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

Figura 25 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura na resistência à tração por compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)

Através da figura, evidencia-se que os concretos produzidos utilizando o aditivo incorporador de ar estudado atingiram resistências significativamente mais baixas que o traço de referência (0% de aditivo). Em relação ao traço de referência (0% de aditivo), houve diferenças significativas entre os tempos de mistura estudados. A partir do teste de Fisher se pode verificar que os tempos de 5 e 20 minutos e 45 e 90 minutos não apresentaram diferenças significativas entre si. Além disso, percebe-se que os dois primeiros tempos apresentaram resultados ligeiramente inferiores aos encontrados nos dois últimos tempos, sendo que o tempo de 45 minutos apresentou o maior valor de de resistência à tração por compressão diametral. Os tempos de 5 e 45 minutos, 20 e 45 minutos e 20 e 90 minutos apresentaram diferenças significativas ente si.

Para o traço executado com um teor de 0,15% de aditivo, o tempo de 90 minutos apresentou diferença significativa em relação aos demais tempos estudados. O que pode estar relacionado, como mencionado anteriormente, à menor quantidade de água de amassamento disponível na mistura neste tempo, o que foi comprovado com o ensaio do *slump test*. Em relação aos tempos de 5, 20 e 45 minutos, não é possível afirmar que a variação do tempo de mistura influenciou de forma significativa os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com aditivo.

6.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais e serve como um estimador da rigidez de um sólido. Desta forma, ele é um dos parâmetros utilizados pelos projetistas estruturais ao relacionarem a tensão aplicada à estrutura de concreto com a deformação instantânea obtida. Ter conhecimento do valor do módulo de elasticidade do concreto permite compreender melhor o comportamento da estrutura quando submetida à tensões de carregamento.

Os resultados para módulo de elasticidade para os concretos estudados encontram-se na tabela 19. Na figura 26 pode-se observar um comparativo das médias dos resultados encontrados para os concretos produzidos com e sem aditivo incorporador de ar em relação aos tempos de mistura estudados.

Tabela 19 – Módulo de elasticidade aos 28 dias

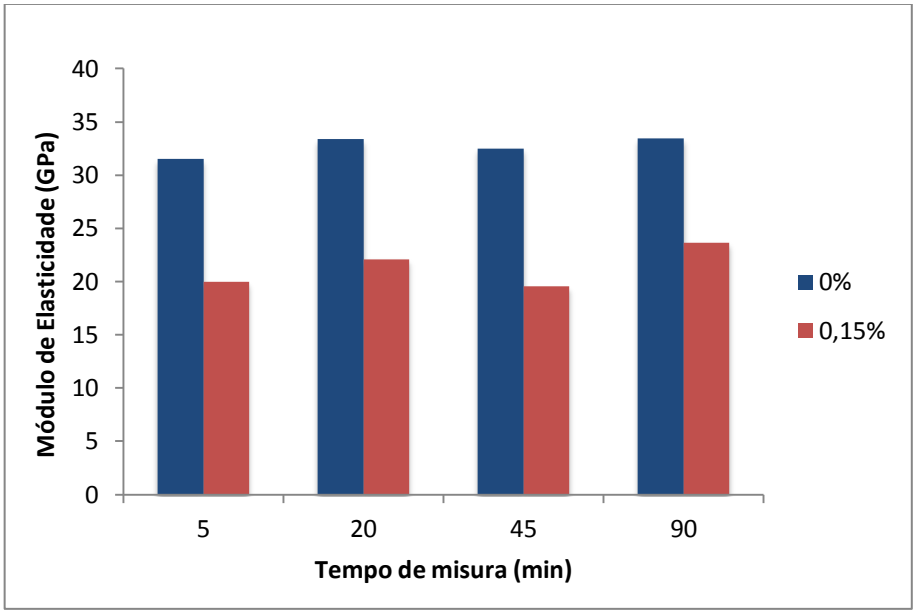
CP	Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coeficiente de variação (%)
T1B1T1	31,2	31,5	0,4	1,12
T1B2T1	31,7			
T1B2T1	40,1*			
T1B1T2	33,8	33,4	1,2	3,63
T1B1T2	32,0			
T1B2T2	34,3			
T1B1T3	32,0	32,5	1,0	2,94
T1B2T3	31,9			
T1B2T3	33,6			
T1B1T4	34,5	33,4	2,2	6,59
T1B1T4	34,9			
T1B2T4	30,9			

T2B1T1	19,2	20,0	0,9	4,44
T2B2T1	20,9			
T2B2T1	19,8			
T2B1T2	20,1	22,1	1,8	7,98
T2B1T2	22,6			
T2B2T2	23,6			
T2B1T3	18,1	19,5	2,1	10,66
T2B2T3	21,9			
T2B2T3	18,5			
T2B1T4	24,8	23,6	1,3	5,32
T2B1T4	23,8			
T2B2T4	22,3			

* Valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 26 – Média dos resultados de módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pela autora)

Após a obtenção dos resultados, foi realizado um tratamento dos dados obtidos, onde se buscou excluir os valores espúrios. O parâmetro utilizado para tal foi o desvio padrão global das amostras. Amostras fora do intervalo de [-1,5*desvio padrão global; +1,5*desvio padrão global] foram consideradas espúrias. Na análise dos dados obtidos para o módulo de elasticidade foi considerado espúrio o valor correspondente à amostra T1B2T1. Ao excluir este resultado os novos valore encontrados para este conjunto de amostras são 31,5 GPa para a média, 0,35 GPa para o desvio padrão e 1,12% para o coeficiente de variação.

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Esta análise buscou avaliar se as variáveis independentes e sua interação causam efeito significativo na variável dependente módulo de elasticidade. Os resultados obtidos pelo método ANOVA podem ser encontrados na tabela 20.

Tabela 20 – Análise de variância para o módulo de elasticidade

	GLD	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Teor	1	731,43	320,83	0,000000	S
Tempo	3	10,35	4,54	0,018668	S
Teor*tempo	3	2,53	1,11	0,376483	NS
Erro	15	2,28			

GLD: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática FC: valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo
Se p < 5% = valor significativo

(fonte: elaborado pela autora)

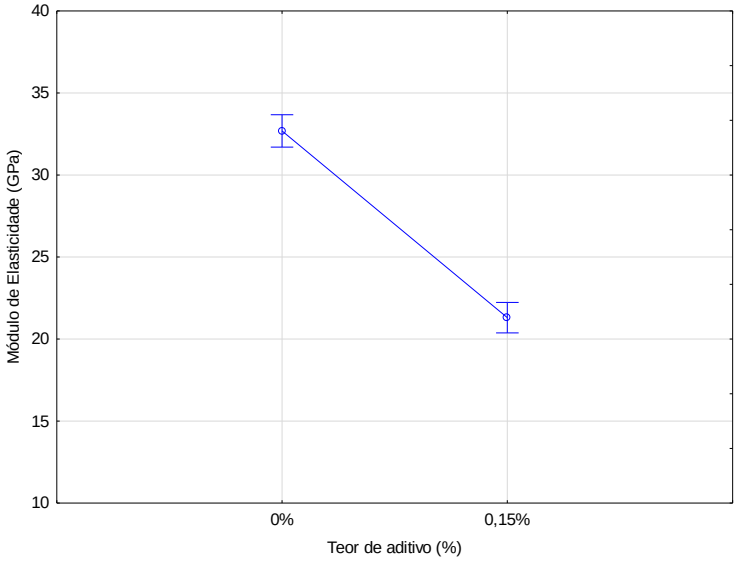
Analisando a tabela 20 é possível verificar que os efeitos isolados do teor de aditivo e do tempo de mistura foram significativos na variável dependente analisada, contudo a interação entre ambos não mostrou diferença estatística significativa.

A seguir serão analisados os efeitos das variáveis independentes, bem como de sua interação.

6.4.1 Efeito do teor de aditivo

A figura 27 mostra a tendência de comportamento para o teor de aditivo no módulo de elasticidade dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 5.3, a relação água/cimento foi mantida constante (0,48) nos diferentes traços estudados.

Figura 27 – Efeito isolado do teor de aditivo no módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pela autora)

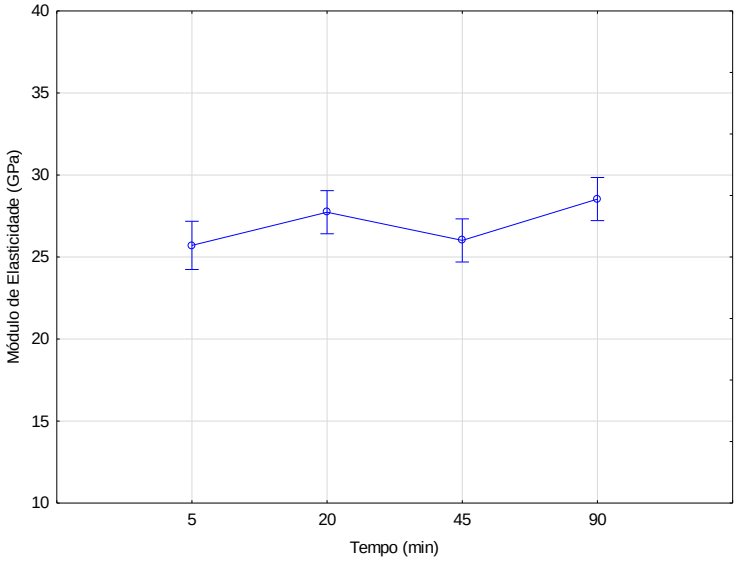
Analisando a figura é possível verificar a influência do teor de aditivo no módulo de elasticidade dos concretos estudados, para uma mesma relação água/cimento. Percebe-se que os resultados encontrados para os concretos produzidos com o teor de 0,15% de aditivo, são significativamente mais baixos que os valores encontrados para o traço de referência (0% de aditivo). A redução pode estar relacionada com o aumento da porosidade da matriz cimentícia, uma das grandes responsáveis pelo módulo de elasticidade. Segundo Dolch (1995, tradução nossa), a presença de vazios afeta o módulo de elasticidade na mesma proporção que a resistência à compressão é afetada, pois os vazios não interferem na relação existente entre as duas propriedades.

Cabe salientar que os resultados desta análise apresentam somente uma tendência de comportamento para o fator de controle, teor de aditivo, frente à variável dependente módulo de elasticidade.

6.4.2 Efeito do tempo de mistura dos materiais

A figura 28 mostra a influência isolada do tempo de mistura dos materiais. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade, na idade de 28 dias, utilizando a análise de variância (ANOVA). Para a análise de significância entre os tempos de mistura foi utilizado o teste de Fisher.

Figura 28 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais módulo de elasticidade



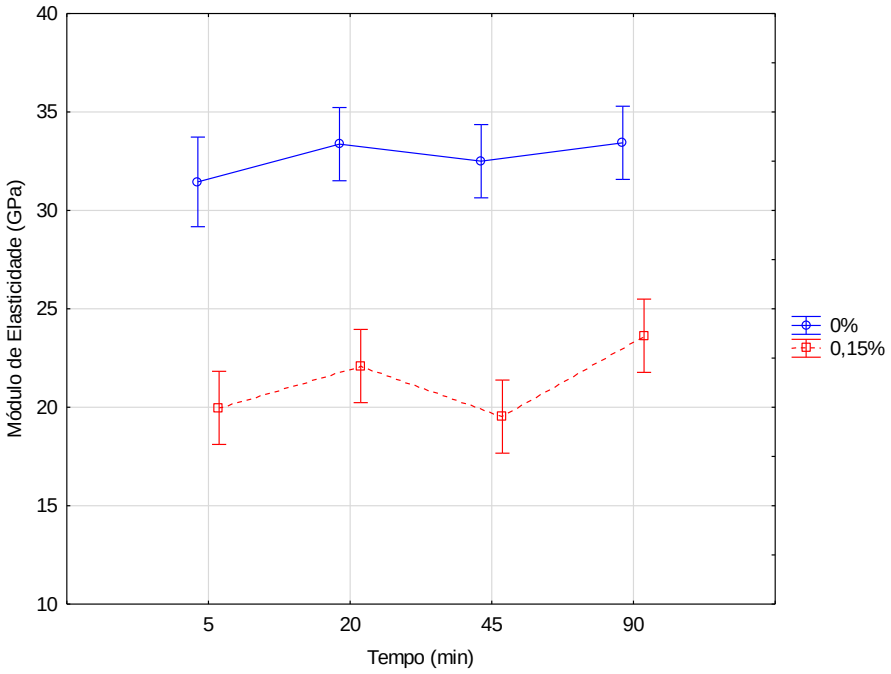
(fonte: elaborado pela autora)

Através da figura e dos resultados obtidos através do teste de Fisher percebe-se diferenças significativas entre os tempos de 5 e 20 minutos, 5 e 90 minutos e 45 e 90 minutos. Diferentemente das demais variáveis dependentes, cujo tempo de 90 minutos apresentou resultados relativamente maiores, o módulo de elasticidade apresentou resultados mais uniformes.

6.4.3 Efeito da interação entre o tempo de mistura e o teor de aditivo

A figura 29 apresenta o efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais frente ao módulo de elasticidade do concreto. A figura foi obtida através dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

Figura 29 – Efeito da interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura na resistência à tração por compressão diametral



(fonte: elaborado pela autora)

A análise estatística realizada não apontou como significativa a interação entre o teor de aditivo e o tempo de mistura dos materiais. Embora o traço sem aditivo tenha atingido valores mais baixos de módulo de elasticidade, ao longo do tempo ele mostrou comportamento semelhante ao traço de referência (0% de aditivo). Apesar de não haver interação significativa entre as variáveis, é possível fazer algumas considerações em relação ao comportamento do módulo de elasticidade ao longo do tempo para cada um dos teores analisados. Quanto ao traço de referência, os tempos estudados não apresentaram diferenças significativas entre si. Em relação ao traço com aditivo, os tempos de 5, 20 e 45 minutos não apresentaram diferenças significativas entre si. O tempo de 90 minutos, que apresentou um valor ligeiramente superior aos demais, diferiu significativamente dos tempos de 5 e 45 minutos.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a variação dos valores de módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, em concretos produzidos com e sem o aditivo incorporador de ar frente ao tempo de mistura dos materiais. Para tal verificação foram feitos ensaios de teor de ar incorporado, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e à compressão em um traço de referência (sem aditivo), e outro traço utilizando 0,15% de aditivo em relação à massa de cimento. Os tempos de mistura escolhidos foram 5, 20, 45 e 90 minutos. A avaliação da influência das variáveis independentes nas propriedades estudadas foi feita através de uma análise estatística dos resultados.

Desta forma, foi possível concluir que, em relação ao teor de aditivo, os concretos produzidos com 0,15% apresentaram resultados significativamente mais baixos que os concretos de referência, chegando a uma redução média de 50% para a resistência à compressão, 43% para a resistência à tração e 33% para o módulo de elasticidade. Cabe ressaltar que ambos os concretos foram produzidos com a mesma relação água/cimento e, conforme verificado com o ensaio do *slump test*, a introdução do aditivo elevou o abatimento do concreto. Quando fixo o abatimento, possivelmente uma menor quantidade de água na mistura poderia ser empregada, esta redução na quantidade de água de amassamento provavelmente acarretaria em um aumento nas resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade.

Em relação aos tempos de mistura estudados pode-se concluir que, para a resistência à compressão, o traço de referência não apresentou diferenças significativas entre os tempos de 5, 20 e 45 minutos e que o tempo de 90 minutos diferiu significativamente dos tempos de 5 e 45 minutos. Em relação ao traço com aditivo todos os tempos apresentaram diferenças significativas entre si, sendo que a menor resistência foi verificada aos 20 minutos onde havia sido incorporada a maior quantidade de ar.

Para a resistência à tração por compressão diametral, no traço de referência, os tempos de 5 e 45 minutos, 20 e 45 minutos e 20 e 90 minutos apresentaram diferenças significativas entre si. E, para o traço com aditivo os tempos de 5, 20 e 45 minutos não apresentaram diferenças

significativas entre si. Desta forma, para estes tempos, não é possível afirmar que sua variação afetou de forma significativa os resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Em relação ao módulo de elasticidade, para o traço de referência, não houve diferenças significativas entre os tempos estudados, não sendo possível provar que o tempo de mistura interferiu nos resultados. Para o traço com aditivo, os tempos de 5, 20 e 45 minutos, também não apresentaram diferenças significativas entre si. Contudo, o tempo de 90 minutos diferiu significativamente dos tempos de 5 e 45 minutos.

Salienta-se que as conclusões apresentadas referem-se às condições específicas deste programa experimental, sendo válidas apenas para concretos com as características estudadas. Não devem, portanto, serem consideradas de forma absoluta, sendo necessária a realização de novas pesquisas para confirmar sua representatividade.

Para trabalhos futuros sugere-se que o abatimento seja fixado, de forma a avaliar o ganho de resistência que pode ser obtido com a redução na quantidade de água de amassamento. Além disso, é válido comparar o aditivo estudado com outros aditivos incorporadores de ar, com o intuito de verificar se existem reais diferenças entre os produtos. Sugere-se também o estudo de traços que empreguem outros tipos de cimento, de forma a avaliar a exigência do fabricante sobre a pureza do cimento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: **ACI 211.1 – 91**: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2002.

_____: **ACI 211.2 – 98**: Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM – C125**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohochen, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 47:** concreto – determinação do teor de ar em concreto fresco – método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 5738:** concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 45:** agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5739:** concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522:** concreto – determinação do modo elástico de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 52:** agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 7211:** agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR NM 53:** agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **NBR 7222:** concreto e argamassa – determinação resistência à tração por compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011b.

_____. **NBR 7212:** execução de concreto dosado em central – procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

BGC CONCRETE. **Polished and exposed mixes.** [S.l.], [2013]. Disponível em: <http://www.bgcconcrete.com.au/mixes.html>. Acesso em: 16 jun. 2013.

BRENNAND CIMENTOS. **Declaração ambiental do produto**. Sete Lagoas, MG, 2013a.

_____. **Certificado de ensaio em cimento:** CP V – ARI MAX. Sete Lagoas, MG, 2013b.

CALDARONE, M. A. **High-strength concrete:** a practical guide. London, Taylor & Francis, 2009.

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. p. 518-557.

EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement admixtures. In: HEWLETT, P. C. (Ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete.** 4th ed. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, c1998

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 905-944. v. 2.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete:** microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, c2006.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete.** 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, c2003.

NEVILLE, A. D. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

POLESELLO E**. Avaliação da resistência à compressão e da absorção de água de concretos utilizados após o tempo máximo de mistura e transporte especificado pela NBR 7212**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

POWERS, T. C. Resistance to weathering: freezing and thawing. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (Org.). **Significance of tests and properties of concrete and concrete agregates.** Baltimore, 1955. p. 182-187.

RIXOM, M. R.; MAILVAGANAM, N. P. **Chemical admixtures for concrete.** 3rd ed. London: E & FN Spon, 1999.