

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

AUGUSTO LIO MORANDIN

**ALGUNS ASPECTOS REOLÓGICOS E TECNOLÓGICOS SOBRE CONCRETOS:
VALIDAÇÃO NO ESTADO FRESCO E DESEMPENHO NO ESTADO
ENDURECIDO**



**Ilha Solteira – SP
2025**

AUGUSTO LIO MORANDIN

**ALGUNS ASPECTOS REOLÓGICOS E TECNOLÓGICOS SOBRE CONCRETOS:
VALIDAÇÃO NO ESTADO FRESCO E DESEMPENHO NO ESTADO
ENDURECIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia do
Campus de Ilha Solteira – UNESP, como
parte dos requisitos para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes
Alcantara

Ilha Solteira – SP
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M829a Morandin, Augusto Lio.
Alguns aspectos reológicos e tecnológicos sobre concretos: validação no estado fresco e desempenho no estado endurecido / Augusto Lio Morandin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Marco Antônio de Moraes Alcântara

Inclui bibliografia

1. Concreto. 2. Tecnologia do concreto. 3. Reologia. 4. Estado fresco. 5. Estado endurecido.

AUGUSTO LIO MORANDIN

**ALGUNS ASPECTOS REOLÓGICOS E TECNOLÓGICOS SOBRE CONCRETOS:
validação no estado fresco e desempenho no estado endurecido**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovado em: 24/06/2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara (Orientador)
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira



Prof. Dr. Artur Pantoja Marques (Examinador)
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira



Prof. Dr. Adriano Souza (Examinador)
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais, por todo apoio e incentivo nestes
longos anos de estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as realizações que fez em minha vida, pela força e sabedoria durante toda essa jornada.

À minha família pelo apoio incondicional, pela confiança e amor que sempre me deram. Cada um de vocês tem papel fundamental na pessoa que sou hoje. Em especial aos meus pais, minhas irmãs, meus tios, meus avós e meu cachorro Luke.

Aos meus amigos, que me ajudaram a ter momentos de distração nesse período, com suas palavras de incentivo, me fortalecem, me fazem uma pessoa mais leve e me motivam a seguir em frente.

À minha namorada, que sempre esteve ao meu lado, me retribuindo com carinho, apoio emocional e, principalmente, amor. Sua companhia neste tempo foi essencial para que eu superasse os desafios e chegasse até aqui.

Ao professor e orientador Marco Antônio pelo acolhimento na pesquisa, pelos ensinamentos, disposição e paciência que teve comigo ao longo da realização do trabalho.

Ao técnico de laboratório Gilson, pela prontidão em me ajudar, pelos ensaios realizados e por todo carinho e atenção dedicados a mim.

Ao meu amigo Thiago, que me auxiliou na preparação dos traços, no transporte dos materiais e me ofereceu o suporte necessário para que eu pudesse concluir este trabalho.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

RESUMO

O concreto é o material mais utilizado pelo homem depois da água. Suas características de durabilidade, resistência, plasticidade e de fácil produção, justificam esse alto consumo. Por isso, torna-se um material muito estudado, de forma que pesquisadores buscam encontrar soluções para melhorar ainda mais suas propriedades e torná-lo mais eficiente e econômico. No estado fresco, as propriedades reológicas como fluidez, viscosidade, segregação e tempo de pega influenciam diretamente a facilidade de manuseio, o lançamento e a compactação do concreto nas formas, o que é primordial para garantir um concreto de qualidade. No estado endurecido, o desempenho do concreto é essencial para garantir que a estrutura tenha resistência mecânica, durabilidade e estabilidade ao longo do tempo. A manipulação dos parâmetros de dosagem do concreto, com o intuito de associar o comportamento reológico no estado fresco e a validação no estado endurecido, torna-se uma opção viável para entender o comportamento do concreto, de forma a proporcionar melhores entendimentos de como otimizar suas propriedades para melhorar a resistência e durabilidade das estruturas. Neste trabalho, variou-se a relação de agregados/cimento “m” nos valores de 3, 4 e 5, e a relação água/materiais secos “H%” variou a 8%, 9% e 10%, totalizando nove traços experimentais. Os ensaios realizados permitiram estabelecer diversas correlações. Ensaios como o de abatimento mostraram que, com a relação “m” constante, a relação água/cimento aumenta à medida em que o abatimento aumenta. O aumento do abatimento mostrou melhora na trabalhabilidade do concreto. No estado endurecido, os resultados de compressão axial e diametral evidenciaram que a resistência diminui com o aumento da relação água/cimento, confirmando a interdependência entre durabilidade, resistência e porosidade. A análise da massa específica indicou redução ao longo do tempo, atribuída à evaporação da água e à retração plástica, causada pela exsudação. A absorção, por sua vez, revelou-se inversamente proporcional à resistência, reforçando a importância da porosidade e permeabilidade do material de concreto.

Palavras-chave: concreto; tecnologia do concreto; reologia; estado fresco; estado endurecido

ABSTRACT

Concrete is the most widely used material by humans after water. Its characteristics of durability, strength, plasticity, and ease of production justify this high level of consumption. Consequently, it is a highly studied material, as researchers seek to find solutions to further improve its properties and make it more efficient and economical. In the fresh state, rheological properties such as flowability, viscosity, segregation, and setting time directly influence the ease of handling, placing, and compacting the concrete into molds—factors that are essential to ensuring the quality of the material. In the hardened state, the performance of the concrete is crucial to guarantee that the structure maintains mechanical strength, durability, and stability over time. Manipulating concrete mix design parameters, with the aim of associating rheological behavior in the fresh state with performance in the hardened state, becomes a viable approach to understanding concrete behavior. This helps provide better insight into how to optimize its properties to enhance the strength and durability of structures. In this study, the aggregate-to-cement ratio (“m”) was varied at values of 3, 4, and 5, and the water-to-dry materials ratio (“H%”) was varied at 8%, 9%, and 10%, totaling nine experimental mixes. The results obtained made it possible to establish several correlations. Tests such as the slump test showed that, with a constant “m” ratio, the water/cement ratio increases as the slump increases. The increase in slump indicated improved workability of the concrete. In the hardened state, axial and diametral compression test results showed that strength decreases as the water/cement ratio increases, confirming the interdependence between durability, strength, and porosity. The analysis of specific mass indicated a reduction over time, attributed to water evaporation and plastic shrinkage caused by bleeding. Absorption, in turn, was found to be inversely proportional to strength, reinforcing the importance of porosity and permeability in the performance of concrete as a material.

Keywords: concrete; concrete technology; rheology; fresh state; hardened state

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Evolução Do Concreto	19
Figura 2 – Materiais Utilizados No Concreto	30
Figura 3 - Balança	31
Figura 4 – Betoneira	31
Figura 5 – Molde Cilíndrico De PVC.....	32
Figura 6 – Mesa Vibratória	33
Figura 7 – Ferramentas Utilizadas	34
Figura 8 – Passo A Passo Ensaio Do Abatimento	36
Figura 9 - Máquina Universal De Ensaio	37
Figura 10 – Corpo De Prova Do Traço 3 Antes De Romper	39
Figura 11 – Ensaio De Tração Por Compressão Diametral	40
Figura 12 – Corpo De Prova Do Traço 3 Antes De Romper	41
Figura 13 – Corpos De Prova Na Estufa A 105°C	42
Figura 14 – Corpos De Prova Imersos A 25°C	43
Figura 15 - Traço Inicial 1	45
Figura 16 – Abatimento Dos Três Primeiros Traços	48
Figura 17 – Concreto Do Traço 1	48
Figura 18 – Abatimento Do Quarto Ao Sexto Traço.....	49
Figura 19 – Abatimento Dos Últimos Três Traços	49
Figura 20 – Corpo De Prova Do Traço 6 Rompido Axialmente A 28 Dias	54
Figura 21 – Corpo De Prova Do Traço 1 Rompido A 28 Dias.....	58
Figura 22 – Corpo De Prova Do Traço 9 Rompido A 28 Dias.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Influência Da Relação A/C No Abatimento Do Concreto.....	47
Gráfico 2 - Resistência Média (F_{cm}) Com A Relação Agregados/Cimento (M)	
Mantendo H (%) A 8	52
Gráfico 3 - Resistência Média (F_{cm}) Com A Relação Agregados/Cimento (M)	
Mantendo H (%) A 9	53
Gráfico 4 - Resistência Média (F_{cm}) Com A Relação Agregados/Cimento (M)	
Mantendo H (%) A 10	53
Gráfico 5 – Resistência Média À Compressão Diametral ($F_{ctm,Sp}$) Com A Relação	
Agregados/Cimento (M) Mantendo H (%) A 8	56
Gráfico 6 – Resistência Média À Compressão Diametral ($F_{ctm,Sp}$) Com A Relação	
Agregados/Cimento (M) Mantendo H (%) A 9	57
Gráfico 7 – Resistência Média À Compressão Diametral ($F_{ctm,Sp}$) Com A Relação	
Agregados/Cimento (M) Mantendo H (%) A 10	57
Gráfico 8 – Absorção Com A Relação A/C	60
Gráfico 9 – Resistência Média De Compressão Com Absorção, Com H (%) Igual A 8	
.....	61
Gráfico 10 - Resistência Média De Compressão Com Absorção, Com H (%) Igual A 9	
.....	61
Gráfico 11 - Resistência Média De Compressão Com Absorção, Com H (%) Igual A	
10	62
Gráfico 12 – Resistência Média De Tração Com Absorção, Com H (%) Igual A 8	63
Gráfico 13 - Resistência Média De Tração Com Absorção, Com H (%) Igual A 9	63
Gráfico 14 - Resistência Média De Tração Com Absorção, Com H (%) Igual A 10 ...	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Fator De Correção H/D	38
Tabela 2– Traços Iniciais Calculados	45
Tabela 3 - Traços Finais Calculados.....	46
Tabela 4 – Ensaio Do Abatimento	46
Tabela 5 – Resultados Da Massa Específica	50
Tabela 6 – Resultados Do Ensaio De Compressão Axial	51
Tabela 7 – Força Máxima De Ruptura A 7 E 28 Dias De Compressão Diametral	55
Tabela 8 – Resultados Do Ensaio De Compressão Diametral	55
Tabela 9 – Massa Seca E Massa Úmida Do Ensaio De Absorção	59
Tabela 10 – Resultado Da Absorção	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa Específica Aparente.....	24
Equação 2 - Resistência À Compressão.....	37
Equação 3 - Resistência À Compressão Diametral.....	40
Equação 4 - Absorção.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
f_c	Resistência à compressão
f_{cm}	Resistência média à compressão
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração
$f_{ctm,sp}$	Resistência média à tração
H%	água/materiais secos, em porcentagem
h/d	altura/diâmetro
m	agregados/cimento
NBR	Norma Brasileira
S	Desvio Padrão
x	água

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVO PRINCIPAL	17
1.2.	OBJETIVO ESPECÍFICO	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	CONCRETO	18
2.1.1.	Breve Contexto Histórico.....	18
2.1.2.	Materiais Constituintes	20
2.1.2.1.	Cimento	20
2.1.2.2.	Agregados	21
2.1.2.3.	Água de amassamento.....	22
2.2.	RELAÇÃO ÁGUA-CIMENTO	22
2.3.	CONCRETO FRESCO	23
2.3.1.	Aspectos Reológicos	23
2.3.1.1.	Trabalhabilidade	24
2.3.1.2.	Massa específica aparente.....	24
2.3.1.3.	Consistência	25
2.3.1.4.	Tempo de pega.....	25
2.3.1.5.	Segregação	26
2.3.1.6.	Exsudação.....	26
2.3.2.	Ensaio de validação.....	26
2.3.2.1.	Ensaio do abatimento.....	26
2.4.	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	27
2.4.1.	Resistência à compressão	27
2.4.2.	Durabilidade.....	28
2.4.3.	Permeabilidade.....	28
2.4.4.	Ensaio tecnológicos de desempenho	29
2.4.4.1.	Ensaio de resistência à compressão axial.....	29

2.4.4.2. Ensaio de resistência à compressão diametral	29
2.4.4.3. Ensaio de absorção de água por imersão	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. MATERIAIS	30
3.2. ESTRATÉGIA E METODOLOGIA DE PESQUISA	34
3.3. ENSAIOS REALIZADOS	35
3.3.1. Ensaio de abatimento de tronco de cone	35
3.3.2. Ensaio de compressão axial	37
3.3.3. Ensaio de compressão diametral	39
3.3.4. Ensaio de absorção de água por imersão	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. CÁLCULO DOS TRAÇOS	44
4.2. ENSAIO DO ABATIMENTO	46
4.3. MASSA ESPECÍFICA	49
4.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	51
4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	54
4.6. ENSAIO DE ABSORÇÃO	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado pelo homem depois da água (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2025). A primeira concepção de concreto foi no Império Romano, cerca de 300 anos antes de Cristo. Com o tempo, o concreto revolucionou a engenharia e trouxe uma série de benefícios à sociedade. Atualmente, a presença é cotidiana deste material, que por suas características de resistência, durabilidade, plasticidade e de fácil produção, acaba sendo o escolhido em muitas construções.

Esse material é uma mistura de água, cimento, agregado miúdo e agregado graúdo. Pode ou não possuir aditivos, superplastificantes, finos ou fibras, dependendo das especificações técnicas do projeto e das características desejadas para o material. Ele pode ser considerado, em termos de suas propriedades, em estado fresco e estado endurecido. Sendo que o primeiro está relacionado com o processo de fabricação, e o segundo com o seu desempenho final (Neville, 2016).

De acordo com Carasek (2007), para o estado fresco ideal se requer a homogeneidade e a ausência de patologias, como a segregação e exsudação. Exemplos de propriedades intrínsecas ao estado fresco têm-se a consistência e mobilidade, sendo a primeira relacionada com a energia absorvida na deformação, e a segunda à resistência inversa à deformação. A junção entre as propriedades intrínsecas ao concreto é denominada trabalhabilidade. Um concreto trabalhável é aquele que se mantém homogêneo desde a fase da mistura até o lançamento, a partir de sua composição e dos meios tecnológicos adotados.

Partindo disso, um concreto no estado fresco estará potencialmente apto para um determinado tipo de processo de fabricação e, ainda, proporcionará a formação de um bom concreto endurecido.

Para a validação, são comumente utilizados ensaios para poder qualificar concretos no estado fresco, que deverão ser aplicados em obras civis dentro de um determinado processo, como o *Slump Test*. E para sua validação, normalmente são utilizados ensaios de compressão axial e diametral, bem como ensaio de absorção para garantir que o concreto endurecido apresente as características desejadas.

Visando estabelecer um melhor controle e previsão de comportamento, se considera importante associar os parâmetros de dosagem às propriedades do estado fresco, e do concomitante resultado do estado endurecido. Isto poderá permitir a

orientação de estudos de dosagem e da elaboração de um método prático de dosagem.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Manipular os parâmetros do concreto de modo a se validar e caracterizar os concretos frescos, assim como de verificar a expectativa de desempenho destes no estado endurecido.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Alterar as dosagens do concreto de modo a associá-las com a validação no estado fresco e ao seu desempenho no estado endurecido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO

Segundo Neville (2013), em um sentido mais amplo, o concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Em um sentido mais comum, é um material de construção obtido pela mistura de aglomerantes, agregados e água, podendo ou não ter adição de aditivos e superplastificantes. A mistura desses componentes, ao endurecer, forma um material com elevada resistência à compressão, tornando-se ideal para aplicações estruturais.

O concreto apresenta duas fases distintas. A primeira, denominada concreto fresco, é quando o material foi misturado de forma recente, onde ele pode ser misturado, transportado, lançado e adensado. A segunda fase, denominada concreto endurecido, se inicia com a hidratação do cimento e logo depois o endurecimento.

Não é à toa que é o segundo material mais utilizado do mundo. Suas características técnicas e econômicas o fazem um dos materiais de construção mais versáteis e eficientes. Dentre as suas principais vantagens, destacam-se a alta resistência à compressão, resistência a intempéries climáticas, durabilidade elevada, custo-benefício e facilidade na execução. Sua capacidade de ser moldado em diversas formas e dimensões o torna um material versátil, capaz de atender não apenas às exigências estruturais, como também às demandas estéticas da arquitetura, permitindo a criação de elementos que aliam resistência e valor visual.

Apesar de suas vantagens, o concreto apresenta baixa resistência à tração. Isso acaba exigindo ter que associá-lo com materiais complementares, como o aço. O concreto protendido e o concreto armado são algumas opções na construção civil para obter um elemento estrutural com alta resistência à compressão e, ao mesmo tempo, alta resistência à tração. Outra desvantagem do concreto é o de alto consumo de matérias-primas naturais, causando impactos negativos nos locais de extração.

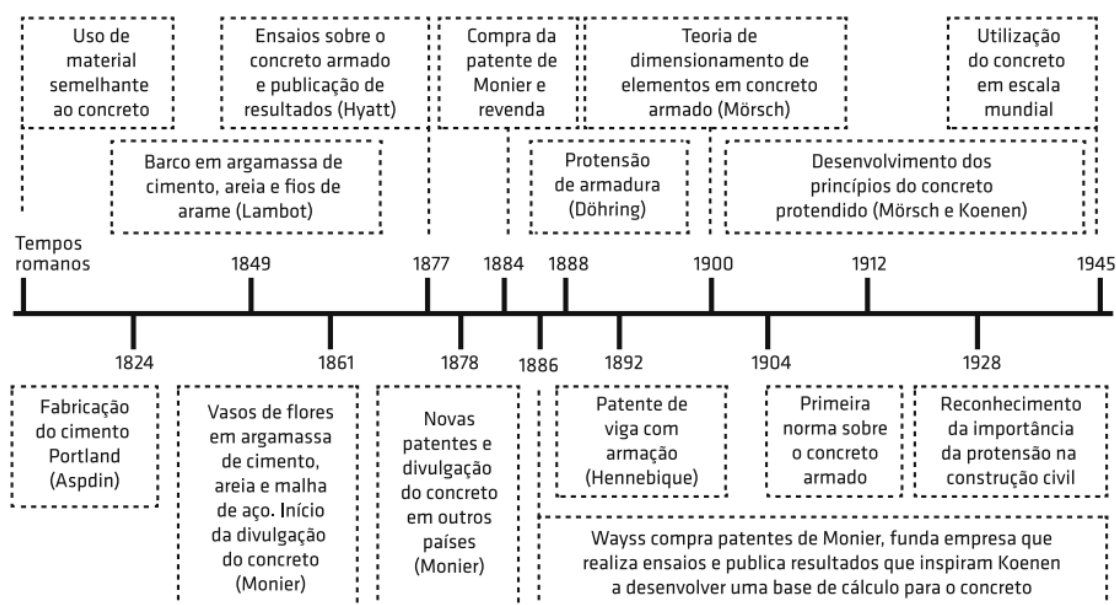
2.1.1. Breve Contexto Histórico

Conforme explica o site How Concrete Works (2006), a história do concreto tem suas primeiras evidências em Roma, há cerca de 2000 anos atrás. Esse material era utilizado em aquedutos e estradas na capital italiana. O primeiro fato que foi realmente registrado é de John Smeaton que, em 1756, fez o concreto misturando agregado graúdo e cimento. Em 1793, ele iniciou a construção do *Farol de Eddystone* em *Cornwall*, na Inglaterra. Em 1824, Joseph Aspdin desenvolveu o cimento Portland. A

partir disso, o concreto se tornou um material indispensável no mundo. Foi se tornando um aliado da vida humana, facilitando processos construtivos e fazendo parte do desenvolvimento humano e da infraestrutura moderna. Com o avanço da engenharia e da tecnologia dos materiais, o concreto passou por diversas evoluções, recebendo aditivos, armaduras e técnicas de aplicação que aumentaram sua durabilidade, resistência e versatilidade. Atualmente, o concreto é utilizado em praticamente todos os tipos de obras, desde pequenas edificações até grandes estruturas como pontes, barragens e arranha-céus, consolidando-se como um dos pilares da construção civil contemporânea.

A linha do tempo exposta a seguir, na figura 1, apresentada por Porto e Fernandes (2015), demonstra a evolução do concreto ao decorrer dos anos.

Figura 1– Evolução do concreto



Fonte: PORTO; FERNANDES (2015)

No Brasil, segundo Santos (2008), foi introduzido no início do século XX, como produto patenteado, distribuído por filiais de firmas estrangeiras aqui estabelecidas. Com o tempo, indústrias cimentícias foram instaladas e, gradualmente, o uso do concreto passou a se expandir e incorporar progressivamente o cotidiano da construção civil nacional. Na década de 1940 o concreto passa a se estabilizar no país. Regulamentações como a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT já estavam vigentes e o tornaram um material consolidado, fazendo parte dos currículos

das escolas de engenharia e, principalmente, das novas obras que se iniciavam neste período e que predominam até os dias de hoje.

2.1.2. Materiais Constituintes

São quatro materiais principais que constituem o concreto: aglomerante (cimento), agregado graúdo, agregado miúdo e água.

2.1.2.1. Cimento

De acordo com Neville (2016, p. 25), “Cimento, no sentido geral da palavra, pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta”.

É um material pulverulento de origem mineral, amplamente utilizado para fazer o concreto como aglomerante hidráulico, ou seja, possui a capacidade de endurecer em presença de água e manter essa resistência mesmo em ambientes úmidos.

O cimento mais comum é o Cimento Portland. A matéria prima deste cimento consiste, essencialmente, em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Estes compostos interagem entre si no interior de um forno, a altas temperaturas, e formam uma série de compostos mais complexos, sendo eles:

- Silicato tricálcico (C_3S)
- Silicato bilicálcico (C_2S)
- Aluminato tricálcico (C_3A)
- Ferro iluminato tetracálcico (C_4AFe)

Os óxidos presentes se fundem parcialmente e originam o clínquer. Após o resfriamento, o clínquer é moído em conjunto com uma pequena quantidade de gesso, que tem como função controlar o tempo de pega do cimento, resultando no final em um pó fino, pronto para ser utilizado como aglomerante em concretos.

O cimento passa por um processo muito importante chamado hidratação. É quando há a adição direta de moléculas de água ao cimento, resultando na formação de compostos cristalinos responsáveis pela resistência mecânica do material endurecido. É um processo fundamental para garantir ao concreto sua resistência e durabilidade.

O tipo de Cimento Portland mais utilizado e, inclusive, aglomerante empregado no presente trabalho, é o Cimento Portland II. É um tipo de cimento que contém, além do clínquer e do gesso, adições que podem ser de escória granulada de alto forno, pozolana ou com material carbonático. Os diferentes tipos de cimento Portland

seguem os critérios estabelecidos pela norma técnica vigente NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.1.2.2. Agregados

A definição do agregado total se dá, segundo a norma técnica atual NBR 12655 (ABNT, 2022, p.11) como sendo um “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”.

Servem para dar estabilidade e volume, ou seja, enchimento à massa, visando economia, já que os agregados são mais baratos que o cimento. Além disso, proporcionam estabilidade dimensional, reduzem a retração e, também, melhoram as propriedades mecânicas do concreto endurecido, como resistência à compressão e, também, influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto fresco.

Os agregados que normalmente compõem o concreto são os agregados graúdos e agregados miúdos. Ambos trabalham juntos para formar uma matriz sólida, reduzindo vazios e visando melhorar o desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2024, p. 6), “Agregado graúdo cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”. Pode ser encontrado em diversas formas, como pedras britadas, seixos rolados e argilas expandidas. Sendo a mais comum encontrada no concreto a brita, que pode variar suas dimensões de acordo a sua numeração a seguir.

- Brita 0: 4,8 a 9,5 mm, chamado de pedrisco, utilizado em massa asfáltica.
- Brita 1: 9,5 a 19 mm, a mais comum em concretos.
- Brita 2: 19 a 25 mm, em concretos de maior resistência (fundações)
- Brita 3: 25 a 28 mm, em concretos de grande porte (barragens, grandes blocos).

A escolha do agregado graúdo depende da disponibilidade da região, custo e atendimento às exigências técnicas. Em regiões próximas a rios e córregos, é natural que dominam seixo rolado, por questões de processos naturais, o que acaba abaixando seu custo. Em outros locais é natural que a pedra britada seja mais econômica, por justamente apresentar pedreiras e por ser longe dos locais que apresentam seixo, sendo, portanto, a alternativa mais viável.

Também de acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2024, p. 7) “Agregado miúdo cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m”. Geralmente de areia natural ou britagem, tem papel fundamental no concreto. O agregado miúdo preenche os espaços entre os grãos do agregado graúdo, reduzindo a quantidade de vazios no concreto. Conjuntamente, é essencial para a fluidez e trabalhabilidade do concreto. A quantidade adequada de areia proporciona uma massa mais plástica e coesa, facilitando o lançamento, adensamento e acabamento do concreto.

A granulometria também diferencia os tipos de areia. Segundo as especificações técnicas, a areia pode ser dividida em:

- Areia fina: diâmetro de 0,15 a 0,60 mm, utilizada em rebocos e argamassas de acabamento.
- Areia média: diâmetro dos grãos entre 0,6 e 1,2 mm, utilizado em concreto comum, argamassa de assentamento.
- Areia grossa: diâmetro de 1,2 a 2,4 mm, empregado em concreto estrutural.

2.1.2.3. Água de amassamento

A água é um material indispensável do concreto. É responsável por promover a hidratação do cimento e o endurecimento da mistura. A adição da água ao concreto promove melhora em alguns aspectos reológicos do concreto, como trabalhabilidade e viscosidade. Considerada como solvente universal, a sua correta dosagem influencia diretamente na fluidez, resistência e durabilidade do concreto.

De acordo com Freitas (2016), o excesso da água é um catalisador da retração, portanto é de extrema importância controlar a qualidade e quantidade de água utilizada na mistura. A água deve ser limpa, isenta de óleos, ácidos, sais, matéria orgânica ou outras substâncias que podem comprometer a qualidade do concreto. Uma dosagem inadequada pode causar fissuras, baixa resistência mecânica, segregação dos materiais e baixa trabalhabilidade.

2.2. RELAÇÃO ÁGUA-CIMENTO

É a proporção de água em relação a quantidade de cimento Portland e outros materiais cimentícios. Conforme Gaspari (2013, p.7), “[...] é um dos parâmetros mais importantes que regem a resistência e durabilidade do concreto, devido à sua relação com a porosidade e permeabilidade do material”.

Há mais de 100 anos, Duff A. Abrams descobriu que a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação a/c (água-cimento). Ou seja, quanto maior a resistência do concreto, menor a relação a/c. Essa descoberta tem seu fundamento justificado pelo fato de que quanto menor esta relação, haverá menos água para evaporar e, portanto, menor porosidade, aumentando a densidade do concreto e sua resistência. A recíproca é verdadeira, pois uma relação a/c alta resulta em um concreto mais poroso e, conseqüentemente, menos resistente.

Além disso, esta relação influencia diretamente na trabalhabilidade. Uma relação a/c maior, faz com que a trabalhabilidade seja maior. Mais água no concreto o torna mais fluido, mais fácil de manusear e conseqüentemente mais fácil de moldar. Uma relação a/c menor, o concreto fica mais seco, rígido e difícil de trabalhar. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022), a relação a/c deverá variar de 0,65 a 0,45, dependendo do tipo do concreto desejado e das classes de agressividade.

2.3. CONCRETO FRESCO

Em concordância com a NBR 12655 (ABNT, 2022), o concreto fresco é aquele que está completamente misturado e ainda no estado plástico, estando apto ao adensamento. Compreende um período máximo, em geral de 1h a 5h. Essa fase refere-se ao intervalo de tempo necessário para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado e adensado (Helene e Andrade, 2010).

O concreto possui propriedades que devem ser estudadas no estado fresco, pois influenciam diretamente na sua aplicação e no desempenho final da estrutura. Entre essas propriedades, destacam-se a trabalhabilidade, a consistência, a massa específica, a exsudação e o tempo de pega. Esses fatores são determinantes para garantir que o concreto possa ser lançado de maneira adequada nas fôrmas, preenchendo completamente os vazios, sem segregação dos materiais ou perda de água.

Um bom concreto fresco é aquele que apresenta características adequadas para ser realizado o transporte, o adensamento e o lançamento, sem apresentar problemas como segregação, exsudação ou falta de trabalhabilidade.

2.3.1. Aspectos Reológicos

O concreto fresco é considerado um fluido homogêneo e incompressível, que pode ser estudado pela reologia (ciência que estuda o comportamento e a deformação

dos materiais). Os aspectos reológicos são de extrema importância para caracterizar o comportamento do concreto.

2.3.1.1. Trabalhabilidade

De acordo com a ASTM C125 (1993), a trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade. Não existe um método exato para medir a trabalhabilidade. Porém, ela pode ser relacionada com algumas propriedades mensuráveis do concreto fresco, como:

- Mobilidade: capacidade do concreto se mover
- Adensabilidade: capacidade do concreto ser adensado através de um esforço específico
- Estabilidade: resistência à segregação

Dessa maneira, a importância da trabalhabilidade na tecnologia dos concretos torna-se evidente, independente da sofisticação usada nos procedimentos de dosagem e de outras considerações, tais como o custo. Uma mistura de concreto, que não pode ser lançada facilmente ou adensada em sua totalidade, provavelmente não apresentará as características de resistência e durabilidade inicialmente desejadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3.1.2. Massa específica aparente

A massa específica é uma propriedade importante do concreto fresco que caracteriza a densidade do material enquanto ainda está em estado plástico, antes do endurecimento por completo. Essa propriedade é essencial para avaliar a qualidade do concreto. Ela indica a relação entre a sua massa com o volume total ocupado por ele, incluindo os poros internos, como pode-se ver na Equação 1 a seguir.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Onde ρ , m e v são, respectivamente, massa específica, massa do concreto fresco e volume.

Controlar a massa específica aparente é fundamental para garantir a sua qualidade. Ela serve como um parâmetro de controle durante a produção, podendo ajudar a identificar possíveis problemas no corpo de prova, como excesso de ar ou má compactação.

2.3.1.3. Consistência

Segundo Helene e Andrade (2010), uma das principais características do concreto que determina a aptidão para ser manuseado é a consistência. É definido como maior ou a menor capacidade do concreto de se deformar sob ação da sua própria massa. Ela é medida pelo ensaio do abatimento, que será revisado futuramente neste trabalho.

O índice de consistência, de acordo com ASTM C125 (1993), é um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco.

O principal fator que influi na consistência é o teor água/materiais secos H (%). Tendo em vista que a consistência é a capacidade do concreto fresco se deformar e fluir, isso está diretamente ligado a quantidade de água na mistura. Quando se aumenta o teor H (%), o concreto se torna mais fluido e fácil de se manusear, facilitando o adensamento e o lançamento. A recíproca é verdadeira. O teor H (%) baixo faz com que o concreto tenha dificuldade para se deformar e fluir.

2.3.1.4. Tempo de pega

De acordo com Bauer (2000), o fenômeno da pega do cimento compreende na evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, resultante da hidratação dos compostos presentes no cimento. É o intervalo de tempo necessário para que uma mistura cimentícia comece a perder sua plasticidade e inicie o processo de endurecimento.

Já de acordo com Neville e Brooks (2013):

Genericamente falando, pega se refere à mudança de estado fluido para o rígido. A pega é causada principalmente pela hidratação do C3A e C3S e é acompanhada pela elevação da temperatura na pasta de cimento. O início de pega corresponde a uma rápida elevação e o fim de pega corresponde ao pico de temperatura (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 18).

Segundo a NBR 16607 (ABNT, 2018), o tempo de pega é dividido em: início de pega e fim de pega. Onde o primeiro está ligado ao momento em que o cimento entra em contato com a água, e o segundo quando a pasta atinge uma rigidez significativa, sendo considerada imprópria para manuseio.

Além disso, existem aditivos que podem modificar o tempo de pega, de modo a acelerar ou retardar, de acordo com a necessidade. Da mesma forma, existem outros fatores que influenciam no tempo de pega, como:

- Relação água/cimento: proporções maiores aumentam o tempo de pega, enquanto menores reduzem.
- Ambiente de exposição: a temperatura e umidade do ar variam, portanto, afetam o tempo de endurecimento.
- Composição química do cimento: compostos de C_3A , C_3S e sulfatos interferem diretamente no comportamento de pega.

2.3.1.5. Segregação

Para Balbo (2019), denomina-se segregação o movimento de partículas grosseiras de concreto em sentido descendente. Movimento que, evidentemente, traz a causa da separação em fração mais grossas dos agregados do que as finas, resultando em perda de homogeneidade.

Na mesma linha de raciocínio, a segregação pode ser definida como a separação dos componentes de concreto de tal forma que a distribuição não é uniforme (MEHTA; MONTEIRO; 2008).

2.3.1.6. Exsudação

Mehta e Monteiro (2008) definem a exsudação como sendo um fenômeno cuja manifestação se dá pelo aparecimento de água na superfície após transporte e lançamento do concreto, antes de ocorrer a sua pega. É um caso particular de segregação, ocorrendo quando os materiais mais pesados se depositam no fundo e a água, material mais leve, sobe à superfície.

2.3.2. Ensaios de validação

O ensaio de validação do concreto no estado fresco é uma etapa essencial para controlar a sua qualidade. Essa prática assegura que o concreto, ainda no estado plástico, apresente as propriedades necessárias para garantir o desempenho ideal no concreto endurecido.

2.3.2.1. Ensaio do abatimento

O ensaio do abatimento do tronco de cone, ou conhecido também como *Slump Test*, é uma técnica muito utilizada para avaliar a consistência do concreto e uma parte essencial no controle tecnológico. É um dos parâmetros mais utilizados na engenharia civil para a verificação da trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, isto é, tem seus resultados diretamente associados à trabalhabilidade e não efetivamente à resistência à compressão do concreto, que é na verdade a mais importante

característica na definição da qualidade e durabilidade de uma estrutura (MANCIO et al., 2010, p. 586, traduzido pelo autor). Já para Neville (1997), esse ensaio é muito útil como uma verificação nas variações dos materiais componentes com o tempo ou entre remessas.

O ensaio de abatimento é muito simples. A sua principal função é fornecer um método simples e conveniente para controlar a uniformidade da produção de concreto de diferentes betonadas (METHA; MONTEIRO, 2008).

A interpretação do resultado do ensaio é de extrema importância para controlar a qualidade do concreto bem como as suas características. Um abatimento muito baixo pode indicar um concreto seco e pouco trabalhável, dificultando o preenchimento de fôrmas. Já o abatimento muito alto pode indicar uma alta relação a/c ou até segregação dos materiais, o que pode comprometer a resistência e durabilidade do concreto após a cura.

2.4. CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A segunda fase, denominada de concreto endurecido, inicia-se com a hidratação do cimento e consequente endurecimento do concreto, estendendo-se por toda a vida da estrutura (Helene e Andrade, 2010). Em uma definição mais simples, é o material que se obtém através da mistura dos componentes do concreto, após o fim da pega do aglomerante. No estado endurecido, o concreto deixa de ser uma mistura plástica e maleável, passando a ser um material rígido, com propriedades mecânicas e tecnológicas que o tornam um material resistente perante as cargas que irão o solicitar.

2.4.1. Resistência à compressão

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resistência de um material pode ser definida como sua capacidade de resistir a um determinado esforço de tensão sem se romper. Quadros (2014) argumenta que a resistência à compressão é a propriedade do concreto que é mais conhecida entre os profissionais, e tem sido usada quase que unicamente para garantir a qualidade do concreto.

Para Neville e Brooks (2013), uma resistência à compressão adequada é a principal exigência do concreto endurecido, por ser relativamente fácil de ser medida e fácil de certificar se atende às especificações exigidas. Além de ser a mais importante, é a característica que mais se destaca no concreto. É amplamente

utilizada como parâmetro principal para a sua especificação, controle de qualidade e dimensionamento estrutural.

No concreto endurecido, a resistência à compressão está diretamente ligada à qualidade de seus materiais, ao processo de cura e condições do ensaio. Para calculá-la, deverá ser realizado o ensaio de resistência à compressão.

2.4.2. Durabilidade

Bauer (2008) descreve que a durabilidade das estruturas está ligada ao ambiente no qual o concreto está exposto, sendo que a vida útil pode variar de acordo com as ações atuantes na estrutura. Estas ações podem ser quase sempre amenizadas, levando a estrutura a uma maior longevidade.

Um concreto durável é aquele que resiste, ao longo do tempo, às influências físicas, químicas e mecânicas do meio, mantendo suas propriedades estruturais e funcionais que lhe foi concebida. Isso inclui resistência aos agentes agressivos, como cloretos, sulfatos e variações térmicas.

A obtenção de um concreto durável depende de vários fatores, entre eles: traço adequado, escolha dos agregados e aglomerantes, controle do fator a/c , cura adequada e execução correta.

2.4.3. Permeabilidade

A permeabilidade está relacionada à capacidade em que o material tem de permitir a passagem de fluidos. Metha e Monteiro (2008) citam que a permeabilidade tem grande importância para os processos de degradação físico-químicos que atuam no concreto. Esta propriedade está diretamente ligada à porosidade, ou seja, uma redução da porosidade acarretará também em uma redução na permeabilidade. Ainda, os autores afirmam que este parâmetro está diretamente ligado aos indicadores de durabilidade do concreto, sendo essencial o controle dos poros capilares e da conectividade da rede porosa para garantir o desempenho adequado da estrutura ao longo do tempo.

A condição que faz o concreto ser permeável depende, principalmente, da relação a/c , qual determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares, além da dimensão máxima do agregado que acaba influenciando a espessura e microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.4.4. Ensaios tecnológicos de desempenho

Os ensaios tecnológicos de desempenho são de extrema importância para verificar o desempenho, qualidade e segurança do concreto. Esses ensaios permitem avaliar se o concreto, após a cura, atinge as propriedades esperadas. Ou seja, é um excelente meio para avaliar os parâmetros técnicos das amostras e identificar a situação quanto à qualidade e resistência.

2.4.4.1. Ensaio de resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é a propriedade que mais interessa os engenheiros e projetistas da área de estruturas (Isaia, 2007). Essa propriedade está ligada à qualidade do concreto como um todo, justificando o grande interesse.

Esse ensaio visa determinar a resistência à compressão de corpos cilíndricos, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

2.4.4.2. Ensaio de resistência à compressão diametral

É também conhecido como ensaio de resistência à tração indireta ou ensaio brasileiro, já que foi criado por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo na década de 1940. A técnica inventada tinha como objetivo criar uma solução prática para encontrar a resistência de materiais frágeis, já que era comum a dificuldade de encontrar a resistência à tração desses materiais devido a falhas prematuras.

O ensaio rege a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), que descreve os procedimentos para encontrar a resistência à tração indireta.

2.4.4.3. Ensaio de absorção de água por imersão

Com o objetivo de determinar a capacidade de absorção de água do concreto endurecido, o ensaio de absorção de água, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), avalia o movimento da água na forma líquida através dos poros capilares, em condição não saturada, ao ser exposto parcialmente à água.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho contou com um estudo experimental envolvendo valores sobre as propriedades do concreto no estado fresco, ligando a qualidade e desempenho no concreto endurecido.

3.1. MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados partiram de dentro do laboratório da engenharia civil na faculdade de engenharia de Ilha Solteira (FEIS – UNESP). A instituição disponibilizou depósito de materiais e equipamentos que foram suficientes para a realização dos ensaios.

Para a realização do concreto foi utilizado: Cimento Portland II-F-32 da CSN, areia grossa, pedra britada 1 e água. Na figura 2 a seguir é possível visualizar os insumos utilizados.

Figura 2 – Materiais utilizados no concreto



Fonte: Elaborado pelo autor. Sendo, da esquerda para a direita: areia média, pedra britada 1, Cimento Portland II marca CSN

Os materiais foram devidamente pesados em balança, representada na figura 3. Com ela, foi possível garantir que cada material seja pesado com exatidão, o que é essencial para manter a proporção correta dos traços, permitindo resultados mais confiáveis e comparáveis.

Figura 3 - Balança



Fonte: Elaborado pelo autor

Os materiais foram misturados em betoneira, visualizada na figura 4, e a preparação do concreto foi seguida de acordo com a NBR 12821 (ABNT, 2009), que estabelece os métodos e formas de prepará-lo em laboratório.

Figura 4 – Betoneira



Fonte: Elaborado pelo autor

A sequência de colocação dos materiais foi a seguinte:

- 1) Com a betoneira em movimento, adicionou-se os agregados miúdos e graúdos.
- 2) Adicionou-se parte da água de amassamento (cerca de 1/3).

- 3) Após 1 minuto, a contar da introdução da água de amassamento, foi interrompido o funcionamento da betoneira e adicionado o cimento.
- 4) Acionado a betoneira novamente e inserido o restante da água.
- 5) Deixar bater a betoneira por cerca de 3 minutos ou até garantir que a massa esteja homogênea.

Em seguida, realizou-se os ensaios de validação do concreto fresco, quando então foi feita a moldagem dos corpos de prova em moldes cilindros de PVC com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, podendo ser observado na figura 5 a seguir. A cada traço o objetivo foi de moldar 12 corpos de prova.

Figura 5 – Molde cilíndrico de PVC



Fonte: Elaborado pelo autor

A moldagem e cura dos corpos de prova atendeu a NBR 5738 (ABNT, 2015), que prescreve os procedimentos que devem ser realizados.

Para preparar os moldes, passou-se na base e, ao redor do corpo cilíndrico, uma camada fina de óleo mineral ou outro lubrificante que não reaja com cimento. A superfície para apoiar o molde foi rígida, horizontal e livre de vibrações.

Após prepará-los, introduziu-se o concreto de modo a deslocar a concha ao redor da borda do molde, pois isso assegura a distribuição simétrica e, também, foi nivelado o concreto antes de iniciar o seu adensamento com a haste em movimento circular.

O adensamento pode ser feito de forma manual ou de forma mecanizada. Para o atual trabalho, o adensamento foi feito em mesa vibratória. Como se verifica na figura 6, a mesa é plana e horizontal, sendo fundamental para garantir o adensamento correto, removendo os vazios de ar existentes e garantindo melhor resistência do concreto. É nesta fase que é possível observar as possíveis tendências do material à exsudação e/ou segregação.

Figura 6 – Mesa vibratória



Fonte: Elaborado pelo autor

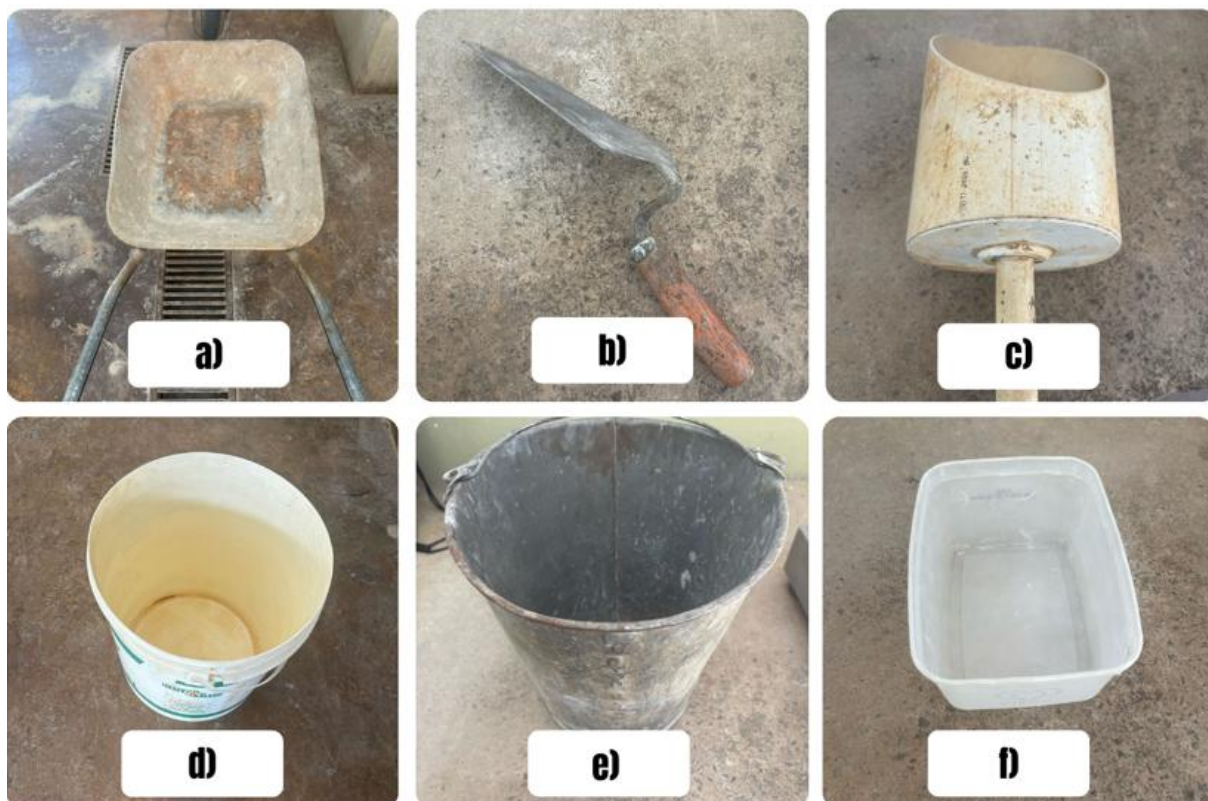
A vibração foi finalizada quando a superfície do concreto apresentou um aspecto liso e regular e quando não apareceu de bolhas de ar na sua superfície. Caso houver excesso de vibração, pode causar em um corpo de prova segregado, ou seja, com separação dos componentes na mistura. Isto é, os agregados se apresentando no fundo, enquanto o cimento fica na superfície. Essa segregação pode comprometer a homogeneidade do concreto, diminuindo sua resistência mecânica, além de reduzir a confiabilidade dos resultados nos ensaios laboratoriais.

Após o adensamento da última camada, foi feito o rasamento da superfície com a borda do molde, com uma régua ou colher de pedreiro.

Depois da moldagem, os moldes foram armazenados em um local horizontal rígido, livre de vibrações e intempéries, protegido coberto com material não reativo e não absorvente, de modo a evitar a perda de água do material, pelo menos durante as primeiras 24h no caso dos corpos de prova cilíndricos.

As ferramentas que foram utilizados para manuseio, transporte ou auxílio de alguma forma, estão evidenciados na figura 7 abaixo.

Figura 7 – Ferramentas utilizadas



Fonte: Elaborado pelo autor. Sendo a) Carriola; b) Colher de pedreiro; c) Concha de PVC; d) Balde de plástico; e) Balde metálico; f) Recipiente plástico.

Em seguida, após a cura inicial de aproximadamente 24h, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%. Isso faz com que o concreto tenha o desenvolvimento adequado. Favorece a hidratação do cimento, ocorrendo a reação química entre o cimento e a água, bem como reduz o risco de fissuras por retração, já que em um ambiente úmido não há perda rápida de água. São retirados 5 corpos de prova a 7 dias e os restantes a 28 dias.

Passados os tempos de cura, são submetidos aos ensaios mecânicos e de absorção de água.

A massa específica aparente do concreto foi avaliada e comparada, posteriormente, com a massa específica de 7 e de 28 dias.

3.2. ESTRATÉGIA E METODOLOGIA DE PESQUISA

Para um estudo das propriedades reológicas e tecnológicas do concreto, foram elaborados diferentes traços com proporções variadas. Em todos os traços, manteve-se constante a quantidade de cimento (12 kg) e a relação agregado graúdo-agregado

miúdo (1:1). Procurou-se variar a relação água-materiais secos H (%) e a relação agregado-cimento (m).

Os valores adotados para “m” foram 3, 4 e 5, enquanto para “H%” foram 8,0%, 9,0% e 10,0%, isto é, será realizado 9 combinações diferentes (3 valores para H (%) e 3 valores para “m”).

O traço, em massa, pode ser demonstrado na proporção de: 1:a:p:x.

Sendo:

1 se refere à massa do cimento;

a ao agregado miúdo;

p ao agregado graúdo;

x à relação água/cimento.

No entanto, como no presente trabalho a relação agregado miúdo:agregado graúdo será 1, a proporção a:p pode ser substituída por “m”. Logo, a proporção a ser utilizada será 1:m:x.

3.3. ENSAIOS REALIZADOS

3.3.1. Ensaio de abatimento de tronco de cone

No estado fresco é realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), de acordo com a norma NBR 16889 (ABNT, 2020), com a finalidade de avaliar as condições de consistência e mobilidade dos concretos.

Para realizar o ensaio, foi necessário: um cone, placa horizontal lisa, haste de ponta arredondada e uma régua.

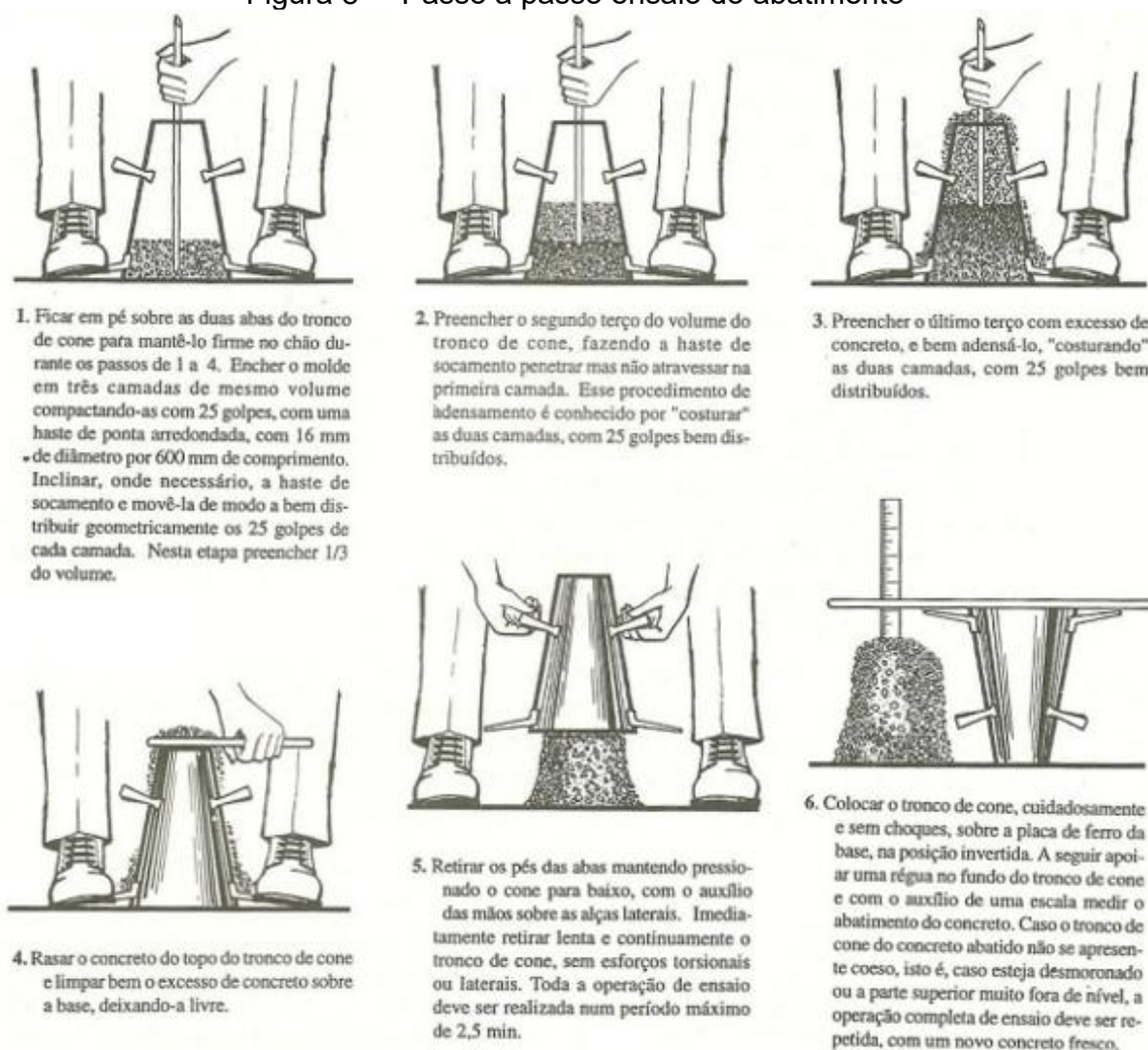
As dimensões do cone deverão ser, segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020), as seguintes:

- Diâmetro da base inferior: $200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
- Diâmetro da base superior: $100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
- Altura: $300 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

De início, colocou-se a placa da base sobre uma superfície lisa, horizontal e livre de vibrações. Umedeceu-se o balde e a placa da base, colocando o molde sobre a placa da base. Assim, pôde-se dar início ao ensaio.

A figura 8 a seguir demonstra o passo a passo da realização do *Slump Test*, qual rege de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020).

Figura 8 – Passo a passo ensaio do abatimento



Fonte: Mehta e Monteiro (1994, p. 350)

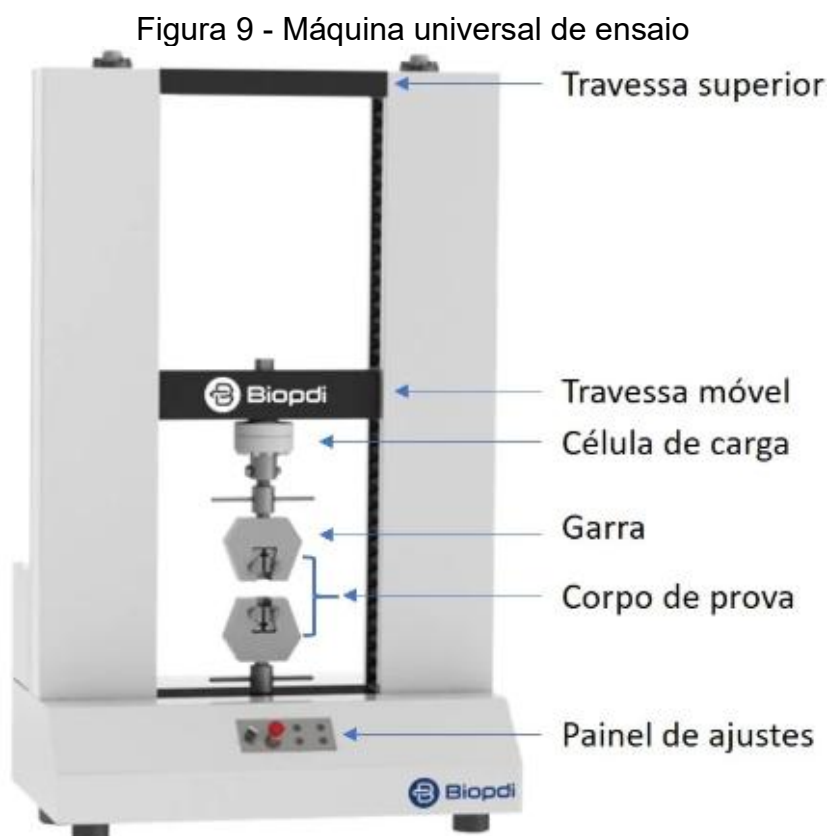
É importante, sempre que possível, manter os mesmos operadores para evitar erros sistemáticos, pois o *Slump Test* envolve procedimentos manuais que estão sujeitos à variabilidade humana. Operadores diferentes podem aplicar pressões distintas durante o adensamento ou puxar o cone em velocidades e angulações variadas, o que pode comprometer a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados.

Finalizado o *Slump Test*, foi preenchido uma forma com volume de 0,75 litros, adensada em mesa vibratória e conseqüentemente pesado, para fins de análise de massa específica. Futuramente, será comparada com a massa específica de 7 e 28 dias.

3.3.2. Ensaio de compressão axial

Para a realização do ensaio, devem ser seguidos os procedimentos descritos na NBR 5739 (ABNT, 2018), a qual estabelece os métodos para determinar a resistência dos CP's moldados em loco ou em laboratório. Os corpos de prova serão retidos a 7 e 28 dias.

O princípio do ensaio consiste na aplicação de uma carga axial crescente sob o corpo de prova até que ocorra a ruptura. A carga é controlada por uma máquina e os dados obtidos são utilizados para cálculo da resistência. A figura 9 a seguir demonstra uma máquina universal de ensaio de coluna dupla, que é utilizada para romper os corpos de prova.



Fonte: Biopdi, adaptado pelo autor

Após o rompimento, o *software* ligado à máquina fornecerá o valor da força máxima alcançada pelo corpo de prova. Assim sendo, será possível descobrir a resistência à compressão individual f_c . Poderá ser calculada de acordo com a Equação 2 a seguir.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (2)$$

Onde F e D são, respectivamente, a força máxima alcançada em newtons (N) e o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros.

No entanto, a mesma norma vigente para esse tipo de ensaio descreve que as dimensões do CP devem ser levadas em consideração. Para tanto, deverá ser aplicado um fator de correção, de acordo com a relação altura/diâmetro (h/d), em conformidade com a tabela 1 a seguir.

Tabela 1– Fator de correção h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: NBR 5739:2018, adaptado pelo autor

O resultado da resistência à compressão f_c deverá expresso em MegaPascal (MPa), com três algarismos significativos.

Conforme descreve Isaia (2007), em um mesmo lote de concreto, o valor de f_c para vários CP's não será igual devido às variáveis envolvidas. A partir dos valores de f_c é possível calcular um valor médio para a amostragem dos corpos de prova. Esse valor é denominado Resistência média do concreto (f_{cm}). Logo, esse valor é encontrado realizando uma simples média aritmética dos valores de f_c encontrados.

Para encontrar a resistência característica do concreto (f_{ck}), seria necessário uma quantidade igual ou maior a 20 unidades de corpos de prova, o que não acontece no presente trabalho.

A figura a seguir demonstra um corpo de prova antes do rompimento.

Figura 10 – Corpo de prova do traço 3 antes de romper



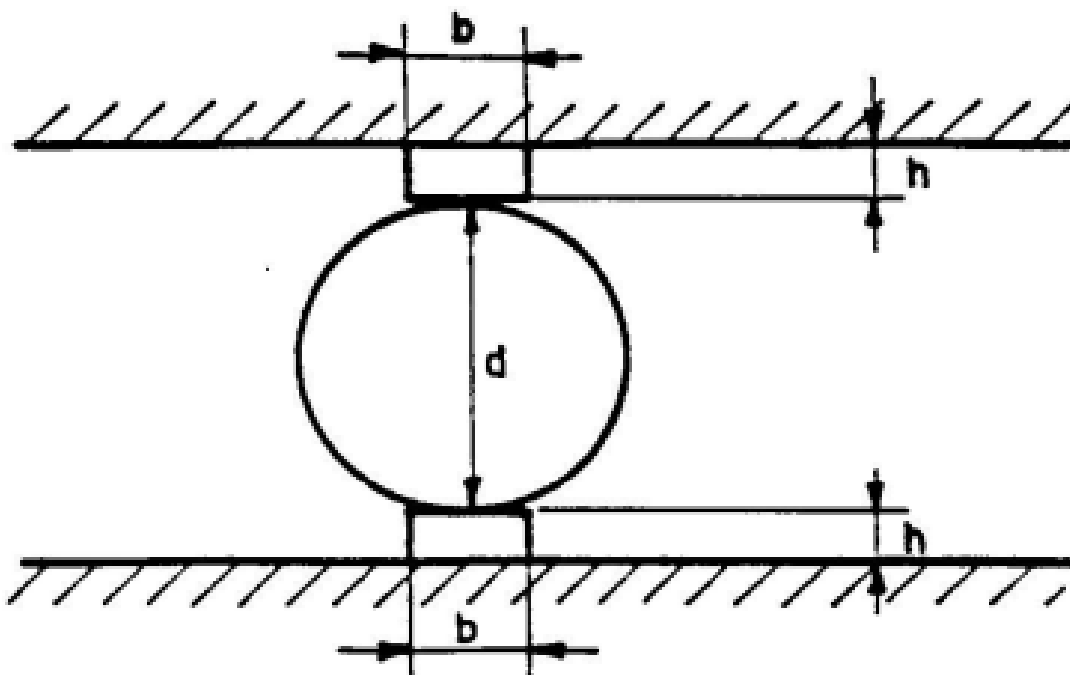
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3. Ensaio de compressão diametral

Da mesma forma, é realizado o ensaio de compressão diametral, sendo regido de acordo com a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), por meio da aplicação de carga compressiva ao longo do diâmetro dos corpos de prova. Da mesma forma que o ensaio de compressão axial, neste ensaio os corpos de prova também serão retidos da câmara úmida a 7 e 28 dias.

Consiste em colocar um corpo de prova cilíndrico com seu eixo longitudinal de forma paralela aos pratos da prensa hidráulica, sendo aplicado uma força até que ocorra a ruptura, como mostra a figura 11.

Figura 11 – Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: ABNT NBR 7222:2011. Sendo b) largura da talisca; d) diâmetro do CP; h) altura da talisca.

A ruptura e consequente separação das duas partes do corpo de prova ocorre ao longo do plano formado pelo contato da prensa, causada pela tensão normal a este plano, isto é, na direção perpendicular a do carregamento.

A resistência à compressão diametral ($f_{ct,sp}$), em megapascal (Mpa), pode ser calculada de acordo com a Equação 3 a seguir.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi DL} \quad (3)$$

Onde:

F é a força máxima obtida no ensaio, expresso em Newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

L é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Na figura 12 abaixo, pode-se observar um corpo de prova antes do rompimento diametral.

Figura 12 – Corpo de prova do traço 3 antes de romper



Fonte: Elaborado pelo autor

Os ensaios de compressão axial e diametral foram feitos em laboratório, com uma máquina de ensaio conectada ao *software* Tesc, o qual fornece resultados precisos sobre os testes executados. Para a correta execução do ensaio, é necessário inserir no sistema informações como dimensões do corpo de prova e o tipo de ensaio a ser realizado.

3.3.4. Ensaio de absorção de água por imersão

Além destes, é realizado o ensaio de absorção de água regido pela norma NBR 9778 (ABNT, 2012), para analisar a porosidade bem como a permeabilidade de cada traço de concreto ensaiado. Segundo essa mesma norma, para registrar a massa seca da amostra (m_s), deve-se separar o corpo de prova desejado e colocá-lo em estufa por 72 horas, mantendo em temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Após, imergi-lo na água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e mantê-lo por 72 h nessa condição. Completa a etapa de saturação, colocar a amostra em um recipiente cheio d'água e levá-lo em ebulição por 5 horas. Depois, deixar a água resfriar até $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Por fim, retirá-lo da água, secar e pesar m_{sat} .

Logo, poderá ser calculado o índice de absorção de água por imersão e correlacioná-los a outros parâmetros relacionados à porosidade e à permeabilidade do concreto, conforme abaixo. Para calcular a absorção (A), em porcentagem, deve-se seguir a Equação 4.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (4)$$

Onde: m_{sat} e m_s são massa saturada e massa seca, respectivamente

Figura 13 – Corpos de prova na estufa a 105°C



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 – Corpos de prova imersos a 25°C



Fonte: Elaborado pelo autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CÁLCULO DOS TRAÇOS

Para a definição dos traços, foram utilizadas combinações entre três valores da relação agregado/cimento ($m = 3, 4$ e 5) e três valores para a relação água/materiais secos ($H = 8\%, 9\%$ e 10%). A massa de cimento foi fixada em 12 kg para todas as misturas.

A massa de agregados foi calculada com base na relação “ m ”:

$$\text{massa de agregados} = m * \text{cimento}$$

- Para $m = 3$

$$\text{massa de agregados} = 3 * 12 = 36\text{ kg}$$

- Para $m = 4$

$$\text{massa de agregados} = 4 * 12 = 48\text{ kg}$$

- Para $m = 5$

$$\text{massa de agregados} = 5 * 12 = 60\text{ kg}$$

A massa total de materiais secos em cada traço foi, portanto, a soma da massa de cimento com a massa de agregados. Com base nessa soma e no valor de H , a massa de água foi determinada de acordo com a relação H (%).

Como exemplo, para o traço 1 com $m = 3$ e $H = 8\%$:

$$Pa = 0,08 * (12 + 36)$$

$$Pa = 3,84\text{ kg}$$

Esse procedimento foi repetido para todas as combinações entre os três valores de “ m ” e os três valores de “ H ”, totalizando nove traços distintos. Todas as misturas foram preparadas com base nesses cálculos e utilizadas nos ensaios experimentais subsequentes. Os resultados dos traços iniciais estão expostos na tabela abaixo.

Tabela 2– Traços iniciais calculados

Traço	Proporção (1:m:x)	Cimento (kg)	Agregados (kg)	Água (kg)
1	1:3:0,32	12	36	3,84
2	1:3:0,36	12	36	4,32
3	1:3:0,40	12	36	4,80
4	1:4:0,40	12	48	4,80
5	1:4:0,45	12	48	5,40
6	1:4:0,50	12	48	6,00
7	1:5:0,48	12	60	5,76
8	1:5:0,54	12	60	6,48
9	1:5:0,60	12	60	7,20

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar o traço 1, notou-se que a mistura apresentava uma consistência extremamente seca e uma baixa trabalhabilidade, dificultando a homogeneização e o adensamento adequado, como é possível ver na figura abaixo.

Figura 15 - Traço inicial 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se a presença de algumas bolotas de material, o que significa que a água utilizada inicialmente não foi suficiente para a mistura se tornar homogênea e minimamente aceitável para o adensamento e posterior colocação na forma. Insistir nessa mistura levaria, certamente, a presença de vazios e elevada porosidade no concreto, causando resultados inconsistentes e não confiáveis.

Sabendo disso, foi adicionado 400 ml a cada mistura e novas proporções foram calculadas de modo a garantir a trabalhabilidade adequada e viabilidade da execução do trabalho. Na tabela 3 a seguir é possível verificar os traços finais que foram executados.

Tabela 3 - Traços finais calculados

Traço	Proporção (1:m:x)	Cimento (kg)	Agregados (kg)	Água (kg)
1	1:3:0,35	12	36	4,24
2	1:3:0,39	12	36	4,72
3	1:3:0,43	12	36	5,20
4	1:4:0,43	12	48	5,20
5	1:4:0,48	12	48	5,80
6	1:4:0,53	12	48	6,40
7	1:5:0,51	12	60	6,16
8	1:5:0,57	12	60	6,88
9	1:5:0,63	12	60	7,60

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. ENSAIO DO ABATIMENTO

Utilizado para avaliar a consistência do concreto, segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020) foi realizado, para as nove misturas, o Ensaio do abatimento do tronco de cone.

A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos.

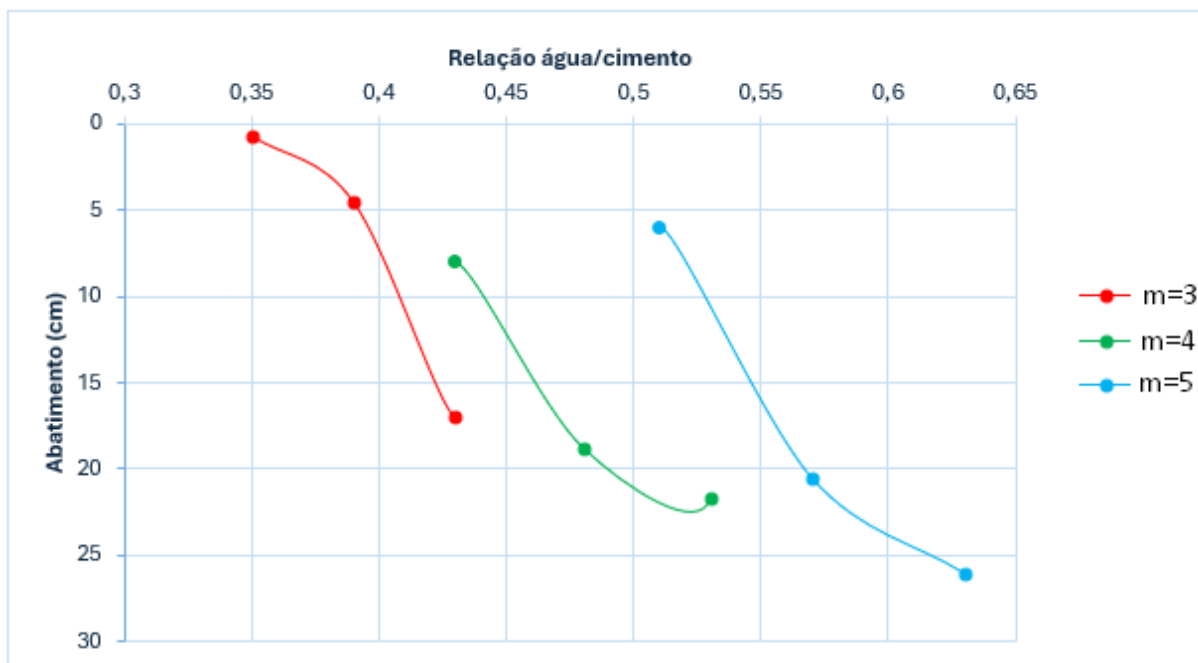
Tabela 4 – Ensaio do abatimento

Traço	Proporção (1:m:x)	Abatimento (cm)
1	1:3:0,35	0,70
2	1:3:0,39	4,50
3	1:3:0,43	17,00
4	1:4:0,43	8,00
5	1:4:0,48	18,83
6	1:4:0,53	21,67
7	1:5:0,51	5,97
8	1:5:0,57	20,50
9	1:5:0,63	26,10

Fonte: Elaborado pelo autor

Do mesmo modo, foi possível plotar, no gráfico 1, a relação água/cimento com o abatimento, e correlacionar esses aspectos.

Gráfico 1 – Influência da relação a/c no abatimento do concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi possível notar, portanto, que o abatimento não apresentou um comportamento totalmente linear com o aumento da relação a/c. Essa variação está associada à mudança na proporção dos agregados “m”, que foi alterada a cada três traços. Quando “m” é o mesmo, nota-se que o abatimento aumenta, como é realmente esperado. Porém, quando essa propriedade é mudada, mesmo que aumente a relação a/c, o abatimento não o acompanha.

Isso vai de acordo com o que indica a NBR 7212 (ABNT, 2024), ou seja, que o abatimento é influenciado não apenas pela relação a/c, mas também pela granulometria e quantidade relativa dos agregados, que afetam diretamente na mistura.

É possível visualizar, na figura 16 a seguir, o ensaio do abatimento para as três primeiras misturas cujo a relação agregado/cimento (m) foi igual a 3 e “H (%)” variando a 8, 9 e 10.

Figura 16 – Abatimento dos três primeiros traços



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Da esquerda para a direita: Traço 1, Traço 2 e Traço 3.

Percebe-se, no traço 1, o abatimento quase nulo (0,70 cm), justificado pela baixa relação a/c. Sendo a menor relação entre todos os traços, resultando, portanto, em um menor abatimento entre todos. Na figura 17 a seguir é possível visualizar o concreto, na carriola, que foi utilizado no traço 1.

Figura 17 – Concreto do traço 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao observar, nota-se uma massa com consistência seca e pouco trabalhável, tornando difícil o lançamento na forma e podendo apresentar vazios se não for bem vibrado.

Da mesma maneira, com “H (%)” variando a 8, 9 e 10, e nestes casos com o valor de “m” igual a 4, é possível observar na figura 18 os abatimentos obtidos.

Figura 18 – Abatimento do quarto ao sexto traço



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Da esquerda para a direita: Traço 4, Traço 5 e Traço 6.

Por fim, foram realizados os três últimos traços, cujo valor de “m” foi 5 e “H%” variando da mesma forma, podendo visualizar na figura 19 a seguir.

Figura 19 – Abatimento dos últimos três traços



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Da esquerda para a direita: Traço 7, Traço 8 e Traço 9.

Nota-se que as misturas mais ricas em água (ou menos ricas em cimento) apresentam mais fluidez e, portanto, maior abatimento. Isso é coerente com o comportamento típico do concreto, que fica mais fluido à medida que apresenta mais água em seu volume.

4.3. MASSA ESPECÍFICA

Ao fim do ensaio do abatimento, pesou-se o concreto em uma fôrma pré-definida com volume já conhecido. Foi feito a comparação com o concreto após o

tempo de cura de 7 e 28 dias. Resultados estão expostos na tabela 5 a seguir. A massa específica acompanha o desvio padrão (S), uma vez que para as massas específicas secas foram pesados mais de um corpo de prova.

Tabela 5 – Resultados da massa específica

Traço	Proporção (1:m:x)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Massa específica a 7 dias + S (kg/m ³)	Massa específica a 28 dias + S (kg/m ³)
1	1:3:0,35	2453,33	2346,58±17,20	2349,13±10,07
2	1:3:0,39	2533,33	2338,94±18,89	2319,84±18,34
3	1:3:0,43	2440,00	2274,01±34,40	2262,55±34,75
4	1:4:0,43	2413,33	2258,73±17,08	2293,11±24,82
5	1:4:0,48	2373,33	2314,75±27,23	2280,37±17,67
6	1:4:0,53	2373,33	2281,65±11,56	2225,62±22,78
7	1:5:0,51	2320,00	2279,10±49,52	2254,91±41,36
8	1:5:0,57	2333,33	2211,62±27,60	2233,26±36,13
9	1:5:0,63	2306,67	2177,24±46,13	2186,15±16,60

Fonte: Elaborado pelo autor

De maneira geral, comparando o valor da massa específica fresca com a massa específica de 7 e 28 dias, nota-se uma diminuição. Essa diferença pode ser explicada por diversos aspectos físicos e químicos que ocorrem durante o processo de endurecimento e cura. Um deles, é o fato de que o concreto fresco apresenta parte da água de amassamento, ocupando espaço dentro do concreto. Com o tempo, essa água evapora, especialmente aquela que não participa da hidratação do cimento, causando diminuição da sua massa sem alterar significativamente seu volume, causando em uma menor massa específica. Outra explicação é que durante os primeiros dias de cura, os produtos de hidratação começam a se formar e, como esses produtos são menos densos que os componentes secos originais (cimento e agregados), acaba contribuindo para a redução da massa específica. Outrossim, a diminuição da massa específica pode estar ligada à retração plástica, ou seja, a água superficial proveniente da exsudação evapora, causando em uma menor massa.

Ainda em análise, percebe-se pouca variação comparando a massa específica a 7 e a de 28 dias. Isso acontece porque a maior parte do processo de hidratação do concreto acontece nos primeiros 7 dias. A partir daí, a variação da densidade desacelera consideravelmente. Entre esses dois períodos, os poros e a microestrutura do cimento se estabilizam, havendo menos alterações físicas mensuráveis na massa específica.

Nota-se, também, que em alguns casos a massa específica aumenta de 28 dias para 7 e, em outros casos, diminui. Essa alternância pode ser dada pelo desvio padrão significativo, em alguns casos. A tendência, naturalmente, é de que tenha um pequeno aumento ou estabilidade, uma vez que o processo de hidratação, mesmo que seja mais lento que nos primeiros 7 dias, ainda ocorre, formando produtos de hidratação que preenchem os vazios.

4.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.

Para este ensaio, foram separados três corpos de prova para cada tempo de cura. Destes corpos de prova, o programa fornece, em MPa, o valor da resistência média (f_{cm}), mas poderia, da mesma forma, ser encontrada a partir da equação 3. A relação h/d é igual a 2 (altura 20 cm e diâmetro 10 cm), logo o fator de correção é igual a 1, de acordo com a tabela 1. Como são três valores de resistência obtidos, a f_{cm} é acompanhada de seu desvio padrão (S). O ensaio de compressão axial realizado seguiu a NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo possível, portanto, obter os resultados que estão expostos na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão axial

Traço	Proporção (1:m:x)	$f_{cm} \pm S$ (MPa) 7 dias	$f_{cm} \pm S$ (MPa) 28 dias
1	1:3:0,35	30,64±2,43	32,86±4,83
2	1:3:0,39	23,49±2,97	25,77±3,77
3	1:3:0,43	20,91±1,57	24,99±1,39
4	1:4:0,43	21,96±2,02	24,12±1,32
5	1:4:0,48	18,69±0,99	22,11±0,57
6	1:4:0,53	17,38±1,89	21,27±0,61
7	1:5:0,51	18,46±1,95	23,08±0,87
8	1:5:0,57	13,51±0,36	17,69±1,00
9	1:5:0,63	10,47±0,66	14,89±0,76

Fonte: Elaborado pelo autor

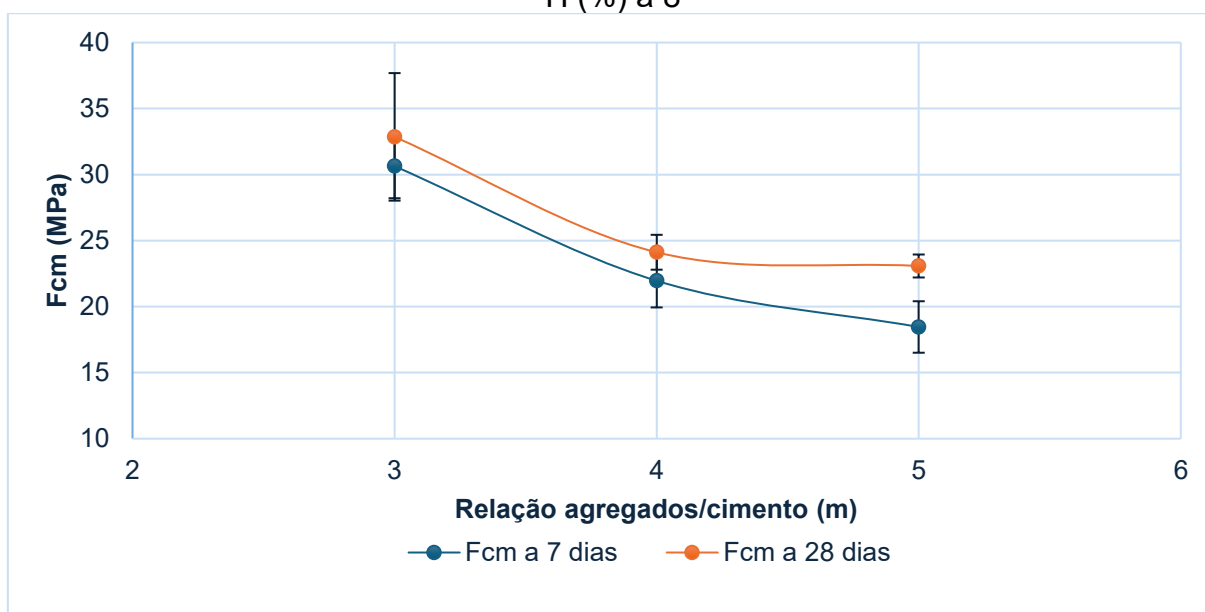
Observa-se que a resistência de 28 dias aumentou em relação ao dia 7. O principal motivo desse aumento se dá pela continuidade da reação de hidratação do cimento. À medida que o cimento continua reagindo com água, mais produtos cimentícios (C-S-H) são formados, aumentando a coesão e, conseqüentemente, a resistência do concreto.

No mesmo tocante, percebe-se que o traço 1 tem a maior resistência à compressão, em relação a todos os traços, tanto aos 7 como aos 28 dias, justamente por ter maior quantidade de cimento (em proporção) e menor quantidade de agregado,

implicando em menor a/c. O valor da resistência de um concreto plenamente adensado é inversamente proporcional à relação água/cimento (NEVILLE, 2016; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Ou seja, quanto mais água em excesso na mistura, mais vazios e poros se formam quando essa água evapora. Esses vazios enfraquecem a estrutura endurecida.

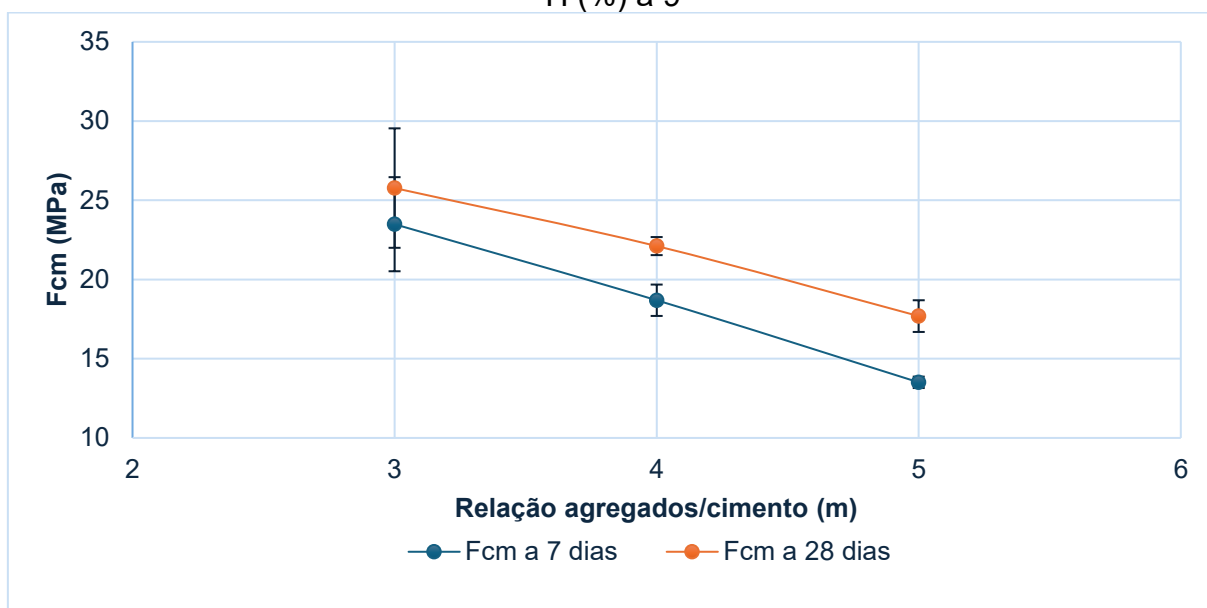
É possível visualizar, nos gráficos 2, 3 e 4 abaixo, a resistência média do concreto com a relação “m”.

Gráfico 2 - Resistência média (f_{cm}) com a relação agregados/cimento (m) mantendo H (%) a 8



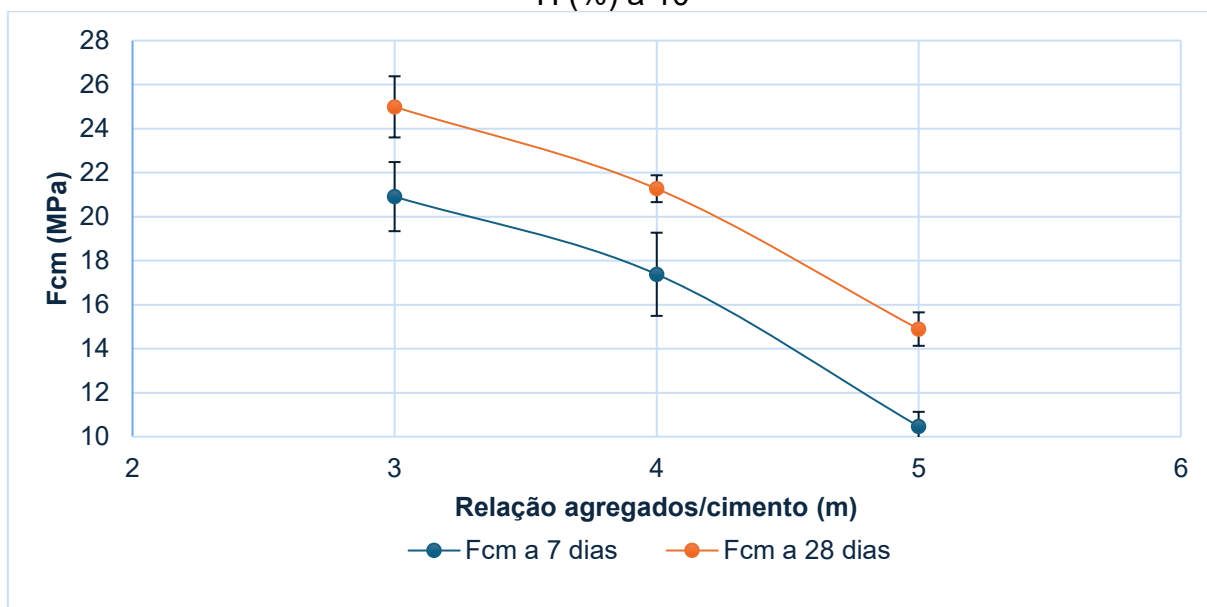
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 - Resistência média (f_{cm}) com a relação agregados/cimento (m) mantendo H (%) a 9



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 - Resistência média (f_{cm}) com a relação agregados/cimento (m) mantendo H (%) a 10



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se, ao fazer uma análise visual do gráfico, que a resistência média à compressão do concreto diminui com o aumento da relação agregados/cimento. Isso prova que uma maior quantidade de agregados dilui a pasta de cimento, reduzindo a ligação entre os grãos e, portanto, a resistência do concreto. Ou seja, menos cimento, neste caso, resulta em menor resistência.

Na figura a seguir, é possível visualizar um corpo de prova rompido no ensaio com características importantes que permitem discutir seu desempenho mecânico.

Figura 20 – Corpo de prova do traço 6 rompido axialmente a 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

Na superfície do corpo de prova, é possível notar a textura relativamente lisa, com nenhum agregado aparente, o que é um sinal de bom adensamento e compactação. A ruptura ocorre de forma frágil (sem aviso prévio) e com pouca deformação.

4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Da mesma forma que o ensaio de compressão axial, o ensaio de tração indireta aconteceu com o tempo de cura dos corpos de prova de 7 e 28 dias. Foram separados dois corpos de prova. O ensaio seguiu a NBR 7222 (ABNT, 2011), documento que normaliza os procedimentos a serem executados.

Diferentemente do ensaio à compressão axial, o programa repassa apenas os dados da força máxima para ruptura. A tabela 7 a seguir demonstra as forças F (força máxima) que romperam os corpos de prova.

Tabela 7 – Força máxima de ruptura a 7 e 28 dias de compressão diametral

TRAÇO	CP	F (kgf) a 7 dias	F (kgf) a 28 dias
1	1	7099	9009
	2	7322	11826
2	3	9999	8549
	4	7043	6931
3	5	5272	5774
	6	4714	7810
4	7	6429	8214
	8	6973	8033
5	9	5690	6611
	10	7587	7113
6	11	4923	7015
	12	5788	6192
7	13	6597	7043
	14	5997	6192
8	15	4421	4728
	16	5272	4560
9	17	4337	4058
	18	3180	4212

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esses valores, é possível determinar, a partir da equação 4, a resistência média à compressão diametral ($f_{ctm,sp}$), acompanhada de seu desvio padrão (S). A tabela 8 expõe os resultados obtidos.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de compressão diametral

Traço	Proporção (1:m:x)	$f_{ctm,sp} \pm S$ (MPa) 7 dias	$f_{ctm,sp} \pm S$ (MPa) 28 dias
1	1:3:0,35	2,25±0,05	3,25±0,62
2	1:3:0,39	2,66±0,65	2,42±0,36
3	1:3:0,43	1,56±0,12	2,12±0,45
4	1:4:0,43	2,09±0,12	2,54±0,04
5	1:4:0,48	2,07±0,42	2,14±0,11
6	1:4:0,53	1,67±0,19	2,06±0,18
7	1:5:0,51	1,97±0,13	2,07±0,19
8	1:5:0,57	1,51±0,19	1,45±0,04
9	1:5:0,63	1,17±0,26	1,29±0,03

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores estão coerentes com a expectativa, uma vez que a resistência à tração do concreto varia geralmente entre 8 e 15% da resistência à compressão.

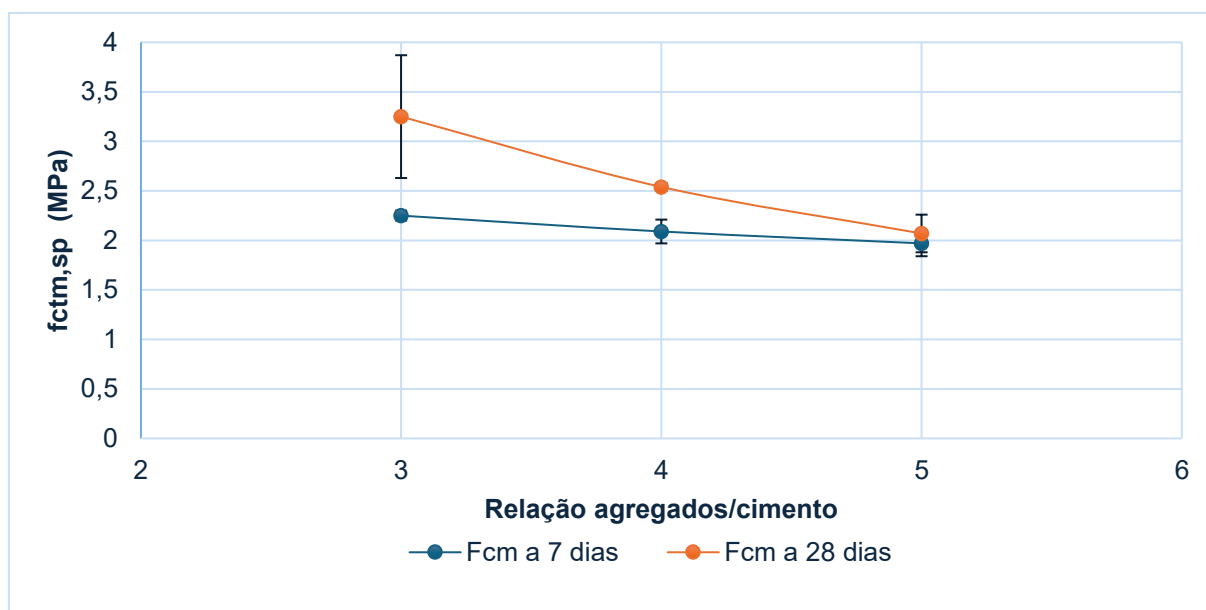
Em concordância com o ensaio de compressão axial, de maneira geral os corpos de prova com menor relação a/c apresentaram maior resistência. Da mesma forma, nota-se aumento da resistência de 7 dias para 28 dias, já que corpos de prova

que tem mais tempo de cura apresentam maior grau de hidratação do cimento, tornando a matriz mais coesa e densa.

Uma observação relevante ao se comparar os traços 3 e 4, que apresentam mesma relação a/c, é a diferença significativa de resultados. Essa variação ocorre devido à maior proporção de agregados no traço 4, ou seja, um valor mais elevado da relação “m”. A maior quantidade de agregados reflete em um maior empacotamento dos grãos, resultando na redução vazios e, conseqüentemente, da porosidade capilar. Por outro lado, o traço 3, mais rico em cimento, tende à retração e microfissuração, o que compromete sua resistência mecânica.

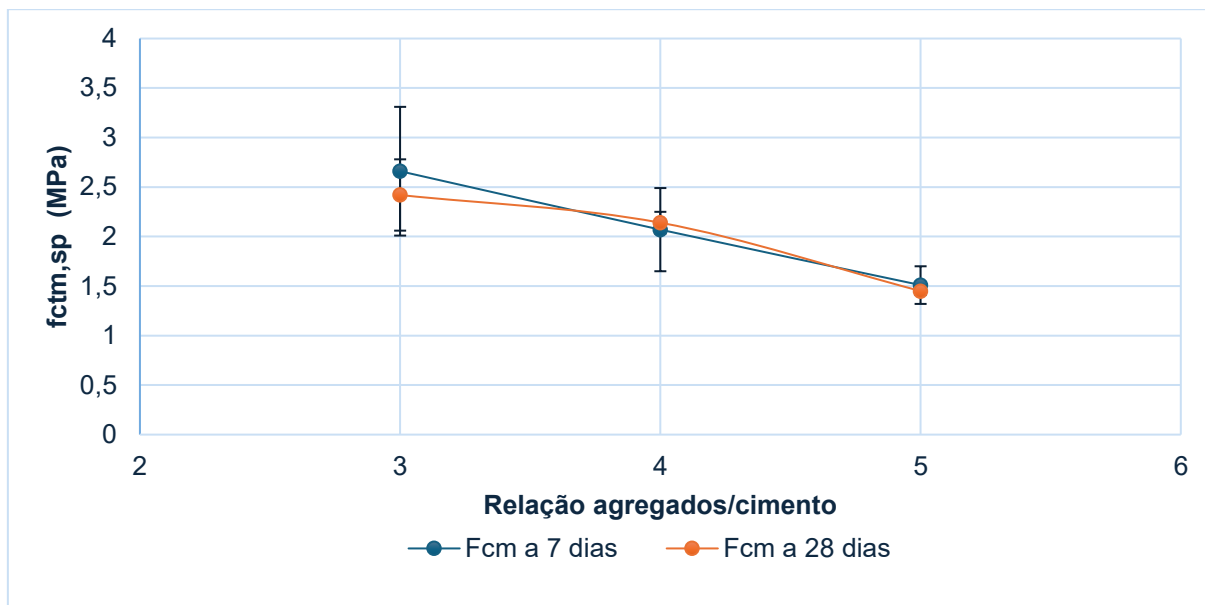
Com isso, é possível relacionar a resistência à compressão com a relação agregados/cimento (m) e discutir o resultado. Os gráficos a seguir demonstram tal relação.

Gráfico 5 – Resistência média à compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) com a relação agregados/cimento (m) mantendo (H%) a 8%



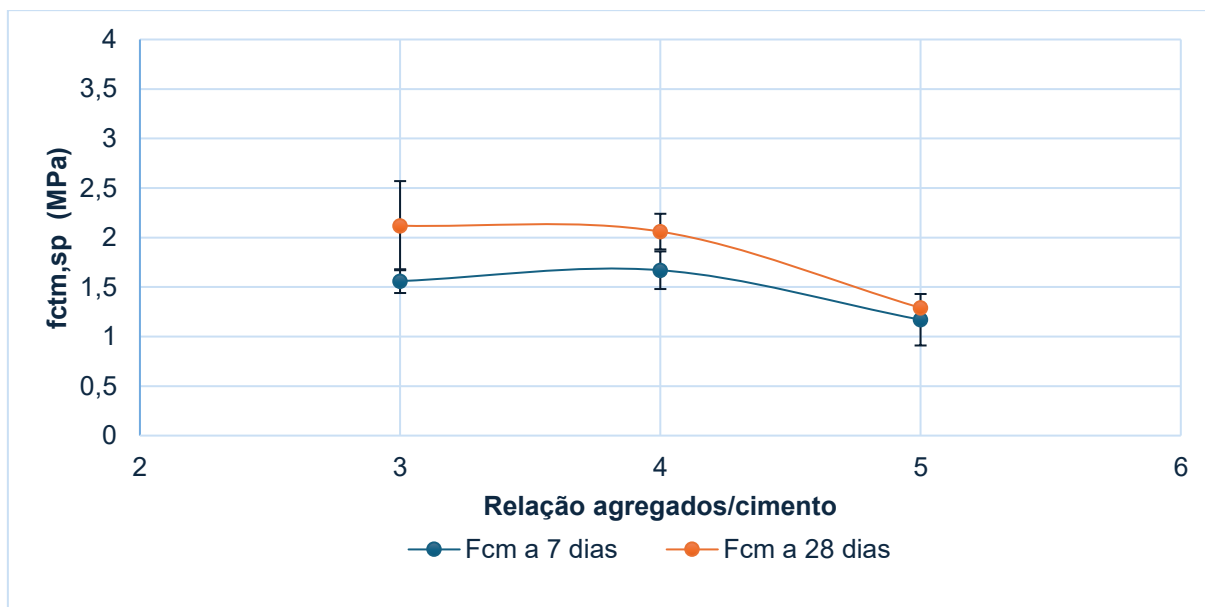
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 – Resistência média à compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) com a relação agregados/cimento (m) mantendo (H%) a 9%



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 – Resistência média à compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) com a relação agregados/cimento (m) mantendo (H%) a 10%



Fonte: Elaborado pelo autor

Semelhantemente ao ensaio de compressão axial, a resistência média à compressão diametral diminuiu a medida em que aumentou a relação agregados/cimento. Menores quantidades de cimento em proporção na mistura significou em menor resistência.

A figura 21 abaixo demonstra um corpo de prova do traço 1 rompido.

Figura 21 – Corpo de prova do traço 1 rompido a 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que o CP apresenta boa distribuição de agregado graúdo, o que indica não apresentar segregação. Além disso, existem alguns vazios visíveis entre os agregados e a pasta de cimento, o que pode indicar que o concreto apresenta baixa trabalhabilidade, como é o caso, visto que o abatimento para o traço 1 foi de 0,70 cm.

Por outro lado, na figura 22 abaixo, pode-se observar o corpo de prova do traço 9 rompido, cujo traço possui maior relação a/c.

Figura 22 – Corpo de prova do traço 9 rompido a 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Repara-se uma superfície mais porosa e os agregados parecem estar mal envolvidos pela pasta de cimento. A matriz cimentícia aparenta estar com baixa densidade e fraca ligação entre os agregados, o que indica fragilidade e baixa resistência mecânica. Essa baixa resistência foi comprovada com o ensaio, uma vez que, para o traço 9, foi apresentado a menor resistência à tração (1,17 MPa e 1,29 MPa a 7 e 28 dias, respectivamente).

4.6. ENSAIO DE ABSORÇÃO

Para conhecer a absorção dos corpos de prova, foi realizado esse ensaio seguindo a NBR 9778 (ABNT, 2005), que estabelece as condições técnicas para a determinação de absorção de água por imersão em argamassas endurecidas. A massa seca (m_s) que foi pesada depois do tempo na estufa e a massa saturada (m_{sat}) estão expostas na tabela 9. Foram separados dois corpos de prova para cada traço. Em especial, o traço 3 contou com apenas um corpo de prova, uma vez que o concreto obtido na concretagem não foi suficiente

Tabela 9 – Massa seca e massa úmida do ensaio de absorção

TRAÇO	M_s (g)	M_{sat} (g)
1	3556,44	3670,58
	3542,68	3650,02
2	3405,82	3562,10
	3386,38	3539,42
3	3369,42	3529,49
	3292,81	3427,55
4	3328,05	3472,43
	3364,58	3526,97
5	3391,54	3578,34
	3310,88	3540,42
6	3325,71	3558,41
	3422,62	3597,90
7	3402,23	3610,08
	3245,96	3475,72
8	3320,70	3549,38
	3136,54	3386,57
9	3197,54	3455,87

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com essas informações, foi possível, a partir da equação 6, calcular a absorção dos corpos de prova de cada traços. Os resultados estão expostos na tabela a seguir.

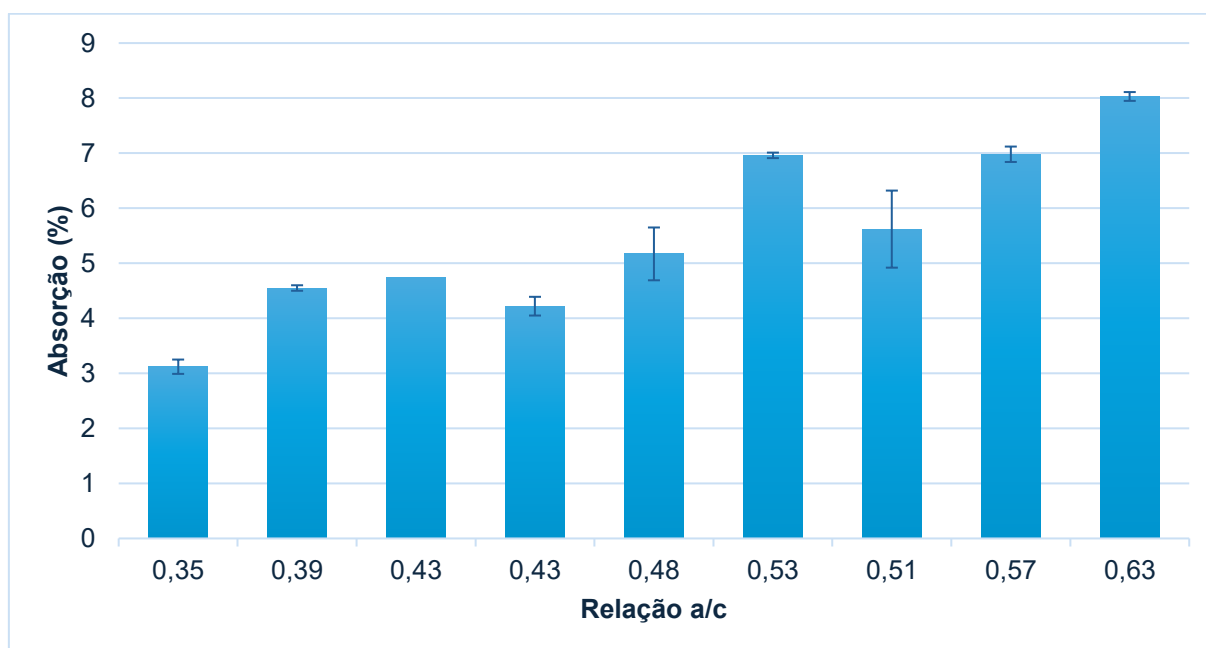
Tabela 10 – Resultado da absorção

Traço	Proporção (1:m:x)	Absorção $\pm$ S (%)
1	1:3:0,35	3,12 $\pm$ 0,13
2	1:3:0,39	4,55 $\pm$ 0,05
3	1:3:0,43	4,75
4	1:4:0,43	4,22 $\pm$ 0,17
5	1:4:0,48	5,17 $\pm$ 0,48
6	1:4:0,53	6,96 $\pm$ 0,05
7	1:5:0,51	5,62 $\pm$ 0,70
8	1:5:0,57	6,98 $\pm$ 0,14
9	1:5:0,63	8,03 $\pm$ 0,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o gráfico 8 a seguir, é possível observar o resultado da absorção e compará-los com a relação água/cimento.

Gráfico 8 – Absorção com a relação a/c



Fonte: Elaborado pelo autor.

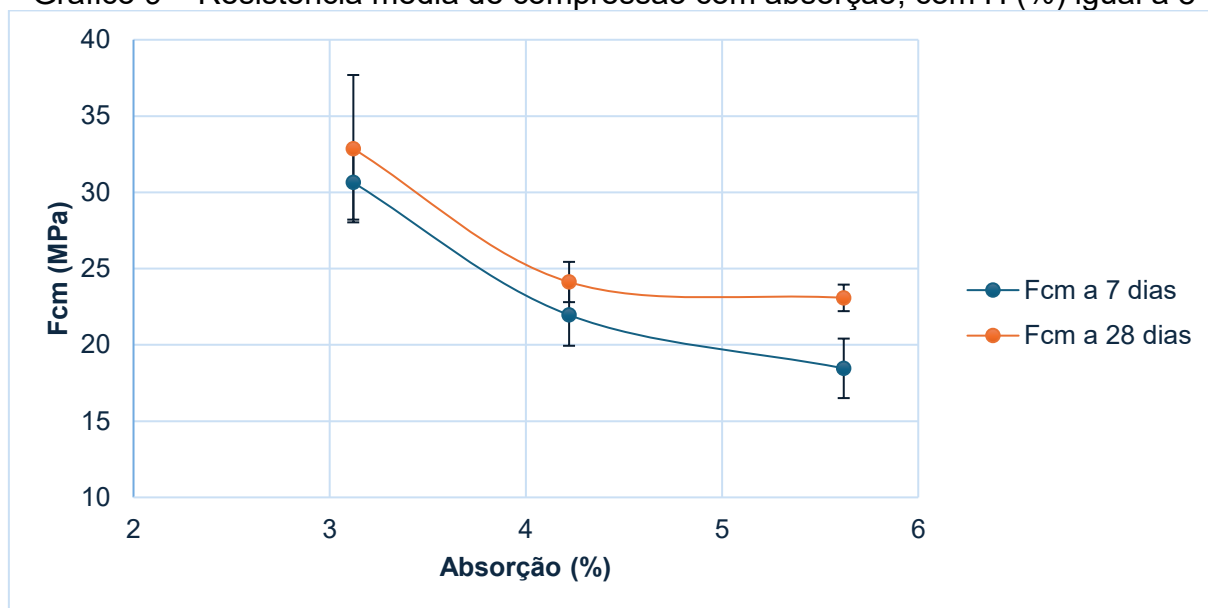
Percebe-se que a relação água/cimento é o fator dominante deste ensaio. A tendência observada é que quanto maior o fator “x”, maior a absorção dos corpos de prova, já que uma maior quantidade de água em relação ao cimento gera mais poros capilares após a evaporação da água, aumentando sua permeabilidade.

Ao comparar o traço 1 com o traço 9, um com menor relação a/c e outro com maior, nota-se um aumento significativo, de 157%, no valor da absorção.

Da mesma forma, comparando o traço 3 e 4, ambos com mesma relação a/c, nota-se que o resultado de absorção, mesmo que ligeiramente, é distinto. Isso mostra que a relação “m” influencia na absorção. O traço 4, por apresentar maior quantidade de agregados e menor quantidade de cimento em proporção, forma menos de gel poroso, absorvendo um pouco menos.

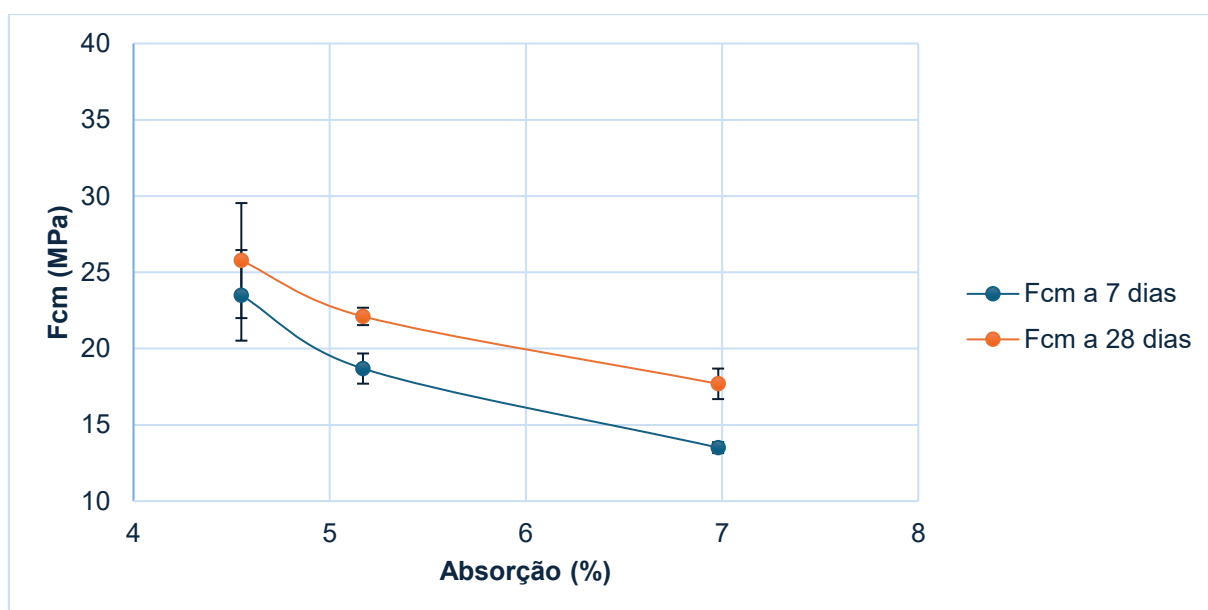
Os gráficos a seguir demonstram a relação entre resistência média do concreto com a absorção.

Gráfico 9 – Resistência média de compressão com absorção, com H (%) igual a 8



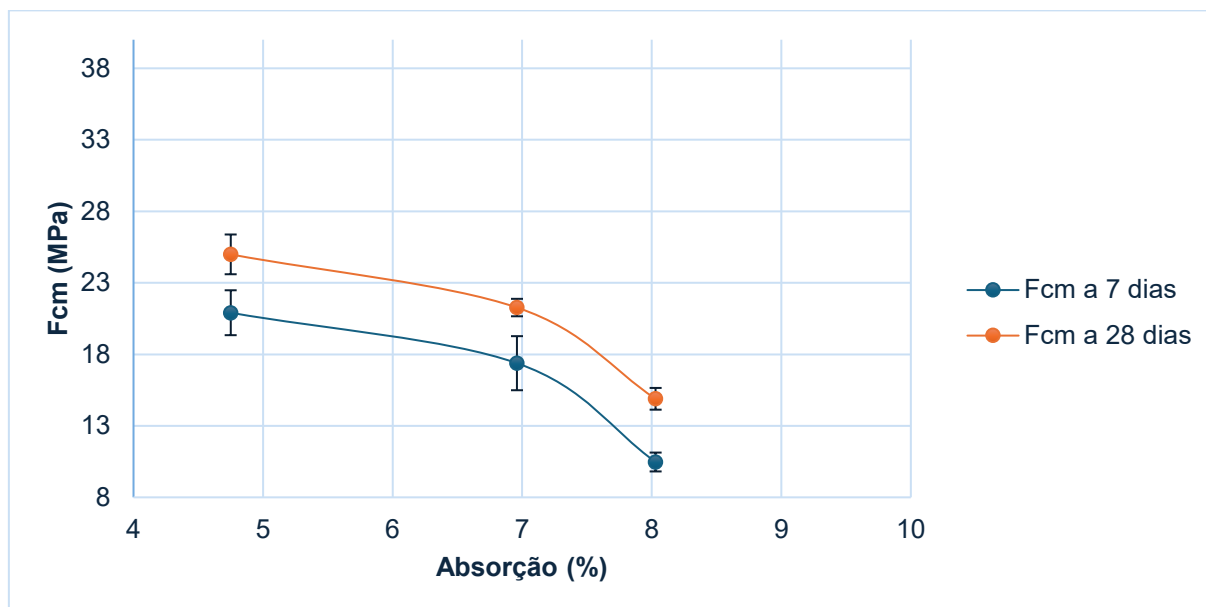
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 - Resistência média de compressão com absorção, com H (%) igual a 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 - Resistência média de compressão com absorção, com H (%) igual a 10

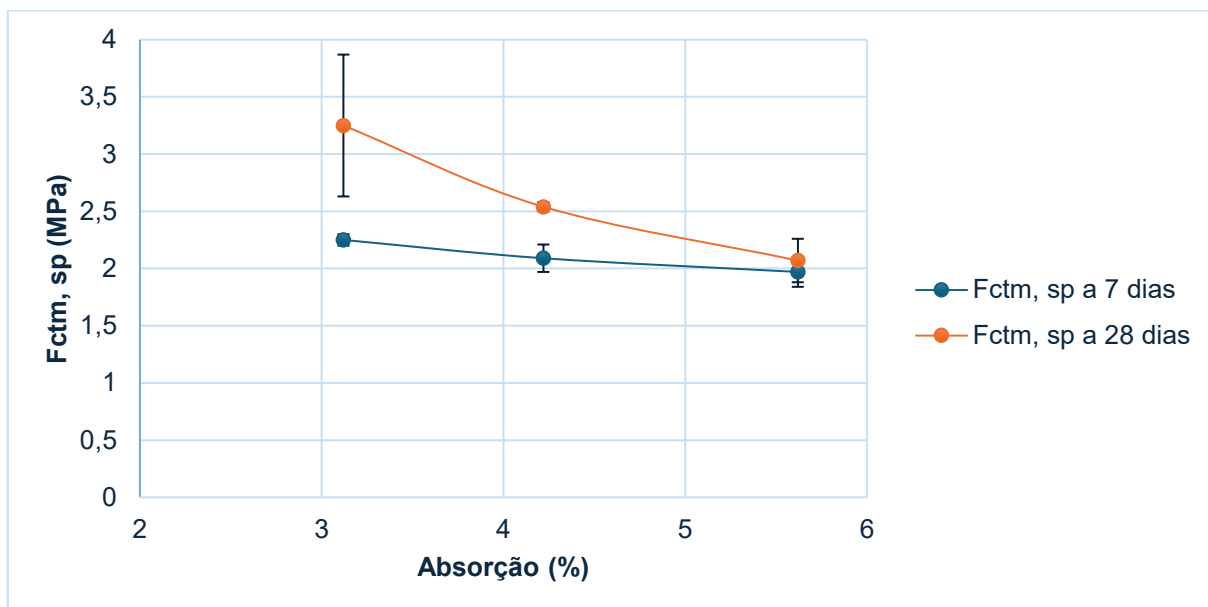


Fonte: Elaborado pelo autor.

Metha e Montheiro (2008) explicam que, em geral, existe uma relação inversa fundamental entre a porosidade e a resistência, e é o que acontece. Em um material heterogêneo como o concreto, a capacidade de absorver água de cada componente pode ser um fator limitante para a resistência. Como os agregados são densos e resistentes, a porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição na interface entre o agregado e a pasta que dita a resistência do concreto.

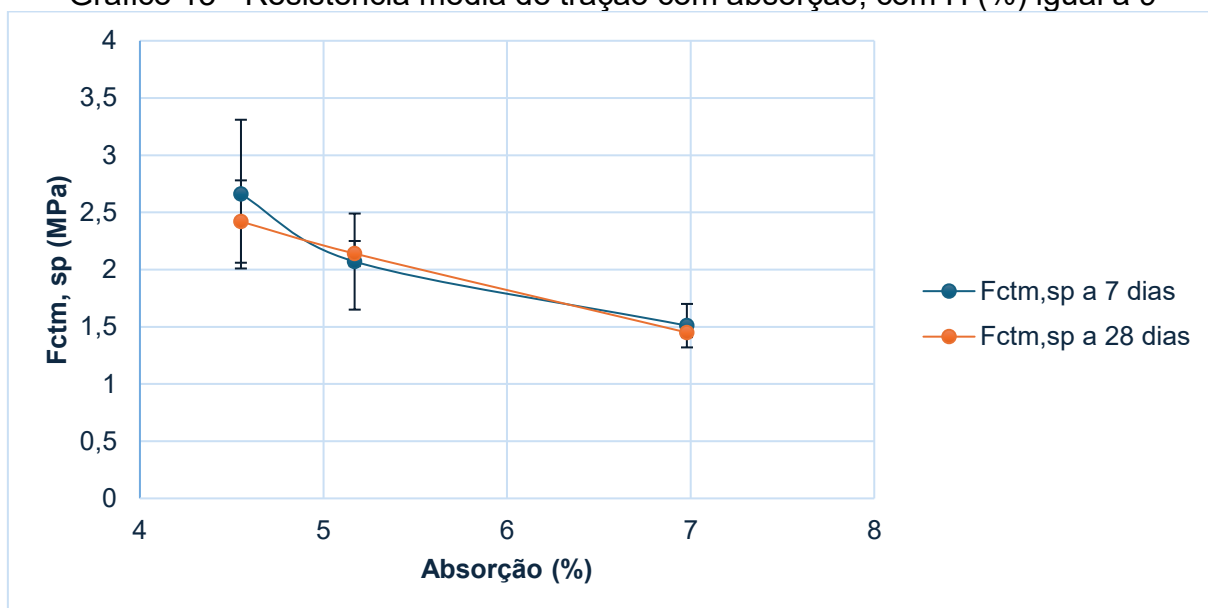
Os gráficos abaixo continuam mostrando essa relação inversamente proporcional, agora com a resistência média à tração.

Gráfico 12 – Resistência média de tração com absorção, com H (%) igual a 8



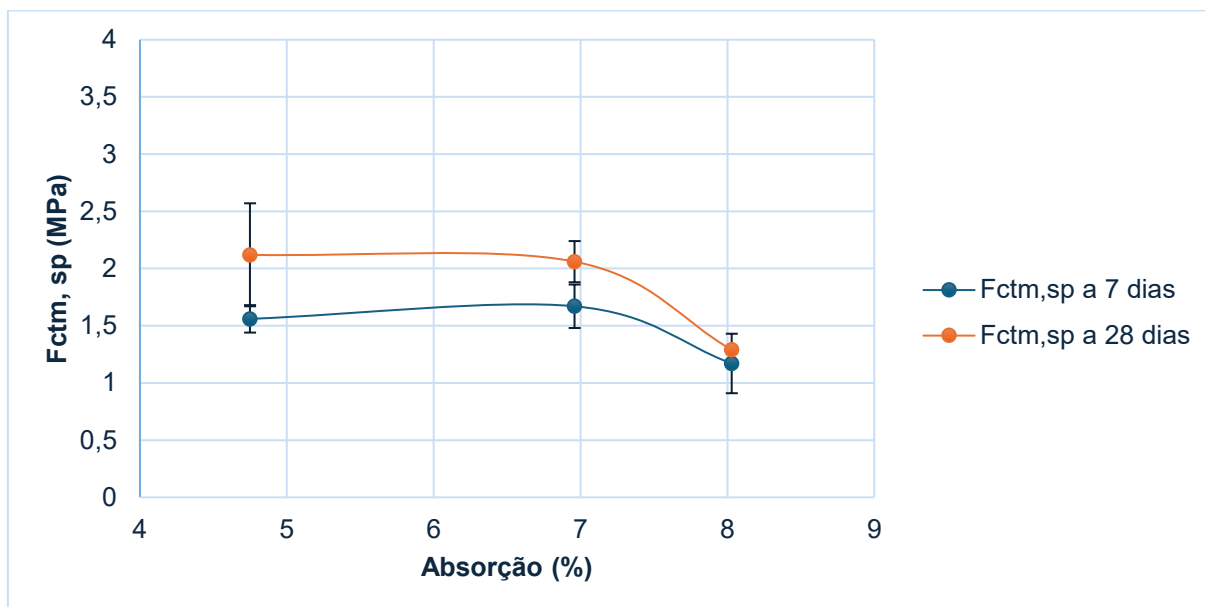
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 - Resistência média de tração com absorção, com H (%) igual a 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 - Resistência média de tração com absorção, com H (%) igual a 10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos, é possível notar que o traço que possuiu maior relação água/cimento e, ao mesmo tempo, maior absorção, foi o traço 9, e este possuiu menor resistência à compressão e à tração entre todos, tanto em 7 quanto em 28 dias. Realizando o inverso, o traço com menor porosidade e menor relação água/cimento foi o traço 1, que apresentou maior resistência à compressão e à tração em 7 e 28 dias. Já que quanto maior a relação a/c e menor o grau de hidratação do cimento, maior será a porosidade capilar do material e menor será a resistência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos foram essenciais para analisar os aspectos do concreto, de modo a validá-lo no seu estado fresco e analisar o desempenho no estado endurecido. O presente trabalho está coerente com o que afirmam Helene e Andrade (2010), que a durabilidade, resistência à compressão, relação água/cimento, o consumo de cimento e o abatimento do concreto tem uma interdependência entre si, isto é, um parâmetro não pode estar totalmente dissociado um do outro.

O ensaio de abatimento do troco de cone, que avalia a consistência do concreto, foram essenciais para demonstrar que, se manter a relação “m” constante, o abatimento tende a aumentar à medida que aumenta a relação água/cimento. A baixa relação a/c demonstrou baixa trabalhabilidade, dificultando o lançamento na fôrma e adensamento. O aumento gradual da relação a/c tornou o concreto mais trabalhável e fluido, facilitando seu manuseio, lançamento e molde no corpo de prova.

Ao avaliar a massa específica fresca e compará-la com as massas específicas de 7 e 28 dias, foi notado uma diminuição. Isso por conta de processos físico-químicos que acontecem no concreto, como a retração plástica, que é quando a água superficial proveniente da exsudação evapora, diminuindo sua massa. Além disso, a água de amassamento que não participa da hidratação do cimento evapora, reduzindo sua massa específica. Comparando a massa específica de 7 e 28 dias, notou-se uma variação quase insignificativa, uma vez que os processos de hidratação acontecem nos primeiros dias.

O ensaio de compressão axial demonstrou que a relação água/cimento é inversamente proporcional a resistência à compressão do concreto. Ao diminuir a relação a/c, foi notado, de maneira geral, aumento da resistência. No entanto, além da relação a/c, foi possível observar que o desempenho mecânico depende também da relação agregado/cimento (m), uma vez que, observado os traços 3 e 4, que possuem a mesma relação a/c, mas diferente “m”, a resistência foi diferente, sendo maior ao traço 3 que possui maior empacotamento dos grãos, logo menos quantidade de vazios e por consequência menor porosidade capilar. A resistência de 28 dias foi maior que a de 7 dias, uma vez que os corpos de prova de 28 dias tiveram mais tempo de hidratação do cimento.

O ensaio de compressão diametral demonstrou coerência nos resultados uma vez que está entre 8 e 15% da resistência média à compressão. Da mesma forma que a resistência à compressão axial, os valores foram maiores a 28 dias.

A absorção encontrada nos corpos de prova foi inversamente proporcional à resistência à compressão, uma vez que misturas mais densas, com menor porosidade e melhor distribuição de partículas sólidas, tendem a apresentar melhor resistência. A relação a/c , quando se mantém “ m ” constante, aumentou a medida em que a absorção também aumenta. Essa relação diretamente proporcional está ligada o excesso de água além do necessário para a hidratação do cimento que permanece no sistema durante a cura.

6. CONCLUSÃO

Foi realizado a manipulação dos parâmetros de dosagem do concreto para, em seguida, executar os ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Conseguiu-se correlacionar os resultados obtidos com os aspectos reológicos e tecnológicos do concreto, de modo a discorrer sobre as suas dependências e influências no comportamento do concreto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. São Paulo, 2015. Disponível em: abcp.org.br/cimento. Acesso em: 2 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para o concreto: requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASTM C125. **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1993.
- BALBO, J.T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 472 p.
- BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, Ed. Livros Técnicos e Científicos, 5ª ed., 2 vol., 2000.

CARASEK, Helena. **Patologia das argamassas de cimento**. Revista Materiais de Construção Civil, São Paulo: Ibracon, 2011. Disponível em: <https://ecivilufes.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/03/patologias-em-argamassa.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

FREITAS, J. J. **Traço do concreto. A importância do controle de água**. Artigo de material cimentício. Disponível em: www.mapadaobra.com.br/inovacao/artigos-tecnicos/traco-de-concreto-a-importancia-do-controle-de-agua/. Acesso em 2 jun. 2025.

GASPARI, Mateus Monegat de. **Determinação instantânea da relação água/cimento através do método da resistividade elétrica em concretos no estado fresco**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2013.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Org). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** São Paulo: IBRACON, 2010.

HOW CONCRETE WORKS. **History of Concrete**. Artigo de concreto, 2006. Disponível em: howconcreteworks.com. Acesso em: 17 mar. 2025.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p.

MANCIO, M.; MOORE, J. R.; BROOKS, Z.; MONTEIRO, P. J. M., GLASER, S. D. **Instantaneous In-Situ Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete**. ACI Materials Journal, Farmington Hills, v. 107, n. 6, p. 586-592, Nov.-Dec. 2010.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto** / tradução Ruy Alberto Cremonini. - 5. Ed. - Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle. **Curso básico de concreto armado**. Oficina de Textos, 2015.

QUADROS, P. A. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, R. E. **A armação do concreto no brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Educação da UFMG, Belo Horizonte, 2008.