

UNIS – CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

ENGENHARIA CIVIL

ZILTON FABIANO DE MIRANDA JUNIOR

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CONCRETOS CONVENCIONAIS E EM
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS HIDROFUGANTES: Levantamento
de informações pela ótica dos mecanismos de transporte no concreto.**

**VARGINHA
2018**

ZILTON FABIANO DE MIRANDA JUNIOR

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CONCRETOS CONVENCIONAIS E EM
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS HIDROFUGANTES: Levantamento
de informações pela ótica dos mecanismos de transporte no concreto.**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como
pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob
orientação do Professor Me. Ivan Francklin Junior.

**VARGINHA
2018**

ZILTON FABIANO DE MIRANDA JUNIOR

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CONCRETOS CONVENCIONAIS E EM
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS HIDROFUGANTES: Levantamento
de informações pela ótica dos mecanismos de transporte no concreto.**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como
pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela
banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

Prof. Me. Ivan Francklin Junior
(Orientador)

Prof. Me.

Prof. Me.

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus pais que são a base do meu caráter e me ensinaram os valores da vida, sem eles nada seria possível e ao meu avô, José Candido da Cruz, que infelizmente não está mais aqui conosco, vovô, obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu chegar até aqui e concluir essa importante etapa da minha vida.

Aos meus amados pais, Zilton e Isabel, que são a base de quem eu sou e sempre estiveram ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, obrigado por tudo.

Ao meus irmãos, Fagner e Zilbele, que me ajudaram e me entenderam nos momentos de ausência.

A minha namorada Thais, que mesmo com todas as barreiras lutou para estar ao meu lado, obrigado por sempre me incentivar e me mostrar que eu posso ir mais longe, obrigado pelo amor, carinho e paciência.

Ao meu orientador professor Ivan Francklin Junior que me deu esse desafio e acreditou em meu trabalho, obrigado por tudo.

A empresa Construtiza Materiais para Construção e aos meus colegas de trabalho que me cobriram nos momentos em que não pude estar presente, muito obrigado.

Aos colegas de laboratório que conheci através desse trabalho, obrigado pela ajuda.

E a todos os professores que participaram da minha formação, respeito muito essa profissão abençoada, sem vocês não estaria aqui, obrigado.

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito”.

Isaac Newton

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo realizar estudos em concretos convencionais e em concretos com aditivos impermeabilizantes que atuam por hidrofugação, observando a capacidade de transporte de fluidos para o interior dos concretos através da absorção por capilaridade, a fim de entender seu comportamento microestrutural, pois além de interferir na durabilidade das estruturas, a absorção é um dos mecanismos de transporte de massa de maior ocorrência. Foram analisados três tipos distintos de concretos, com teores de argamassa seca de aproximadamente $\alpha \cong 46,5\%$, $\alpha \cong 50\%$ e $\alpha \cong 53,5\%$; e fixadas as relações de água/cimento e o consumo de cimento para os diferentes concretos analisados, a fim de se obter parâmetros comparativos confiáveis. Posteriormente foram caracterizados os materiais componentes e produzidos os concretos em laboratório. Após a moldagem e cura dos corpos-de-prova dos diferentes concretos produzidos, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, seguindo os parâmetros estabelecidos por norma. Os resultados, para as idades analisadas, apontaram que os concretos, de uma maneira geral, apresentaram uma altura de infiltração acima dos limites de cobrimento estabelecidos por norma, sendo necessária uma verificação mais aprofundada em cada caso, principalmente de elementos enterrados ou em contato com o solo, a fim de se obter concretos com características de menor permeabilidade e conseqüentemente mais duráveis. Outro ponto observado foi que os aditivos utilizados no estudo causaram interferências negativas nos concretos, afetando suas resistências mecânicas, onde essas apresentaram redução em comparação com os concretos que foram moldados sem o uso de aditivos. A aplicação de hidrófugos de massa, principalmente em concretos para fins estruturais, mostrou-se inviável em um primeiro momento, sendo recomendados estudos mais aprofundados para entendimento, pela ótica microestrutural, de sua interação com os concretos.

Palavras Chave: Absorção por Capilaridade. Mecanismos de Transporte de massa no concreto. Resistência mecânica. Coeficiente de capilaridade. Impermeabilidade.

ABSTRACT

The objective of this work was to study concrete and concrete with waterproofing additives that act by waterproofing, observing the ability of fluid transport to the interior of the concrete through the absorption by capillarity, in order to understand its microstructural behavior to interfere in the durability of structures, absorption is one of the most frequent mass transport mechanisms. Three different types of concretes were analyzed, with dry mortar contents of approximately $\alpha \cong 46.5\%$, $\alpha \cong 50\%$ and $\alpha \cong 53.5\%$; and fix the water / cement ratios and the cement consumption for the different concretes analyzed, in order to obtain reliable comparative parameters. Subsequently, the materials were characterized and the concretes produced in the laboratory. After the molding and curing of the specimens of the different concretes produced, tests of compressive strength, tensile strength by diametrical compression and water absorption by capillarity were carried out, following the parameters established by norm. The results, for the analyzed ages, indicated that the concretes, in general, presented a height of infiltration above the limits of cover established by norm, being necessary a more in depth verification in each case, mainly of elements buried or in contact with the soil, in order to obtain concretes with characteristics of lower permeability and consequently more durable. Another point observed was that the additives used in the study caused negative interferences in the concretes, affecting their mechanical strengths, where these presented reduction in comparison with the concretes that were molded without the use of additives. The application of mass hydrophobics, especially in concrete for structural purposes, was not feasible at first, and further studies are recommended to understand, from the microstructural point of view, its interaction with concrete.

Keywords: *Capillarity Absorption. Mechanisms of mass transport in concrete. Mechanical resistance. Coefficient of capillarity. Impermeability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas granulométricas pela graduação do agregado.....	29
Figura 2 – Recobrimentos dos poros pelo uso do aditivo hidrófugo.....	33
Figura 3 (a) – Ângulo menor e maior contato; (b) – Ângulo maior e menor contato.....	34
Figura 4 – Principais etapas de dosagem experimental.....	42
Figura 5 (a) e (b) – Esquema de tubos paralelos em cubo de material sólido.....	44
Figura 6 – Porosidade capilar.....	46
Figura 7 – Rede de poros da pasta de cimento.....	46
Figura 8 – Fenômeno da capilaridade.....	48
Figura 9 – Curva típica de absorção de água por capilaridade de um material poroso ..	49
Figura 10 – Absorção capilar do tijolo antigo claro alveolar.....	50
Figura 11 – Quarteador mecânico.....	53
Figura 12 – Peneiras utilizadas nos ensaios.....	54
Figura 13 (a) – Massa específica conforme ABNT NBR 9776:1987; (b) massa específica conforme ABNT NBR NM 52:2009.....	54
Figura 14 (a) – Saturação do agregado; (b) condição SSS; (c) pesagem por imersão; (d) massa do agregado seco.....	55
Figura 15 (a) – Massa unitária do agregado graúdo; (b) Massa unitária do agregado miúdo.....	56
Figura 16 – Cura inicial após moldagem.....	59
Figura 17 – Pesagem dos corpos-de-prova no estado fresco.....	59
Figura 18 (a) – Aferição das dimensões dos corpos-de-prova; (b) cura úmida dos corpos-de-prova.....	60
Figura 19 – Prensa hidráulica para o ensaio de resistência à compressão.....	61
Figura 20 – Corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	62
Figura 21 – Equipamento desenvolvido para o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	62
Figura 22 – Aspecto físico do concreto (TR 1) após correções.....	72

Figura 23 (a) – Abatimento (TR 1); (b) abatimento (TR 2); (c) abatimento (TR 3). 73

Figura 24 (a) – Abatimento (TR 2 AL2); (b) abatimento (TR 2 B); (c) abatimento (TR 2 C), (d) abatimento (TR 2 D); (e) abatimento (TR 2 SAB)..... 74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Granulometria do agregado miúdo.....	66
Gráfico 2 (a) – Granulometria da brita 0; (b) – Granulometria da brita 1.	67
Gráfico 3 (a) – Granulometria da relação (30%/70%); (b) relação (40%/60%); (c) relação (50%/50%).	67
Gráfico 4 – Massa unitária do agregado graúdo no estado solto e compactado.	70
Gráfico 5 – Índice de vazios do agregado graúdo no estado solto e compactado.	71
Gráfico 6 – Massa específica do concreto no estado fresco da primeira etapa.	75
Gráfico 7 – Massa específica do concreto no estado fresco da segunda etapa.	76
Gráfico 8 – Resistência média à compressão axial dos concretos da primeira etapa.	77
Gráfico 9 – Resistência média à compressão axial dos concretos da segunda etapa.	77
Gráfico 10 – Altura de ascensão capilar média dos concretos da primeira etapa.	79
Gráfico 11 – Absorção de água por capilaridade dos concretos da primeira etapa.	80
Gráfico 12 – Altura de ascensão capilar média dos concretos da segunda etapa.	80
Gráfico 13 – Absorção de água por capilaridade dos concretos da segunda etapa.	81
Gráfico 14 – Curvas características de absorção capilar dos concretos da primeira etapa.	82
Gráfico 15 – Curvas características de absorção capilar dos concretos da segunda etapa.	82
Gráfico 16 – Coeficientes médios de capilaridade dos concretos.	83
Gráfico 17 – Resistência média à tração dos concretos da primeira etapa.	84
Gráfico 18 – Resistência média à tração dos concretos da segunda etapa.	84
Gráfico 19 – Relação entre a resistência à compressão e o teor de argamassa seca.	86
Gráfico 20 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica da primeira etapa.	87
Gráfico 21 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica da segunda etapa.	88
Gráfico 22 – Relação entre a resistência à tração e à absorção de ambas etapas.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo com os tipos mais comuns de cimento Portland.....	25
Tabela 2 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).27	
Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	28
Tabela 4 – Módulo de finura do agregado miúdo.....	28
Tabela 5 – Propriedades típicas das rochas.....	29
Tabela 6 – Consumo de brita por região e principais estados produtores.....	30
Tabela 7 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	31
Tabela 8 – Classes de resistência de concretos estruturais.....	37
Tabela 9 – Classes de agressividade ambiental (CAA).	38
Tabela 10 – Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para $c=10\text{mm}$	39
Tabela 11 – Classificação e aplicação dos concretos pelo abatimento.	40
Tabela 12 – Relação entre a permeabilidade e a relação a/c	47
Tabela 13 – Traço de referência (TR 1) inicial.	57
Tabela 14 – Traço de referência (TR 1) após correções.	57
Tabela 15 – Traços TR 2 e TR 3.....	57
Tabela 16 – Características do aditivo utilizado na primeira etapa.	58
Tabela 17 – Logística dos corpos-de-prova da primeira etapa.....	58
Tabela 18 – Cronograma de produção e desmoldagem dos corpos-de-prova.....	59
Tabela 19 – Cronograma do ensaio de resistência à compressão axial.	60
Tabela 20 – Cronograma do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. .	63
Tabela 21 – Características dos aditivos utilizados na segunda etapa.	64
Tabela 22 – Logística dos corpos-de-prova da segunda etapa.	64
Tabela 23 – Cronograma de produção dos concretos e idades nos ensaios da segunda etapa.	65
Tabela 24 – Massa específica do cimento.....	68
Tabela 25 – Massa específica pelo método da ABNT NBR NM 52:2009.	69

Tabela 26 – Massa específica pelo método da ABNT NBR 9776:1987.....	69
Tabela 27 – Massa específica do gnaisse.....	69
Tabela 28 – Massa unitária e índice de vazios do agregado miúdo no estado solto e compactado.....	70
Tabela 29 – Resultados de caracterização dos materiais componentes dos concretos...	72
Tabela 30 – Resumo dos abatimentos dos concretos da primeira etapa.....	73
Tabela 31 – Resumo dos abatimentos dos concretos da segunda etapa.....	74
Tabela 32 – Redução da resistência à compressão dos concretos da segunda etapa.....	78
Tabela 33 – Relação entre a resistência à tração e a resistência a compressão.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- α – Teor de argamassa seca da mistura
- a/c – Relação água/cimento
- μm – micrômetro
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI – American Concrete Institute
- ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
- C – Classes de concreto
- CA – Com aditivo
- CAA – Classe de agressividade ambiental
- cm – centímetro
- CP – Cimento Portland
- f_c – Resistência à Compressão do Concreto
- f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão do concreto
- f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto
- f_{cm} – Resistência média à compressão do concreto
- $f_{ct,m}$ – Resistência média à tração do concreto
- $f_{ct,sp}$ – Resistência do concreto à tração indireta
- IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto
- ℓ – comprimento
- MF – Módulo de finura do agregado
- mm – milímetro
- MG – Minas Gerais - Brasil
- MME – Ministério de Minas e Energia
- MPa – Mega Pascal, unidade de tensão
- NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
- NM – Norma Mercosul
- N – Newton
- SA – Sem aditivo
- tf – Tonelada-força
- γ_c – Coeficiente de ponderação da resistência do concreto

TR – Traço de Referência

TR 1 SA – Traço de referência 1 sem aditivo

TR 1 CA – Traço de referência 1 com aditivo do tipo A

TR 2 SA – Traço de referência 2 sem aditivo

TR 2 CA – Traço de referência 2 com aditivo do tipo A

TR 3 SA – Traço de referência 3 sem aditivo

TR 3 CA – Traço de referência 3 com aditivo do tipo A

TR 2 AL2 – Traço de referência 2 com aditivo do tipo A do lote 2

TR 2 B – Traço de referência 2 com aditivo do tipo B

TR 2 C – Traço de referência 2 com aditivo do tipo C

TR 2 D – Traço de referência 2 com aditivo do tipo D

TR 2 SAB – Traço de referência 2 sem aditivo da segunda etapa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Geral	19
1.1.2 Específicos.....	19
1.2 Estrutura do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Estrutura do concreto	22
2.1.1 Cimento Portland	22
2.1.1.1 Tipos de Cimento Portland	22
2.1.2 Agregados	25
2.1.2.1 Agregado miúdo	27
2.1.2.2 Agregado graúdo	28
2.1.3 Água	31
2.2 Aditivos e impermeabilizantes	32
2.2.1 Hidrófugos de massa	33
2.2.2 Hidrófugos de superfície	34
2.3 Ensaio de caracterização dos agregados	35
2.4 Tipos de Concreto	36
2.5 Propriedades do concreto	39
2.5.1 Propriedades do concreto no estado fresco.....	39
2.5.2 Propriedades do concreto no estado endurecido.....	41
2.6 Dosagem do concreto	41
2.7 Durabilidade e mecanismos de transporte de massa no concreto	42
2.7.1 Absorção capilar e permeabilidade	45
2.7.1.2 Transporte de água líquida e coeficiente de capilaridade.....	48
2.7.2 Difusão	50
2.7.3 Migração.....	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos	53
3.1.1 Granulometria	53
3.1.2 Massa específica	54
3.1.3 Massa unitária	55
3.2 Produção dos concretos da primeira etapa	56
3.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos	58
3.2.2 Ensaio de resistência à compressão axial	60
3.2.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade	61
3.2.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	63
3.3 Produção dos concretos da segunda etapa	63
3.3.1 Ensaio de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral	65
4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	66
4.1 Granulometria.....	66
4.2 Massa específica	68

4.2.1 Cimento CP V-ARI.....	68
4.2.2 Agregado miúdo.....	68
4.2.3 Agregado graúdo.....	69
4.3 Massa unitária e índice de vazios.....	69
4.3.1 Agregado miúdo.....	70
4.3.2 Agregado graúdo.....	70
4.4 Caracterização tecnológica dos concretos.....	71
4.4.1 Caracterização dos materiais componentes dos concretos.....	71
4.4.2 Avaliação do concreto no estado fresco.....	72
4.4.2.1 Abatimento pelo tronco de cone.....	72
4.4.2.2 Massa específica do concreto no estado fresco.....	75
4.4.3 Avaliação do concreto no estado endurecido.....	76
4.4.3.1 Resistência à compressão axial.....	76
4.4.3.2 Absorção de água por capilaridade.....	79
4.4.3.2.1 Coeficiente de capilaridade.....	81
4.4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	83
4.5 Análise comparativa dos resultados.....	85
4.5.1 Resistência à compressão x teor de argamassa seca (α).....	86
4.5.2 Resistência à compressão x massa específica.....	87
4.5.3 Resistência à tração x absorção capilar.....	88
5. CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE A – Fotos das amostras dos traços TR 1, TR 2 e TR 3.....	96
APÊNDICE B – Corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão axial.....	99
APÊNDICE C – Corpos-de-prova do ensaio de resistência à tração por compressão diametral e altura da ascensão capilar.....	107
APÊNDICE D – Quadros e Tabelas auxiliares com dados processados no estudo.....	115
ANEXO A – Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto.....	132
ANEXO B – Concreto sujeito a meios agressivos (geralmente em elementos enterrados ou em contato com o solo).....	133

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pedroso (2009) o concreto é um material construtivo amplamente disseminado, podendo ser encontrado em diversas obras como em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolífera móveis.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) por uma variedade de razões é necessário avaliar cuidadosamente as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais de construção para que se possa garantir a qualidade final do concreto, aumentando sua durabilidade e conseqüentemente sua vida útil. O concreto, por ser um material naturalmente poroso é susceptível de ser atacado por agentes deletérios, tornando-o menos durável. Devido a isso, é importante que se obtenha características de impermeabilidade para evitar que tal penetração ocorra. Ainda segundo Mehta e Monteiro (2008) a permeabilidade do concreto depende não só das proporções da mistura, compactação e da cura, mas também de microfissuras causadas pelos ciclos de temperatura e umidade do ambiente.

Em alguns casos, os concretos moldados in loco, seja por método de mistura manual ou mecanizado com uso de betoneiras, são produzidos sem um estudo de dosagem racional prévio. Nestes casos, os concretos podem ficar sujeitos a não atingir uma resistência mecânica que atenda os requisitos normativos mínimos de 20 MPa conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014. Normalmente concretos com baixa resistência são mais porosos e permitem uma penetração generalizada de agentes nocivos ao concreto e às armaduras, segundo Mehta e Monteiro (2008).

A utilização de métodos de dosagem racional é uma alternativa para produção de concretos com maiores controles tecnológicos e conseqüentemente menos permeáveis, segundo Helene e Terzian (1993). Outra alternativa para controle, redução da permeabilidade e da penetração de agentes nocivos em materiais porosos, segundo Repette (2003), se dá pela utilização de hidrófugos de massa (adicionados no processo de produção) ou de superfície (aplicados sobre a superfície externa do material a ser impermeabilizado).

Contudo, segundo Wendler e Charola (2008), em alguns casos, o uso de produtos hidrófugos se revelou mais prejudicial do que benéfica, principalmente pelo insuficiente conhecimento das influências do seu uso nas propriedades do material, conduzindo a aplicações errôneas.

Segundo Silva (2005) é importante entender como os mecanismos de transporte interagem com os concretos e também pela sua interferência na durabilidade das estruturas. Conforme preconizado pela ABNT NBR 6118:2014 o cobrimento mínimo deve ser suficiente para impedir que agressões do meio ambiente penetrem nos concreto e afetem, tanto sua própria estrutura, como também as armaduras.

Partindo por essa ótica, entender o comportamento dos mecanismos de transporte de massa no concreto torna-se de grande importância, sendo a absorção de água o de maior ocorrência, segundo Silva (2005).

O presente trabalho pretende contribuir no enriquecimento literário, devido certa escassez encontrada durante a elaboração desse estudo e também contribuir para uma melhor compreensão do comportamento dos concretos tratados com aditivos a base de hidrófugos, sua eficiência em relação à impermeabilidade e se causam interferências nas propriedades mecânicas dos concretos a serem estudados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a absorção de água por capilaridade em diferentes tipos de concretos, utilizando aditivos impermeabilizantes hidrófugos e verificar possíveis interferências no comportamento mecânico dos concretos com o uso destes aditivos.

1.1.2 Específicos

Como objetivos específicos citam-se:

- Realizar a caracterização física dos materiais componentes dos concretos a serem estudados;
- Estabelecer os traços e produzir os concretos em laboratório;
- Avaliar as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido;
- Executar os ensaios de permeabilidade através da absorção de água por capilaridade;

- Apresentar e discutir os resultados obtidos nos ensaios, fazendo correlações entre os dados de resistência à compressão, resistência à tração, massa específica do concreto e absorção de água por capilaridade.
- Determinar as curvas de absorção e os coeficientes de capilaridade dos concretos estudados.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos principais, quatro apêndices e dois anexos, onde são apresentados todos os processos e documentos para o desenvolvimento desse estudo, a saber:

Capítulo 1: É apresentada a parte introdutória do estudo, bem como a justificativa, apontando para sua relevância e importância e os objetivos que se espera alcançar com a pesquisa;

Capítulo 2: Revisão bibliográfica; onde é apresentada a fundamentação teórica do estudo e a conceituação necessária para o entendimento acerca do tema, através de intensa pesquisa em livros, dissertações e trabalhos científicos, com abordagem voltada aos assuntos relacionados no que foi elaborado na metodologia, resultados e discussão;

Capítulo 3: Materiais e métodos; apresenta todos os procedimentos metodológicos utilizados para realização do estudo, como foram realizados os ensaios, os materiais utilizados e todas as etapas laboratoriais para desenvolvimento do trabalho;

Capítulo 4: Resultados obtidos e discussão; são apresentados, através de gráficos, quadros e tabelas, os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. São feitas as análises críticas e discussões desses resultados, apontando os pontos mais relevantes para maior entendimento do leitor, de acordo com o que foi desenvolvido pela metodologia;

Capítulo 5: Conclusões; são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, sendo também indicadas algumas propostas para desenvolvimento futuro de novos estudos;

Nos apêndices A, B, C e D são apresentadas fotos, quadros e tabelas para consulta mais aprofundada do que foi feito no estudo laboratorial, incluindo resultados e dados obtidos nos

ensaios e os anexos A e B trazem materiais complementares para consulta conforme especificado no desenvolvimento desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura do concreto

2.1.1 Cimento Portland

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) o cimento é um material fino, pulverulento e seco, que desenvolve propriedade de ligação como resultado da hidratação (isto é, a partir de reações químicas entre os minerais do cimento e a água). Um cimento é chamado de hidráulico quando os produtos da hidratação são estáveis em um ambiente aquoso. O cimento mais comumente usado é o cimento Portland.

Segundo Fusco (2008) existem diversos tipos de cimento que podem ser empregados na construção de estruturas de concreto, que são fabricados para o atendimento de necessidades usuais ou específicas de aplicação, ou são decorrentes do aproveitamento de subprodutos de outras indústrias, como por exemplo, a escória de alto-forno.

Os componentes básicos dos cimentos são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). Esses componentes são aglutinados por sinterização, isto é, por aquecimento da mistura até uma fusão incipiente, sendo posteriormente moídos com uma finura adequada. Para o cimento Portland comum, admite-se que a finura Blaine, medida pelo ensaio de permeabilidade ao ar, deva ser no mínimo de $2.600 \text{ cm}^2/\text{g}$. (FUSCO, 2008, p. 19).

Segundo definição da ABNT NBR 5732:1991 o cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos. Na análise de concretos, é relevante conhecer os tipos de cimento, pois o tempo de cura e início de pega varia de acordo com suas características.

2.1.1.1 Tipos de Cimento Portland

Existem diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado, alguns deles são:

- CP I e CP I-S – Cimento Portland comum e Cimento Portland comum com adição;
- CP II-E – Cimento Portland composto com escória;

- CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana;
- CP II-F – Cimento Portland composto com filer;
- CP III – Cimento Portland de alto-forno;
- CP IV – Cimento Portland Pozolânico;
- CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial.

As definições a seguir caracterizam os cimentos apresentando quais as melhores formas de utilizar cada classificação segundo a ABCP (BT106, 2003), porém não abordam características físico-químicas, lembrando que alguns tipos atendem melhor os requisitos relacionados à CAA (Classe de Agressividade Ambiental), desde que respeitado as exigências estabelecidas na ABNT NBR 6118:2014 e demais normas para cada tipo de cimento.

1) Cimento Portland comum e com adição (CP I e CP I-S).

O cimento CP-I é o tipo de cimento Portland mais básico, sendo indicado para o uso em construções onde o ambiente não seja desfavorável como, por exemplo, água do mar, esgotos, etc. De acordo com a ABNT NBR 5732:1991 no cimento CP I é adicionado somente sulfatos de cálcio e no CP I-S é permitido à adição de até 5% de escória de alto-forno, ou pozolana ou filer.

2) Cimento Portland composto com escória (CP II-E).

A norma que trata desse tipo de cimento é a ABNT NBR 11578:1991. O cimento CP II é composto, porque além da sua composição básica (clínquer + sulfatos de cálcio), existe adição de escória de alto-forno de 6% a 34% fornecendo a este tipo de cimento um calor de hidratação menor, sendo indicados para situações onde essa condição precisa ser atendida.

3) Cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z).

A norma que trata desse tipo de cimento é também é a ABNT NBR 11578:1991. Com adição de 6% a 14% de pozolana, este cimento é indicado para obras de infra-estrutura, obras subterrâneas e em situações onde existe presença de água.

4) Cimento Portland composto com filler (CP II-F).

Como no cimento Portland CP II-Z, a norma que trata desse cimento também é a ABNT NBR 11578:1991. Esse cimento contém material carbonático na faixa de 6% a 10%. Não é recomendada sua aplicação em ambientes agressivos, mas pode ser utilizado em concreto armado, como argamassa de assentamento e revestimento.

5) Cimento Portland de alto-forno (CP III).

A norma que trata desse tipo de cimento é a ABNT NBR 5735:1991. É adicionado na proporção de 35% a 70% escoria de alto-forno nesse tipo de cimento sendo indicado em situações que exijam baixo calor de hidratação. Outras vantagens são as características de impermeabilidade e durabilidade, sendo indicado em obras de grande porte e em situações onde a (CAA) é mais agressiva como efluentes industriais, obras submersas, pavimentação, esgotos e também obras em geral de concreto armado ou protendido.

6) Cimento Portland pozolânico (CP IV).

A norma que trata desse tipo de cimento é a ABNT NBR 5736:1991. Ao cimento CP IV é adicionado de 15% a 50% de pozolana, que proporciona a esse tipo de cimento uma maior impermeabilidade, estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos, aumentando por consequência sua durabilidade. É indicado para obras expostas à ação de água corrente, em ambientes agressivos e em especial por possuir baixo calor de hidratação, ele se torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas.

7) Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

A norma que trata desse tipo de cimento é a ABNT NBR 5733:1991. Esse tipo de cimento não contém adições em sua composição (em alguns casos utiliza-se até 5% de material carbonático) e seu processo de dosagem e produção do clínquer garante ao CP V-ARI uma alta resistência já no primeiro dia, chegando a até 26MPa. Normalmente é utilizado em situações onde seja necessário um tempo de desforma menor.

A Tabela 1 apresenta um resumo sintetizando os tipos mais comuns de cimento Portland:

Tabela 1 – Resumo com os tipos mais comuns de cimento Portland.

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma NBR
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou filer (até 5%)	CP I-S 32	5732:1991
		CP I-S 40	
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32	11578:1991
		CP II-E 40	
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	
	Filer (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-70%)	CP III 32 CP III 40	5735:1991
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736:1991
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733:1991
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737:1991

Fonte: ABCP, 2018 (Adaptado pelo autor).

Por sua característica de secagem mais rápida o cimento utilizado na elaboração desse estudo foi o CP V-ARI Campeão da marca CRH, por permitir que o tempo demandado de espera fosse menor que os usuais 28 dias, sendo estabelecido para o estudo um prazo de 7 dias de cura úmida para início dos ensaios nos corpos-de-prova moldados.

2.1.2 Agregados

Segundo Mehta e Monteiro (2008) agregados são materiais granulares, tal como areia, cascalho, pedra britada ou esmagada, escória de alto-forno, resíduos de construção ou de demolição triturados, que são usados juntamente com cimento e água para produzir concreto ou argamassa. Os agregados do concreto podem ser divididos em graúdos e miúdos, conforme sua composição granulométrica.

Os agregados podem exercer influência sobre a resistência mecânica e durabilidade do concreto, estando presentes em torno de 60% a 80% do volume total. Segundo Neville (1997) as propriedades do agregado dependem das propriedades da rocha-mãe, sendo características da composição química e mineralógica, petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física, estrutura de poros e cor. As propriedades físicas e

químicas dos agregados podem ter considerável influência na qualidade do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

De acordo com a ABNT NBR 9935:2011, os agregados de uso na construção civil são classificados da seguinte forma:

Quanto à origem:

- Naturais: encontrados na natureza e podem requerer processos simples de lavagem ou seleção. Ex: areia e pedregulho.
- Artificiais: materiais processados industrialmente, incluindo-se britagem, a partir de matérias-primas naturais. Ex: brita, pedrisco, argila expandida, concreto reciclado de demolições, etc.

Quanto à massa específica:

- Leves: agregados com massa específica menor que 2000 kg/m^3 . Ex: argila expandida, vermiculita.
- Normais: agregados com massa específica entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3 . Ex: areias naturais de cava ou praia, pedras britadas, pedregulho, etc.
- Pesados: agregados com massa unitária acima de 3000 kg/m^3 . Ex: barita, magnetita, hematita, etc.

Quanto às dimensões:

- Agregado graúdo: refere-se às partículas de agregados maiores que de acordo com a ABNT NBR 7211:2009 são os grãos que passam pela peneira com abertura de malha 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75mm.
- Agregados miúdos: referem-se aos grãos que passam pela peneira com abertura de malha 4,75mm e ficam retidos na malha de $75\mu\text{m}$.

A Tabela 2 apresenta o conjunto de peneiras sucessivas, que atendem aos requisitos da ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010, da serie normal e intermediária usados em ensaios de granulometria.

Tabela 2 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	---
---	63 mm
---	50 mm
37,5 mm	---
---	31,5 mm
---	25 mm
19 mm	---
---	12,5 mm
9,5 mm	---
---	6,3 mm
4,75 mm	---
2,36 mm	---
1,18 mm	---
600 μm	---
300 μm	---
150 μm	---

Fonte: ABNT NBR 7211:2009.

Segundo a ABNT NBR 7211:2009 os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto.

2.1.2.1 Agregado miúdo

Segundo Fusco (2008) o agregado miúdo é a areia natural quartzosa ou artificial resultante do britamento de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,75mm.

A distribuição granulométrica, determinada segundo a ABNT NBR NM 248:2003, deve atender aos limites estabelecidos na Tabela 3. Podem ser utilizados como agregado miúdo para concretos materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas em norma, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211:2009.

De acordo com Fusco (2008), para se obter uma apreciação global sobre a composição granulométrica da areia, define-se o MF (módulo de finura), pela soma das frequências relativas acumuladas, obtidas no ensaio de peneiramento normal, isto é, pela soma das porcentagens acumuladas das peneiras da serie normal dividida por 100. Os módulos de finura do agregado miúdo podem ser classificados conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Módulo de finura do agregado miúdo.

Agregado	Módulo de Finura
Areia grossa	MF > 3,9
Areia média	2,4 < MF < 3,9
Areia fina	MF < 2,4

Fonte: Fusco, 2008 (Adaptado pelo autor).

A areia utilizada na produção dos corpos-de-prova desse estudo foi a areia considerada média. A equação 1 foi utilizada para determinação do módulo de finura dos agregados segundo a ABNT NBR 7211:2009.

$$MF = \left(\frac{\sum \% \text{retidas acumuladas da serie normal}}{100} \right) \quad \text{Eq.(01)}$$

2.1.2.2 Agregado graúdo

Segundo Mehta e Monteiro (2008), rochas metamórficas são rochas ígneas ou sedimentares que mudaram a sua textura original, a estrutura de cristal, ou composição

mineralógica em resposta a condições físicas e químicas abaixo da superfície da terra. Os tipos de rochas mais comuns pertencentes a este grupo são o mármore, xisto e gnaïsse.

Um dos materiais mais utilizados como agregado graúdo na produção de concreto é o gnaïsse por apresentar boa resistência à compressão. A Tabela 5 apresenta dados relativos aos tipos de rochas mais utilizadas como agregado na construção civil e suas propriedades.

Tabela 5 – Propriedades típicas das rochas.

Tipos de Rocha ^A	Resistência à compressão MPa			Absorção (%)	Massa Específica (kg/m ³)	Módulo Deformação (GPa)
	Média	Máximo	Mínimo			
Granito	150	240	100	0,1 a 0,8	2600/2700	40/70
Basalto compacto	220	280	180	0,1 a 0,6	2750/2950	60/100
Gnaïsse	150	240	100	0,2 a 0,8	2550/2700	40/70
Calcário ^B	120	200	90	0,2 a 4,5	2600/2800	30/50
Xisto	120	180	100	1,2 a 4,5	2300/2500	25/40
Quartzito	260	400	130	0,1 a 0,8	2550/2700	50/100
Arenito	70	150	50	1,2 a 8,5	2200/2400	20/40

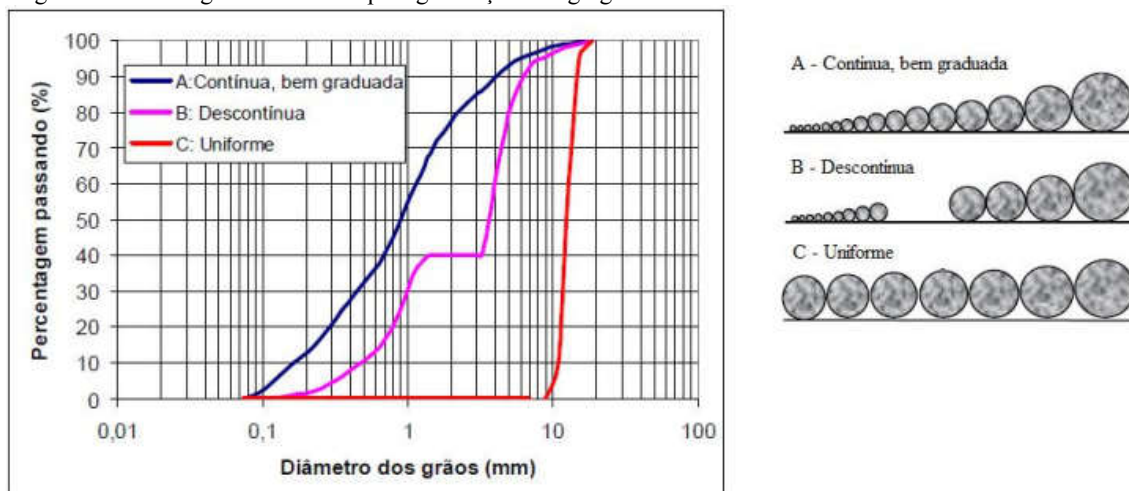
^AOs valores variam nos intervalos assinalados para cada família de rocha e com o estado de alteração intempérica que apresentam, .

^BAs propriedades dos calcários variam muito em função da diversidade dos processos genéticos, que podem originá-los.

Fonte: Sbrighi Neto, 2005.

Segundo Farias e Palmeira (2007) um concreto com menor índice de vazios proporciona maior economia de cimento e ganho de resistência, fatores que estão ligados diretamente à distribuição granulométrica do agregado e compacidade. A Figura 1 apresenta um gráfico com curvas granulométricas classificadas como contínua, descontínua e uniforme.

Figura 1 – Curvas granulométricas pela graduação do agregado.



Fonte: Farias e Palmeiras, 2007.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) para misturas de concreto de alta resistência o ideal é uma limitação na dimensão máxima do agregado a 19mm, pois partículas grandes tendem a gerar mais microfissuras na fase de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento. Outro aspecto importante segundo Farias e Palmeira (2007) é a utilização de agregados com granulometria contínua, pois esses produzem concretos mais trabalháveis e econômicos, devido a uma menor área a ser coberta pela pasta de cimento.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2008) o preço do cimento chega a ser de 10 a 15 vezes maior que o preço do agregado e desde que a resistência não seja afetada, é válido uma redução no custo final do concreto reduzindo a quantidade de cimento a ser empregada na pasta.

De acordo com o MME (2009), comercialmente, as britas são classificadas pela sua granulometria, sendo:

- Pó de pedra: de 0mm a 4,8mm
- Brita 0 ou pedrisco: de 4,8mm a 9,5mm
- Brita 1: de 9,5mm a 19mm
- Brita 2: de 19mm a 25mm
- Brita 3: de 25mm a 50mm
- Brita 4: de 50mm a 76mm

Segundo dados da ANEPAC (2007) o consumo por região e os principais estados do Brasil produtores de agregado, estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 – Consumo de brita por região e principais estados produtores.

Região	Quantidade (10 ⁶ t)
Norte	9,84
Nordeste	16,52
Centro-Oeste	18,88
Sudeste	99,28
Sul	29,16
Estado	Quantidade (10 ⁶ t)
São Paulo	58,4
Minas Gerais	22,32
Rio de Janeiro	14,2
Santa Catarina	11,04
Rio Grande do Sul	9,88
Goiás	9,52
Paraná	8,24

Fonte: MME – Relatório Técnico 30, 2009.

A ABNT NBR 7211:2009 estabelece os limites da composição granulométrica do agregado graúdo conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b - 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

a - Zona granulométrica correspondente à menor (*d*) e à maior (*D*) dimensões do agregado graúdo.

b - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211:2009.

Para elaboração dos concretos foi analisada a granulometria e a massa unitária da brita 0 e da brita 1 individualmente e da mistura de ambas em proporções sendo 70% de brita 1 e 30% de brita 0, 60% de brita 1 e 40% de brita 0 e por ultimo 50% de ambas para definir qual agregado ou qual a mistura ideal para produção dos corpos-de-prova.

2.1.3 Água

Segundo Fusco (2008) a água destinada ao amassamento do concreto deve ser isenta de teores prejudiciais de substâncias estranhas. O concreto, no estado endurecido, fica mais vulnerável ao ataque de agentes agressivos presentes na água em comparação quando o concreto ainda se encontra no estado fresco, pois o processo de hidratação neutraliza grande parte desses agentes. Ainda segundo Fusco (2008), uma vez em contato com agentes agressivos, a neutralização não acontece mesmo com a renovação da água sobre o concreto endurecido.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a água geralmente está envolvida em qualquer forma de deterioração de estruturas e a facilidade da penetração nos sólidos porosos geralmente determinam sua taxa de degradação.

De acordo com Salgado (2009) a água deve ser armazenada de forma a não entrar em contato com materiais reagentes além de estar isenta de elementos deletérios como óleos, folhas, graxas e galhos.

A ABNT NBR 15900-1:2009 estabelece os requisitos para utilização e aceitação da água para produção de concretos de acordo com sua fonte de origem. O Anexo A disponibiliza o fluxograma para avaliação de aprovação ou reprovação da água.

2.2 Aditivos e impermeabilizantes

A busca por mecanismos que controlem a penetração de água nas construções são de longa data, existem registros de aplicação de óleos e ceras para a proteção das rochas em templos gregos e romanos, segundo Charola (1995).

De acordo com o Comitê nº 201 da ACI (2001) a durabilidade de um concreto de cimento Portland é definida pela sua capacidade de resistir à ação de desgaste de ataques químicos, abrasivos ou por qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma original e qualidade quando expostos ao ambiente para o qual foi produzido.

Segundo a ABNT NBR 11768:2011, aditivos são produtos adicionados durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido, exceto pigmentos inorgânicos para o preparo do concreto colorido. Alguns tipos de aditivos para aplicação em concretos e argamassas são:

- Redutor de água (plastificante e superplastificante): pode ser usado para reduzir o consumo de água de um concreto; ou, para aumentar o abatimento e a fluidez; ou, ainda, para produzir esses dois efeitos simultaneamente;
- Incorporador de ar: permite incorporar, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, que permanecem no estado endurecido;
- Acelerador de pega: diminui o tempo de transição do estado plástico para o estado endurecido do concreto;
- Acelerador de resistência: aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais do concreto, com ou sem modificação do tempo de pega;

- Retardador de pega: aumenta o tempo de transição do estado plástico para o estado endurecido do concreto.

2.2.1 Hidrófugos de massa

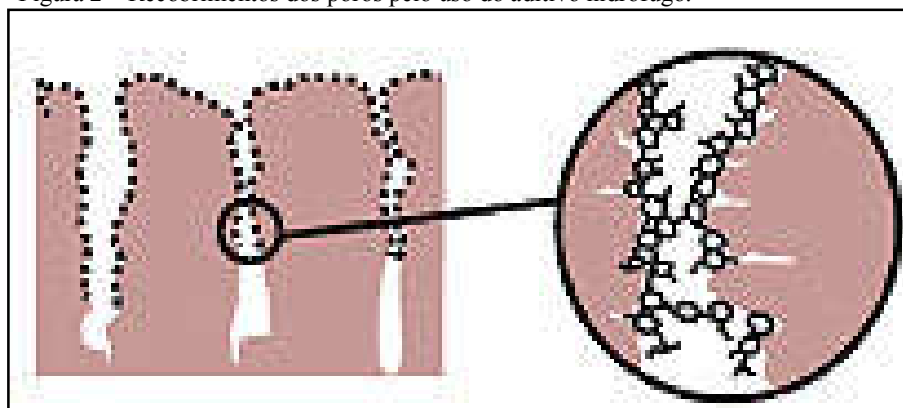
O uso de aditivos impermeabilizantes está cada vez mais presente na construção civil, com o principal intuito de evitar o aparecimento de patologias. De acordo com Repette (2003) os aditivos hidrofugantes atuam de forma a impedir que a água seja atraída por absorção ou sucção, reduzindo a permeabilidade e agindo sobre a estrutura capilar da pasta de cimento.

Os hidrófugos de massa, objeto desse estudo, de acordo com Correia et al. (2013) são produtos que formam misturas hidrófobas ao reagirem com a pasta cimentícia no processo de hidratação do concreto; essas misturas hidrófobas impregnam nos capilares da argamassa endurecida e formam uma camada que repele a água.

Pinto (1997) alerta quanto à utilização dos hidrófugos, principalmente os de massa, orientando que sua ação deve ser avaliada através da sua capacidade inicial em alterar o comportamento do material em contato com a água, se ele se comporta de forma nociva alterando de forma indesejada ou prejudicial o material onde ele está sendo empregado, sua influência na durabilidade e sua eficácia ao longo do tempo.

De acordo com Repette (2003) o aditivo hidrofugante reage com o cimento e modifica a superfície dos produtos hidratados, atuando na formação de um filme (película) na superfície do capilar da pasta ou na dispersão na superfície com finas partículas repelentes no cimento hidratado na composição geral. A Figura 2 apresenta o recobrimento dos poros pelo uso de aditivo hidrofugante conforme Maranhão et al. (2008).

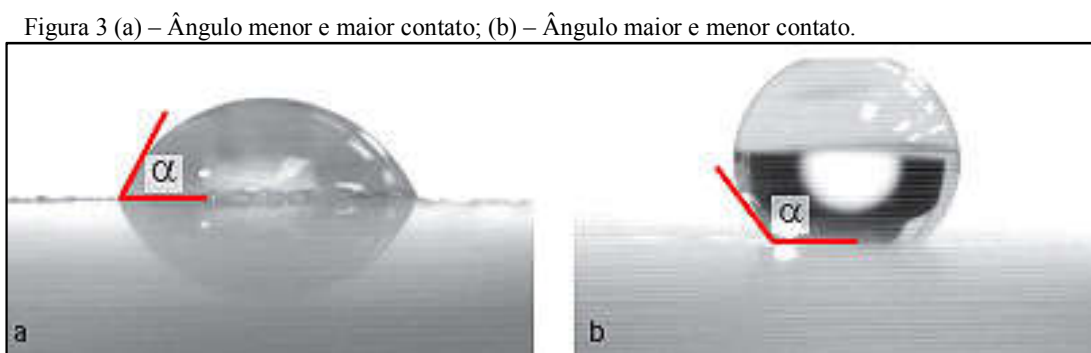
Figura 2 – Recobrimentos dos poros pelo uso do aditivo hidrófugo.



Fonte: Maranhão et al., 2008.

A água exerce ação deletéria nas propriedades dos materiais de construção porosos, reduzindo seu desempenho térmico, acústico, provocando eflorescências e acelerando o crescimento de micro-organismos, conforme Maranhão et al. (2008). O principal fator de atuação da água nos concretos, argamassas e granitos se dá em consequência de sua tensão superficial que é de 73 miliNewton/m, significativamente mais baixa do que a dos materiais cerâmicos que são superiores a 500 miliNewton/m. Como consequência dessa diferença de tensão superficial, os ângulos de contato da água na superfície são menores conforme pode ser observado na Figura 3 (a).

Conforme Maranhão et al. (2008) os polímeros, incluindo os hidrofugantes, apresentam uma tensão superficial inferior à da água apresentando características hidrofóbicas. Quanto menor for a tensão superficial do polímero, maior é o ângulo de contato. O comportamento hidrofóbico é caracterizado por ângulos de contato superior a 90° como pode ser observado na Figura 3 (b).



Fonte: Maranhão et al., 2008.

2.2.2 Hidrófugos de superfície

Conforme Charola (1995) a estrutura química da água é constituída por oxigênio (carga negativa) e hidrogênio (carga positiva); devido a isso, em contato com pedras, tijolos e concretos, ocorre atração que resulta na absorção da água, pois esses elementos também possuem cargas positivas e negativas.

Santana (2002) ressalta que os hidrófugos de superfície tem por finalidade reduzir a absorção e sucção capilar através da aplicação de aditivos na superfície dos materiais porosos, agindo quimicamente como repelente. Alguns efeitos como alterações no aspecto visual, redução da permeabilidade ao vapor e retardamento da secagem podem ocorrer pela utilização

dos hidrófugos de superfície, devido a isso se torna necessário conhecer o grau de nocividade de acordo com o tratamento.

Henriques (1992); Santana (2002) concordam que os tipos de hidrófugos de superfícies mais comumente usados são:

- Os siliconatos, que reagem com o dióxido de carbono do ar formando uma camada hidrofóbica na superfície onde foi aplicada;
- Os silicones, que possuem baixa viscosidade favorecendo nesse aspecto a penetração do produto na superfície onde são aplicados. Além disso, eles têm elevada durabilidade e apresentam boa resistência a agentes químicos, microorganismos e efeitos do temperismo;
- As resinas silicônicas, que atuam formando moléculas orgânicas hidrófobas que se fixam na superfície aplicada após a evaporação do solvente que faz parte da composição do produto;
- Os organometálicos, que são constituídos por compostos de titânio e estearatos de alumínio e em algumas superfícies eles não são indicados;
- E as resinas acrílicas, que são um dos tipos de polímeros mais utilizados para conservação de superfícies e atribuem características hidrorrepelentes às superfícies tratadas.

Ainda segundo Henriques (1992); Santana (2002), os hidrófugos de superfície devem ser aplicados de preferência com a superfície seca ou de forma que não afetem a secagem. Quando a secagem é retardada ou há presença de água por períodos prolongados podem resultar no desenvolvimento de microorganismos biológicos.

2.3 Ensaios de caracterização dos agregados

Segundo Frazão (2002), a caracterização tecnológica de rochas para uso como material de construção é feita por meio de técnicas apropriadas que permitem conhecer as propriedades das rochas isoladamente ou em conjunto e de forma direta ou indireta.

A seguir são conceituados apenas os ensaios físicos básicos de granulometria, massa específica e massa unitária:

- **Granulometria:** através de peneiras com malhas de abertura definidas em norma é feito o peneiramento para obter a distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados para definir e direcionar sua aplicação.
- **Massa específica:** para o cálculo da dosagem do concreto é importante saber a massa específica tanto dos agregados como do cimento.
- **Massa unitária:** tem interferência na resistência do concreto em relação com os índices de vazios, pois essa informação ajuda na escolha do agregado. Um menor índice é consequentemente melhor para elaboração de concretos mais resistentes.

2.4 Tipos de Concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o concreto consiste, através de um meio ou agente de ligação, de um material compósito dentro do qual estão incorporados partículas ou fragmentos de agregados. Em concretos de cimento hidráulico, o agente de ligação é formado a partir da mistura deste com água. Esses materiais associados entre si resultam em:

- **Pasta:** cimento + água;
- **Argamassa:** pasta + agregado miúdo;
- **Concreto:** argamassa + agregado graúdo.

De acordo com a ABNT NBR 8953:2015 os concretos são classificados em dois grupos:

- Grupo I são os concretos da classe C20 até C50, em se tratando de concretos estruturais,
- Grupo II os concretos C55 até C100, sendo os números indicadores representantes da resistência característica à compressão especificada em MPa para a idade de 28 dias.

A Tabela 8 detalha as classes e as respectivas resistências características à compressão:

Tabela 8 – Classes de resistência de concretos estruturais.

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45		
C50	50	C100	100

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 8953:2015, os concretos são classificados como:

- **Concreto normal (C)** concreto com massa específica seca, de acordo com a ABNT NBR 9778:2005, compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³;
- **Concreto leve (CL)** concreto com massa específica seca, de acordo com a ABNT NBR 9778:2005, inferior a 2000 kg/m³;
- **Concreto pesado ou denso (CD)** concreto com massa específica seca, de acordo com a ABNT NBR 9778:2005, superior a 2800 kg/m³.

A ABNT NBR 6118:2014 classifica os concretos sendo os C20 ou superiores para serem utilizados com armadura passiva e os acima de C25 podem ser usados também como armadura ativa (Concreto Protendido) e ainda estabelece que os de classe C15 podem ser utilizados em obras provisórias ou em concretos sem fins estruturais.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a taxa de utilização do concreto é muito maior do que era há 40 anos. Estima-se que o atual consumo de cimento no mundo é na ordem de 11 bilhões de toneladas de m³ por ano. Isso ocorre principalmente devido sua excelente resistência à água, possui um custo mais baixo e sua resistência aumenta com o tempo.

A classificação do concreto pode ser feita a partir de critérios de resistência à compressão (f_{ck} aos 28 dias), dividindo-se nas seguintes categorias segundo Mehta e Monteiro (2008):

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 MPa à 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Segundo Carvalho e Filho (2014), a durabilidade das estruturas de concreto e a perda da qualidade estão relacionadas à agressividade do meio ambiente e de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, os projetos devem ser classificados conforme o ambiente em que serão executadas conforme Tabela 9:

Tabela 9 – Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾ Industrial ^{1),2)}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{1),3)} Respingos de maré	Elevado
1)	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos: salas, dormitórios, banheiros, cozinhas, áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.		
2)	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde chove raramente.		
3)	Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.		

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

A Tabela 10, segundo a ABNT NBR 6118:2014, define os cobrimentos mínimos de acordo com a CAA para os elementos estruturais usuais.

Tabela 10 – Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para $c=10\text{mm}$.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 9)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.5 Propriedades do concreto

Helene e Terzian (1993) consideram a dosagem como um processo abrangente, envolvendo conhecimentos das propriedades físicas e mecânicas do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Conforme preconizado pela ABNT NBR 12655:2015, o concreto se encontra no estado fresco quando está completamente misturado e em estado plástico, sendo capaz de ser adensado por um método de lançamento escolhido. Já no estado endurecido é quando o concreto se encontra no estado sólido e desenvolveu resistência mecânica.

2.5.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Segundo Carvalho e Filho (2014) no estado fresco é importante que os ingredientes da mistura não se separem durante o transporte e o lançamento, evitando à segregação e exsudação, além de proporcionar facilidade de adensamento e trabalhabilidade, fatores que dependem da qualidade do material empregado.

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que a trabalhabilidade é a propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

De acordo com Helene e Terzian (1993), no estado fresco é importante que o concreto tenha trabalhabilidade, permitindo que possa ser transportado, lançado e adensado sem que haja segregação (separação da pasta de cimento dos agregados) e exsudação (tendência da água vir à superfície do concreto fresco).

Uma das propriedades do concreto a serem avaliadas no estado fresco é o abatimento pelo tronco de cone (slump test), pois a consistência, trabalhabilidade e aplicabilidade do concreto estão relacionadas às características obtidas no ensaio, sendo possível também verificar a coesão, exsudação e segregação, se houver. Outra propriedade avaliada é a massa específica do concreto no estado fresco.

Os concretos são classificados por sua consistência no estado fresco, determinada a partir do ensaio de abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998, e no caso de concreto autoadensável, conforme previsto na ABNT NBR 15823-1:2017. A Tabela 11 apresenta as aplicações típicas de acordo com a classificação pelas classes de consistência e abatimento.

Tabela 11 – Classificação e aplicação dos concretos pelo abatimento.

Classe	Abatimento mm	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

NOTA 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.

NOTA 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.

Fonte: ABNT NBR 8953:2015 (Adaptado pelo autor).

2.5.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

De acordo com Helene e Terzian (1993) no estado endurecido espera-se que o concreto atinja a resistência mecânica esperada, além de quesitos como durabilidade, impermeabilidade ou permeabilidade se for o caso e demais solicitações para atender as exigências especificadas no projeto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a qualidade do concreto no estado fresco exerce influencia direta nas propriedades do concreto no estado endurecido e na qualidade final do material. A seleção de um material de engenharia para uma aplicação particular deve ser levada em conta a sua capacidade de resistir à força aplicada. Conforme as especificações do projeto, o concreto em estado endurecido deverá ter resistência, durabilidade, conforto térmico, estética; compatíveis com as solicitações impostas pelas condições e variáveis que estará sujeita a obra a um menor custo possível.

2.6 Dosagem do concreto

Mehta e Monteiro (2008) consideram a dosagem do concreto mais uma arte que uma ciência, porque mesmo que alguns assuntos não possam ser reduzidos a um conjunto exato de números, uma vez que haja entendimento dos princípios subjacentes e com a prática, é possível aprender a proporcionar os materiais na mistura de concreto.

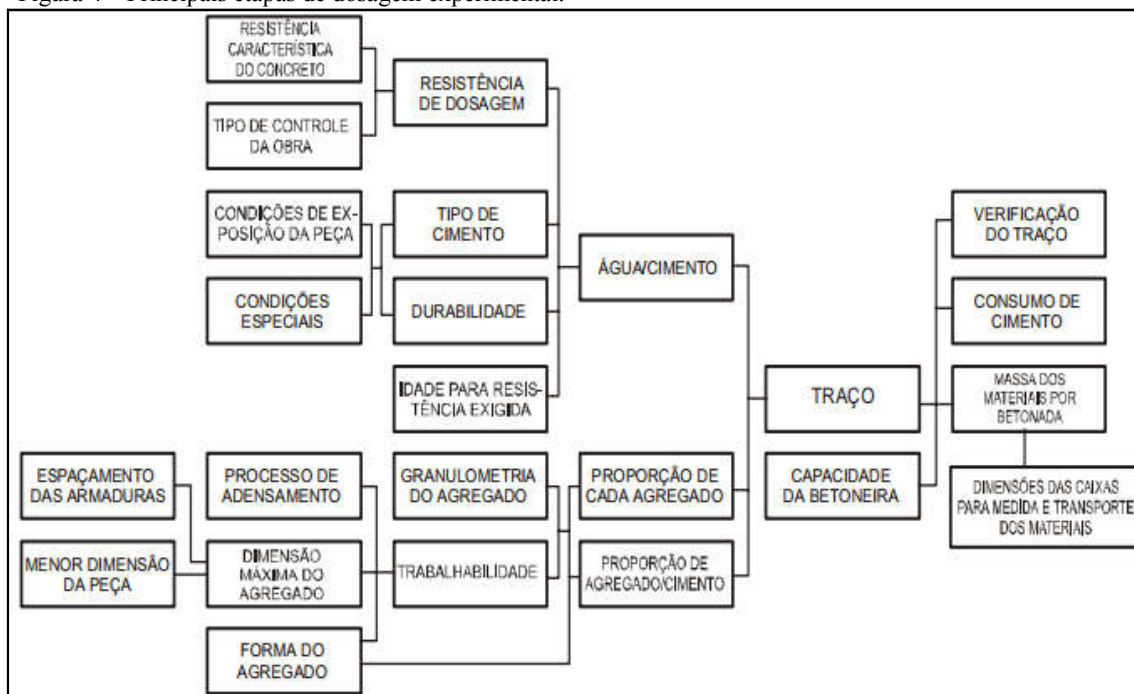
Segundo Basilio (1977) não é tão complexa a dosagem do concreto ao ponto de que não se possa apresentar uma solução, em contrapartida também não é tão simples a ponto de tornar-se o mero manuseio de umas poucas fórmulas matemáticas. De acordo com seu entendimento, a dosagem do concreto é importante para determinar as proporções mais adequadas entre os diversos componentes da mistura, principalmente aos requisitos de:

- Resistência da obra e o especificado no projeto;
- Ter durabilidade independente do ambiente ao qual será submetido;
- Boa aparência em situações onde o mesmo ficará aparente;
- Ter boa trabalhabilidade atendendo requisitos de transporte, lançamento e adensamento;
- Ser preparado o mais econômico possível sem que sua durabilidade seja afetada.

De acordo com Silva (1991) é necessário conhecer as características da obra, dos materiais e do concreto no estudo de dosagem. A dosagem experimental é “a determinação das porcentagens dos componentes do concreto, de modo a se obter um concreto econômico, adequado às condições da obra, usando-se os materiais disponíveis” (SILVA, 1991).

A Figura 4 demonstra quais as principais etapas na execução de uma dosagem experimental de concreto, segundo Assunção (2002).

Figura 4 – Principais etapas de dosagem experimental.



Fonte: Assunção, 2002.

2.7 Durabilidade e mecanismos de transporte de massa no concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a durabilidade é entendida como a vida de um material sob determinada condição ambiental de serviço. A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade para resistir à ação, desgaste, ataque químico ou qualquer outro processo de deterioração. Em outras palavras, um concreto durável irá manter a sua forma original, qualidade e facilidade de manutenção quando expostos ao seu ambiente de serviço pretendido. A pasta de cimento hidratado é alcalina, portanto, a exposição às águas ácidas é prejudicial para o concreto. Sob estas condições, a impermeabilidade ou estanqueidade torna-se um fator principal na determinação da durabilidade.

De acordo com Cascudo et al. (2002) a durabilidade de uma estrutura de concreto depende da camada de cobrimento, pois é o elemento fundamental na conservação e vida útil das armaduras por ser a primeira a deter os mecanismos de transporte que levam líquidos, íons e gases para o interior do material e complementa:

Sabe-se que o cobrimento assume características peculiares que o diferem do concreto confinado nas partes mais internas dos elementos estruturais. Estas diferenças se dão em função de vários aspectos, dentre os quais pode-se citar a absorção promovida pelas fôrmas, a evaporação de água para o ambiente (mais ou menos acentuada em função dos procedimentos de cura aplicados), o efeito parede etc.

A ABNT NBR 12655:2015, em seu anexo A, apresenta recomendações relativa à durabilidade das estruturas, principalmente de elementos enterrados ou em contato com o solo. Estas recomendações podem ser verificadas no Anexo B deste trabalho.

A ABNT NBR 6118:2014, no item 6.3.2. (mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto), apresenta orientações para maximizar a durabilidade dos concretos, como por exemplo, para prevenir e evitar a lixiviação, que é um mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas, recomenda-se restringir a fissuração, de forma a minimizar a infiltração de água, e proteger as superfícies expostas com produtos específicos, como por exemplo, o uso de hidrófugos.

Segundo Silva (2005) a durabilidade das estruturas de concreto tem relação direta com a estrutura dos poros, microfissuras da pasta de cimento e a forma de ingresso e transporte dos agentes. Os modelos matemáticos para previsão de vida útil das estruturas são baseados nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos através da rede de poros do concreto, de acordo com Helene (1993).

Segundo Nepomuceno (2005) a interação do concreto com o meio ambiente é o principal fator de deterioração das estruturas, através da penetração de agentes agressivos pelos poros do concreto.

De acordo com Neville (1997) a configuração dos poros (tipo e distribuição do tamanho dos poros ou microfissuras) e o seu preenchimento com água é o que determina esse mecanismo de transporte no concreto.

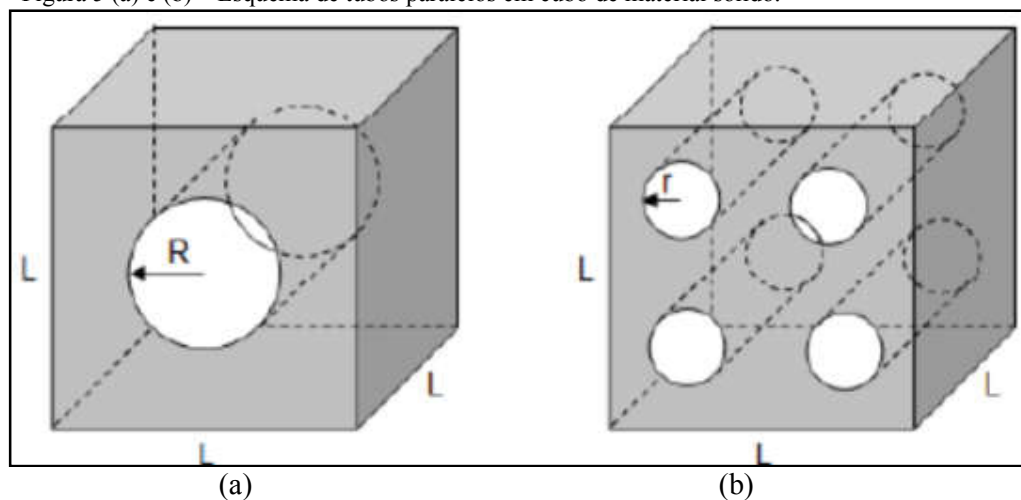
Silva (2005) destaca que existem quatro tipos de mecanismos de penetração e transporte no concreto: absorção capilar, permeabilidade, migração iônica e difusão além da combinação entre eles.

Outro fator de influência nos mecanismos de transporte no concreto são as suas características físicas e químicas e também a concentração superficial das substâncias que penetram no material, o grau de umidificação, a temperatura e as condições do meio ambiente. Estes mecanismos podem atuar simultaneamente ou sucessivamente ao longo do tempo dependendo das condições de exposição ao qual esteja submetido o concreto, conforme destaca Nepomuceno (2005).

O mecanismo de transporte de massa no concreto que mais usualmente ocorre segundo Silva (2005) é a absorção capilar, objeto principal desse estudo, seguido pela difusão e pela permeabilidade. Já a migração ocorre após o início do processo de corrosão (processo secundário de movimento de íons). Silva (2005) destaca que a caracterização do transporte é de difícil definição, pois dependem de fatores como a composição do cimento, tipo de materiais, idade e cura e umidade no concreto.

A teoria do tubo na escala de microestrutura segundo Silva (2005) define que tubos com grandes diâmetros possuem maiores taxas de transporte que os tubos de menores diâmetros. As Figuras 5 (a) e (b) apresentam o esquema baseado no tubo de dimensões $L \times L \times L$ (lados iguais) atravessado por um cilindro de raio R .

Figura 5 (a) e (b) – Esquema de tubos paralelos em cubo de material sólido.



Fonte: Silva, 2005.

Segundo Silva (2005) os critérios para caracterizar os concretos em relação à durabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos dependem de alguns fatores como a quantidade e a distribuição dos poros e macroporos e a tortuosidade dos poros interconectados (poros menores e com caminhos sinuosos são menos permeáveis).

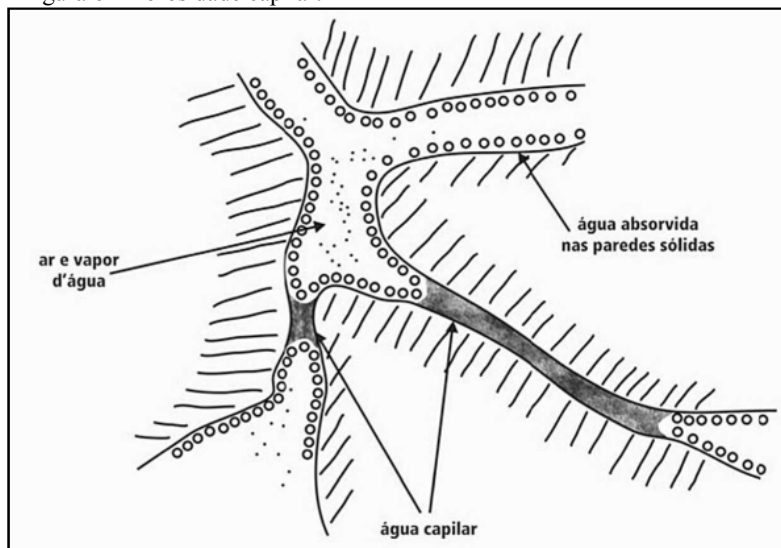
2.7.1 Absorção capilar e permeabilidade

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que desde o começo do processo de fabricação do concreto a água é essencial, pois atua na hidratação do cimento e a relação a/c interfere em vários aspectos como trabalhabilidade, porosidade, resistência entre outros. Ao longo do tempo, microfissuras internas podem aparecer no concreto e canais por onde a água interna evapora, cria um caminho para o ingresso de agentes agressivos que de acordo com as condições ambientais, o tornam passível de fenômenos deletérios relacionados à água. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros.

Segundo Silva (2005) a absorção ou sucção capilar é o processo pelo qual os líquidos, particularmente a água, podem ser transportados no concreto através dos poros capilares devido à tensão superficial, ou seja, é um mecanismo de transporte de água comum no concreto e em argamassas de revestimento. O transporte normalmente é influenciado pela viscosidade, pela densidade e a tensão superficial do líquido, pela espessura dos poros e pela energia superficial característica do sólido. Outro fator é que a permeabilidade é uma característica intrínseca do concreto e representam a passagem de água (estado líquido) ou gases (por exemplo, CO_2 e O_2) através dos poros do concreto.

Segundo Fusco (2008) os poros capilares, que formam uma rede de canais intercomunicantes ao longo de toda a massa de concreto, são decorrentes essencialmente da evaporação do excesso de água de amassamento. Após o endurecimento do concreto, parte dessa água evapora, ficando uma rede capilar com os poros menores saturados de água e os maiores contendo ar e vapor no seu interior e uma película de água adsorvida ao longo de suas paredes. A Figura 6 demonstra a porosidade capilar exposto por Fusco (2008).

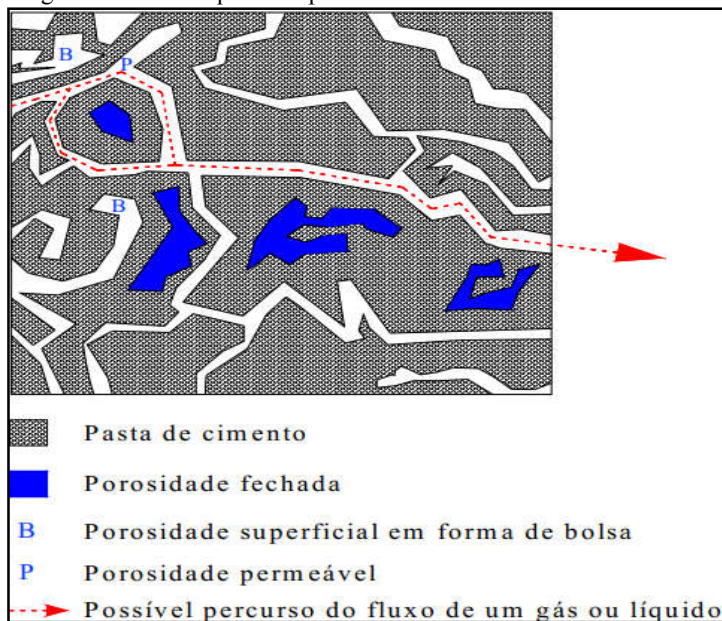
Figura 6 – Porosidade capilar.



Fonte: Fusco, 2008.

O caminho que a água percorre ao penetrar no concreto ocorre através dos poros interconectados, onde uma rede de poros é formada, como pode ser observado na Figura 7 de acordo com Figueiredo (1994).

Figura 7 – Rede de poros da pasta de cimento.



Fonte: Figueiredo, 1994.

Segundo apresentado por Neville (1997) o coeficiente de permeabilidade no concreto (k) decresce com a diminuição da relação água/cimento, até 4 ordens de grandeza com a diminuição da relação a/c de 0,75 para 0,26 e de 2 ordens de grandeza para a relação a/c de

0,75 para 0,45, por exemplo. A Tabela 12 apresenta valores do coeficiente de permeabilidade em diversas idades de uma pasta de cimento com 93% de hidratação.

Tabela 12 – Relação entre a permeabilidade e a relação a/c.

Idade (dias)	Coeficiente de Permeabilidade - k (m/s)
Fresco	$2 \cdot 10^{-6}$
5	$4 \cdot 10^{-10}$
6	$1 \cdot 10^{-10}$
8	$4 \cdot 10^{-11}$
13	$5 \cdot 10^{-12}$
24	$1,10^{-12}$
Final	$6 \cdot 10^{-13}$

Fonte: Neville, 1997.

Segundo Frizzo (2001) a absorção capilar é o um dos problemas mais relevantes quando da análise de transporte de massa no concreto, exercendo influencia significativa de acordo com o grau a saturação.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o carregamento estrutural e os efeitos das intempéries facilitam a propagação de microfissuras normalmente preexistentes na zona de transição entre a argamassa de cimento e as partículas de agregado graúdo, com perda gradual da estanqueidade pela interconexão de fissuras, microfissuras e vazios, criando assim um ambiente favorável à deterioração da estrutura pela penetração de agentes agressivos.

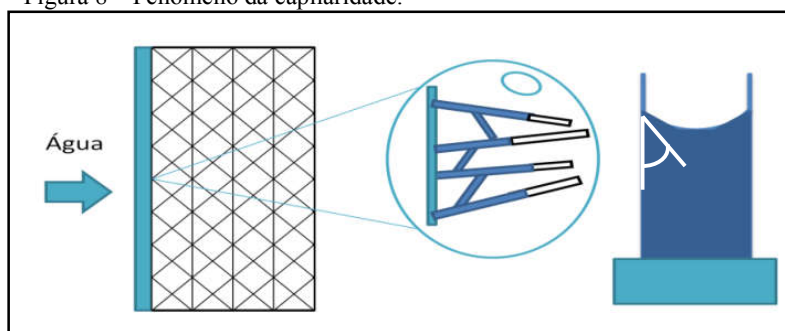
Algumas normas brasileiras são específicas para realização de ensaios de permeabilidade em concretos, entre elas citam-se:

- ABNT NBR 9778:2005: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água e índice de vazios e massa específica;
- ABNT NBR 10786:2013: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água;
- ABNT NBR 10787:2011: Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão;
- ABNT NBR 9779:2013: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.

2.7.1.2 Transporte de água líquida e coeficiente de capilaridade

Segundo Freitas (1992) o transporte de água no estado líquido em materiais porosos, como o concreto, se dá principalmente através da capilaridade. Este mecanismo de transporte de massa ocorre pelo fato que o resultado das forças de atração entre o líquido e o material sólido são maiores do que as forças de coesão do líquido, formando um menisco côncavo. Nesse caso, o material é denominado hidrófilo, caracterizado pela existência de penetração de água, formando ângulos de contato inferiores a 90° , como pode ser observado na Figura 8, adaptado de Couto (2010).

Figura 8 – Fenômeno da capilaridade.



Fonte: Couto, 2010 (Adaptado pelo autor).

Nos hidrófugos, o ângulo de contato é superior a 90° e o menisco formado é convexo. Nesse caso a penetração de líquido no material é reduzida ou nula.

De acordo com Freitas (1992) a ascensão do líquido por capilaridade é o resultado da diferença de pressão líquido-gás que ocorre em um capilar. Essa diferença de pressão capilar é dada pela equação 2.

$$P_c = -\frac{2 \times \sigma \times \cos \theta}{r} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

P_c é a pressão capilar (Pa);

σ a tensão superficial do líquido (N/m);

r é o raio do capilar (m).

Devido à complexidade de determinar a rede capilar de materiais porosos, como por exemplo, o concreto que é o objeto desse estudo, não pode ser analisada a capilaridade utilizando a equação 2. Através dos ensaios de absorção por capilaridade, é possível determinar coeficientes globais. Segundo Freitas (1992), com base nos ensaios, a nível macroscópico, a quantidade de água absorvida e a altura de ascensão capilar no material são função da raiz quadrada do tempo conforme equação 3.

$$W(t) = A \times \sqrt{t} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

W é a quantidade de água absorvida (kg/m^2);

t é o tempo em horas (h)

A é o coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)

O coeficiente de capilaridade pode ser determinado simplificadaamente através do ensaio de absorção de água, onde a base dos corpos-de-prova é colocada em contato com a água. Através de pesagens periódicas e com os valores obtidos nas pesagens calcula-se o coeficiente de capilaridade utilizando a equação 3.

A Figura 9 apresenta o gráfico característico obtido nos resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, que expressa a quantidade de água absorvida em função da raiz quadrada do tempo.

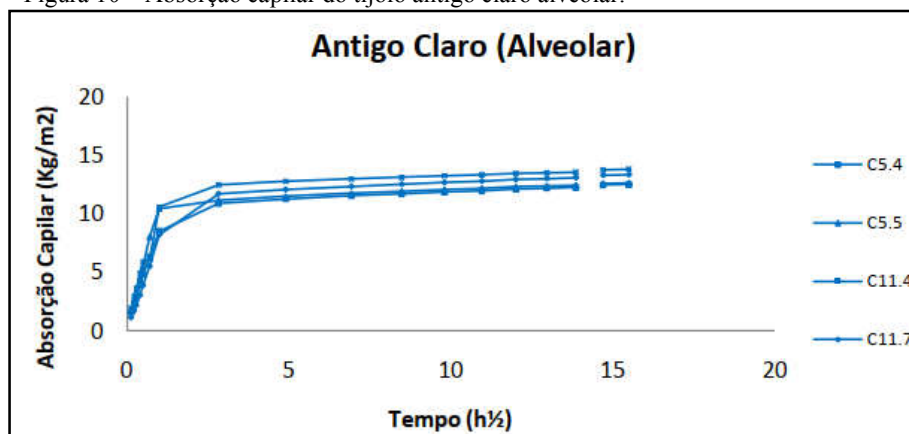
Figura 9 – Curva típica de absorção de água por capilaridade de um material poroso



Fonte: Couto, 2010.

De acordo com Freitas (1992) com pesagens em intervalos iniciando em menores, iniciando em 1min, 3min, 5min, 10min e assim sucessivamente, determina-se a primeira seção da curva polinomial, como pode ser observado na Figura 10, de acordo com Couto (2010).

Figura 10 – Absorção capilar do tijolo antigo claro alveolar.



Fonte: Couto, 2010.

2.7.2 Difusão

Segundo Silva Filho (1994) difusão é o mecanismo pelo qual o fluido se movimenta em função da existência de um diferencial de potencial químico, onde o fluxo da substância que difunde tende a igualar as concentrações ou através de um gradiente de temperatura/umidade. A difusão não depende do fluxo de fluidos, como ocorre com a absorção, por exemplo.

Para Silva (2005) difusão é a transferência de massa por movimento aleatório de moléculas ou íons na solução dos poros das regiões com altas concentrações para regiões de baixas concentrações da substância que difunde.

Quando o gradiente se mantém através da entrada e saída contínua da substância no sentido do extremo de maior concentração para o de menor, obtém-se um fluxo de estado estacionário também chamado regime permanente, indicando que o processo é inalterável no tempo, conforme exposto por Silva Filho (1994).

Outro ponto de observação é que a difusão ocorre tanto no meio líquido quanto no meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras são o CO₂ e os íons de cloreto. Em alguns casos, além da difusão, podem ocorrer da absorção e a

migração também estarem atuando, principalmente se o concreto estiver em meio marinho, ressalta Silva (2005).

Segundo Neville (1997) a difusão iônica é mais efetiva em circunstâncias onde os poros da pasta de cimento hidratado estão saturados ou parcialmente saturados. Sem um certo teor mínimo de umidade a movimentação de íons não ocorre, cessando a difusão se houver uma região seca no percurso. Outro ponto é que a difusão varia com a idade do concreto pois o sistema de poros se altera com o tempo devido a hidratação do cimento.

2.7.3 Migração

Segundo Helene (1993) o processo de migração ocasiona um transporte de íons através de um campo elétrico (força motriz), sendo normalmente gerada por uma diferença de potencial de uma fonte externa. Durante este fenômeno, os íons de cloreto (com carga eletronegativa) se movem no sentido da armadura, desde que a mesma esteja polarizada positivamente segundo Bauer (1995). Para o cálculo do transporte de massa, nesse caso, ocorre segundo a lei de Faraday (1791-1867) conforme equação 4.

$$m = \frac{i \times t \times a}{n \times F} \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde:

m – massa do metal corroído, em g

i – corrente elétrica em A (ampères)

t – tempo em s (segundos)

a – massa atômica

n – valência dos íons do metal

F – constante de Faraday (96.500 C - Coulomb)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi elaborado em duas etapas e a metodologia foi dividida da seguinte maneira:

Primeira etapa

Inicialmente foram estudados três tipos de concretos com teores de argamassa distintos, utilizando aditivo hidrófugo composto de silicato de sódio e ácido oleico. As atividades foram:

- Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos;
- Produção dos concretos da primeira etapa;
- Realização dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral.

Segunda etapa

Em seguida foi realizado um estudo comparativo, utilizando-se para tanto quatro tipos distintos de aditivos hidrófugos, com o intuito de atestar sua eficácia em impedir a absorção capilar e verificar possíveis interferências no comportamento mecânico dos concretos pelo uso destes aditivos. As atividades foram:

- Produção dos concretos da segunda etapa;
- Realização dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral.

Por final, após a conclusão das duas etapas, as atividades foram:

- Apresentação dos resultados obtidos;
 - Realização da análise comparativa de resultados.
- Conclusões gerais sobre os resultados obtidos.

3.1 Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos

Para o desenvolvimento dos concretos e moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados os seguintes materiais: cimento CP V-ARI Campeão da marca CRH em sacos de 40kg, agregado graúdo tipo gnaisse extraído pelo Grupo Pedreira Santo Antônio e agregado miúdo areia de rio quartzosa classificada como areia média. Foram adquiridos 200kg de agregado miúdo e 400kg de agregado graúdo, sendo 200kg de brita 0 e 200kg de brita 1.

Para alcançar uma redução de amostra satisfatória, os agregados foram esparramados e misturados antes da execução do quartejamento das amostras, que foram reduzidas conforme o estabelecido pela ABNT NBR NM 26:2001 e ABNT NBR NM 27:2001. Para tanto foi utilizado um quarteador mecânico conforme Figura 11.

Figura 11 – Quarteador mecânico.



Fonte: O autor, 2018.

3.1.1 Granulometria

Os ensaios de granulometria são preconizados pela ABNT NBR NM 248:2003. É importante realizar estes ensaios pois as propriedades físicas e mecânicas do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido, são influenciadas pela geometria dos grãos, modulo de finura, pela dimensão máxima característica e pela superfície específica dos agregados.

Os ensaios foram realizados pelo método de peneiramento utilizando-se a mesa vibratória e as peneiras da série normal e intermediária conforme Figura 12.

Figura 12 – Peneiras utilizadas nos ensaios.



Fonte: O autor, 2018.

Os resultados obtidos foram comparados com parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009.

3.1.2 Massa específica

A massa específica é fundamental para que se possa determinar o traço do concreto, pois o volume de materiais é afetado por essa característica. A massa específica do cimento Portland CPV-ARI foi determinada pelo método preconizado pela ABNT NBR NM 23:2000. É de vital importância o controle da temperatura para realização do ensaio, evitando assim alterações na leitura do volume no frasco.

Para o agregado miúdo foram realizados dois métodos de ensaios para determinação da massa específica. Foi realizado o ensaio de acordo com a ABNT NBR 9776:1987 (Frasco de Chapman), conforme Figura 13 (a) e através da ABNT NBR NM 52:2009, Figura 13 (b).

Figura 13 (a) – Massa específica conforme ABNT NBR 9776:1987; (b) massa específica conforme ABNT NBR NM 52:2009.



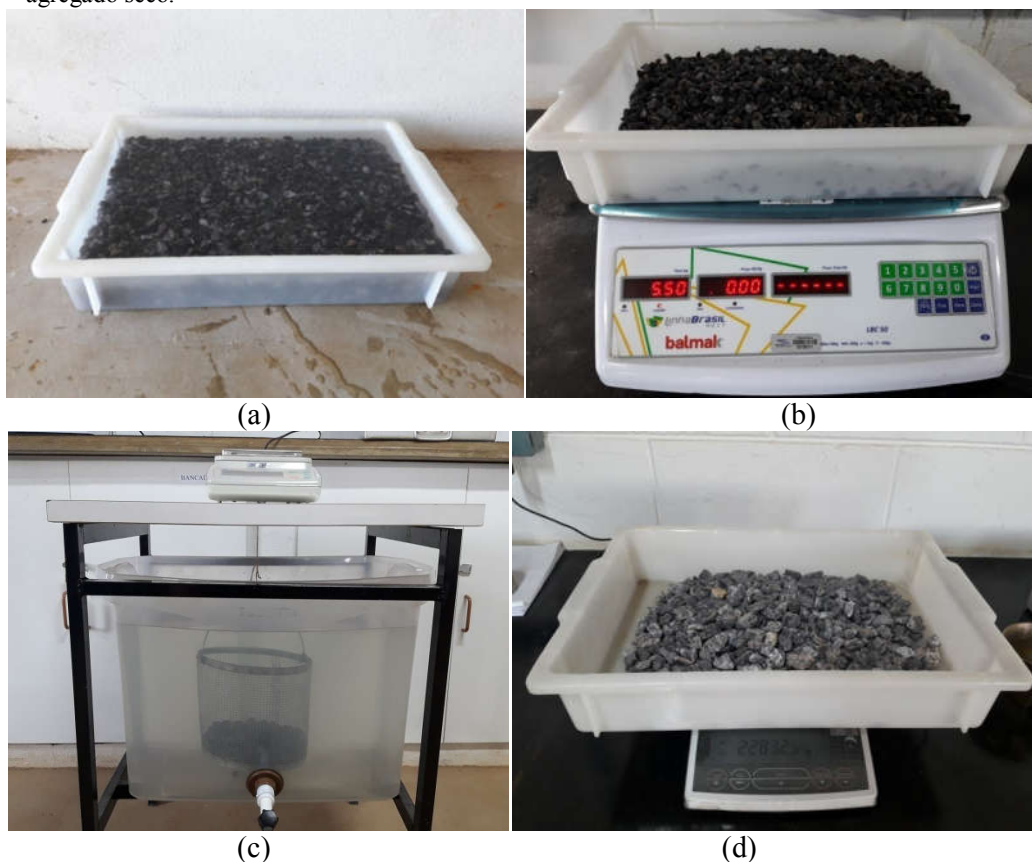
(a)

(b)

Fonte: O autor, 2018.

Por último e não menos importante, o agregado graúdo teve sua massa específica determinada através do ensaio preconizado pela ABNT NBR NM 53:2009, pelo método da balança hidrostática, sendo primeiramente lavado para remoção de pó e qualquer material da superfície do agregado, ficando em seguida em estado de repouso para saturação durante 24h conforme Figura 14 (a). Da amostra inicial de 5500g (Figura 14 b) foi extraída 2300,42g para realização do ensaio (Figura 14 d). A pesagem por imersão foi executada conforme Figura 14 (c).

Figura 14 (a) – Saturação do agregado; (b) condição SSS; (c) pesagem por imersão; (d) massa do agregado seco.



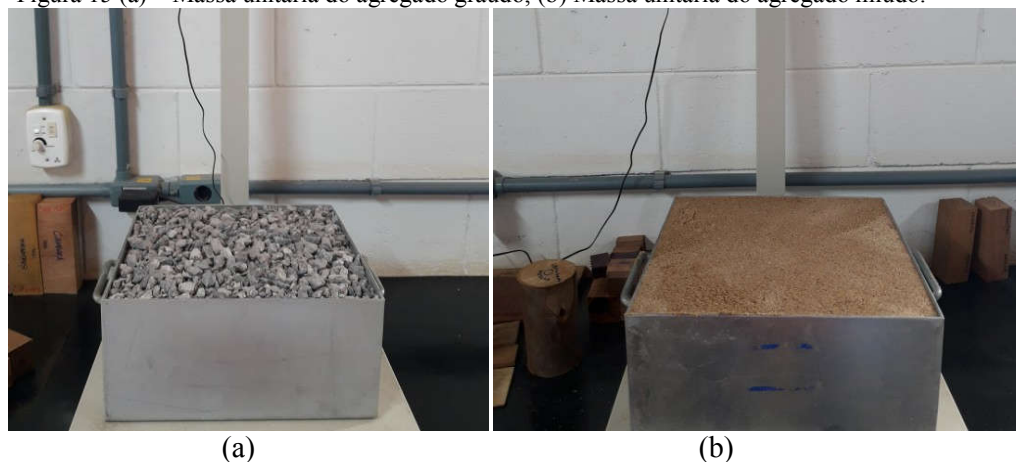
Fonte: O autor, 2018.

3.1.3 Massa unitária

Para o estudo foi determinado a massa unitária do agregado miúdo e do agregado graúdo conforme o estabelecido pela ABNT NBR NM 45:2006, tanto no estado solto como no estado compactado. O objetivo nesse momento foi determinar principalmente o índice de vazios que tem interferência direta no empacotamento dos grãos, sendo a massa unitária

inversamente proporcional o índice de vazios. Para o agregado graúdo foi executado o ensaio de cinco formas distintas para que se pudesse encontrar o melhor perfil granulométrico visando um maior preenchimento de vazios. O ensaio foi executado com a brita 0, brita 1 e pela mistura de ambas nas proporções de 30% de brita 0 e 70% de brita 1, 40% de brita 0 e 60% de brita 1 e 50% de ambas. As Figuras 15 (a) apresenta o ensaio com do agregado graúdo e a Figura 15 (b) apresenta o ensaio do agregado miúdo.

Figura 15 (a) – Massa unitária do agregado graúdo; (b) Massa unitária do agregado miúdo.



Fonte: O autor, 2018.

3.2 Produção dos concretos da primeira etapa

Foram estabelecidos três traços com teores de argamassas seca de $\alpha \cong 46,5\%$, $\alpha \cong 50\%$ e $\alpha \cong 53,5\%$ para realização dos estudos da primeira etapa. Para obtenção dos traços, não foram utilizados métodos racionais de dosagem, pois não se fez necessário pré-estabelecer um valor mínimo de resistência mecânica, pois o objetivo principal do estudo foi avaliar os mecanismos de transporte em concretos com porosidades e empacotamentos distintos. Também foi estabelecido a fixação das relações de água/cimento e o consumo de cimento a fim de se obter parâmetros comparativos confiáveis.

Os concretos foram produzidos no laboratório de pesquisa de materiais de construção do UNIS – MG de acordo com os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 12821:2009. A betoneira utilizada para elaboração dos concretos foi de 120l de capacidade.

De posse dos dados obtidos pelos ensaios de caracterização, foi definido o traço de referência (TR 1) em massa seca conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Traço de referência (TR 1) inicial.

	Cimento	Areia	Brita	a/c	α	Vol (dm ³)
Massa (kg)	1	2	3	0,5		
Massa específica (g/cm ³)	3,07	2,64	2,86	1	50%	2,632

Fonte: O autor, 2018.

A relação a/c de 0,5 foi um parâmetro adotado para início da produção do concreto (TR 1). Foi adotada uma margem de 10% de perda por possível aderência do concreto no fundo da betoneira. Foram feitas as correções necessárias para que se pudesse atingir o abatimento de 80±10mm, parâmetro esse fixado para determinação do traço final

A representação do traço de referência (TR 1) após as correções pode ser observado conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Traço de referência (TR 1) após correções.

	Cimento	Areia	Brita	a/c	α	Vol (dm ³)
Massa (kg)	1	2	3	0,61		
Massa específica (g/cm ³)	3,07	2,64	2,86	1	50%	2,737

Fonte: O autor, 2018.

A representação final do traço TR 1 em massa para materiais secos foi de (1 : 2 : 3 : 0,61). De posse dos dados do traço TR 1, foram elaborados outros dois traços, um com $\alpha \cong 46,5\%$ e outro com $\alpha \cong 53,5\%$, mantendo o mesmo volume e a mesma relação a/c para ambos os traços de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 – Traços TR 2 e TR 3.

TR 2	Cimento	Areia	Brita	a/c	α	Vol (dm ³)
Massa (kg)	1	1,8	3,22	0,61	46,50%	2,737
TR 3	Cimento	Areia	Brita	a/c	α	Vol (dm ³)
Massa (kg)	1	2,2	2,78	0,61	53,50%	2,737

Fonte: O autor, 2018.

A representação final dos traços TR 2 e TR 3 em massa para materiais secos são respectivamente (1 : 1,8 : 3,22 : 0,61) e (1 : 2,2 : 2,78 : 0,61). Os Quadros com os valores

calculados de todos os traços e o processamento dos dados para melhor entendimento encontram-se no Apêndice D.

3.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos

O aditivo utilizado na produção dos concretos da primeira etapa do estudo foi denominado de aditivo (A). Tal medida foi utilizada para resguardar o nome e marca do fabricante e também para a identificação e compreensão dos processos realizados. As principais características do aditivo utilizado podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Características do aditivo utilizado na primeira etapa.

Aditivo	Composição química básica	Densidade g/cm ³	Estado Físico	Cor	pH	Dosagem recomendada pelo fabricante
A	Silicato de sódio e ácido oleico	1,00 a 1,05	Líquido pastoso	Branco	10,0 a 12,0	500ml a cada 50kg cimento

Fonte: O autor, 2018.

Os moldes para confecção dos corpos-de-prova foram do tipo cilíndrico; possuem diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm e foram moldados de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 5738:2015. Sempre que for citado no estudo o termo corpos-de-prova, refere-se ao modelo cilíndrico mencionado.

Foram produzidos 78 corpos-de-prova para o estudo da primeira etapa, 26 para cada traço, sendo 13 com aditivo e 13 sem aditivo. A logística dos corpos-de-prova da primeira etapa é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Logística dos corpos-de-prova da primeira etapa.

Aditivo	TRAÇOS						TOTAIS
	TR 1 SA	TR 1 CA	TR 2 SA	TR 2 CA	TR 3 SA	TR 3 CA	
Compressão axial	*	A	*	A	*	A	36
Tração e absorção capilar	4	4	4	4	4	4	24
Contra-prova	3	3	3	3	3	3	18
Total de corpos-de-prova produzidos							78
Legenda	SA			Sem aditivo			
	CA			Com aditivo			

*Sem Aditivo

Fonte: O autor, 2018.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram submetidos à cura inicial conforme Figura 16.

Figura 16 – Cura inicial após moldagem.



Fonte: O autor, 2018.

Para o cálculo da massa específica do concreto no estado fresco foram pesados 3 exemplares de cada traço conforme Figura 17.

Figura 17 – Pesagem dos corpos-de-prova no estado fresco.



Fonte: O autor, 2018.

Os corpos-de-prova foram mantidos em superfície plana e respeitado o tempo mínimo de 24 horas para a desforma. O cronograma de produção e desmoldagem dos corpos-de-prova são apresentados na Tabela 18.

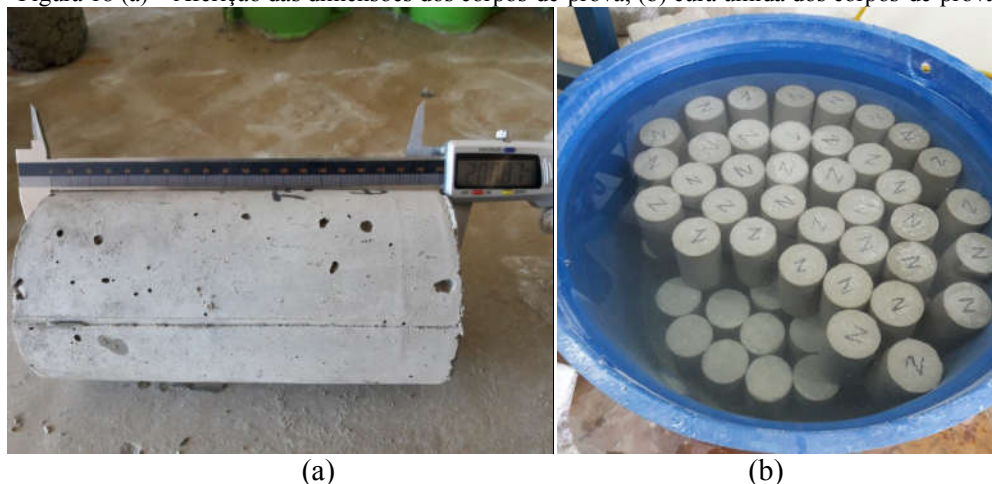
Tabela 18 – Cronograma de produção e desmoldagem dos corpos-de-prova.

TRAÇO	TR 1	TR 2	TR 3
Data da produção	19/05/2018	21/05/2018	22/05/2018
Data da desmoldagem	21/05/2018	22/05/2018	23/05/2018

Fonte: O autor, 2018.

Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram identificados e tiveram suas dimensões determinadas conforme Figura 18 (a) e submetidos à cura úmida conforme Figura 18 (b) por um período de 7 dias para posterior execução dos ensaios de resistência à compressão axial. Todos os corpos-de-prova moldados podem ser visualizados no Apêndice A.

Figura 18 (a) – Aferição das dimensões dos corpos-de-prova; (b) cura úmida dos corpos-de-prova.



Fonte: O autor, 2018.

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão axial

A ABNT NBR 5739:2007 estabelece os critérios para realização do ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Foi elaborado um cronograma, conforme Tabela 19, para que não houvessem erros em relação à realização dos ensaios, respeitando as idades dos corpos-de-prova, evitando assim o comprometimento e veracidade das informações.

Tabela 19 – Cronograma do ensaio de resistência à compressão axial.

Traço	Tipo	Idade total Dias	Data do ensaio	Executado?
TR 1	SA.	8	28/05/2018	Sim
	CA	8	28/05/2018	Sim
TR 2	SA.	8	29/05/2018	Sim
	CA	8	29/05/2018	Sim
TR 3	SA.	8	30/05/2018	Sim
	CA	8	30/05/2018	Sim

Fonte: O autor, 2018.

Para execução dos ensaios de resistência à compressão, foi utilizada a prensa hidráulica disponibilizada no laboratório de materiais de construção do UNIS – MG,

conforme Figura 19. Todos os corpos-de-prova ensaiados podem ser visualizados no Apêndice B.

Figura 19 – Prensa hidráulica para o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O autor, 2018.

O equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão fornece os dados de força em tf (tonelada-força), sendo esta convertida em newtons (N) e o valor da aceleração da gravidade (g) utilizada nos cálculos de conversão foi de $9,81\text{m/s}^2$.

Antes de realizar os ensaios, os corpos-de-prova tiveram a área da seção transversal aferida com auxílio de um paquímetro digital. As Tabelas com as medidas colhidas dos corpos-de-prova, juntamente com os dados da força resistida nos ensaios podem ser observadas no Apêndice D.

3.2.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, tanto em argamassas como em concretos endurecidos, tem seus parâmetros de execução estabelecidos pela ABNT NBR 9779:2013. O objetivo é verificar a absorção através da ascensão capilar e da massa de água absorvida em vários períodos de tempo. Para realização do ensaio é preciso que os corpos-de-prova adquiram constância de massa, não podendo haver variação maior que 0,5% entre duas pesagens em um período de 2h (material seco em estufa). A quantidade mínima para o ensaio ter validade é de 3 corpos-de-prova. Para o estudo, foram ensaiados 8 corpos-de-prova para

cada traço, sendo 4 da série SA e 4 da série CA. A figura 20 apresenta os corpos de prova do traço TR 1 que foram utilizados no ensaio.

Figura 20 – Corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: O autor, 2018.

Após secagem dos corpos-de-prova com constância de massa, os mesmos foram pesados para aferição da sua massa seca (m_s) e medidos com o auxílio do paquímetro digital para o cálculo do diâmetro médio. Tal medição foi executada devida sua utilização para os cálculos de resistência à tração por compressão diametral. Em seguida, os corpos-de-prova foram submetidos à imersão parcial de (5 ± 1) mm de sua face inferior para determinação da massa saturada (m_{sat}) em intervalos de 3h, 6h, 24h e 48h.

A Figura 21 apresenta o equipamento desenvolvido para que os ensaios de absorção de água por capilaridade pudessem ser realizados. Para resultados satisfatórios nos ensaios é preciso manter a água em nível constante, evitando que haja alternância na marca de contato de (5 ± 1) mm dos corpos-de-prova.

Figura 21 – Equipamento desenvolvido para o ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: O autor, 2018.

Em seguida os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com a ABNT NBR 7222:2011, para aferição da altura da

ascensão capilar máxima. As Tabelas com os dados referentes aos ensaios de absorção de água por capilaridade podem ser consultadas no Apêndice D.

3.2.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, preconizado pela ABNT NBR 7222:2011, também foi estabelecido um cronograma de execução para o controle das datas e horários, como pode ser observado na Tabela 20.

Tabela 20 – Cronograma do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Tipo	Idade total Dias	Data do ensaio	Executado?
TR 1	SA	17	06/06/2018	Sim
	CA	17	06/06/2018	Sim
TR 2	SA	17	07/06/2018	Sim
	CA	17	07/06/2018	Sim
TR 3	SA	17	08/06/2018	Sim
	CA	17	08/06/2018	Sim

Fonte: O autor, 2018.

Para execução dos ensaios foi utilizado o mesmo equipamento da Figura 19. Todos os corpos-de-prova ensaiados podem ser visualizados no Apêndice C.

As Tabelas com valores dos diâmetros médios, comprimento e os carregamentos em tf (tonelada-força) resistido pelos corpos-de-prova após os ensaios de resistência à tração por compressão diametral bem como os valores convertidos em newtons (N) podem ser consultados no Apêndice D.

3.3 Produção dos concretos da segunda etapa

A partir da análise dos dados obtidos nos ensaios realizados na primeira etapa do estudo observou-se que os concretos produzidos com o aditivo do tipo (A) apresentaram uma queda significativa nas resistências mecânicas, tanto à tração como à compressão (os resultados serão apresentados no capítulo 4 – Resultados obtidos e discussão), o que motivou, para a segunda etapa, a um estudo do comportamento mecânico dos concretos ao utilizar outros tipos de aditivos hidrófugos, com composições distintas. Para tal verificação, foram utilizados 4 tipos de aditivo incluindo o aditivo do tipo (A) porém de lote diferente do utilizado na primeira etapa. A repetição com outro lote se fez necessária para sanar a dúvida quanto a algum problema do produto no lote utilizado na primeira etapa. Foi adotado o nome

AL2, que significa aditivo do tipo (A) do lote 2. A Tabela 21 apresenta os aditivos utilizados na segunda etapa.

Tabela 21 – Características dos aditivos utilizados na segunda etapa.

Aditivo	AL2	B	C	D
Composição química básica	Silicato de sódio e ácido oleico	Solução aquosa de silicatos coloidais	Sais metálicos e silicatos	Mistura à base de sais inorgânicos
Densidade g/cm ³	1,00 a 1,05	1,00 a 1,10	1,05	0,98 a 1,12
Estado Físico	Líquido pastoso	Líquido cremoso	Líquido	Líquido pastoso
Cor	Branco	Amarelo	Branco	Branco
pH	10,0 a 12,0	8,5 a 11,5	12,0 a 13,0	10,7 a 11,1
Dosagem recomendada pelo fabricante	500ml a cada 50kg cimento	500ml a cada 50kg cimento	500ml a cada 50kg cimento	500ml a cada 50kg cimento

Fonte: O autor, 2018.

Para a produção dos concretos da segunda etapa foram utilizados os valores de referência do traço TR 2. Os Quadros com os valores calculados dos traços da segunda etapa e o processamento dos dados para melhor entendimento encontram-se no Apêndice D. Foram produzidos 65 corpos-de-prova. A logística dos corpos-de-prova da segunda etapa é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – Logística dos corpos-de-prova da segunda etapa.

		TRAÇOS					TOTAIS
		TR 2 AL2	TR 2 B	TR 2 C	TR 2 D	TR 2 SAB	
Ensaio	Aditivo	A	B	C	D	*	
	Compressão axial	6	6	6	6	6	30
	Tração e absorção capilar	4	4	4	4	4	20
	Contra-prova	3	3	3	3	3	15
Total de corpos-de-prova produzidos							65

*Sem Aditivo

Fonte: O autor, 2018.

Os agregados utilizados na produção dos concretos da segunda etapa foram do mesmo lote da primeira etapa. O cimento utilizado também foi o CPV-ARI Campeão, porém de lote

distinto do utilizado na primeira etapa, respeitando as orientações estabelecidas na ABNT NBR 16697:2018.

Os equipamentos e os procedimentos de produção, ensaios de abatimento pelo tronco de cone (slump test), moldagem, pesagem para massa específica, desmoldagem, identificação, aferição das medidas e cura úmida dos corpos-de-prova da segunda etapa seguiram a mesma metodologia da primeira etapa.

3.3.1 Ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral

Na segunda etapa do estudo foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova.

A Tabela 23 apresenta as datas de produção, desmoldagem e as idades dos corpos-de-prova nos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral.

Tabela 23 – Cronograma de produção dos concretos e idades nos ensaios da segunda etapa.

Concretos		TR 2 AL2	TR 2 B	TR 2 C	TR 2 D	TR 2 SAB
Produção dos concretos	Produção	19/09/2018	19/09/2018	19/09/2018	19/09/2018	02/10/2018
	Desmoldagem	20/09/2018	20/09/2018	20/09/2018	20/09/2018	03/10/2018
Ensaio de resistência à compressão axial	Idade	Dias	Dias	Dias	Dias	Dias
		8	8	8	8	8
Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	Idade	Dias	Dias	Dias	Dias	Dias
		17	17	17	17	17

Fonte: O autor, 2018.

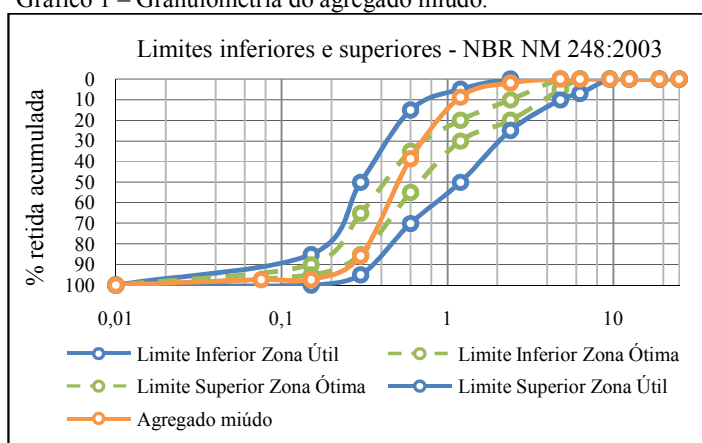
4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Através dos ensaios realizados, pode-se levantar um conjunto de informações que deram base para a análise e discussão dos resultados obtidos, proporcionando um melhor entendimento do comportamento dos concretos estudados, com abordagem voltada para a ótica dos mecanismos de transporte de massa no concreto. Os resultados obtidos nos ensaios de ambas as etapas do estudo, sempre que possível e cabível, foram comparados com limites estabelecidos pelas normas da ABNT.

4.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios realizados em laboratório e os limites das zonas granulométricas conforme ABNT NBR NM 248:2003, do agregado miúdo é apresentado no Gráfico 1.

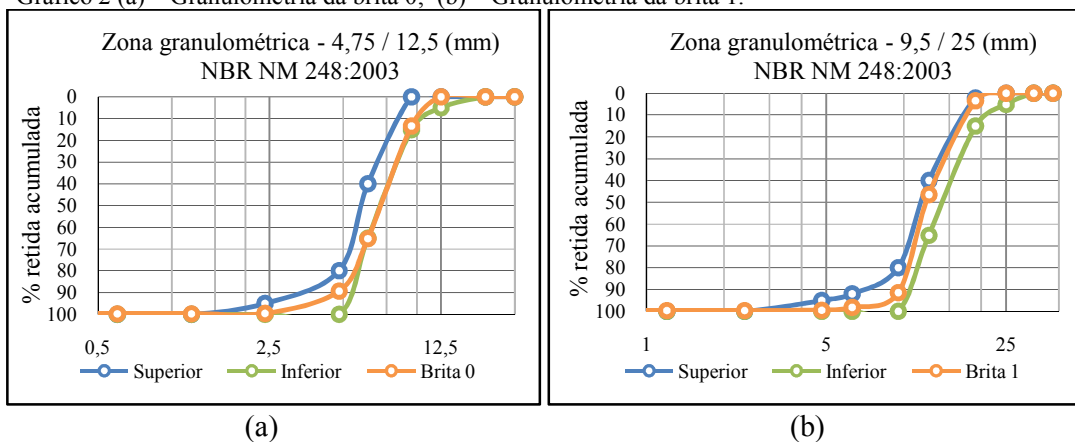
Gráfico 1 – Granulometria do agregado miúdo.



Fonte: O autor, 2018.

Para o agregado graúdo foram realizados ensaios individualmente e através da mistura de ambas as britas para verificação do melhor perfil granulométrico. O Gráfico 2 (a) apresenta o ensaio realizado com brita 0 e o Gráfico 2 (b) apresenta o perfil granulométrico da brita 1.

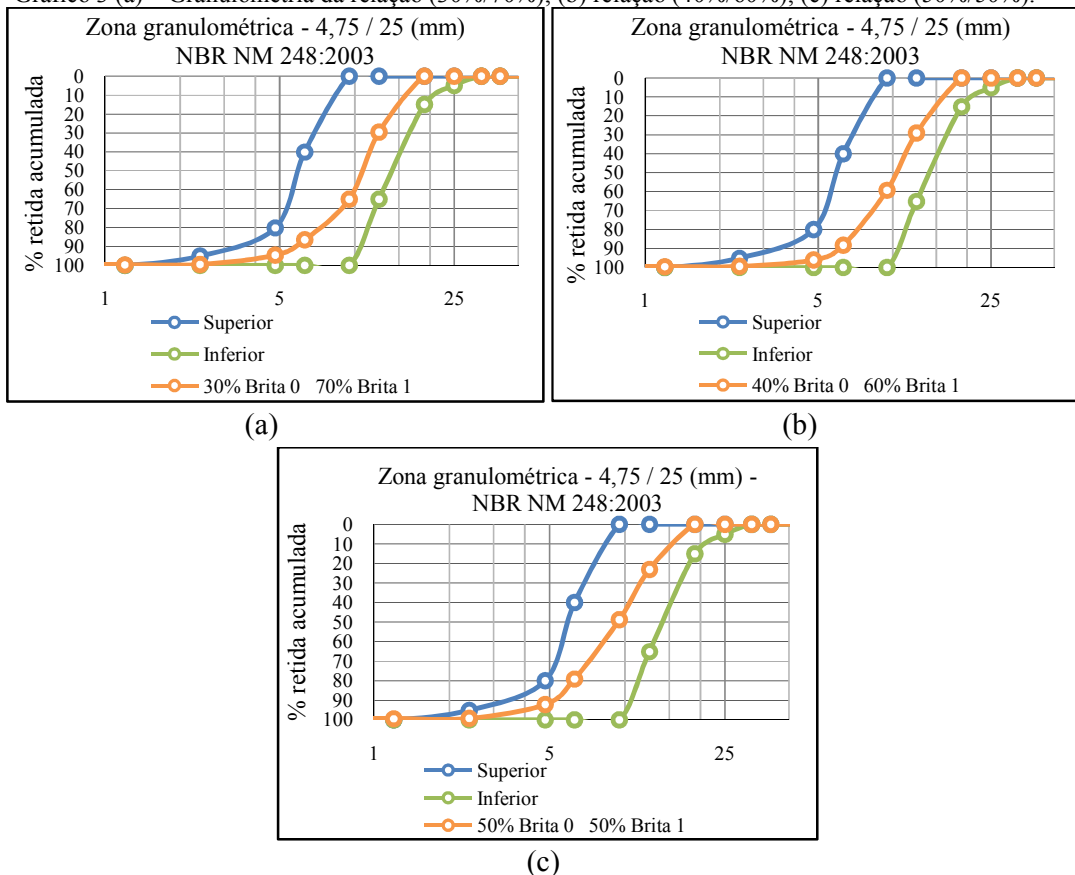
Gráfico 2 (a) – Granulometria da brita 0; (b) – Granulometria da brita 1.



Fonte: O autor, 2018.

O Gráfico 3 (a), (b) e (c) apresentam respectivamente os resultados da granulometria das misturas, sendo 30% de brita 0 e 70% de brita 1, 40% de brita 0 e 60% de brita 1 e por ultimo 50% de ambas.

Gráfico 3 (a) – Granulometria da relação (30%/70%); (b) relação (40%/60%); (c) relação (50%/50%).



Fonte: O autor, 2018.

Observou-se que tanto o agregado miúdo quanto o agregado graúdo apresentaram perfil de distribuição granulométrica dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009, atestando sua aptidão para utilização como agregado nos concretos analisados.

4.2 Massa específica

Os resultados de massa específica obtida através dos ensaios de caracterização dos materiais componentes dos concretos do estudo serão apresentados nesta seção.

4.2.1 Cimento CP V-ARI

O ensaio de massa específica do cimento foi realizado com a utilização de querosene conforme indicado pela ABNT NBR NM 23:2000. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Massa específica do cimento.

Massa específica do cimento ABNT NBR NM 23:2000 (g/cm ³)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)	
	3,06	3,08	3,07

Fonte: O autor, 2018.

Foi adotada a média dos ensaios para utilização nos cálculos dos traços para uma maior confiabilidade nos resultados.

4.2.2 Agregado miúdo

Para o agregado miúdo, os resultados por ambos os métodos foram praticamente os mesmos, sendo adotado para os cálculos do volume dos traços o resultado encontrado pelo ensaio da ABNT NBR NM 52:2009. As Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados dos ensaios de acordo com a ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR 9776:1987 respectivamente.

Tabela 25 – Massa específica pelo método da ABNT NBR NM 52:2009.

Massa específica do agregado miúdo ABNT NBR NM 52:2009 (g/cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica SSS (g/cm ³)	Massa Específica Ap (g/cm ³)
		2,635	2,483
Legenda	SSS = Saturado Superfície Seca Ap = Aparente seca		

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 26 – Massa específica pelo método da ABNT NBR 9776:1987.

Massa específica do agregado miúdo ABNT NBR 9776:1987 (g/cm ³)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
		2,65	2,63

Fonte: O autor, 2018.

4.2.3 Agregado graúdo

O resultado do ensaio de massa específica do agregado graúdo de acordo com a ABNT NBR NM 53:2009 pode ser verificado na Tabela 27.

Tabela 27 – Massa específica do gnaisse.

Massa específica do agregado graúdo ABNT NBR NM 53:2009 (g/cm ³)	Ensaio			Absorção (%)
	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Massa Específica SSS (g/cm ³)	Massa Específica Ap (g/cm ³)	
	2,859	2,819	2,798	0,75%
Legenda	SSS = Saturado Superfície Seca Ap = Aparente			

Fonte: O autor, 2018.

4.3 Massa unitária e índice de vazios

Para os resultados de massa unitária no estado solto, massa unitária no estado compactado e índice de vazios conforme ABNT NBR NM 45:2006, foram utilizadas as amostras reduzidas no separador mecânico preconizado pela ABNT NBR NM 27:2001.

4.3.1 Agregado miúdo

Os resultados de massa unitária do agregado miúdo no estado solto, no estado compactado e o índice de vazios estão representados na Tabela 28.

Tabela 28 – Massa unitária e índice de vazios do agregado miúdo no estado solto e compactado.

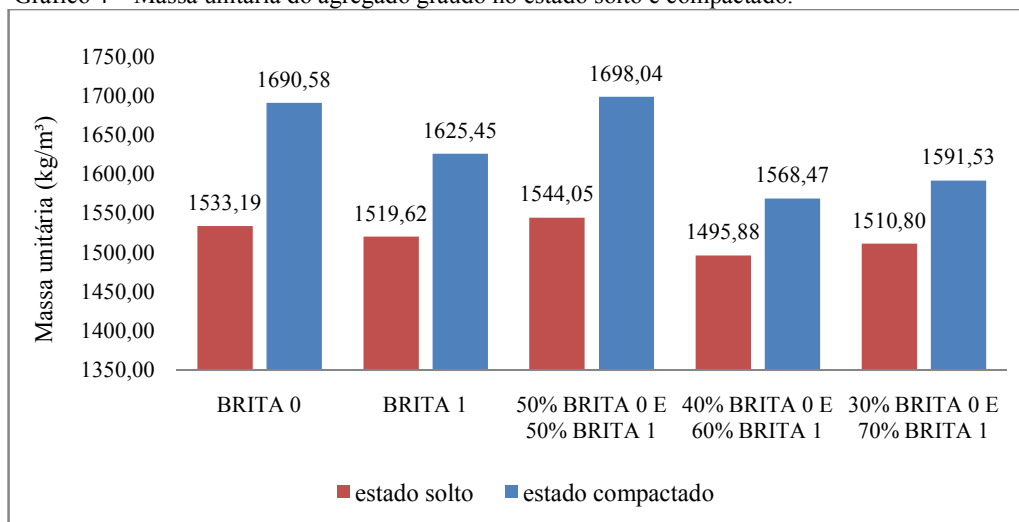
Massa unitária e índice de vazios no estado solto e compactado ABNT NBR NM 45:2006 (kg/m ³)	Ensaio agregado miúdo			
	Estado Solto		Estado Compactado	
	Massa unitária (kg/m ³)	Índice de vazios %	Massa unitária (kg/m ³)	Índice de vazios %
	1544,05	41,51	1668,87	36,79

Fonte: O autor, 2018.

4.3.2 Agregado graúdo

Os resultados de massa unitária dos ensaios com o agregado graúdo foram obtidos individualmente e através da mistura de proporções de brita 0 e de brita 1, para a obtenção da melhor continuidade granulométrica e consequentemente um menor índice de vazios. O Gráfico 4 apresenta os resultados de massa unitária tanto no estado solto como no estado compactado.

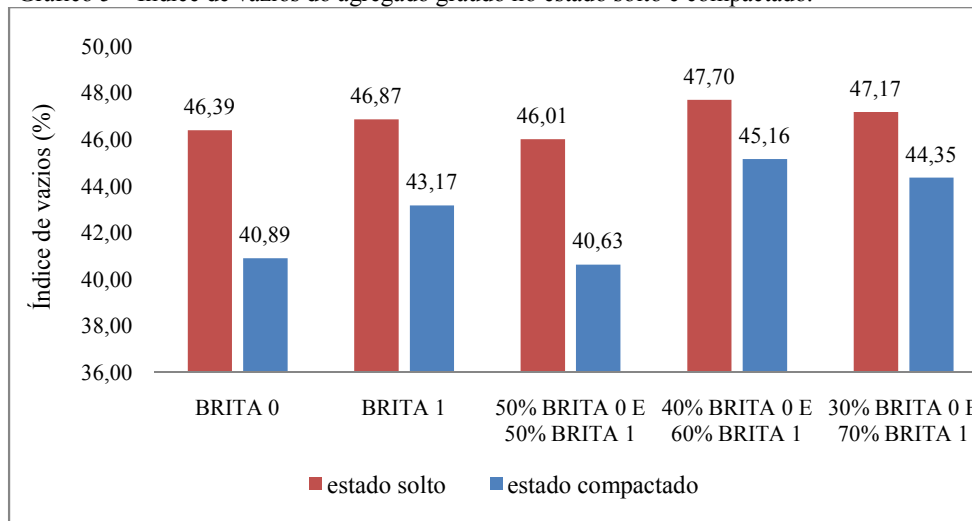
Gráfico 4 – Massa unitária do agregado graúdo no estado solto e compactado.



Fonte: O autor, 2018.

De posse dos dados dos ensaios de massa unitária foi possível calcular o índice de vazios. Os resultados são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Índice de vazios do agregado graúdo no estado solto e compactado.



Fonte: O autor, 2018.

Os melhores resultados obtidos foram da mistura de 50% de brita 0 e 50% de brita 1, apresentando maior compactação e menor índice de vazios, características importantes na redução da porosidade dos concretos e no empacotamento dos grãos, devido a isso, foi utilizada essa proporção na produção dos concretos e moldagem dos corpos-de-prova.

4.4 Caracterização tecnológica dos concretos

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos no estudo através dos ensaios realizados com os concretos de ambas as etapas, avaliando também as propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

4.4.1 Caracterização dos materiais componentes dos concretos

Foram realizados ensaios de caracterização física, dos materiais componentes dos concretos a serem produzidos em laboratório, para obtenção de dados necessários ao desenvolvimento dos traços. A Tabela 29 apresenta o resumo das características dos materiais utilizados para produção dos concretos dos traços TR 1, TR 2 e TR 3, das séries SA (sem aditivo) e CA (com aditivo) bem como dos concretos da segunda etapa.

Tabela 29 – Resultados de caracterização dos materiais componentes dos concretos.

Materiais utilizados TR 1, TR 2 e TR 3 SA e CA.	Ensaio realizado				
	Massa específica g/cm ³	Massa unitária compactada kg/m ³	Análise Granulométrica		
			Zona	Módulo de finura	Dimensão máxima característica
Cimento CP V-ARI	3,07	-	-	-	-
Agregado miúdo - areia rio média	2,64	1668,87	utilizável	2,32	2,4 mm
Agregado graúdo (GNAISSE)	2,86	1698,04	utilizável	6,38	19,0 mm

Fonte: O autor, 2018.

Os valores obtidos nos ensaios foram satisfatórios quando comparados com valores de referência encontrados em literaturas e atendem os limites normativos para utilização na produção dos concretos.

4.4.2 Avaliação do concreto no estado fresco

4.4.2.1 Abatimento pelo tronco de cone

Foram feitas correções para que o objetivo de alcançar o abatimento proposto de 80 ± 10 mm para o traço TR 1 com $\alpha = 50\%$ fosse atingido. Após a correção, o aspecto do concreto imprimido na betoneira pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Aspecto físico do concreto (TR 1) após correções.

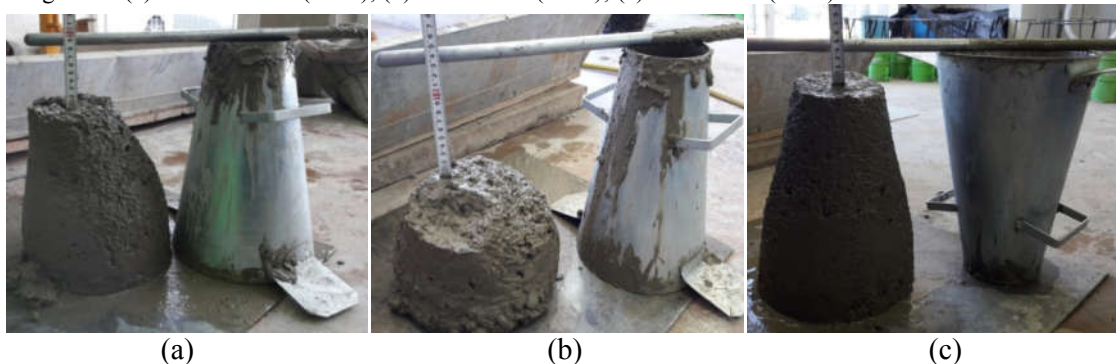


Fonte: O autor, 2018.

Conforme observado na Figura 22, o concreto apresentou trabalhabilidade, ausência de exsudação no período em que a betoneira ficou desligada e coesão dos grãos. A mistura manual utilizando colher de pedreiro também foi satisfatória manifestando boa plasticidade.

A Figura 23 (a), (b) e (c) apresentam os abatimentos pelo tronco de cone (slump test) preconizado pela ABNT NBR NM 67:1998 dos concretos TR 1, TR 2 e TR 3 respectivamente.

Figura 23 (a) – Abatimento (TR 1); (b) abatimento (TR 2); (c) abatimento (TR 3).



Fonte: O autor, 2018.

Ao se manter a mesma relação a/c e o mesmo volume para os traços TR 2 e TR 3, como previsto, houve alteração no abatimento conforme apresentado na Figura 23. O traço TR 2 apresentou um abatimento maior devido a redução da taxa de argamassa, ficando o concreto com um aspecto de maior plasticidade e fluidez, porém com ausência de segregação e exsudação; o traço TR 3 apresentou um baixo abatimento devido a maior taxa de argamassa, mas sem que houvesse excesso de porosidade visualmente, pois era uma preocupação ao executá-lo. Ambos os concretos obtiveram pelo aspecto visual, trabalhabilidade e coesão e não houve problemas aparentes de segregação e consistência. A Tabela 30 apresenta os abatimentos dos três traços.

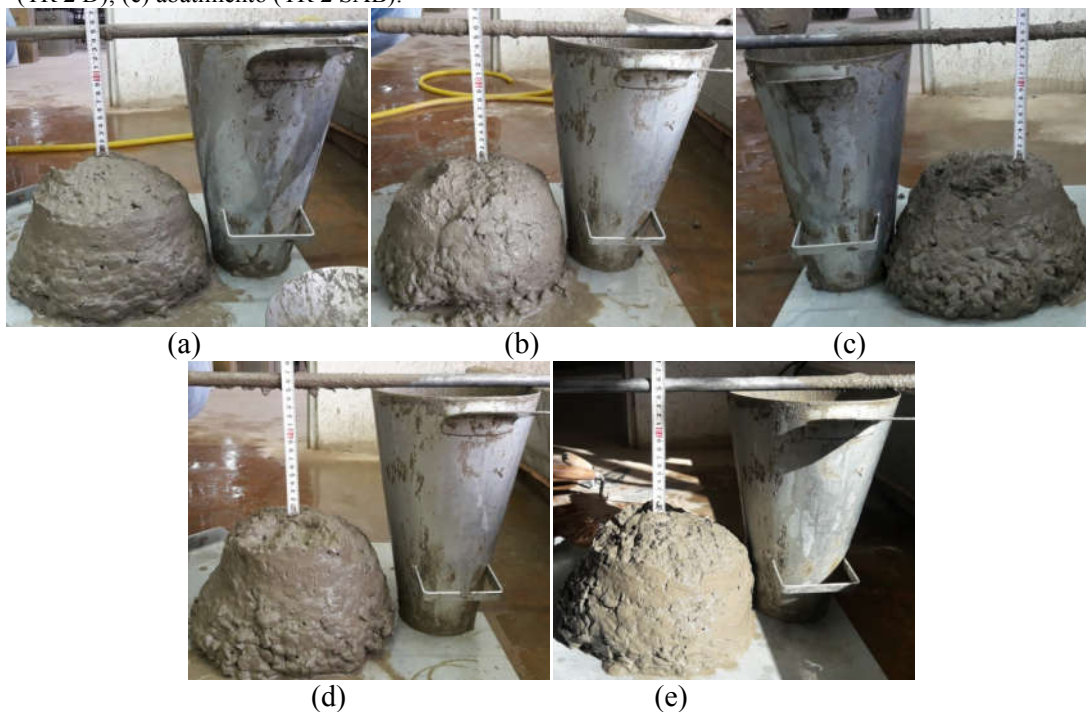
Tabela 30 – Resumo dos abatimentos dos concretos da primeira etapa.

Traço	TR 1	TR 2	TR 3
Abatimento (mm)	85	130	40

Fonte: O autor, 2018.

Nos concretos da segunda etapa, a variação dos abatimentos foi quase nula devido todos terem sido produzidos utilizando os parâmetros do traço TR 2. Os abatimentos dos traços TR 2 AL2, TR 2 B, TR 2 C, TR D e TR 2 SAB podem ser observados na Figura 24 (a), (b), (c), (d) e (e) respectivamente.

Figura 24 (a) – Abatimento (TR 2 AL2); (b) abatimento (TR 2 B); (c) abatimento (TR 2 C), (d) abatimento (TR 2 D); (e) abatimento (TR 2 SAB).



Fonte: O autor, 2018.

Como observado na Figura 24 (a), (b), (c), (d) e (e) a variação do abatimento entre os concretos foi de menos de 10mm. O aditivo (AL2) deixou o concreto levemente menos plástico que os demais aditivos apresentando um abatimento ligeiramente menor. A Tabela 31 apresenta o resumo dos abatimentos da segunda etapa.

Tabela 31 – Resumo dos abatimentos dos concretos da segunda etapa.

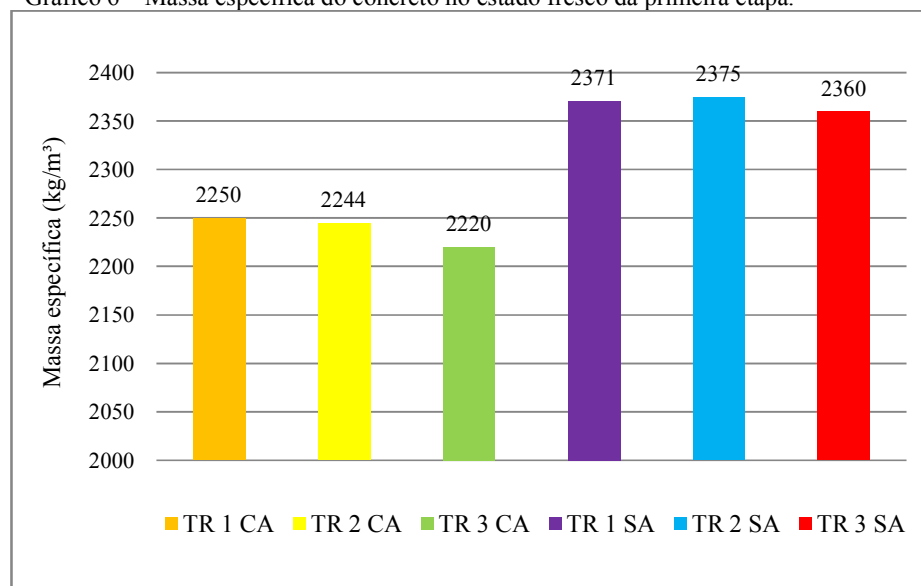
Traço	TR 2 AL2	TR 2 B	TR 2 C	TR 2 D	TR 2 SAB
Abatimento (mm)	140	150	150	150	145

Fonte: O autor, 2018.

4.4.2.2 Massa específica do concreto no estado fresco

A massa específica do concreto no estado fresco de ambas as etapas foi calculada pela média da massa específica de 3 corpos-de-prova. O Gráfico 6 apresenta os resultados dos traços TR 1, TR 2 e TR 3 das séries SA e CA.

Gráfico 6 – Massa específica do concreto no estado fresco da primeira etapa.

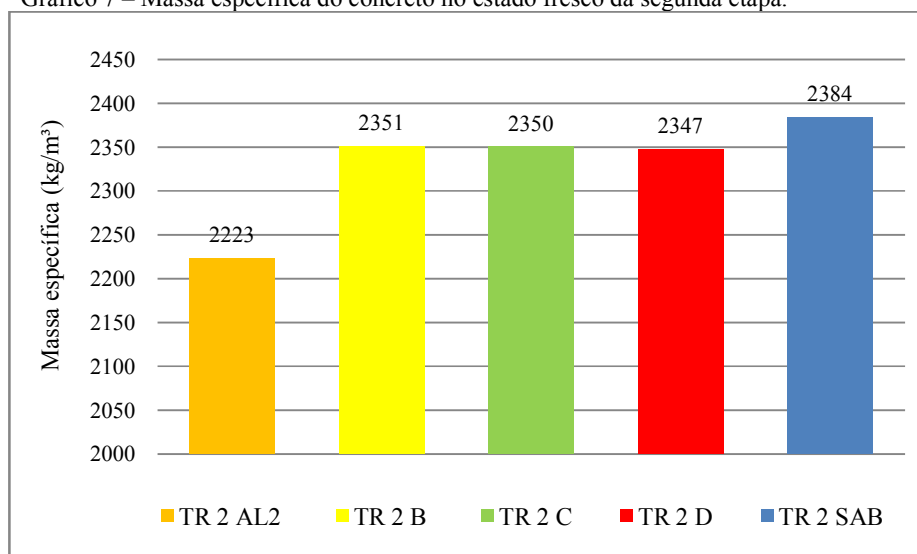


Fonte: O autor, 2018.

Entre os concretos da primeira etapa da série SA praticamente não houve alteração na massa específica de um traço para outro. Observou-se uma redução média de 5,52% na massa específica dos concretos da série CA em comparação com os concretos da série SA.

Nos concretos da segunda etapa também houve redução da massa específica dos concretos aditivados, como pode ser observado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Massa específica do concreto no estado fresco da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

De acordo com o Gráfico 7, os concretos TR 2 AL2 com aditivo do tipo (A), mesmo de outro lote, também apresentou uma redução na massa específica, na ordem de 6,76% quando comparado com os concretos TR 2 SAB (sem aditivo), porcentagem de redução próxima em comparação com os concretos da primeira etapa. Já os concretos com os aditivos do tipo (B), (C) e (D) apresentaram uma redução menor, em torno de 1,45%. De uma maneira geral, os resultados obtidos indicaram que os concretos após serem aditivados, tiveram suas propriedades no estado fresco alteradas. As Tabelas com os resultados obtidos nos ensaios podem ser verificadas no Apêndice D.

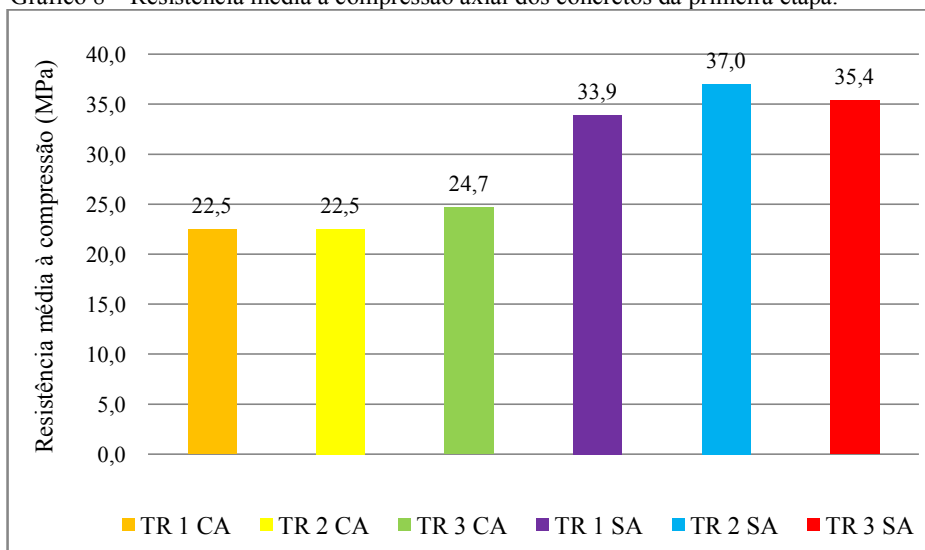
4.4.3 Avaliação do concreto no estado endurecido

As propriedades avaliadas do concreto no estado endurecido de ambas as etapas do estudo foram: resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral.

4.4.3.1 Resistência à compressão axial

Após a realização do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos moldados e armazenados na cura úmida, de acordo com o cronograma estabelecido, com os dados obtidos no ensaio calculou-se a resistência média à compressão (f_c) em MPa. Os resultados dos concretos da primeira etapa são apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Resistência média à compressão axial dos concretos da primeira etapa.

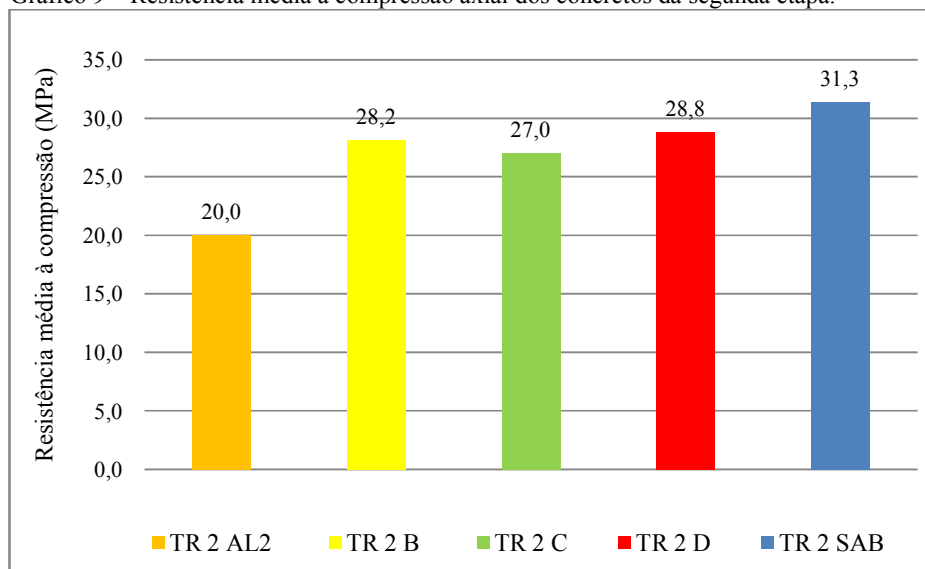


Fonte: O autor, 2018.

Observou-se que os concretos com o uso do aditivo, além de uma redução na massa específica, apresentaram uma redução considerável na resistência à compressão, em média 34,43% menor em comparação com os concretos sem aditivo.

Os concretos moldados na segunda etapa foram ensaiados respeitando as mesmas idades dos concretos da primeira etapa, mantendo uma padronização dos processos. Os resultados dos concretos da segunda etapa são apresentados no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Resistência média à compressão axial dos concretos da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

Os concretos da segunda etapa também apresentaram redução na resistência à compressão. A Tabela 32 apresenta as porcentagem de redução em comparação com os concretos TR 2 SAB.

Tabela 32 – Redução da resistência à compressão dos concretos da segunda etapa.

Traço	TR 2 AL2	TR 2 B	TR 2 C	TR 2 D
% Redução na resistência à compressão quando comparados com o traço TR 2 SAB	36,17%	10,17%	13,84%	8,12%

Fonte: O autor, 2018.

Os concretos da segunda etapa moldados com aditivo do tipo (A) de lote diferente do utilizado na primeira etapa também apresentaram redução na resistência à compressão, descartando a hipótese de problema no lote do produto utilizado na etapa anterior. Os concretos com os aditivos do tipo (B), (C) e (D) também apresentaram redução na resistência à compressão, porém em porcentagens menores, o que não descarta preocupações, principalmente em termos de projeto onde os concretos são solicitados estruturalmente.

Um dos γ_c (coeficiente de ponderação da resistência do concreto) utilizados nos cálculos de dimensionamento de estruturas de concreto armado segundo a ABNT NBR 6118:2014, tem valor de (1,4), o equivalente a uma redução de aproximadamente 28,57% na resistência de cálculo do concreto a favor da segurança. Tal fator de segurança, mesmo que utilizado em sua totalidade não seria suficiente para compensar a redução da resistência de 36,17% dos concretos com aditivo do tipo (A). Wendler e Charola (2008) alertam quanto ao uso de produtos hidrófugos, sendo em alguns casos mais prejudicial do que benéfica, devido ao pouco conhecimento das interações entre esses materiais.

Os aditivos, por razões ainda desconhecidas, exerceram interferências nas propriedades dos concretos estudados, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Os motivos que podem ter causado essa interferência são vários como, por exemplo, uma reação química específica com o cimento utilizado, alguma interferência na cura do concreto por parte do aditivo, maior porosidade na interface entre o agregado e pasta de cimento entre outros. Uma alternativa para investigação do que pode ter ocorrido nos concretos seria através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), por possibilitar uma investigação da superfície das amostras com ampliações na ordem de centenas de milhares de vezes e pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS), que possibilita a identificação e mapeamento dos elementos químicos presentes no material, de acordo com Paulon e Kirchheim (2011).

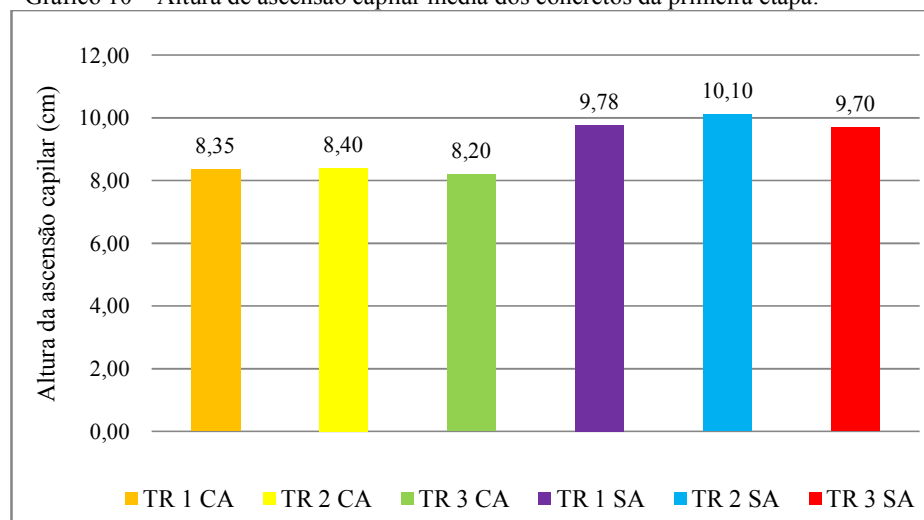
As Tabelas com os resultados dos ensaios de compressão axial encontram-se no Apêndice D para apreciação.

4.4.3.2 Absorção de água por capilaridade

Através dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos corpos-de-prova foi possível verificar dois importantes parâmetros: a massa de água absorvida nos períodos de tempo de 3h, 6h, 24h e 48h e a altura de ascensão capilar.

O gráfico 10 apresenta os resultados em relação à altura da ascensão capilar dos concretos da primeira etapa pela média dos corpos-de-prova ensaiados.

Gráfico 10 – Altura de ascensão capilar média dos concretos da primeira etapa.

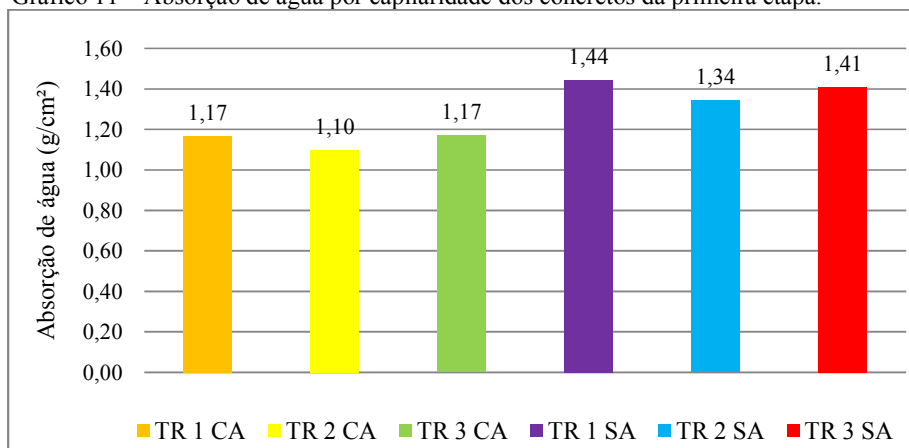


Fonte: O autor, 2018.

A altura da ascensão capilar dos concretos da série CA foram em média 15,65% menores em comparação com os concretos sem aditivo. Observou-se que a maior diferença de absorção entre os concretos da série SA foi de apenas 3,96% e nos concretos da série CA a maior diferença foi de 2,38%, quando comparado o traço TR 3 com o traço TR 2,

De posse dos dados das pesagens foi calculada a massa de água absorvida dos concretos ensaiados. O Gráfico 11 apresenta os valores médios de absorção.

Gráfico 11 – Absorção de água por capilaridade dos concretos da primeira etapa.

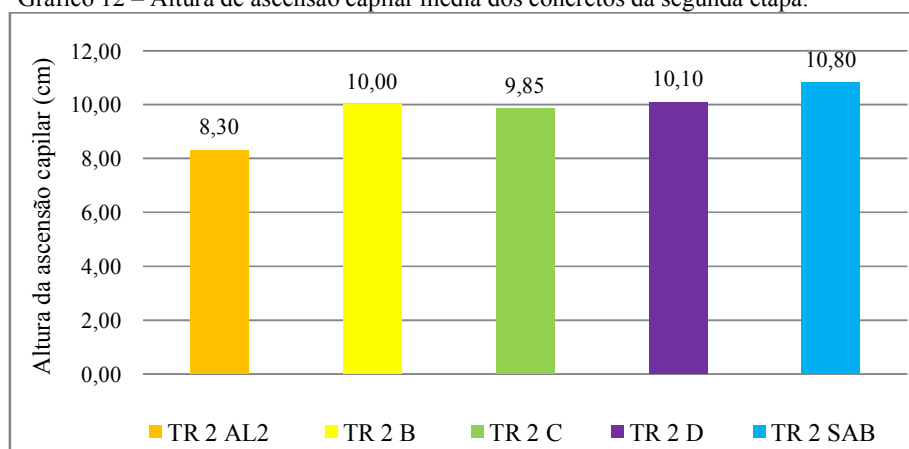


Fonte: O autor, 2018.

A massa de água absorvida nos concretos da série CA foram em média 17,90% menores quando comparados com os concretos da série SA. Outro ponto observado foi que os concretos do traço TR 2, com o menor teor de argamassa apresentaram a menor absorção de água. A relação a/c foi a mesma para ambos os traços e devido a maior utilização de agregado graúdo no traço TR 2, obteve-se um abatimento maior e conseqüentemente uma maior plasticidade, levando a conclusão que numa hipótese de utilização de uma relação a/c menor para esse traço, tanto os resultados de resistência como de estanqueidade tendem a ser melhores. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência e a permeabilidade são fatores que estão relacionados à relação a/c.

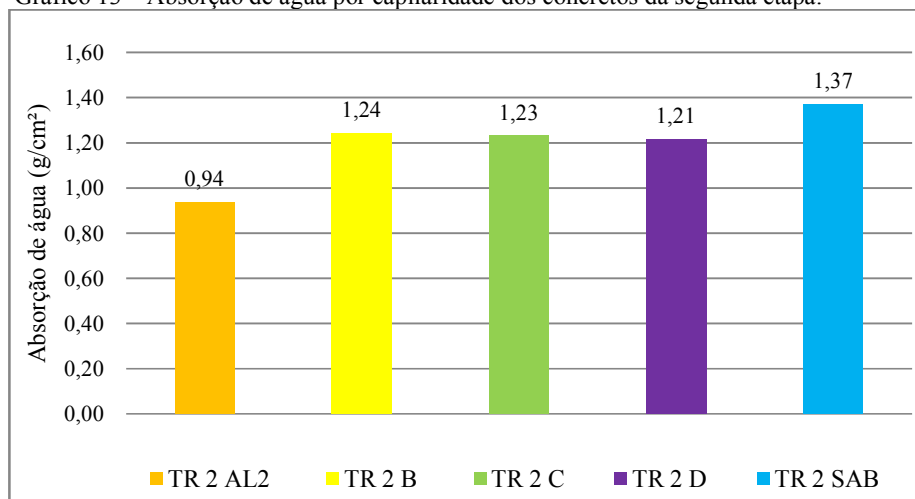
O gráfico 12 apresenta os resultados em relação à altura da ascensão capilar e o Gráfico 13 apresenta os valores de absorção capilar dos concretos, ambos da segunda etapa, pela média dos corpos-de-prova ensaiados.

Gráfico 12 – Altura de ascensão capilar média dos concretos da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

Gráfico 13 – Absorção de água por capilaridade dos concretos da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

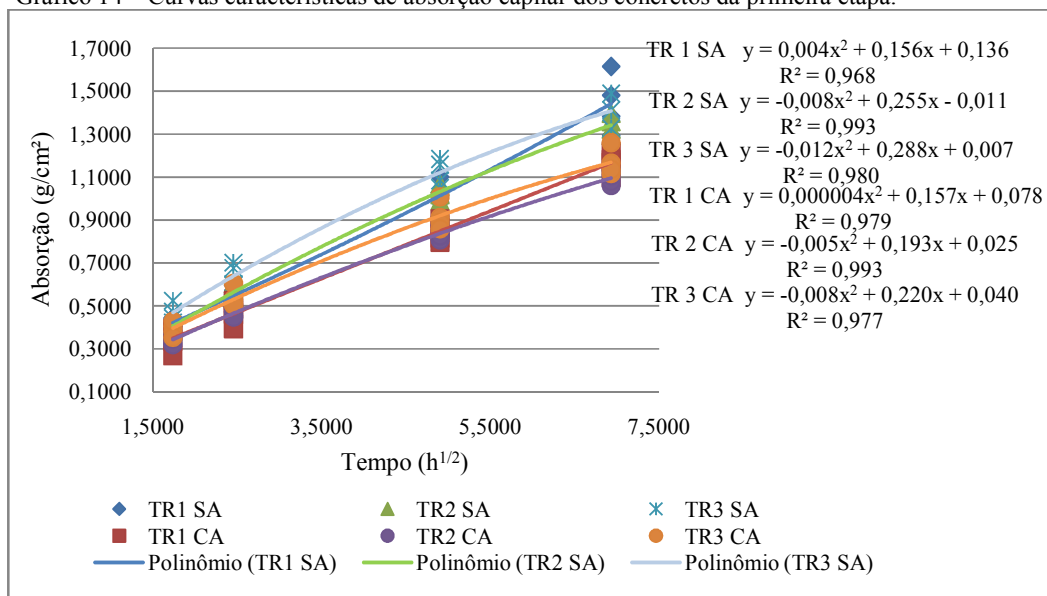
De acordo com os Gráficos 12 e 13, percebe-se uma relação de proporcionalidade, porém não linear, indicando que quanto maior a eficiência do aditivo, maior sua interferência na resistência do concreto. O concreto TR 2 AL2, apresentou uma eficiência maior, em termos de barreira repelente de água, em comparação com os concretos TR 2 B, TR 2 C e TR 2 D. A redução média da altura de ascensão capilar foi de 16,86% e a redução média da absorção de água foi de 23,37%. Em contrapartida, a redução na resistência à compressão desse concreto foi a maior. Em comparação com o concreto TR 2 SAB a eficiência foi um pouco maior, em torno de 23,15% para ascensão capilar e 31,39% para absorção de água, uma redução bastante significativa de massa absorvida. Observou-se que a eficiência da barreira repelente e do efeito parede sugerido por Cascudo et al. (2002) foi pouco expressiva, ocorrendo somente em alturas maiores onde a ascensão capilar já encontrava-se mais fraca.

As Tabelas com os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade podem ser consultadas no Apêndice D.

4.4.3.2.1 Coeficiente de capilaridade

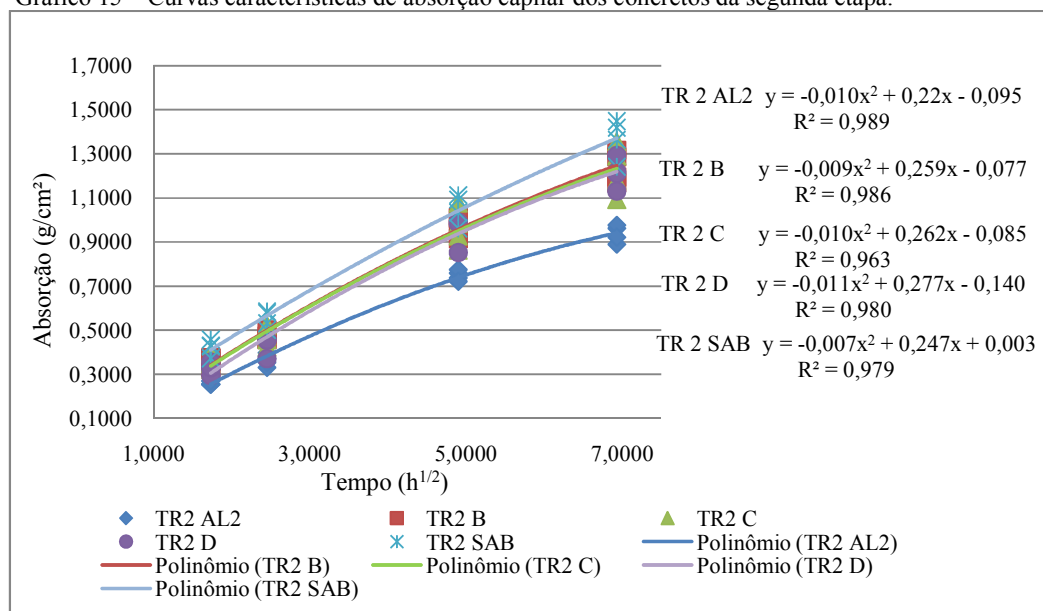
De posse dos dados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade, foi possível traçar as curvas de absorção capilar dos concretos produzidos no estudo. Nos Gráficos 14 e 15 são apresentados os resultados da primeira e da segunda etapa consecutivamente.

Gráfico 14 – Curvas características de absorção capilar dos concretos da primeira etapa.



Fonte: O autor, 2018.

Gráfico 15 – Curvas características de absorção capilar dos concretos da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

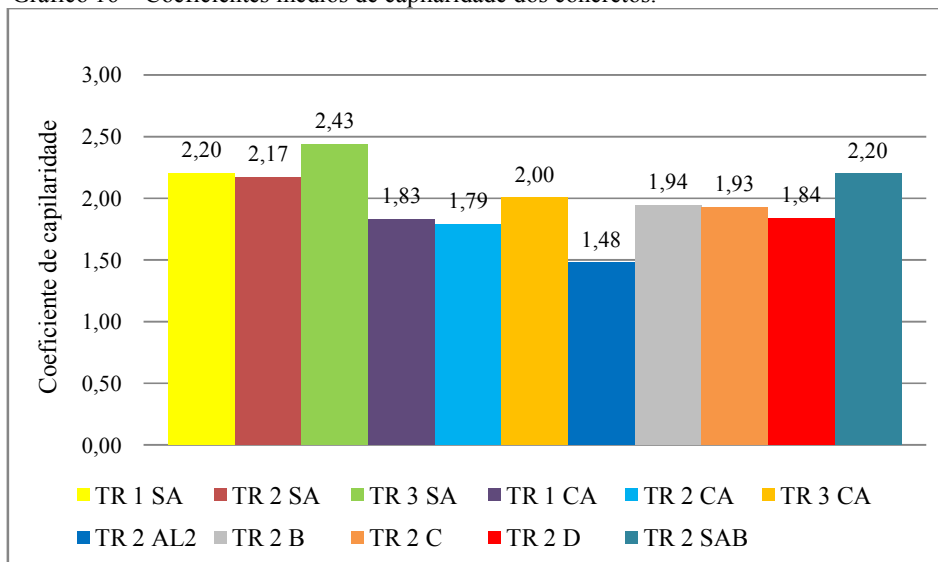
Como pode ser observado, ambos os gráficos apresentaram curvatura semelhante, indicando que a porosidade entre os concretos são muito próximas, variando somente a absorção devido ao uso do aditivo hidrófugo.

O ensaio de absorção capilar estabelecido pela ABNT NBR 9779:2013 preconiza as medições somente nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Para obtenção de gráficos próximos aos das Figuras 9 e 10, é preciso que as medições ocorram em intervalos menores

de tempo, conforme apresentado no capítulo 2 na seção 2.7.1.2, seguindo o estabelecido por Freitas (1992). As curvas de absorção apresentadas nesse estudo divergiram devido às medições terem tido início somente depois de decorridas 3 horas de ensaio para que se pudesse atender o estabelecido na ABNT NBR 9779:2013.

Foram calculados os coeficientes de capilaridade de todos os concretos estudados. As Tabelas podem ser consultados no Apêndice D. Com auxílio da equação 3 e com os coeficientes de capilaridade, é possível estimar a absorção em outras idades. Pode-se também fazer a mesma aproximação de absorção utilizando as equações polinomiais apresentadas nos Gráficos 14 e 15. O resumo dos coeficientes médios de capilaridade de todos os concretos estudados podem ser verificados no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Coeficientes médios de capilaridade dos concretos.

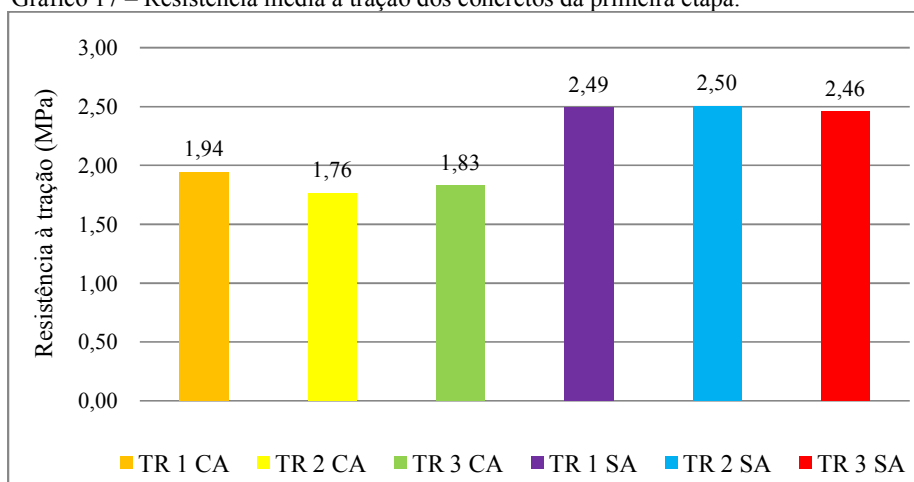


Fonte: O autor, 2018.

4.4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Após a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos concretos submetidos à imersão parcial de (5 ± 1) mm, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova, conforme preconizado pela ABNT NBR 7222:2011. Com os dados obtidos pelos ensaios, calculou-se a resistência média à tração ($f_{ct,sp}$) em MPa. Os resultados dos concretos da primeira etapa são apresentados no Gráfico 17.

Gráfico 17 – Resistência média à tração dos concretos da primeira etapa.

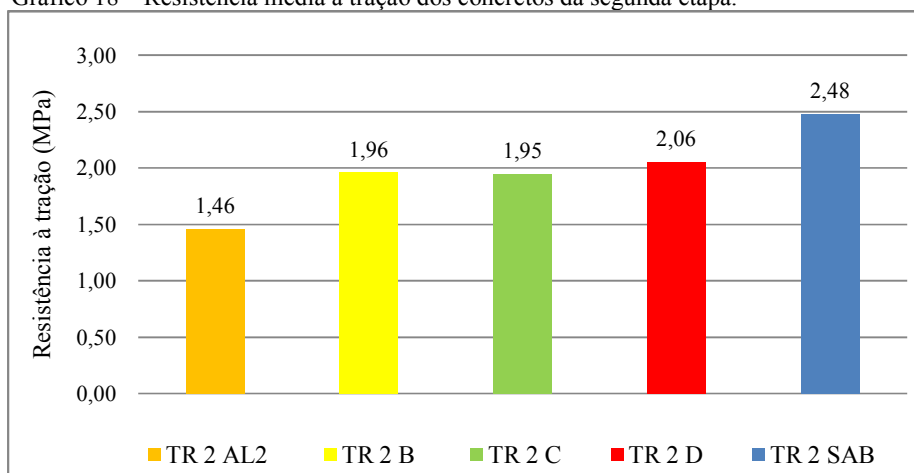


Fonte: O autor, 2018.

Como ocorrido com a resistência à compressão, a resistência à tração dos corpos-de-prova da série CA também foi afetada pela utilização do aditivo do tipo (A). Os corpos-de-prova apresentaram uma redução na resistência à tração na ordem de 25,77%, em média, quando comparados com os resultados dos corpos-de-prova da série SA. Em comparação com a resistência à compressão axial, a redução foi menor, porém bastante significativa também.

Nos concretos da segunda etapa os resultados também apresentaram redução na resistência à tração. O gráfico 18 apresenta os resultados dos corpos-de-prova ensaiados.

Gráfico 18 – Resistência média à tração dos concretos da segunda etapa.



Fonte: O autor, 2018.

A variação da resistência à tração entre os concretos utilizando os aditivos do tipo (B), (C) e (D) foi pequena, apresentando a maior variação de apenas 5,34% quando comparado o concreto TR 2 C com o TR 2 D. Os concretos TR 2 AL2 apresentaram queda da resistência na

ordem de 26,63%, em média, quando comparados com os concretos TR 2 B, TR 2 C e TR 2 D e de 41,13% em relação ao concreto TR 2 SAB. De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, para concretos até a classe C50, a resistência média à tração ($f_{ct,m}$), pode ser obtida pela expressão $(0,3 f_{ck}^{2/3})$, ou seja, algo em torno de 9,65% da resistência característica à compressão do concreto. A relação entre a resistência à tração com a resistência à compressão dos concretos estudados pode ser verificada na Tabela 33.

Tabela 33 – Relação entre a resistência à tração e a resistência a compressão.

Primeira etapa			
Concreto	Resistência média à compressão (MPa)	Resistência média à tração (MPa)	Relação entre a resistência à tração com a resistência à compressão (%)
TR 1 SA	33,90	2,49	7,34%
TR 1 CA	22,47	1,94	8,63%
TR 2 SA	37,00	2,50	6,76%
TR 2 CA	22,52	1,76	7,84%
TR 3 SA	35,35	2,46	6,95%
TR 3 CA	24,68	1,83	7,40%
Segunda etapa			
Concreto	Resistência média à compressão (MPa)	Resistência média à tração (MPa)	Relação entre a resistência à tração com a resistência à compressão (%)
TR 2 AL2	20,01	1,46	7,30%
TR 2 B	28,16	1,96	6,96%
TR 2 C	27,01	1,95	7,22%
TR 2 D	28,80	2,06	7,14%
TR 2 SAB	31,35	2,48	7,91%

Fonte: O autor, 2018.

A resistência à tração dos concretos estudados foi em média o equivalente a $\cong 7,5\%$ da resistência à compressão, porcentagem próxima do estabelecido em norma. Segundo Andrade e Tutikian (2011) essas variações ocorrem devido ao atrito dos corpos de prova com as chapas das prensas utilizadas nos ensaios. Destacam também a importância de se conhecer a resistência do concreto, pois nos elementos estruturais eles podem ser solicitados à compressão, à tração, ao cisalhamento ou a uma combinação dos três tipos de tensão em várias direções. As Tabelas com os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral encontram-se no Apêndice D.

4.5 Análise comparativa dos resultados

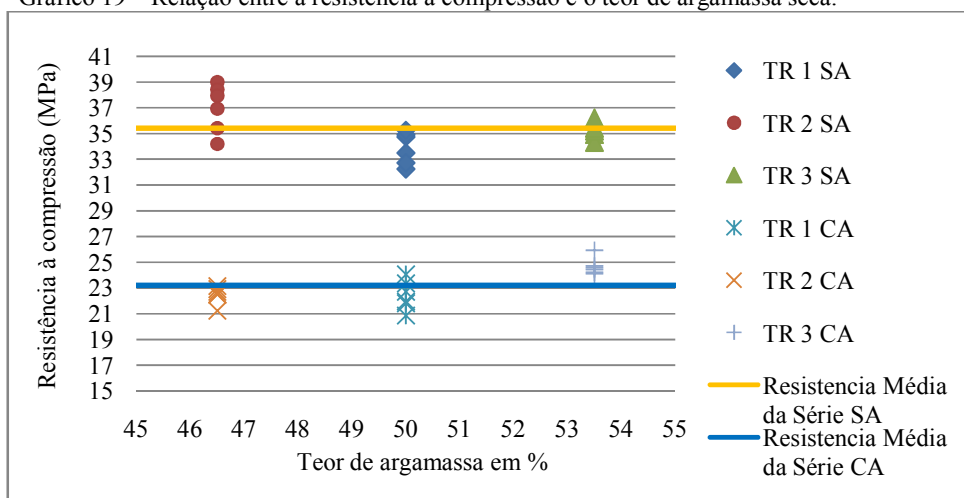
A análise comparativa tem como objetivo compreender o comportamento mecânico e microestrutural dos concretos estudados, através do cruzamento de informações dos

resultados obtidos, avaliando se um parâmetro tem influência sobre outro ou dependência de um com outro. Foi feito também, em algumas análises, o cruzamento de informações com dados de ambas as etapas, permitindo a apresentação dos resultados através de um universo maior de informações.

4.5.1 Resistência à compressão x teor de argamassa seca (α)

Foram estudados três concretos com diferentes teores de argamassa seca (α) na primeira etapa. O Gráfico 19 apresenta os dados correlacionados.

Gráfico 19 – Relação entre a resistência à compressão e o teor de argamassa seca.



Fonte: O autor, 2018.

Pela análise do Gráfico 19, fica visível a diferença de resistência dos concretos com aditivo para os concretos sem aditivo. Como pode ser observado, os concretos TR 2 SA, com o menor teor de argamassa, foram os que apresentaram a maior resistência à compressão da série SA. A resistência média geral de todos os corpos-de-prova ensaiados da série SA foi de 35,42 MPa enquanto que da série CA foi de 23,22 MPa. Outro ponto observado foi que, não necessariamente concretos com teores de argamassa menores são sempre mais resistentes em comparação à concretos com teores de argamassa maiores. Tal verificação tem fundamento ao analisar os concretos TR 1 SA, que apresentaram resistência menor que os TR 3 SA, sendo esse último o concreto com a maior taxa de argamassa entre os três. Outro ponto analisado foi que, quanto menor a taxa de argamassa, maior foi a interferência do aditivo na resistência dos concretos. Tal fato é observado pelos resultados do traço TR 3 CA, que foi o menos afetado

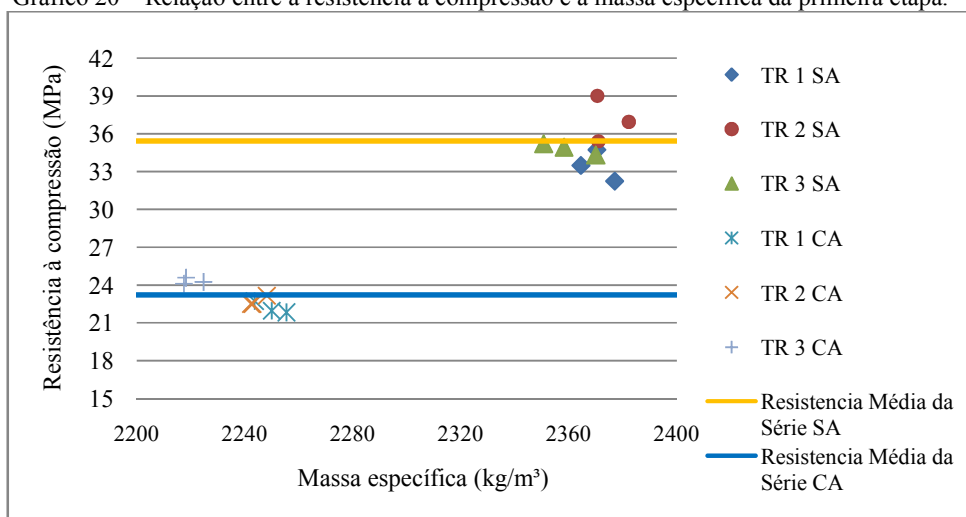
em comparação com os demais concretos e apresentou resistência acima da média geral da série CA.

Não foi apresentado gráfico da segunda etapa pois todos os concretos foram produzidos utilizando o traço TR 2, com teor de argamassa seca de 46,5%.

4.5.2 Resistência à compressão x massa específica

O Gráfico 20 apresenta as correlações entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos da primeira etapa.

Gráfico 20 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica da primeira etapa.

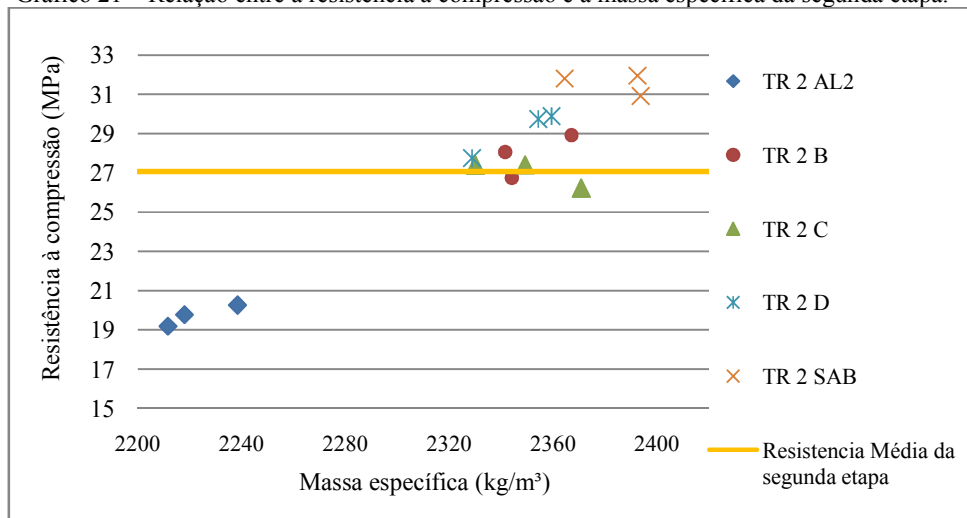


Fonte: O autor, 2018.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) existe uma relação entre a resistência e a massa específica. Essa relação pode ser claramente observada no Gráfico 20 analisando os resultados dos concretos da série SA, que apresentaram massa específica e resistência bem superiores aos concretos da série CA que, por conseguinte, tiveram queda na massa específica e consequentemente queda na resistência. O traço TR 2 SA apresentou a maior massa específica e a maior resistência à compressão em comparação com os demais traços produzidos da primeira etapa.

O Gráfico 21 apresenta as correlações entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos da segunda etapa.

Gráfico 21 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica da segunda etapa.



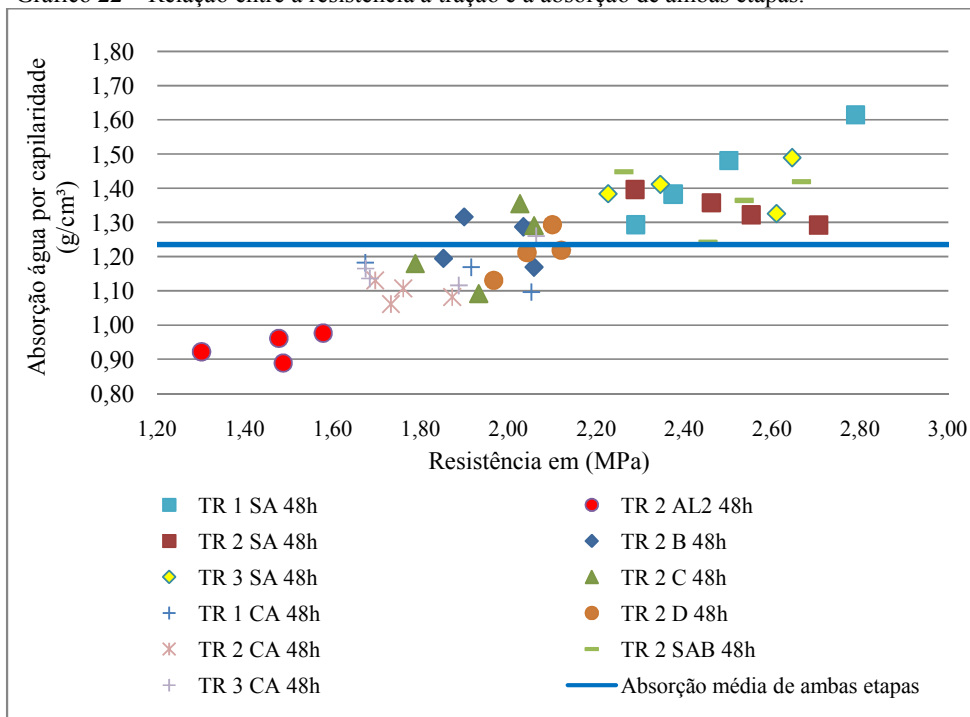
Fonte: O autor, 2018.

Como pode ser observado, os resultados dos concretos com aditivo do tipo (A) da segunda etapa (outro lote) apresentaram resultados semelhantes aos concretos com aditivo do tipo (A) da primeira etapa, tanto na resistência à compressão quanto na massa específica. Observou-se também que os resultados dos concretos TR 2 B, TR 2 C e TR 2 D ficaram próximos dos resultados do concreto TR 2 SAB. Como a redução da massa específica foi menor, consequentemente a redução na resistência também foi menor. Pode se dizer que existe uma relação de proporcionalidade entre a resistência e a massa específica quando são analisados ambos os gráficos.

4.5.3 Resistência à tração x absorção capilar

O Gráfico 22 apresenta as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade e tração por compressão diametral, tomando os valores referentes à absorção de 48h de ambas as etapas.

Gráfico 22 – Relação entre a resistência à tração e à absorção de ambas etapas.



Fonte: O autor, 2018.

Como pode ser observado, o concreto TR 2 AL2, que foi fabricado com aditivo do tipo (A), apresentou a menor absorção de água em comparação entre todos os concretos estudados, sendo 24,13% menor que a média de absorção de ambas as etapas e 31,51% menor em comparação com o concreto TR 2 SAB; em contrapartida, também foi o concreto que atingiu a menor resistência mecânica. Já os concretos TR 2 B, TR 2 C e TR 2 D, apresentaram menor eficiência no quesito de absorção de água, com resultados próximos da média geral de ambas as etapas, porém a interferência e redução na resistência também foi menor, em média 10,89% em comparação com o concreto TR 2 SAB. Pela análise geral dos resultados, os dados indicaram que, quanto maior foi a eficiência do aditivo, maior também foi sua interferência na resistência e na microestrutura dos concretos estudados. Outro ponto observado, foi que os concretos dos traços TR 1 e TR 3, que possuem taxa de argamassa maiores que o traço TR 2, apresentaram resultados de absorção de água por capilaridade maiores. No caso do traço TR 2, há uma maior concentração de agregado graúdo, que possui estrutura física menos permeável que do agregado miúdo.

5. CONCLUSÕES

Os estudos indicaram, para os concretos com as características e as idades analisadas, que somente pelo uso do aditivo hidrófugo, não foi possível impedir a absorção de água por capilaridade e conseqüentemente o transporte de massa para o interior dos concretos, tornando-se necessário avaliar cada projeto e suas particularidades, principalmente se o objetivo for a produção de concretos com características de grande impermeabilidade. Em elementos de concreto, em contato com o solo, onde exista a possibilidade de infiltração de água ou exposição de umidade elevada, orienta-se a utilização do aditivo hidrófugo aliado a outro aditivo impermeabilizante para maior estanqueidade, não sendo indicado, como solução do problema, somente a utilização do aditivo hidrófugo, à princípio. Todavia, essa análise cabe ao profissional responsável, que deve ter conhecimento e sensibilidade na avaliação da melhor solução.

Em última análise, os resultados apontaram que o uso de aditivos hidrófugos a serem incorporados no processo de produção de concretos, onde este ainda se encontra no estado fresco, requer uma investigação mais aprofundada, devendo ser avaliado com cautela a sua utilização, principalmente em concretos para fins estruturais, onde nesses seu uso, à princípio, deve ser evitado, pois, como ficou constatado pelos resultados, ainda por causas desconhecidas, o aditivo hidrófugo interferiu na estrutura física e mecânica dos concretos analisados, reduzindo sua massa específica e resistência mecânica.

Todavia, com o aprofundamento das pesquisas, principalmente no campo microestrutural, pode ser possível compreender como ocorrem as interações dos hidrófugos com os concretos, o que contribuiria no desenvolvimento de soluções para minimizar ou eliminar interferências desfavoráveis ou até mesmo trazer maiores benefícios quanto ao uso desses produtos.

Como recomendações para trabalhos futuros sugerem-se:

- Estudo da microestrutura através de análises microscópicas (MEV – Microscopia eletrônica de varredura), para buscar diagnóstico em relação às interferências ocorridas pelo uso dos aditivos hidrófugos nos concretos analisados.
- Estudar a absorção de água em concretos com outros tipos de agregados, como por exemplo, os reciclados de concreto, e analisar a absorção capilar em outras idades a fim de traçar com maior precisão as curvas de absorção capilar e os coeficientes de capilaridade.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 201.2R. Guide to durable concrete. ACI Manual of Concrete Practice.** Detroit: 2001, 41p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em: 22 Setembro 2018.

_____. **Os tipos de cimento Portland.** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>>. Acesso em: 18 Fevereiro 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jul.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jul.

_____. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jul.

_____. **NBR 5736: Cimento Portland de pozolânico.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jul.

_____. **NBR 5737: Cimento Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jun.

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

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

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014. mai.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. mai.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. jun.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015. mar.

_____. **NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987. mar.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005. ago.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013. jan.

_____. **NBR 9935: Agregados - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. fev.

_____. **NBR 10786: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013. mar.

_____. **NBR 10787: Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. out.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991. jul.

_____. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. ago.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015. fev.

_____. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. abr.

_____. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017. ago.

_____. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. dez.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018. jul.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000. jul.

_____. **NBR NM 26: Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001. mai.

_____. **NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001. mai.

_____. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006. abr.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. fev.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. fev.

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

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

_____. **NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010. out.

ANDADRE, J.J.O.; TUTIKIAN, B.F. **Resistência mecânica do concreto.** In: ISAIA, G.C.(Ed). **Concreto: ciência e tecnologia,** São Paulo: IBRACON, 2011.

ASSUNÇÃO, J.W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

BASILIO, E.S. **Considerações gerais sobre a dosagem do concreto.** In: Colóquio sobre dosagem de concreto. São Paulo: IBRACON, 1977.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 1995. 236p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO, J.R.F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturais Usuais de concreto armado;** 4ª ed., EDUFScar, São Carlos (SP), 2014.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. & LOPES, A. N. **A importância do cobrimento na durabilidade das estruturas de concreto – uma visão do projeto integrado.** In: II Seminário Internacional sobre Durabilidade das Estruturas de Concreto. Goiânia, GO, 2002, CD-ROOM.

CHAROLA, A. E. **Water-repellent treatments for building stones: A practical overview.** APT Bulletin, v.26, n. 2/3, p. 10-17, 1995.

CORREIA, J.; BALTAZAR, L.; RODRIGUES, M. (2013). **Hydrophobic Protection for Concrete: Shortterm Performance and Durability.** Restoration of Buildings and Monuments, Vol.19, No.4, 267-278, 2013.

COUTO, S.C.C. **Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos – Influência na secagem.** 2010. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.

FARIAS, M.M; PALMEIRA, E.M. **Agregados para a construção civil.** In: ISAIA, G.C. (Ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência de Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 16.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil.** São Paulo, ABGE, 2002.

FREITAS, V. **Transferência de humidade em paredes de edifícios - análise do fenómeno de interface.** Tese de Doutoramento. Universidade do Porto, Porto, 1992.

- FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** Santa Maria, 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2001.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado), 1º e 2º volumes. São Paulo, 1994.
- FUSCO, P.B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** 1ª ed., PINI, 2008.
- FRANCKLIN JUNIOR, I. **Estudo tecnológico em rejeitos de quartzitos do sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland.** São Paulo: PINI, 1993.
- HENRIQUES, F. **A acção da humidade em paredes. Formas de manifestação, critérios de quantificação e análise de soluções de reparação.** Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 1992.
- MARANHÃO, F. L.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. & PILEGGI, R. J. **Influência do tipo de cimento nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas hidrofugadas com produtos à base de silicone.** Congresso de Argamassas de Portugal, 2007.
- MARANHAO, F. L., JOHN, V. M., LOH, K., PILEGGI, R. G., DE CLERCQ, H., & CHAROLA, A. E. **The influence of silicone based water repellents as admixtures on the rheological properties of cement slurry.** In: Hydrophobe V, 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials. Aedificatio, Brussels. 2008. p. 258.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Agregados para construção civil.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a31>. Acesso em 15/03/2018.
- NEPOMUCENO, A.A. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto.** In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto,** 2. ed., São Paulo, PINI, 1997.
- PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. **Nanoestrutura e Microestrutura do concreto endurecido.** In: ISAIA, G.C.(Ed). **Concreto: ciência e tecnologia,** São Paulo: IBRACON, 2011.

PEDROSO, F.L. **Concreto: as origens e a evolução do material de construtivo mais usado pelo homem.** Revista Concreto & Construções, São Paulo, ano 37, n. 53, p. 14-19, 2009.

PINTO, A. **Conservação de pedras graníticas.** Estudo da ação de hidrófugos. ITG 22, LNEC, Lisboa, 193p, 1997.

REPETTE, W. L. **Notas de aula. Ciência e Tecnologia de Aditivos para Concreto e Argamassa.** 2003.

SALGADO, J. **Técnicas e Práticas Construtivas para Edificação.** São Paulo: Editora Érica, 2009.

SANTANA, A. **Conservação de pedras carbonatadas. Estudo e selecção de tratamentos.** Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto.** In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 11.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microsilica.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, M.R. **Materiais de Construção.** 2^a ed. rev. São Paulo: Editora Pini, 1991.

SILVA, T.J. **Mecanismos de transporte de massa no concreto.** In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 23.

WENDLER, E.; CHAROLA, A. E. **Water and its interaction with porous inorganic building materials.** In: Proceedings of Hydrophobe V–Fifth International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Brussels. 2008. p. 57-73.

APÊNDICE A – Fotos das amostras dos traços TR 1, TR 2 e TR 3**CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 1 SA)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 1 CA)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 SA)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 CA)**

CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 3 SA)**CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 3 CA)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 AL2)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 B)**

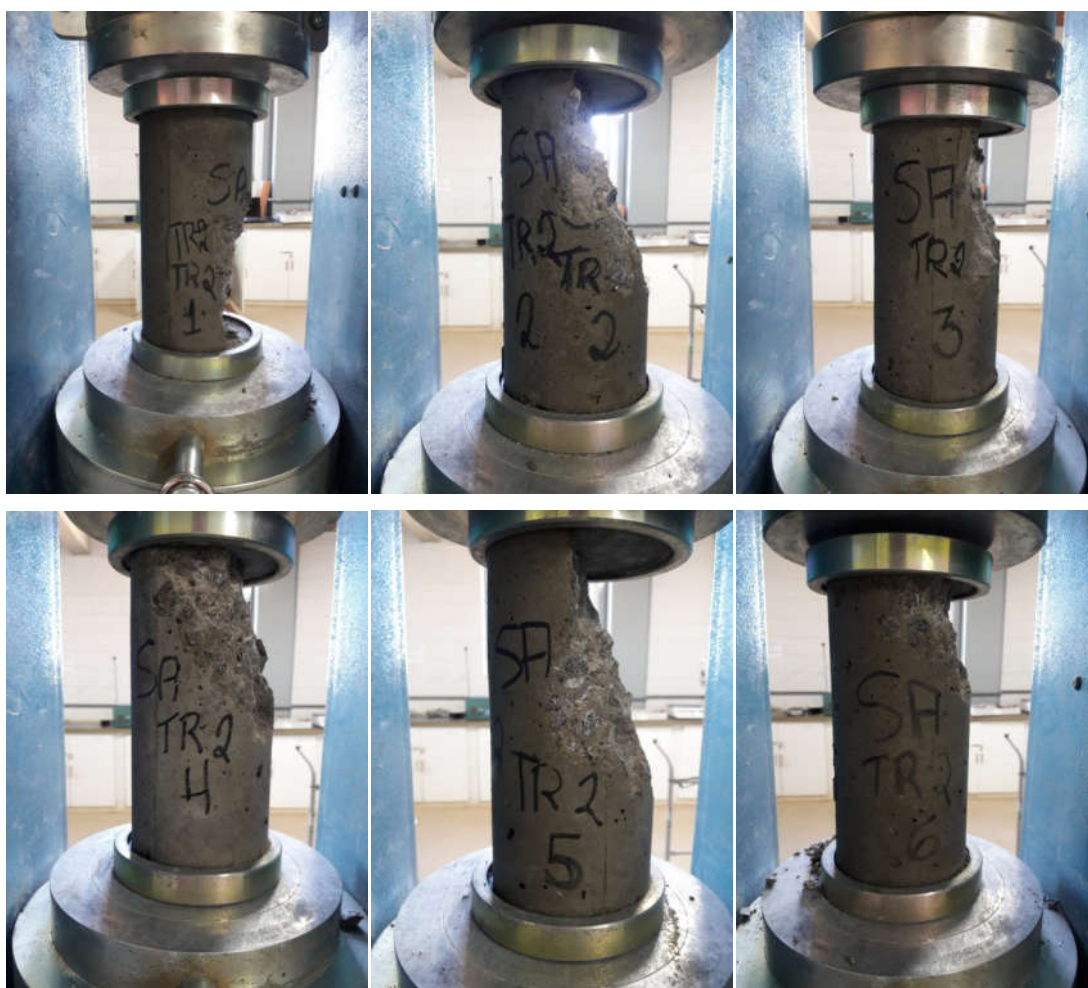
CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 C)**CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 D)****CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO - TRAÇO (TR 2 SAB)**

APÊNDICE B – Corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão axial**TRAÇO (TR 1 SA)****TRAÇO (TR 1 CA)**

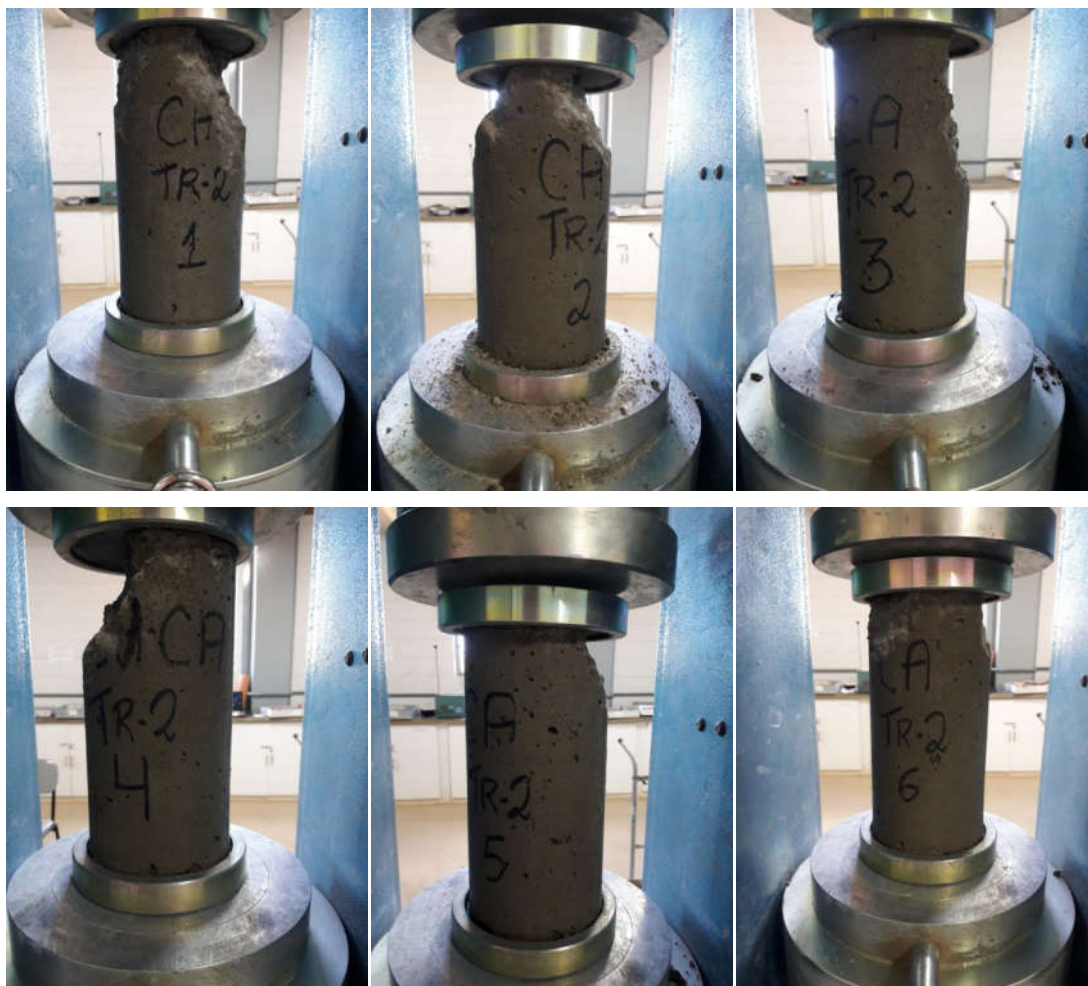
TRAÇO (TR 1 CA)



TRAÇO (TR 2 SA)



TRAÇO (TR 2 CA)



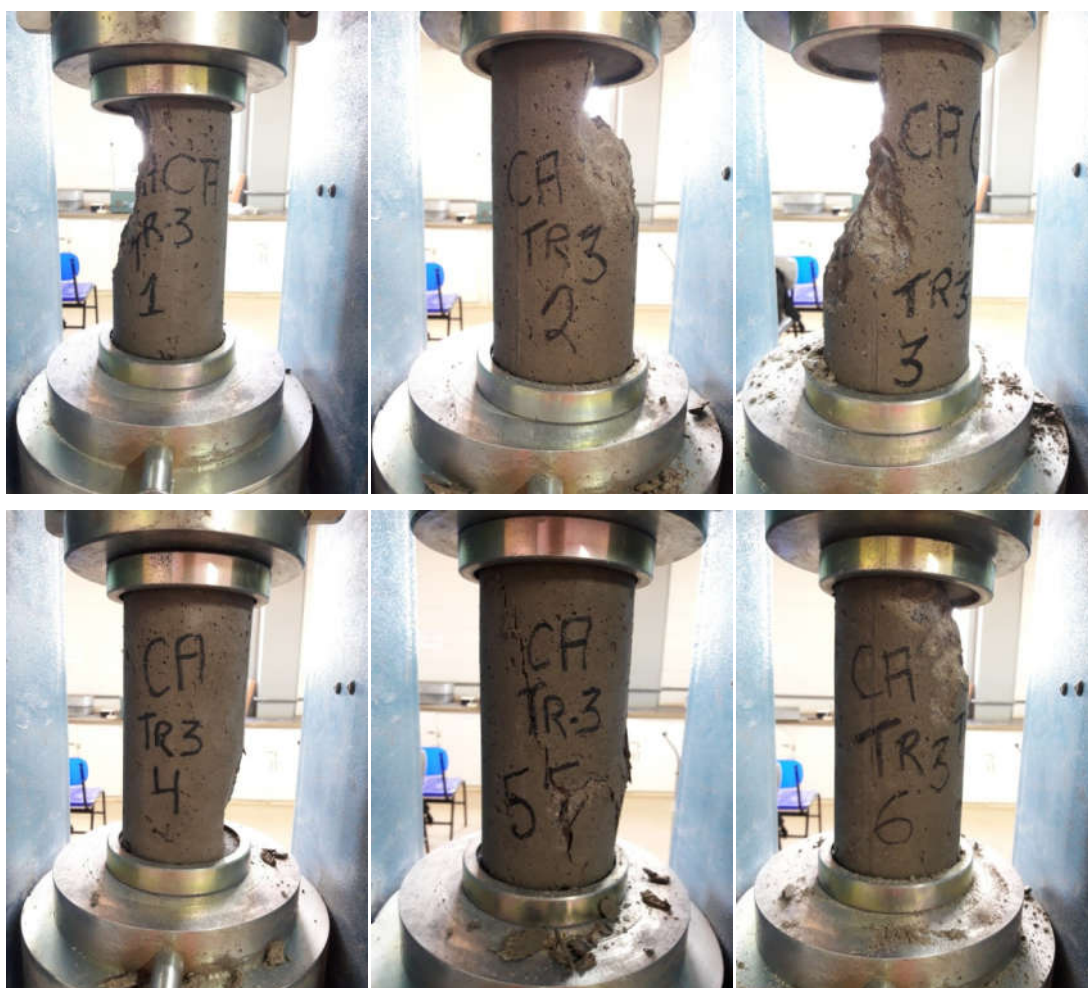
TRAÇO (TR 3 SA)



TRAÇO (TR 3 SA)



TRAÇO (TR 3 CA)



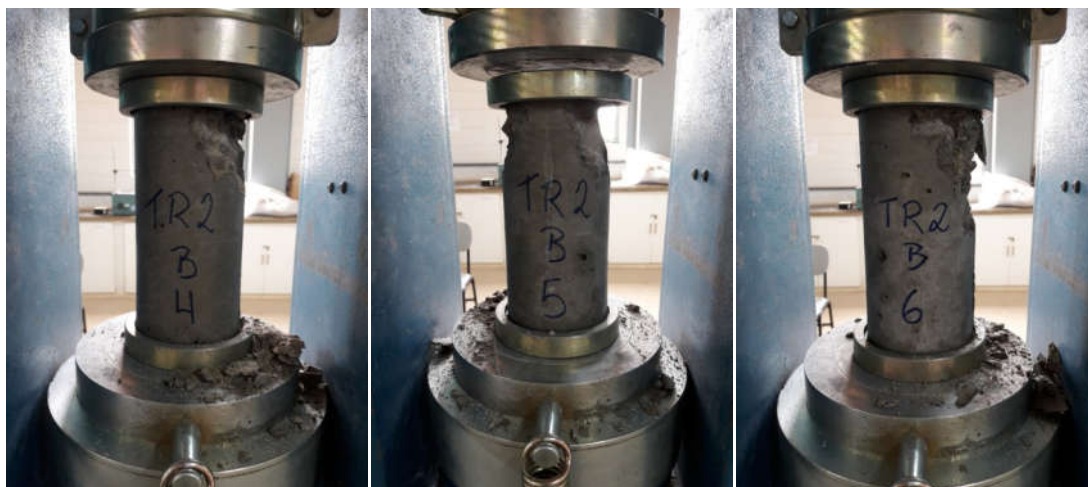
TRAÇO (TR 2 AL2)



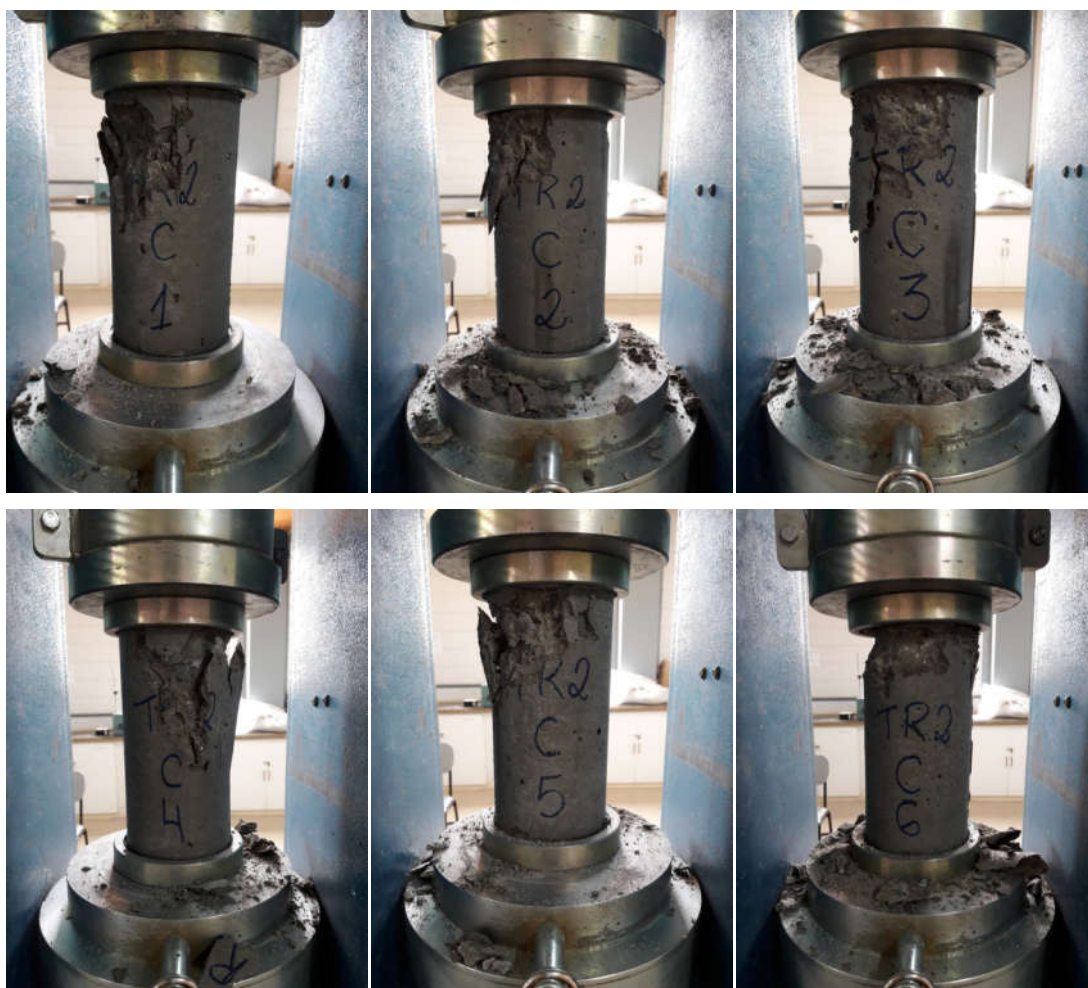
TRAÇO (TR 2 B)

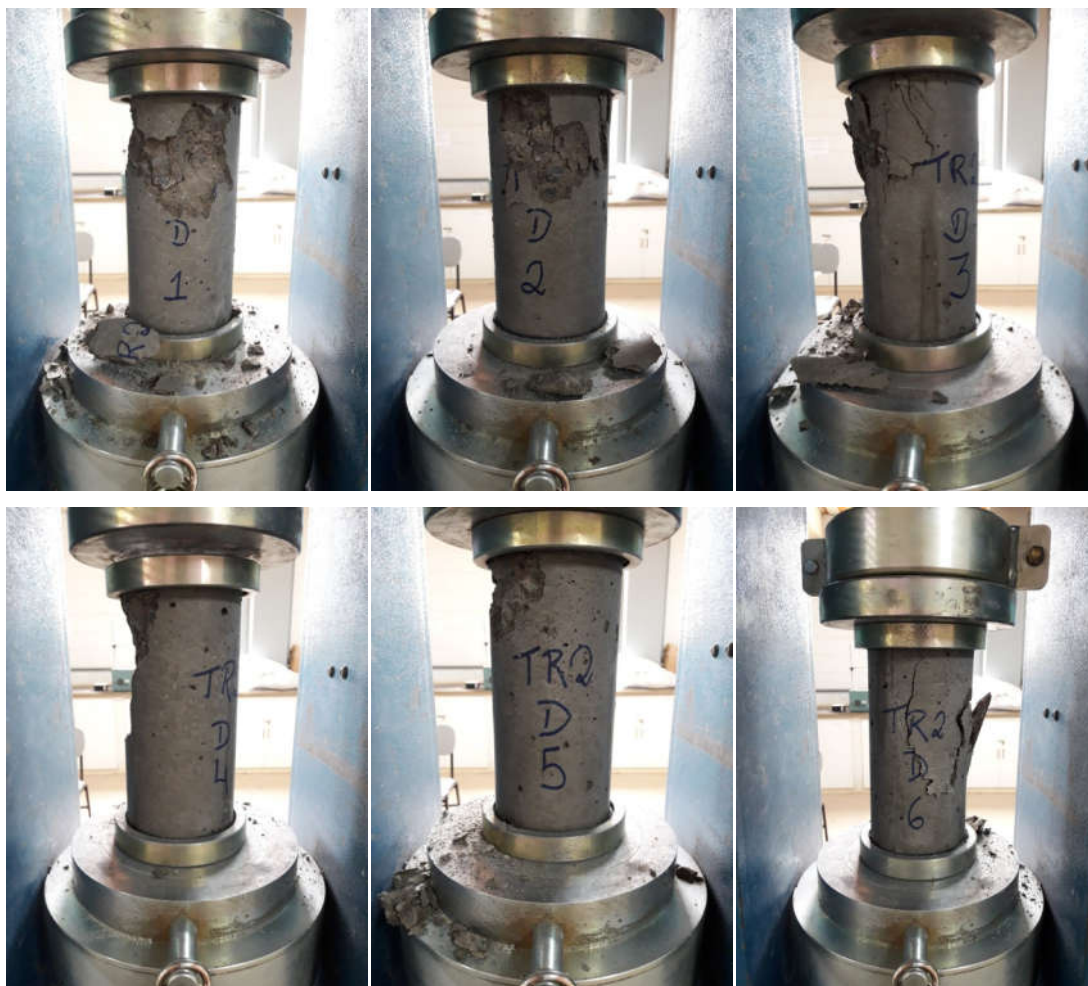


TRAÇO (TR 2 B)



TRAÇO (TR 2 C)

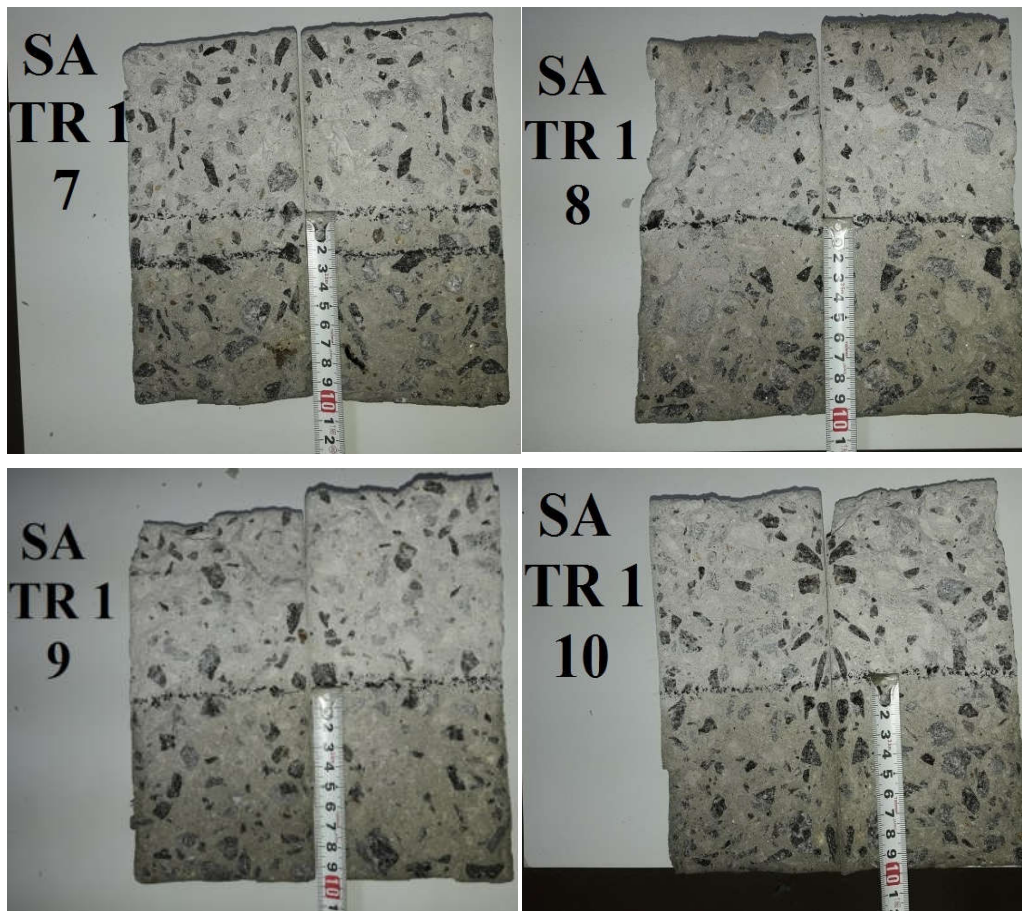


TRAÇO (TR 2 D)**TRAÇO (TR 2 SAB)**

TRAÇO (TR 2 SAB)

APÊNDICE C – Corpos-de-prova do ensaio de resistência à tração por compressão
diametral e altura da ascensão capilar

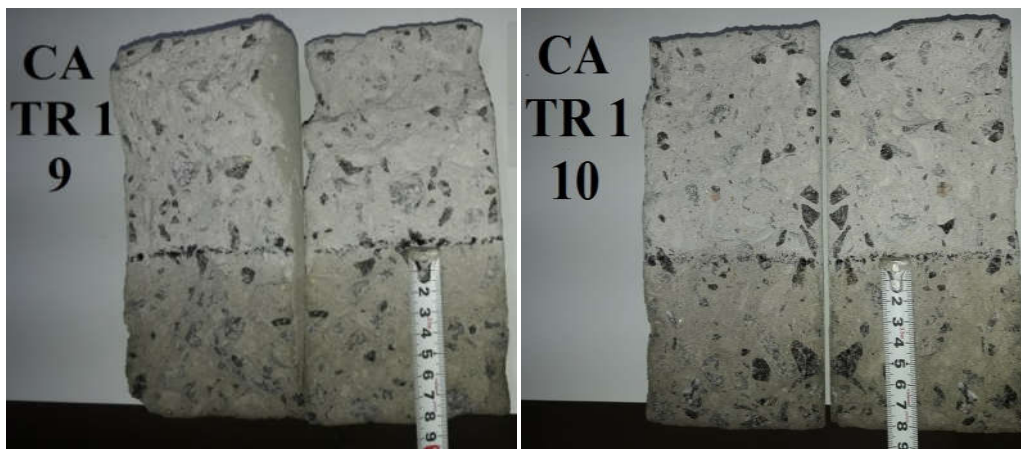
TRAÇO (TR 1 SA)



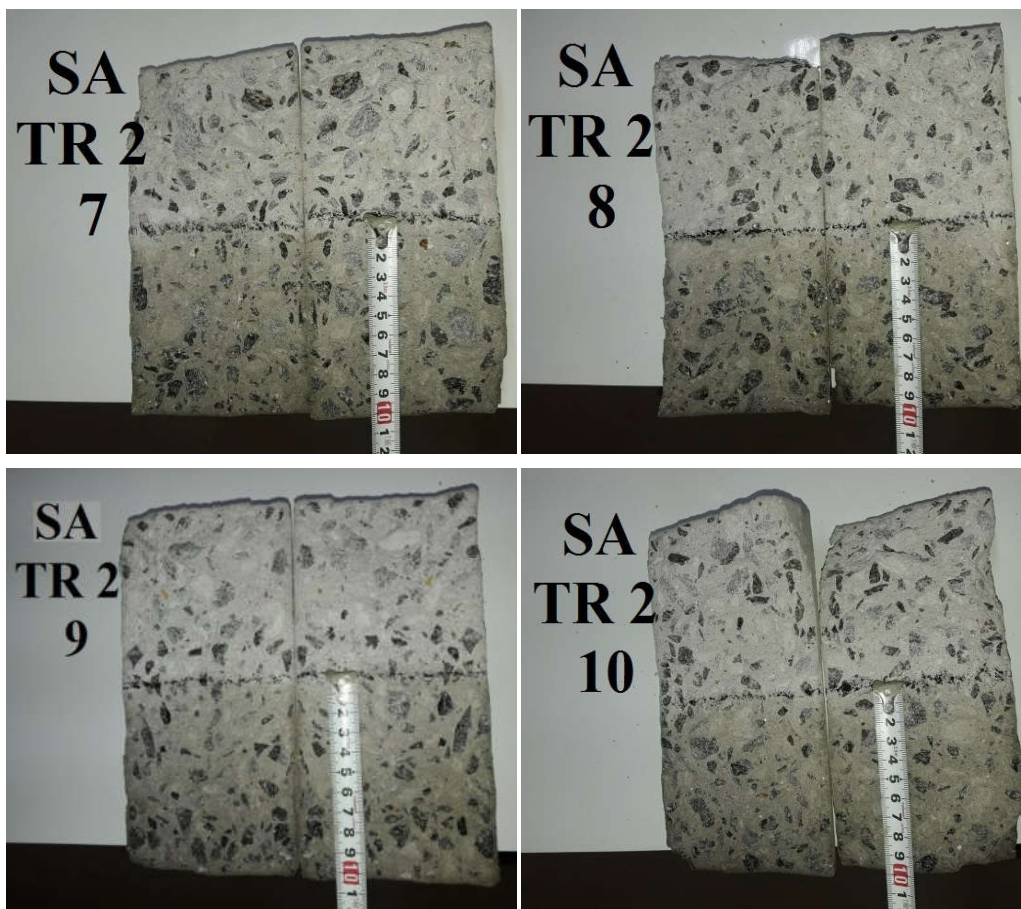
TRAÇO (TR 1 CA)



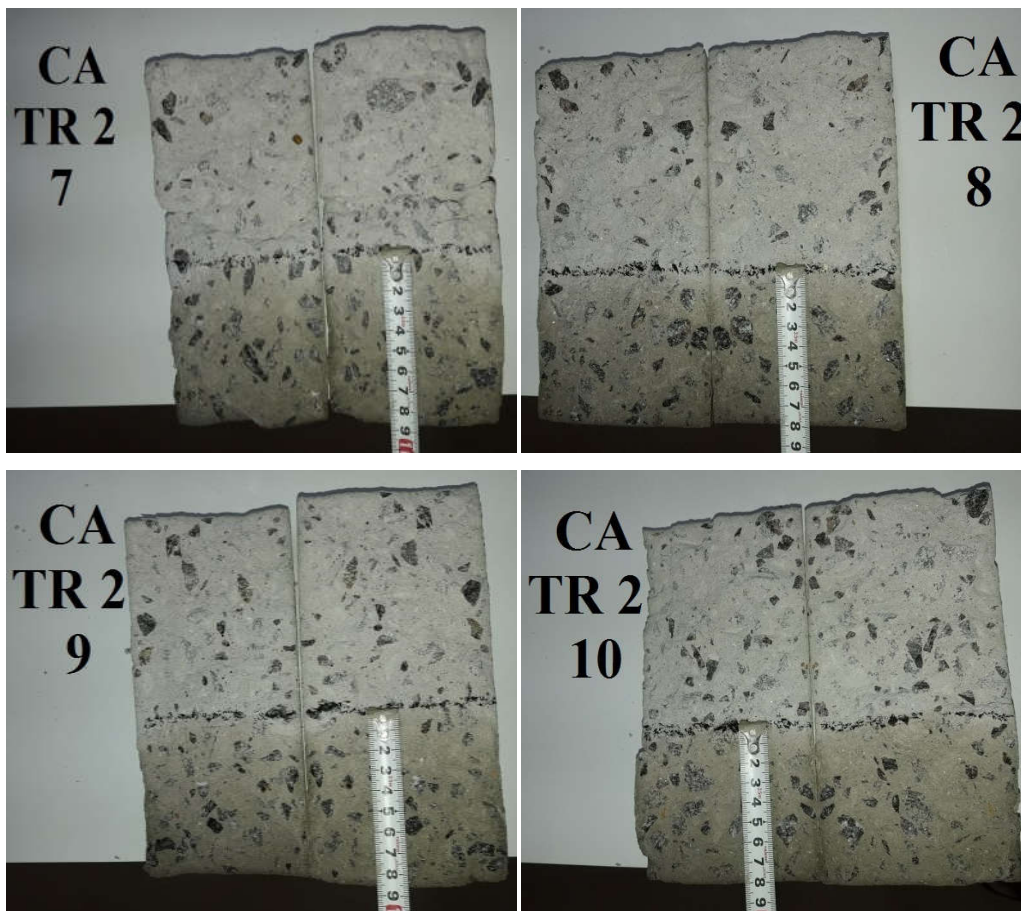
TRAÇO (TR 1 CA)



TRAÇO (TR 2 SA)



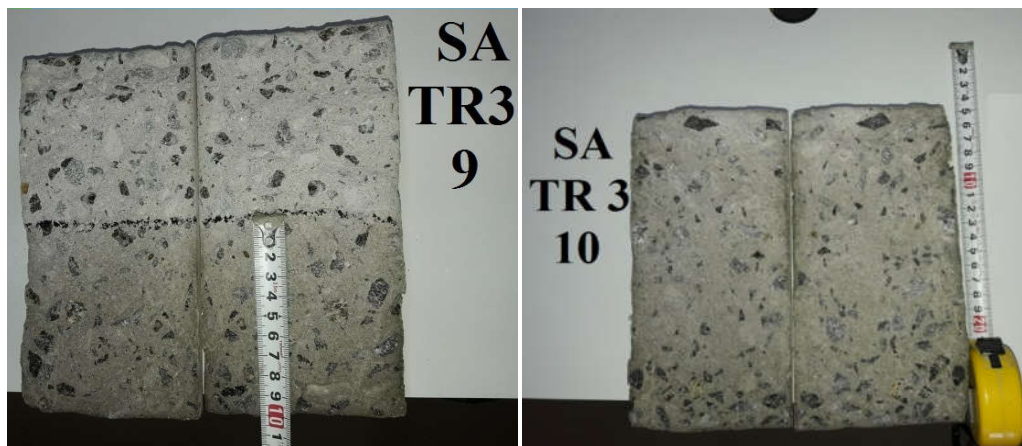
TRAÇO (TR 2 CA)



TRAÇO (TR 3 SA)

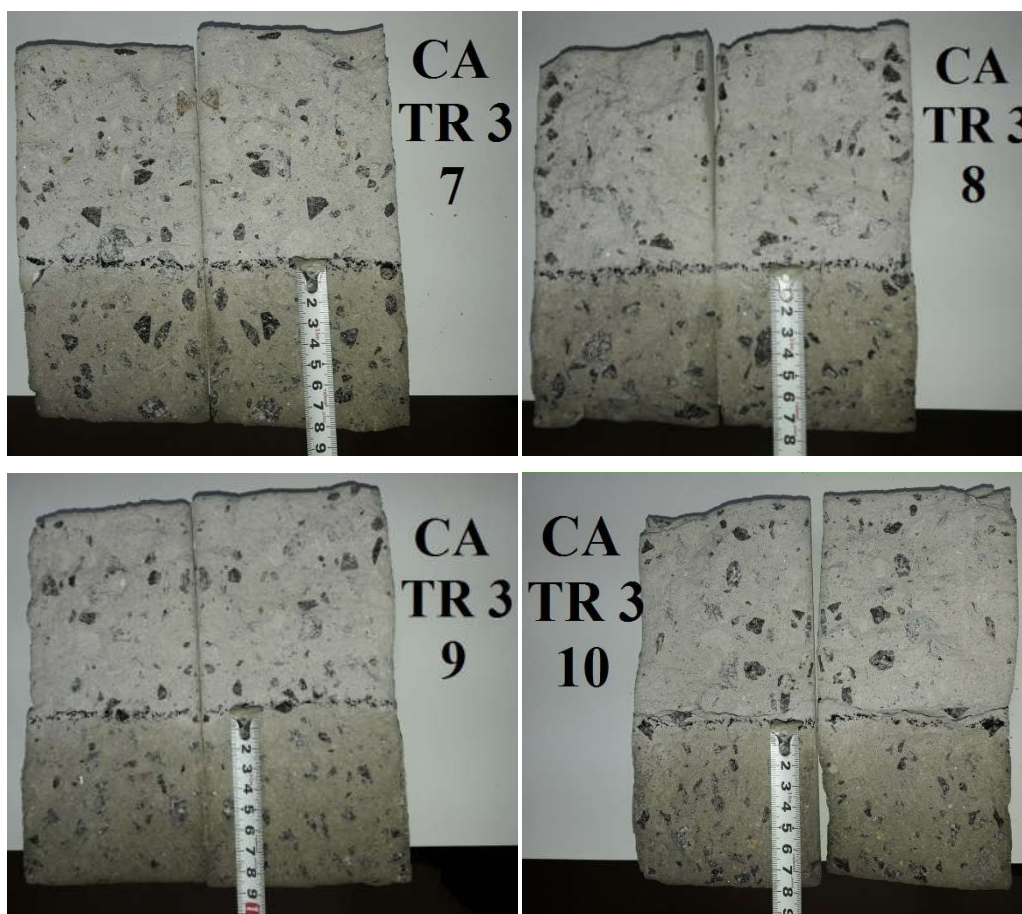


TRAÇO (TR 3 SA)

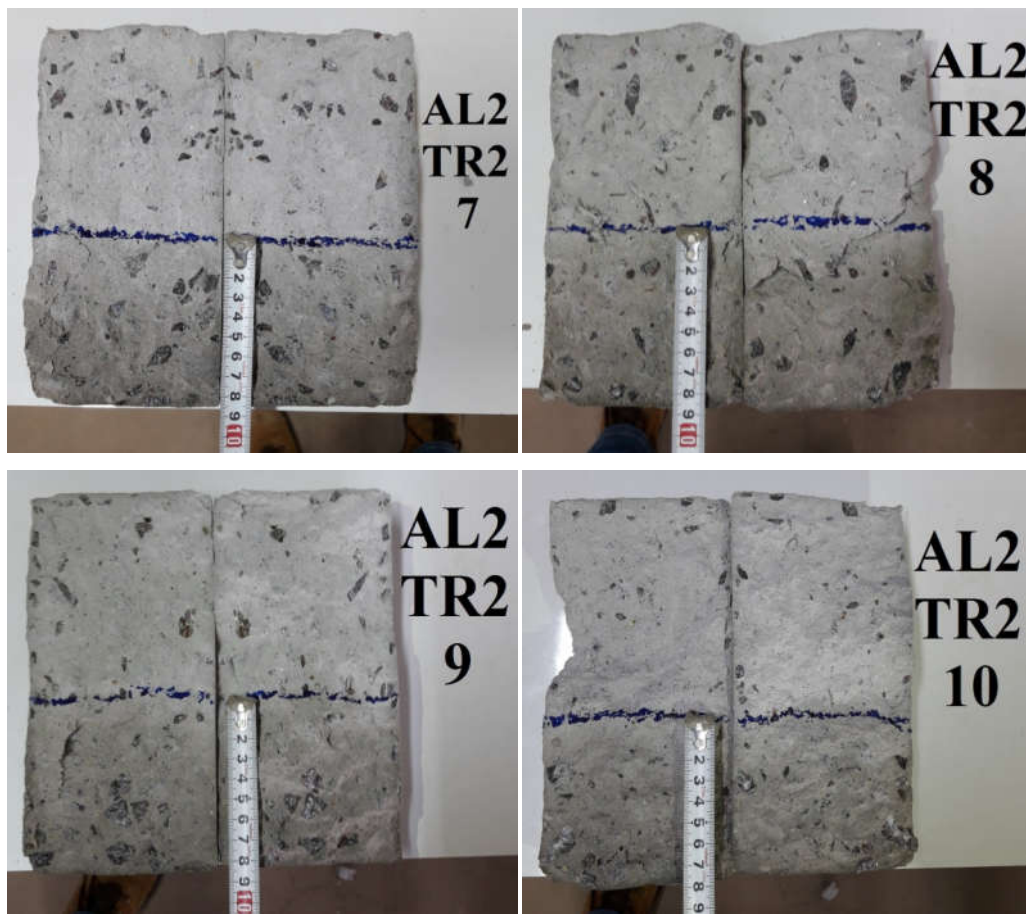


Obs: o corpo-de-prova SA TR 3 10 teve problemas durante o ensaio ficando de fora do cálculo da altura média de ascensão capilar.

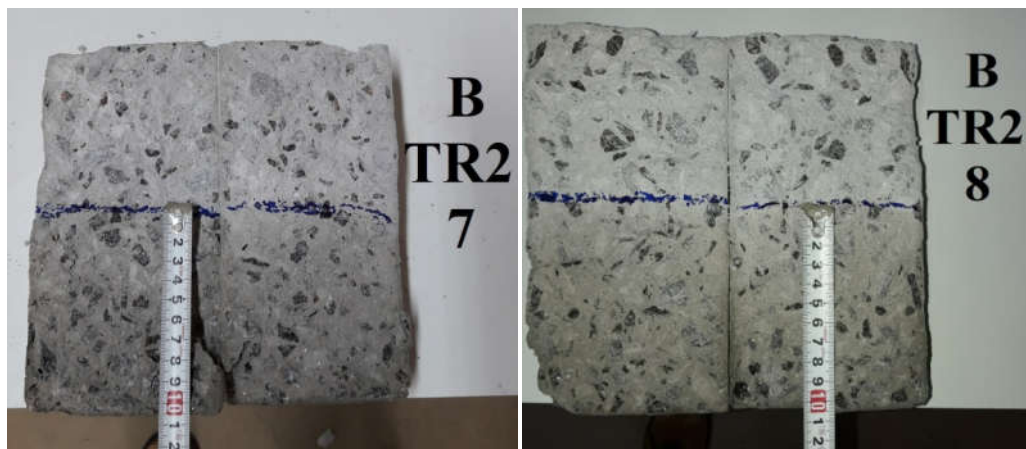
TRAÇO (TR 3 CA)



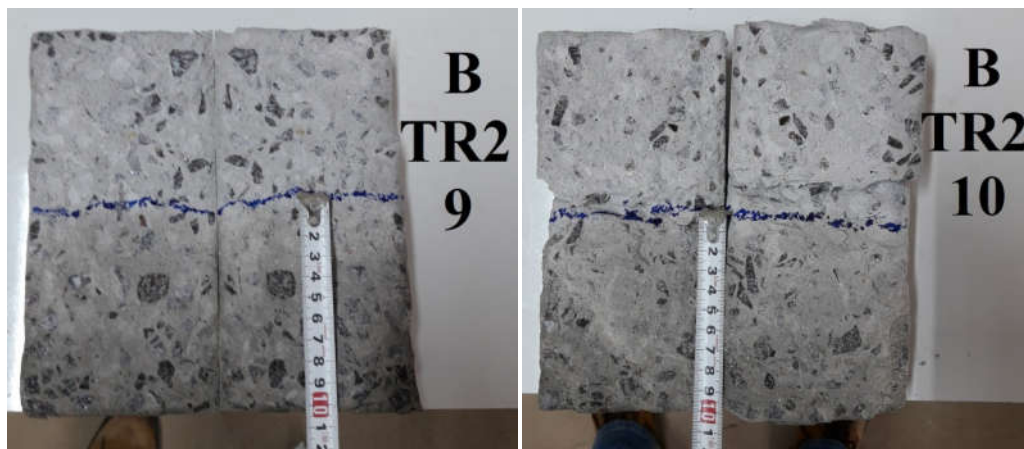
TRAÇO (TR 2 AL2)



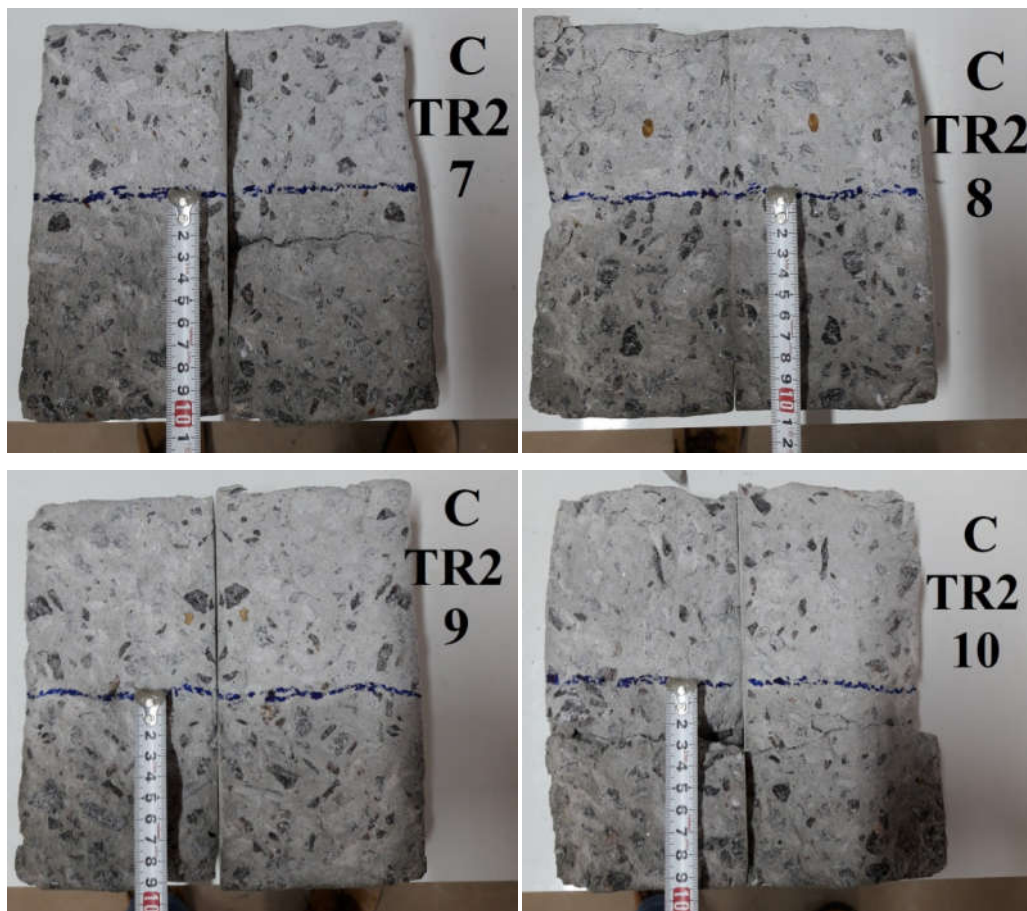
TRAÇO (TR 2 B)



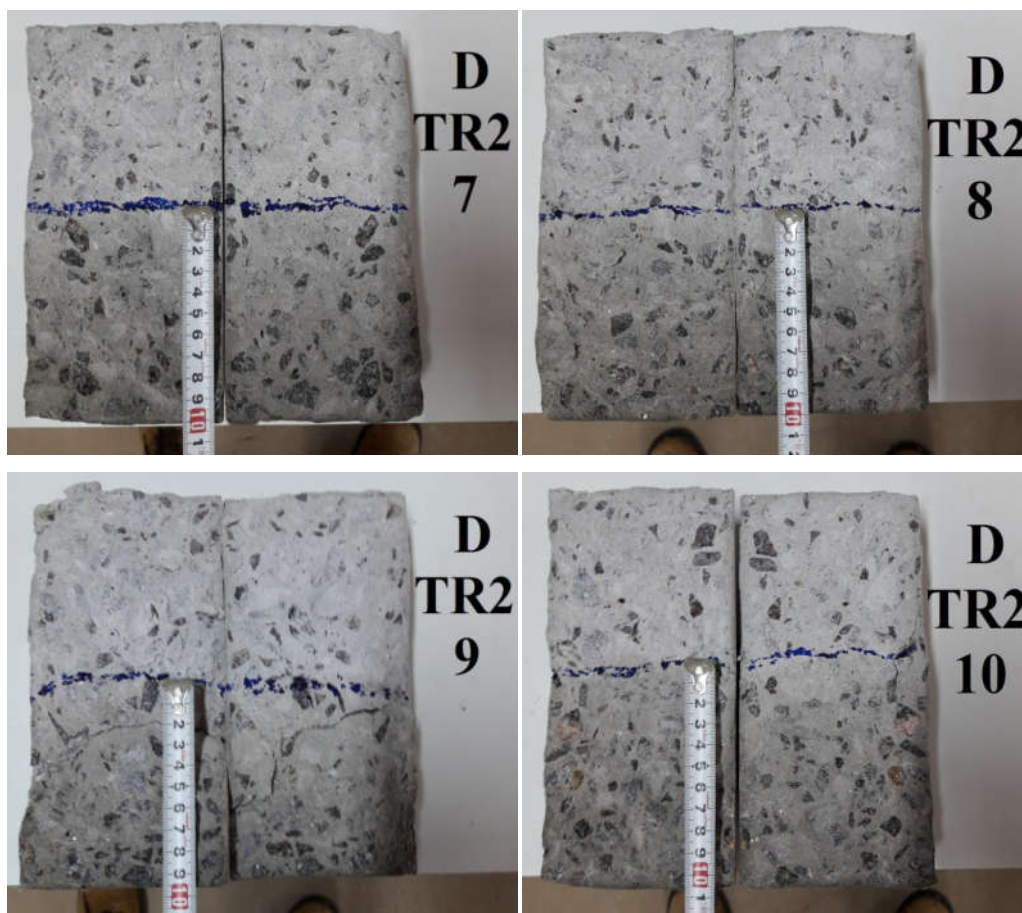
TRAÇO (TR 2 B)



TRAÇO (TR 2 C)



TRAÇO (TR 2 D)



TRAÇO (TR 2 SAB)



TRAÇO (TR 2 SAB)



APÊNDICE D – Quadros e Tabelas auxiliares com dados processados no estudo

Quadro APD-1 – Resumo dos dados referente ao traço (TR 1 SA e CA).

Volume concreto traço inicial (dm ³)	1	2	3	0,5	2,63226	Consumo cimento (kg)	1	2,6323	Xc =	0,6564
	3,07	2,64	2,86	1			Xc	1,7279		
Volume corpo prova (dm ³)	1,5708	Margem perda		10%	1,72788					
Consumo material para 26 corpos de prova						Consumo agregado miúdo (kg)	2	2,6323	Xar =	1,3128
Relação a/c inicial	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (ml)		Xar	1,7279		
0,5	17,07	34,13	25,60	25,60	85,33					
Consumo de água (kg)	Água 1 (l)	Água 2 (l)	Água 3 (l)	Água 4 (l)	Final (l)	Consumo agregado graúdo (kg)	3	2,6323	Xbr =	1,9693
	8,53	2	0,3	0,1	10,93		Xbr	1,7279		
Correção materiais secos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)		Consumo água (l)	0,5	2,6323	Xa =	0,3282
	1,00	2	1,5	1,5			Xa	1,7279		
Total materiais	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	Volume concreto traço final (dm ³)	2,73742			
	18,07	36,13	27,10	27,10	10,93					
Traço final	1,00	2,00	3,00	0,61						
	3,07	2,64	2,86	1,00						
Obs: a quantidade calculada de aditivo é equivalente à metade do peso do cimento										
Relação a/c final	Volume de material produzido na betonada (dm ³)					Taxa argamassa				
0,61	49,46					50,0%				

Fonte: O autor, 2018.

Quadro APD-2 – Resumo dos dados referente ao traço (TR 2 SA e CA).

Volume concreto traço inicial (dm ³)	1	1,8	3,22	0,61	2,73742	Consumo cimento (kg)	1	2,7374	Xc =	0,6312
	3,07	2,64	2,86	1			Xc	1,7279		
Volume corpo prova (dm ³)	1,5708	Margem perda		10%	1,72788					
Consumo material para 26 corpos de prova						Consumo agregado miúdo (kg)	1,8	2,7374	Xar =	1,1362
Relação a/c inicial	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (ml)		Xar	1,7279		
0,61	16,41	29,54	26,39	26,39	82,06					
Consumo de água (kg)	Água 01 (l)	Água 2 (l)	Água 3 (l)	Água 4 (l)	Final (l)	Consumo agregado graúdo (kg)	3,2167	2,7374	Xbr =	2,0304
	9,93	x	x	x	9,93		Xbr	1,7279		
Correção materiais secos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)		Consumo água (l)	0,6052	2,7374	Xa =	0,3820
	x	x	x	x			Xa	1,7279		
Total materiais	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	Volume concreto traço final (dm ³)	2,73742			
	16,41	29,54	26,39	26,39	9,93					
Traço final	1,00	1,80	3,22	0,61						
	3,07	2,64	2,86	1,00						
Obs: a quantidade calculada de aditivo é equivalente à metade do peso do cimento										
Relação a/c final	Volume de material produzido na betonada (dm ³)					Taxa argamassa				
0,61	44,92					46,5%				

Fonte: O autor, 2018.

Quadro APD-3 – Resumo dos dados referente ao traço (TR 3 SA e CA).

Volume concreto traço inicial (dm ³)	1	2,2	2,78	0,61	2,73742	Consumo cimento (kg)	1	2,7374	Xc =	0,6312
	3,07	2,64	2,86	1			Xc	1,7279		
Volume corpo prova (dm ³)	1,5708	Margem perda		10%	1,72788					
Consumo material para 26 corpos de prova						Consumo agregado miúdo (kg)	2,2	2,7374	Xar =	1,3887
Relação a/c inicial	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (ml)		Xar	1,7279		
0,61	16,41	36,10	22,84	22,84	82,06					
Consumo de água (kg)	Água 1 (l)	Água 2 (l)	Água 3 (l)	Água 4 (l)	Final (l)	Consumo agregado graúdo (kg)	2,78	2,7374	Xbr =	1,7569
	9,93	x	x	x	9,93		Xbr	1,7279		
Correção materiais secos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)		Consumo água (l)	0,61	2,7374	Xa =	0,382
	x	x	x	x			Xa	1,7279		
Total materiais	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)					
	16,41	36,10	22,84	22,84	9,93					
Traço final	1,00	2,20	2,78	0,61	Volume concreto traço final (dm ³)		2,73742382			
	3,07	2,64	2,86	1,00						
Obs: a quantidade calculada de aditivo é equivalente à metade do peso do cimento										
Relação a/c final	Volume de material produzido na betonada (dm ³)					Taxa argamassa				
0,61	44,92					53,5%				

Fonte: O autor, 2018.

Quadro APD-4 – Resumo dos dados referente ao traço (TR 2 AL2, B, C e D).

Volume concreto traço inicial (dm ³)	1	1,8	3,22	0,61	2,73742	Consumo cimento (kg)	1	2,7374	Xc =	0,6312
	3,07	2,64	2,86	1			Xc	1,7279		
Volume corpo prova (dm ³)	1,5708	Margem perda		10%	1,72788					
Consumo material para 26 corpos de prova						Consumo agregado miúdo (kg)	1,8	2,7374	Xar =	1,1362
Relação a/c inicial	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (ml)		Xar	1,7279		
0,61	8,21	14,77	13,20	13,20	82,06					
Consumo de água (kg)	Água 1 (l)	Água 2 (l)	Água 3 (l)	Água 4 (l)	Final (l)	Consumo agregado graúdo (kg)	3,22	2,7374	Xbr =	2,0304
	4,97	x	x	x	4,88		Xbr	1,7279		
Correção materiais secos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)		Consumo água (l)	0,61	2,7374	Xa =	0,382
	x	x	x	x			Xa	1,7279		
Total materiais	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)					
	8,21	14,77	13,20	13,20	4,88					
Traço final	1,00	1,80	3,22	0,61	Volume concreto traço final (dm ³)		2,73742382			
	3,07	2,64	2,86	1,00						
Obs: a quantidade calculada de aditivo é equivalente à metade do peso do cimento										
Relação a/c final	Volume de material produzido na betonada (dm ³)					Taxa argamassa				
0,61	22,38					46,5%				

Fonte: O autor, 2018.

Quadro APD-5 – Resumo dos dados referente ao traço (TR 2 SAB).

Volume concreto traço inicial (dm ³)	1	1,8	3,22	0,61	2,73742	Consumo cimento (kg)	1	2,7374	Xc =	0,6312
	3,07	2,64	2,86	1			Xc	1,7279		
Volume corpo prova (dm ³)	1,5708	Margem perda		10%	1,72788					
Consumo material para 26 corpos de prova						Consumo agregado miúdo (kg)	1,8	2,7374	Xar =	1,1362
Relação a/c inicial	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (ml)		Xar	1,7279		
0,61	8,21	14,77	13,20	13,20	-					
Consumo de água (kg)	Água 1 (l)	Água 2 (l)	Água 3 (l)	Água 4 (l)	Final (l)	Consumo agregado graúdo (kg)	3,22	2,7374	Xbr =	2,0304
	4,97	x	x	x	4,97		Xbr	1,7279		
Correção materiais secos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)						
	x	x	x	x			0,61	2,7374	Xa =	0,382
Total materiais	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	Consumo água (l)	Xa	1,7279		
	8,21	14,77	13,20	13,20	4,97					
Traço final	1,00	1,80	3,22	0,61	Volume concreto traço final (dm ³)		2,73742382			
	3,07	2,64	2,86	1,00						
Obs: a quantidade calculada de aditivo é equivalente à metade do peso do cimento										
Relação a/c final	Volume de material produzido na betonada (dm ³)					Taxa argamassa				
0,61	22,46					46,5%				

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-1 – Dados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpo-de-prova	Φ Topo (mm)	Φ Base (mm)	Φ Médio (mm)	Tonelada-força (tf)	newtons (N)
TR 1	SA	1	100,34	100,50	100,42	26,04	255452,40
		2	100,03	100,20	100,12	26,88	263692,80
		3	100,56	100,80	100,68	28,19	276543,90
		4	100,52	100,74	100,63	28,30	277623,00
		5	100,06	100,27	100,17	26,29	257904,90
		6	100,76	100,98	100,87	28,72	281743,20
	CA	1	100,23	100,01	100,12	17,63	172950,30
		2	100,72	100,80	100,76	18,48	181288,80
		3	99,97	100,08	100,03	17,49	171576,90
		4	100,16	100,33	100,25	18,80	184428,00
		5	100,21	100,34	100,28	16,80	164808,00
		6	100,12	100,38	100,25	19,36	189921,60
TR 2	SA	1	100,69	100,61	100,65	28,73	281841,30
		2	100,43	100,57	100,50	31,56	309603,60
		3	100,44	100,89	100,67	29,97	294005,70
		4	100,39	100,57	100,48	27,66	271344,60
		5	99,94	100,10	100,02	30,79	302049,90
		6	100,58	100,55	100,57	30,72	301363,20
	CA	1	100,32	100,37	100,35	18,15	178051,50
		2	100,27	100,45	100,36	18,15	178051,50
		3	100,03	100,16	100,10	18,58	182269,80
		4	100,29	100,23	100,26	18,46	181092,60
		5	100,15	100,20	100,18	18,26	179130,60
		6	99,91	100,16	100,04	17,03	167064,30
TR 3	SA	1	100,25	100,42	100,34	28,16	276249,60
		2	100,47	100,31	100,39	27,70	271737,00
		3	100,49	100,59	100,54	28,49	279486,90
		4	100,11	100,28	100,20	28,92	283705,20
		5	100,19	100,06	100,13	28,44	278996,40
		6	100,35	100,29	100,32	29,19	286353,90
	CA	1	100,17	100,31	100,24	19,77	193943,70
		2	100,06	100,20	100,13	19,46	190902,60
		3	100,34	100,42	100,38	19,45	190804,50
		4	100,01	100,15	100,08	19,61	192374,10
		5	100,07	100,01	100,04	20,79	203949,90
		6	99,94	100,09	100,02	19,80	194238,00

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-2 – Dados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpo-de-prova	Φ Topo (mm)	Φ Base (mm)	Φ Médio (mm)	Tonelada-força (tf)	newtons (N)
TR 2	AL2	1	100,34	100,70	100,52	15,99	156861,90
		2	100,55	100,69	100,62	15,55	152545,50
		3	100,15	100,33	100,24	16,29	159804,90
		4	100,36	100,44	100,40	15,98	156763,80
		5	99,84	100,06	99,95	16,65	163336,50
		6	100,44	100,92	100,68	16,43	161178,30
TR 2	B	1	100,32	100,48	100,40	21,58	211699,80
		2	99,56	99,78	99,67	22,31	218861,10
		3	99,68	99,72	99,70	23,01	225728,10
		4	100,39	100,47	100,43	23,54	230927,40
		5	100,04	100,24	100,14	22,25	218272,50
		6	100,21	100,41	100,31	22,87	224354,70
TR 2	C	1	100,23	100,69	100,46	22,12	216997,20
		2	99,58	100,06	99,82	21,86	214446,60
		3	100,55	100,81	100,68	21,27	208658,70
		4	99,92	100,12	100,02	23,32	228769,20
		5	99,86	99,94	99,90	21,12	207187,20
		6	99,96	100,22	100,09	20,47	200810,70
TR 2	D	1	99,79	100,13	99,96	22,20	217782,00
		2	100,01	100,17	100,09	23,85	233968,50
		3	100,48	100,58	100,53	24,18	237205,80
		4	100,39	100,45	100,42	22,79	223569,90
		5	100,12	100,50	100,31	23,88	234262,80
		6	100,23	100,51	100,37	22,24	218174,40
TR 2	SAB	1	99,84	100,02	99,93	25,42	249370,20
		2	100,13	100,27	100,20	24,85	243778,50
		3	100,04	100,28	100,16	25,66	251724,60
		4	100,63	100,75	100,69	26,01	255158,10
		5	100,29	100,71	100,50	24,73	242601,30
		6	100,02	100,08	100,05	24,69	242208,90

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-3 – Dados dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos concretos da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Massa seca (g)	Massa saturada 3h (g)	Massa saturada 6h (g)	Massa saturada 24h (g)	Massa saturada 48h (g)
TR 1	SA	7	3504,00	3532,71	3544,71	3576,71	3606,71
		8	3432,00	3464,00	3476,00	3510,00	3560,00
		9	3443,00	3478,12	3490,12	3530,12	3560,12
		10	3511,00	3546,04	3556,04	3592,04	3620,04
	CA	7	3282,00	3312,72	3320,72	3350,72	3378,72
		8	3283,00	3309,50	3319,50	3347,50	3375,50
		9	3312,00	3343,50	3353,50	3383,50	3405,50
		10	3284,00	3305,39	3315,39	3347,39	3371,39
TR 2	SA	7	3472,00	3503,99	3515,99	3555,99	3581,99
		8	3512,00	3544,05	3556,05	3592,05	3616,05
		9	3536,00	3569,90	3583,90	3619,90	3643,90
		10	3504,00	3534,04	3546,04	3582,04	3606,04
	CA	7	3282,00	3311,34	3321,34	3351,34	3371,34
		8	3284,00	3309,43	3319,43	3347,43	3367,43
		9	3282,00	3307,24	3319,24	3347,24	3367,24
		10	3256,00	3283,37	3291,37	3321,37	3343,37
TR 3	SA	7	3452,00	3487,31	3499,31	3535,31	3557,31
		8	3446,00	3483,32	3499,32	3537,32	3557,32
		9	3436,00	3477,30	3491,30	3529,30	3553,30
		10	3488,00	3521,33	3535,33	3573,33	3670,33*
	CA	7	3212,00	3243,98	3253,98	3283,98	3303,98
		8	3228,00	3257,98	3267,98	3297,98	3315,98
		9	3218,00	3252,00	3266,00	3298,00	3318,00
		10	3258,00	3286,01	3298,01	3326,01	3348,01

*Não considerado na média do grupo por problema no ensaio.

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-4 – Dados dos ensaios de absorção de água por capilaridade dos concretos da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Massa seca (g)	Massa saturada 3h (g)	Massa saturada 6h (g)	Massa saturada 24h (g)	Massa saturada 48h (g)
TR 2	AL2	7	3266	3286,04	3292,04	3324,04	3336,04
		8	3260	3280,00	3288,00	3320,00	3336,00
		9	3296	3319,35	3327,35	3357,35	3373,35
		10	3246	3267,47	3275,47	3303,47	3319,47
TR 2	B	7	3458	3487,40	3495,40	3537,40	3559,40
		8	3438	3467,45	3477,45	3517,45	3541,45
		9	3424	3452,10	3460,10	3498,10	3518,10
		10	3434	3460,00	3470,00	3506,00	3526,00
TR 2	C	7	3400	3431,39	3441,39	3485,39	3507,39
		8	3402	3429,24	3439,24	3479,24	3503,24
		9	3404	3431,88	3439,88	3471,88	3489,88
		10	3398	3423,43	3431,43	3471,43	3491,43
TR 2	D	7	3440	3467,97	3475,97	3517,97	3535,97
		8	3450	3475,95	3485,95	3527,95	3545,95
		9	3454	3477,29	3483,29	3521,29	3543,29
		10	3444	3470,06	3480,06	3522,06	3546,06
TR 2	SAB	7	3512	3541,32	3551,32	3593,32	3619,32
		8	3482	3517,99	3527,99	3567,99	3595,99
		9	3504	3537,95	3545,95	3579,95	3601,95
		10	3482	3515,45	3527,45	3569,45	3593,45

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-5 – Dados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpo-de-prova	Φ Topo (mm)	Φ Base (mm)	Φ Médio (mm)	ℓ (mm)	Tonelada-força (tf)	newtons (N)
TR 1	SA	7	100,48	100,61	100,55	201,10	7,41	72692,10
		8	100,32	100,62	100,47	200,79	9,01	88388,10
		9	100,27	100,43	100,35	200,07	8,04	78872,40
		10	100,09	100,29	100,19	201,41	7,67	75242,70
	CA	7	100,47	100,46	100,47	200,75	6,85	67198,50
		8	100,24	100,46	100,35	200,62	6,17	60527,70
		9	100,29	100,38	100,34	202,35	5,44	53366,40
		10	100,63	100,81	100,72	201,36	6,66	65334,60
TR 2	SA	7	100,03	100,22	100,13	200,45	7,35	72103,50
		8	100,13	100,06	100,10	200,51	8,20	80442,00
		9	100,45	100,71	100,58	200,60	7,95	77989,50
		10	100,19	100,33	100,26	200,12	8,69	85248,90
	CA	7	100,26	100,28	100,27	200,91	5,47	53660,70
		8	100,01	100,07	100,04	201,54	5,59	54837,90
		9	100,15	100,12	100,14	200,98	6,03	59154,30
		10	100,11	100,35	100,23	201,17	5,68	55720,80
TR 3	SA	7	100,43	100,68	100,56	200,65	8,43	82698,30
		8	100,10	100,30	100,20	200,13	7,53	73869,30
		9	100,07	100,21	100,14	200,21	8,49	83286,90
		10	100,18	100,02	100,10	200,41	7,15	70141,50
	CA	7	100,14	100,35	100,25	200,62	5,39	52875,90
		8	100,06	100,29	100,18	200,99	6,08	59644,80
		9	100,40	100,63	100,52	201,29	6,68	65530,80
		10	100,32	100,53	100,43	200,91	5,44	53366,40

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-6 – Dados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpo-de-prova	Φ Topo (mm)	Φ Base (mm)	Φ Médio (mm)	ℓ (mm)	Tonelada-força (tf)	newtons (N)
TR 2	AL2	7	99,80	100,48	100,14	199,75	4,76	46695,60
		8	100,26	100,40	100,33	200,69	4,76	46695,60
		9	100,19	100,63	100,41	200,72	5,09	49932,90
		10	100,54	100,88	100,71	199,32	4,18	41005,80
TR 2	B	7	100,11	100,19	100,15	200,59	6,54	64157,40
		8	99,93	100,09	100,01	200,31	6,09	59742,90
		9	100,03	100,21	100,12	200,14	5,94	58271,40
		10	99,99	100,17	100,08	200,78	6,62	64942,20
TR 2	C	7	100,42	100,50	100,46	200,17	6,52	63961,20
		8	99,71	100,13	99,92	199,58	6,57	64451,70
		9	99,83	100,25	100,04	200,06	6,19	60723,90
		10	100,28	100,50	100,39	199,81	5,74	56309,40
TR 2	D	7	99,96	100,26	100,11	200,47	6,81	66806,10
		8	100,32	100,44	100,38	200,56	6,58	64549,80
		9	100,20	100,30	100,25	200,01	6,31	61901,10
		10	100,09	100,35	100,22	200,08	6,74	66119,40
TR 2	SAB	7	100,04	100,08	100,06	199,85	8,12	79657,20
		8	99,98	100,20	100,09	200,00	7,25	71122,50
		9	100,07	100,37	100,22	200,19	7,88	77302,80
		10	99,82	100,18	100,00	200,06	8,54	83777,40

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-7 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
TR 1	SA	1	32,254	33,897
		2	33,497	
		3	34,737	
		4	34,907	
		5	32,729	
		6	35,257	
	CA	1	21,968	22,473
		2	22,736	
		3	21,835	
		4	23,367	
		5	20,869	
		6	24,061	
TR 2	SA	1	35,423	36,999
		2	39,029	
		3	36,941	
		4	34,219	
		5	38,443	
		6	37,941	
	CA	1	22,515	22,518
		2	22,508	
		3	23,163	
		4	22,938	
		5	22,728	
		6	21,256	
TR 3	SA	1	34,939	35,353
		2	34,330	
		3	35,204	
		4	35,982	
		5	35,434	
		6	36,227	
	CA	1	24,576	24,676
		2	24,243	
		3	24,110	
		4	24,455	
		5	25,947	
		6	24,724	

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-8 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
TR 2	AL2	1	19,766	20,011
		2	19,184	
		3	20,250	
		4	19,801	
		5	20,817	
		6	20,246	
TR 2	B	1	26,740	28,160
		2	28,051	
		3	28,914	
		4	29,151	
		5	27,714	
		6	28,389	
TR 2	C	1	27,376	27,010
		2	27,403	
		3	26,210	
		4	29,116	
		5	26,433	
		6	25,522	
TR 2	D	1	27,751	28,803
		2	29,736	
		3	29,884	
		4	28,228	
		5	29,643	
		6	27,574	
TR 2	SAB	1	31,795	31,349
		2	30,915	
		3	31,948	
		4	32,044	
		5	30,582	
		6	30,808	

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-9 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade e altura da ascensão capilar da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Φ médio (cm)	Área seção transversal (cm ²)	Absorção 3h (g/cm ²)	Absorção 6h (g/cm ²)	Absorção 24h (g/cm ²)	Absorção 48h (g/cm ²)	Absorção média (g/cm ²)	Altura ascensão capilar (cm)	Média ascensão capilar (cm)
TR 1	SA	7	10,05	79,40	0,3616	0,5127	0,9158	1,2936	1,44	9,80	9,78
		8	10,05	79,28	0,4036	0,5550	0,9839	1,6145		9,90	
		9	10,04	79,09	0,4440	0,5958	1,1015	1,4808		9,60	
		10	10,02	78,84	0,4445	0,5713	1,0279	1,3831		9,80	
	CA	7	10,05	79,27	0,3875	0,4884	0,8669	1,2201	1,17	8,40	8,35
		8	10,04	79,09	0,3351	0,4615	0,8155	1,1695		8,40	
		9	10,03	79,07	0,3984	0,5249	0,9043	1,1825		8,30	
		10	10,07	79,67	0,2685	0,3940	0,7956	1,0968		8,30	
TR 2	SA	7	10,01	78,74	0,4063	0,5587	1,0667	1,3969	1,34	10,40	10,10
		8	10,01	78,69	0,4073	0,5598	1,0173	1,3223		9,70	
		9	10,06	79,45	0,4267	0,6029	1,0560	1,3580		10,30	
		10	10,03	78,95	0,3805	0,5325	0,9885	1,2925		10,00	
	CA	7	10,03	78,96	0,3716	0,4982	0,8781	1,1314	1,10	8,60	8,40
		8	10,00	78,60	0,3235	0,4507	0,8070	1,0614		8,00	
		9	10,01	78,75	0,3205	0,4729	0,8284	1,0824		8,70	
		10	10,02	78,90	0,3469	0,4483	0,8285	1,1073		8,30	
TR 3	SA	7	10,06	79,41	0,4446	0,5957	1,0491	1,3261	1,41	9,50	9,70
		8	10,02	78,85	0,4733	0,6762	1,1581	1,4117		9,40	
		9	10,01	78,76	0,5244	0,7021	1,1846	1,4893		10,20	
		10	10,01	78,70	0,4235	0,6014	1,0843	2,3169		ND*	
	CA	7	10,02	78,93	0,4052	0,5319	0,9120	1,1654	1,17	8,00	8,20
		8	10,02	78,81	0,3804	0,5073	0,8879	1,1163		7,80	
		9	10,05	79,35	0,4285	0,6049	1,0082	1,2602		8,80	
		10	10,04	79,21	0,3536	0,5051	0,8586	1,1364		8,20	

*Não considerado na média do grupo por problema no ensaio.

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-10 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade e altura da ascensão capilar da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Φ médio (cm)	Área seção transversal (cm ²)	Absorção 3h (g/cm ²)	Absorção 6h (g/cm ²)	Absorção 24h (g/cm ²)	Absorção 48h (g/cm ²)	Absorção média (g/cm ²)	Altura ascensão capilar (cm)	Média ascensão capilar (cm)
TR 2	AL2	7	10,01	78,76	0,2544	0,3306	0,7369	0,8893	0,94	8,50	8,30
		8	10,03	79,06	0,2530	0,3542	0,7589	0,9613		8,60	
		9	10,04	79,19	0,2949	0,3959	0,7748	0,9768		8,30	
		10	10,07	79,66	0,2695	0,3700	0,7214	0,9223		7,80	
TR 2	B	7	10,02	78,78	0,3732	0,4748	1,0079	1,2872	1,24	10,00	10,00
		8	10,00	78,56	0,3749	0,5022	1,0114	1,3169		10,20	
		9	10,01	78,73	0,3569	0,4585	0,9412	1,1952		10,00	
		10	10,01	78,67	0,3305	0,4576	0,9153	1,1695		9,80	
TR 2	C	7	10,05	79,26	0,3960	0,5222	1,0773	1,3548	1,23	10,00	9,85
		8	9,99	78,41	0,3474	0,4749	0,9850	1,2911		10,40	
		9	10,00	78,60	0,3547	0,4565	0,8636	1,0926		9,50	
		10	10,04	79,15	0,3213	0,4223	0,9277	1,1804		9,50	
TR 2	D	7	10,01	78,71	0,3553	0,4570	0,9906	1,2192	1,21	10,20	10,10
		8	10,04	79,14	0,3279	0,4543	0,9850	1,2124		10,00	
		9	10,03	78,93	0,2951	0,3711	0,8525	1,1312		9,70	
		10	10,02	78,89	0,3304	0,4571	0,9895	1,2938		10,50	
TR 2	SAB	7	10,01	78,63	0,3729	0,5000	1,0342	1,3648	1,37	10,80	10,80
		8	10,01	78,68	0,4574	0,5845	1,0929	1,4488		10,90	
		9	10,02	78,89	0,4304	0,5318	0,9628	1,2417		10,50	
		10	10,00	78,54	0,4259	0,5787	1,1134	1,4190		11,00	

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-11 – Coeficientes de capilaridade dos concretos da primeira etapa (continua).

Concreto	Corpos-de-prova	Tempo de pesagem em horas	Tempo ($h^{1/2}$)	Absorção (g/cm^2)	Absorção média (g/cm^2)	Coeficiente de capilaridade ($kg/m^2.h^{1/2}$)		
						Por corpos-de-prova	Médio por pesagem	Médio por concreto
TR 1 SA	7	3	1,7321	0,3616	0,41	2,088	2,39	2,20
	8	3	1,7321	0,4036		2,330		
	9	3	1,7321	0,4440		2,564		
	10	3	1,7321	0,4445		2,566		
	7	6	2,4495	0,5127	0,56	2,093	2,28	
	8	6	2,4495	0,5550		2,266		
	9	6	2,4495	0,5958		2,432		
	10	6	2,4495	0,5713		2,332		
	7	24	4,8990	0,9158	1,01	1,869	2,06	
	8	24	4,8990	0,9839		2,008		
	9	24	4,8990	1,1015		2,248		
	10	24	4,8990	1,0279		2,098		
	7	48	6,9282	1,2936	1,44	1,867	2,08	
	8	48	6,9282	1,6145		2,330		
	9	48	6,9282	1,4808		2,137		
	10	48	6,9282	1,3831		1,996		
TR 1 CA	7	3	1,7321	0,3875	0,35	2,237	2,01	1,83
	8	3	1,7321	0,3351		1,934		
	9	3	1,7321	0,3984		2,300		
	10	3	1,7321	0,2685		1,550		
	7	6	2,4495	0,4884	0,47	1,994	1,91	
	8	6	2,4495	0,4615		1,884		
	9	6	2,4495	0,5249		2,143		
	10	6	2,4495	0,3940		1,608		
	7	24	4,8990	0,8669	0,85	1,770	1,73	
	8	24	4,8990	0,8155		1,665		
	9	24	4,8990	0,9043		1,846		
	10	24	4,8990	0,7956		1,624		
	7	48	6,9282	1,2201	1,17	1,761	1,68	
	8	48	6,9282	1,1695		1,688		
	9	48	6,9282	1,1825		1,707		
	10	48	6,9282	1,0968		1,583		
TR 2 SA	7	3	1,7321	0,4063	0,41	2,346	2,34	2,17
	8	3	1,7321	0,4073		2,352		
	9	3	1,7321	0,4267		2,463		
	10	3	1,7321	0,3805		2,197		
	7	6	2,4495	0,5587	0,56	2,281	2,30	
	8	6	2,4495	0,5598		2,285		
	9	6	2,4495	0,6029		2,461		
	10	6	2,4495	0,5325		2,174		
	7	24	4,8990	1,0667	1,03	2,177	2,11	
	8	24	4,8990	1,0173		2,077		
	9	24	4,8990	1,0560		2,155		
	10	24	4,8990	0,9885		2,018		
	7	48	6,9282	1,3969	1,34	2,016	1,94	
	8	48	6,9282	1,3223		1,909		
	9	48	6,9282	1,3580		1,960		
	10	48	6,9282	1,2925		1,866		

Tabela APD-11 – Coeficientes de capilaridade dos concretos da primeira etapa (conclusão).

Concreto	Corpos-de-prova	Tempo de pesagem em horas	Tempo ($h^{1/2}$)	Absorção (g/cm^2)	Absorção média (g/cm^2)	Coeficiente de capilaridade ($kg/m^2 \cdot h^{1/2}$)		
						Por corpos-de-prova	Médio por pesagem	Médio por concreto
TR 2 CA	7	3	1,7321	0,3716	0,34	2,145	1,97	1,79
	8	3	1,7321	0,3235		1,868		
	9	3	1,7321	0,3205		1,850		
	10	3	1,7321	0,3469		2,003		
	7	6	2,4495	0,4982	0,47	2,034	1,91	
	8	6	2,4495	0,4507		1,840		
	9	6	2,4495	0,4729		1,931		
	10	6	2,4495	0,4483		1,830		
	7	24	4,8990	0,8781	0,84	1,792	1,71	
	8	24	4,8990	0,8070		1,647		
	9	24	4,8990	0,8284		1,691		
	10	24	4,8990	0,8285		1,691		
	7	48	6,9282	1,1314	1,10	1,633	1,58	
	8	48	6,9282	1,0614		1,532		
	9	48	6,9282	1,0824		1,562		
	10	48	6,9282	1,1073		1,598		
TR 3 SA	7	3	1,7321	0,4446	0,47	2,567	2,69	2,43
	8	3	1,7321	0,4733		2,732		
	9	3	1,7321	0,5244		3,028		
	10	3	1,7321	0,4235		2,445		
	7	6	2,4495	0,5957	0,64	2,432	2,63	
	8	6	2,4495	0,6762		2,761		
	9	6	2,4495	0,7021		2,866		
	10	6	2,4495	0,6014		2,455		
	7	24	4,8990	1,0491	1,12	2,141	2,28	
	8	24	4,8990	1,1581		2,364		
	9	24	4,8990	1,1846		2,418		
	10	24	4,8990	1,0843		2,213		
	7	48	6,9282	1,3261	1,41	1,914	2,03	
	8	48	6,9282	1,4117		2,038		
	9	48	6,9282	1,4893		2,150		
	10	48	6,9282	ND*		ND*		
TR 3 CA	7	3	1,7321	0,4052	0,39	2,339	2,26	2,00
	8	3	1,7321	0,3804		2,196		
	9	3	1,7321	0,4285		2,474		
	10	3	1,7321	0,3536		2,042		
	7	6	2,4495	0,5319	0,54	2,171	2,19	
	8	6	2,4495	0,5073		2,071		
	9	6	2,4495	0,6049		2,470		
	10	6	2,4495	0,5051		2,062		
	7	24	4,8990	0,9120	0,92	1,862	1,87	
	8	24	4,8990	0,8879		1,812		
	9	24	4,8990	1,0082		2,058		
	10	24	4,8990	0,8586		1,753		
	7	48	6,9282	1,1654	1,17	1,682	1,69	
	8	48	6,9282	1,1163		1,611		
	9	48	6,9282	1,2602		1,819		
	10	48	6,9282	1,1364		1,640		

*Não considerado na média do grupo por problema no ensaio.

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-12 – Coeficientes de capilaridade dos concretos da segunda etapa (continua).

Concreto	Corpos-de-prova	Tempo de pesagem em horas	Tempo ($h^{1/2}$)	Absorção (g/cm^2)	Absorção média (g/cm^2)	Coeficiente de capilaridade ($kg/m^2 \cdot h^{1/2}$)			
						Por corpo-de-prova	Médio por pesagem	Médio por concreto	
TR 2 AL2	7	3	1,7321	0,2544	0,27	1,469	1,55	1,48	
	8	3	1,7321	0,2530		1,461			
	9	3	1,7321	0,2949		1,702			
	10	3	1,7321	0,2695		1,556			
	7	6	2,4495	0,3306	0,36	1,350	1,48		
	8	6	2,4495	0,3542		1,446			
	9	6	2,4495	0,3959		1,616			
	10	6	2,4495	0,3700		1,510			
	7	24	4,8990	0,7369	0,75	1,504	1,53		
	8	24	4,8990	0,7589		1,549			
	9	24	4,8990	0,7748		1,581			
	10	24	4,8990	0,7214		1,473			
	7	48	6,9282	0,8893	0,94	1,284	1,35		
	8	48	6,9282	0,9613		1,388			
	9	48	6,9282	0,9768		1,410			
	10	48	6,9282	0,9223		1,331			
	TR 2 B	7	3	1,7321	0,3732	0,36	2,155		2,07
		8	3	1,7321	0,3749		2,164		
		9	3	1,7321	0,3569		2,061		
		10	3	1,7321	0,3305		1,908		
7		6	2,4495	0,4748	0,47	1,938	1,93		
8		6	2,4495	0,5022		2,050			
9		6	2,4495	0,4585		1,872			
10		6	2,4495	0,4576		1,868			
7		24	4,8990	1,0079	0,97	2,057	1,98		
8		24	4,8990	1,0114		2,064			
9		24	4,8990	0,9412		1,921			
10		24	4,8990	0,9153		1,868			
7		48	6,9282	1,2872	1,24	1,858	1,79		
8		48	6,9282	1,3169		1,901			
9		48	6,9282	1,1952		1,725			
10		48	6,9282	1,1695		1,688			
TR 2 C		7	3	1,7321	0,3960	0,35	2,286	2,05	
		8	3	1,7321	0,3474		2,006		
		9	3	1,7321	0,3547		2,048		
		10	3	1,7321	0,3213		1,855		
	7	6	2,4495	0,5222	0,47	2,132	1,91		
	8	6	2,4495	0,4749		1,939			
	9	6	2,4495	0,4565		1,864			
	10	6	2,4495	0,4223		1,724			
	7	24	4,8990	1,0773	0,96	2,199	1,97		
	8	24	4,8990	0,9850		2,011			
	9	24	4,8990	0,8636		1,763			
	10	24	4,8990	0,9277		1,894			
	7	48	6,9282	1,3548	1,23	1,956	1,77		
	8	48	6,9282	1,2911		1,864			
	9	48	6,9282	1,0926		1,577			
	10	48	6,9282	1,1804		1,704			

Tabela APD-12 – Coeficientes de capilaridade dos concretos da segunda etapa (conclusão).

Concreto	Corpos-de-prova	Tempo de pesagem em horas	Tempo ($h^{1/2}$)	Absorção (g/cm^2)	Absorção média (g/cm^2)	Coeficiente de capilaridade ($kg/m^2 \cdot h^{1/2}$)		
						Por corpo-de-prova	Médio por pesagem	Médio por concreto
TR 2 D	7	3	1,7321	0,3553	0,33	2,052	1,89	1,84
	8	3	1,7321	0,3279		1,893		
	9	3	1,7321	0,2951		1,704		
	10	3	1,7321	0,3304		1,907		
	7	6	2,4495	0,4570	0,43	1,866	1,78	
	8	6	2,4495	0,4543		1,855		
	9	6	2,4495	0,3711		1,515		
	10	6	2,4495	0,4571		1,866		
	7	24	4,8990	0,9906	0,95	2,022	1,95	
	8	24	4,8990	0,9850		2,011		
	9	24	4,8990	0,8525		1,740		
	10	24	4,8990	0,9895		2,020		
	7	48	6,9282	1,2192	1,21	1,760	1,75	
	8	48	6,9282	1,2124		1,750		
	9	48	6,9282	1,1312		1,633		
	10	48	6,9282	1,2938		1,867		
TR 2 SAB	7	3	1,7321	0,3729	0,42	2,346	2,43	
	8	3	1,7321	0,4574		2,352		
	9	3	1,7321	0,4304		2,463		
	10	3	1,7321	0,4259		2,197		
	7	6	2,4495	0,5000	0,55	2,281	2,24	
	8	6	2,4495	0,5845		2,285		
	9	6	2,4495	0,5318		2,461		
	10	6	2,4495	0,5787		2,174		
	7	24	4,8990	1,0342	1,05	2,177	2,14	
	8	24	4,8990	1,0929		2,077		
	9	24	4,8990	0,9628		2,155		
	10	24	4,8990	1,1134		2,018		
	7	48	6,9282	1,3648	1,37	2,016	1,98	
	8	48	6,9282	1,4488		1,909		
	9	48	6,9282	1,2417		1,960		
	10	48	6,9282	1,4190		1,866		

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-13 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral da primeira etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
TR 1	SA	7	2,289	2,488
		8	2,789	
		9	2,501	
		10	2,374	
	CA	7	2,121	1,940
		8	1,914	
		9	1,673	
		10	2,051	
TR 2	SA	7	2,287	2,501
		8	2,552	
		9	2,461	
		10	2,705	
	CA	7	1,696	1,764
		8	1,732	
		9	1,871	
		10	1,759	
TR 3	SA	7	2,609	2,456
		8	2,345	
		9	2,645	
		10	2,226	
	CA	7	1,674	1,826
		8	1,886	
		9	2,062	
		10	1,684	

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-14 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral da segunda etapa.

Traço	Tipo	Corpos-de-prova	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
TR 2	AL2	7	1,486	1,460
		8	1,476	
		9	1,577	
		10	1,300	
TR 2	B	7	2,033	1,960
		8	1,899	
		9	1,851	
		10	2,057	
TR 2	C	7	2,025	1,950
		8	2,058	
		9	1,932	
		10	1,787	
TR 2	D	7	2,119	2,056
		8	2,041	
		9	1,965	
		10	2,099	
TR 2	SAB	7	2,536	2,479
		8	2,262	
		9	2,453	
		10	2,666	

Fonte: O autor, 2018.

Tabela APD-15 – Dados dos ensaios de massa específica do concreto no estado fresco da primeira etapa.

TRAÇO TR 1					
Traço TR 1 SA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		366,24	365,87	366,54	366,22
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4100	4080	4090	4090
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2377	2364	2370	2371
Traço TR 1 CA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		365,72	365,64	367,16	366,17
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		3900	3890	3910	3900
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2250	2244	2255	2250
TRAÇO TR 2					
Traço TR 2 SA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		365,69	366,42	367,94	366,68
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4090	4090	4110	4097
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2371	2371	2382	2375
Traço TR 2 CA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		367,73	366,98	368,66	367,79
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		3890	3890	3900	3893
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2242	2243	2248	2244
TRAÇO TR 3					
Traço TR 3 SA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		365,72	367,18	367,56	366,82
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4070	4090	4060	4073
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2358	2370	2351	2360
Traço TR 3 CA	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		365,53	365,44	366,87	365,95
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		3850	3860	3850	3853
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2218	2225	2217	2220

Fonte: O autor, 2018.

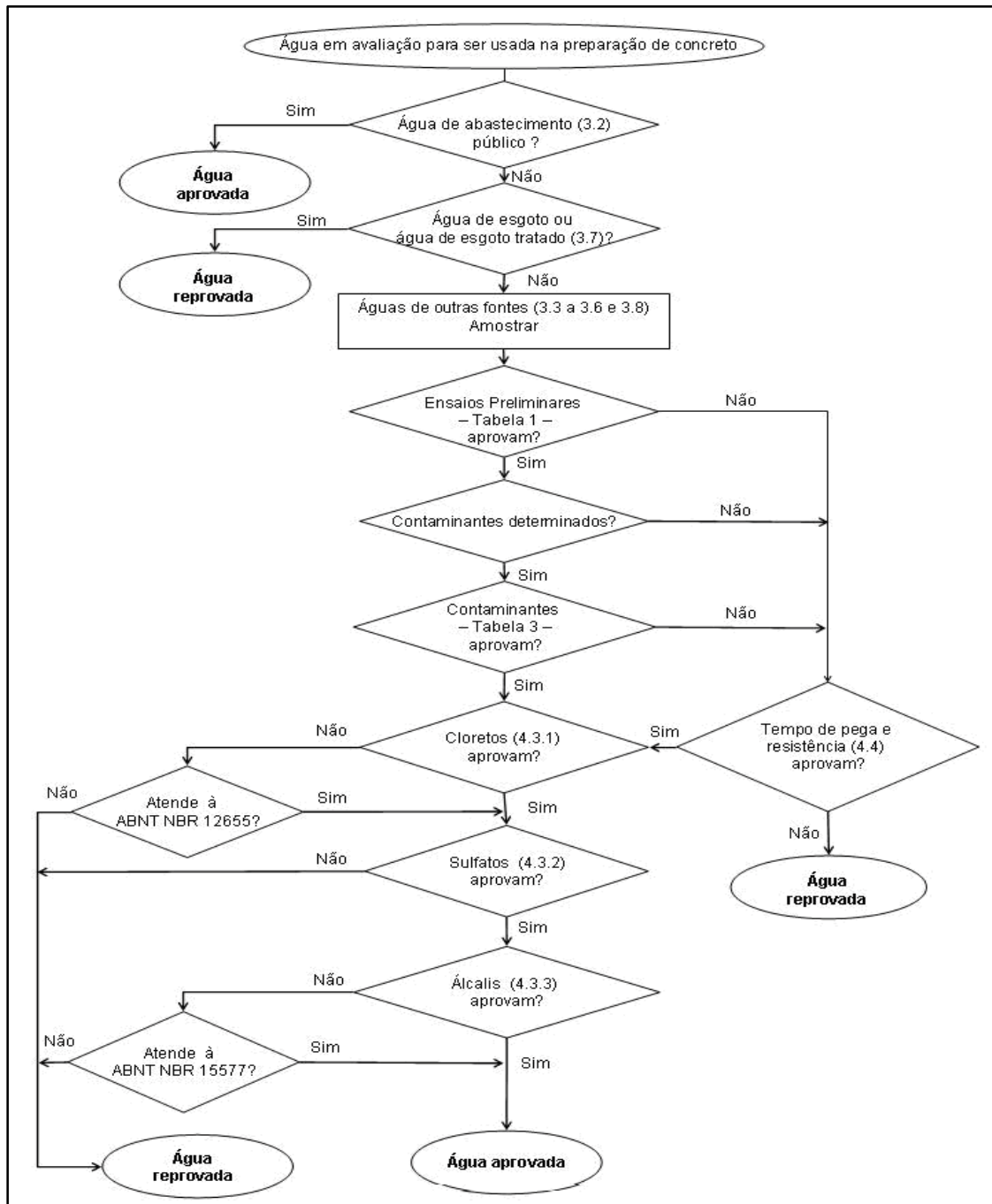
Tabela APD-16 – Dados dos ensaios de massa específica do concreto no estado fresco da segunda etapa.

TRAÇO TR 2 AL2					
Traço TR 2 AL2 (aditivo do tipo A)	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		414	416	418	416,00
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		3898	3890	3934	3907
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2218	2212	2238	2223
TRAÇO TR 2 B					
Traço TR 2 B (aditivo do tipo B)	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		418	414	414	415,33
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4100	4092	4132	4108
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2344	2341	2367	2351
TRAÇO TR 2 C					
Traço TR 2 C (aditivo do tipo C)	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		370	370	370	370,00
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4030	4060	4094	4061
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2330	2349	2371	2350
TRAÇO TR 2 D					
Traço TR 2 D (aditivo do tipo D)	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		372	370	374	372,00
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4030	4068	4080	4059
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2329	2354	2359	2347
TRAÇO TR 2 SAB					
Traço TR 2 SAB (sem aditivo)	Massa recipiente (g)	I	II	III	Media
		416	420	420	418,67
	Massa concreto + recipiente (g)	I	II	III	Media
		4130	4180	4178	4163
	Massa específica concreto estado fresco (kg/m ³)	I	II	III	Media
		2364	2394	2392	2384

Fonte: O autor, 2018.

ANEXO A – Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto

Fonte: (ABNT NBR 15900-1:2009 – Água para amassamento do concreto, Parte 1 – Requisitos) Figura 1.



ANEXO B – Concreto sujeito a meios agressivos (geralmente em elementos enterrados ou em contato com o solo)

Fonte: (ABNT NBR 12655:2015 – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento) – material colhido do Anexo A da norma.

Recomendações relativas à durabilidade das estruturas

De uma maneira geral, as estruturas de concreto apresentam desempenho satisfatório quando expostas a variadas condições ambientais, incluindo o contato com água e solos contendo agentes agressivos. Entretanto, determinadas condições de exposição podem comprometer a vida útil de uma estrutura, caso não sejam tomadas medidas adequadas para prevenir ou reduzir o risco potencial de deterioração.

Para serem nocivos ao concreto e produzir um ataque significativo, os agentes químicos agressivos devem estar em uma determinada proporção, diluídos nas soluções aquosas, uma vez que normalmente o concreto não é atacado por substâncias sólidas (ocorrência muito rara e específica).

Esta Norma estabelece os requisitos mínimos exigíveis para o concreto de estruturas expostas a soluções contendo sulfatos (conforme 5.2.2.3 e Tabela 4). Contudo, as estruturas de concreto expostas a águas puras, águas ácidas, águas magnesianas e águas amoniacais também podem experimentar danos, dependendo das concentrações dos agentes dissolvidos na água. Quando pura, a água é agressiva, por atuar como dissolvente dos compostos hidratados do cimento, e, quando contém determinados íons, estes reagem com os mesmos compostos hidratados do cimento, alterando uma estrutura estável, responsável principalmente pela resistência mecânica do concreto.

O concreto, quando em contato com essas águas, deve apresentar determinadas propriedades, entre elas as decorrentes da relação água/cimento e da resistência característica à compressão (f_{ck}), em função da condição de agressividade do meio com vistas a aumentar a sua durabilidade e vida útil.

A Tabela A.1, resultante de uma compilação de procedimentos e normas internacionais, mostra algumas propriedades recomendadas para concretos em função dos níveis de agressividade ambiental, como medidas preventivas para evitar a deterioração precoce das estruturas.

Tabela A.1 Características recomendadas para concreto exposto a soluções aquosas agressivas ^a

Condições de exposição em função da agressividade	pH ^b (Ver Bibliografia, [1]) ^d	CO ₂ agressivo mg/L (Ver Bibliografia, [5]) ^d	Íon magnésio mg/L (Ver Bibliografia, [3]) ^d	Íon Amônia mg/L (Ver Bibliografia, [2]) ^d	Resíduo sólido mg/L (Ver Bibliografia, [4]) ^d	Máxima relação água/cimento ^b	Mínimo f_{ck} MPa
Fraca	7 a 6	< 30	< 100	< 100	> 150	Conforme Tabela 2 ^c	Conforme Tabela 2 ^c
Moderada	6 a 5,5	30 a 45	100 a 200	100 a 150	150 a 50	0,50	35
Severa	< 5,5	> 45	> 200	> 150	< 50	0,45	40

^a Esta Tabela não é exaustiva e, para casos especiais e outras questões complementares, como o tipo e consumo de cimento, bem como da espessura mínima de cobrimento, deve-se consultar um especialista ou fazer uso de procedimentos e normas internacionais aplicáveis e aceitos pela comunidade tecnocientífica, como as constantes da bibliografia desta Norma, que foi utilizada para a elaboração deste Anexo.

^b Propriedade adimensional.

^c Ver Tabela diretamente na ABNT NBR 12655:2015.

^d Ver bibliografia diretamente na ABNT NBR 12655:2015

Fonte: ABNT NBR 12655:2015 (Adaptado pelo autor)

