



**EFEITOS DA MISTURA DE SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA
NA DURABILIDADE DO CONCRETO**

ANA LUIZA ROCHA DE SOUZA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITOS DA MISTURA DE SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA NA
DURABILIDADE DO CONCRETO**

ANA LUIZA ROCHA DE SOUZA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

COORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL**

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**EFEITOS DA MISTURA DE SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA NA DURABILIDADE
DO CONCRETO**

ANA LUIZA ROCHA DE SOUZA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

Prof^a. Dr.^a Valdirene Maria Silva Capuzzo (PECC/ENC-UnB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Lameiras (PECC/ENC-UnB)
(Coorientador)

Prof^a. Dr.^a Eugênia Fonseca da Silva (PECC/ENC-UnB)
(Examinadora Interna)

Prof^a. Dr.^a Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCAR)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 11 DE FEVEREIRO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, ANA LUIZA ROCHA DE

Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto [Distrito Federal] 2021.

xxii, 149 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2021).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto
3. Sílica ativa

2. Nanossílica
4. Durabilidade

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, A. L. R. (2021). Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-03A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Ana Luiza Rocha de Souza

TÍTULO: Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto.

GRAU: Mestre ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Ana Luiza Rocha de Souza
CLN 208, Bloco C, Apartamento 112
Asa Norte – CEP:70.853-530 – Brasília – DF – Brasil
E-mail: luiza31souza@gmail.com/analuiza_souz@hotmail.com

*Dedico este trabalho aos meus pais, Celso e
Sirlene, meus maiores exemplos de amor e fé.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser meu refúgio, me dar forças e discernimento para enfrentar as dificuldades e obstáculos do dia a dia.

Aos meus queridos pais Celso e Sirlene, por todo amor e apoio durante a caminhada. As palavras de incentivo e confiança fizeram toda a diferença nos dias difíceis e cheios de saudade de casa. Me incentivam a ser uma pessoa melhor a cada dia, na busca pelos meus sonhos. Serão sempre meu maior exemplo e orgulho!

Ao meu irmão João Vitor pelo companheirismo, torcida e pelos conselhos quando mais precisei de palavras de conforto. Tenho orgulho do homem de coração bom que se tornou. À minha cunhada Poliana, por ser sempre tão carinhosa e prestativa com nossa família.

Ao meu avô, carinhosamente chamado de “vovô Du” que mesmo não estando mais presente fisicamente foi fonte de coragem e perseverança, sempre mostrando o valor das coisas simples da vida. A todos os meus familiares pelo apoio e carinho em cada encontro nos nossos domingos em família na casa da vovó.

Carrego no coração pessoas especiais, que o tempo e distância não mudam nossa relação sincera e verdadeira. Às minhas amigas Ana Paula, Camila, Paula, Amanda, Alana, Dany, Ana Clara, Camilinha e Carine pela amizade de tantos anos que começou na infância, por acreditarem em mim e me mostrarem que a amizade é um dom. Faz toda diferença ter um ombro amigo nos momentos difíceis. Sou muito feliz e abençoada por ter vocês em minha vida.

À minha orientadora Valdirene Capuzzo, por todo o apoio, paciência e dedicação ao longo desses anos. Obrigada por ajudar a ampliar meus conhecimentos, me mostrar sempre com serenidade e sabedoria a melhor forma de resolver problemas e imprevistos. Tem toda minha admiração pela mulher e profissional que é. Serei eternamente grata.

Ao meu coorientador Rodrigo Lameiras, por ter aceitado fazer parte desta pesquisa, contribuindo com seu conhecimento e experiência, pela cordialidade e disponibilidade em buscar soluções para a realização do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, que além dos meus orientadores, contribuíram com o meu crescimento e aprendizado na vida pessoal e profissional durante o mestrado. Em especial aos professores Elton Bauer, Eugênia e João Henrique presentes desde o primeiro semestre nessa caminhada acadêmica.

Às professoras por comporem a banca da defesa de mestrado, por aceitarem o convite de contribuir com este trabalho, agregando conhecimento com a vasta experiência que possuem.

Ao Renan, colega e amigo, que além do convívio diário, foi fundamental na parceria de trabalho para realização do estudo de módulo de elasticidade das pastas utilizando o EMM-ARM. Obrigada pela disposição em ajudar e compartilhar seus conhecimentos.

Ao longo da caminhada, conheci pessoas incríveis e admiráveis no PECC, os quais tornaram essa trajetória mais leve e feliz: Mara Monaliza, Myrelle, Larissa, Mabel, Karol, Érica, Guilherme, Vanessa, Thaís, Daiane, Jerfeson, John, Wilber, Arthur Aviz, Jayme, Ana Carla,

Luísa Libardi, Johnnatan e Calebe. Aos meninos da “Sala 4” pela companhia diária e boas conversas. Aos demais colegas do programa que se fizeram presentes. Obrigada pela amizade, apoio e pelos momentos de diversão.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM – UnB), coordenado pelo professor Elton Bauer, por proporcionar a realização do programa experimental. Aos técnicos Gabriel, Patrícia e sr. Severo pela disposição em auxiliar nas tarefas práticas, por serem sempre alegres e dispostos.

À empresa BASF pela doação do aditivo superplastificante. À empresa Nouryon pela doação da nanossílica e à empresa Grupotecno Sistemas Construtivos pela doação dos agregados graúdos.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal/FAP-DF (Processo 0193.001700/2017) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Obrigada a todos que mesmo não tendo citado nomes, contribuíram e participaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“A fé é o impossível acontecendo dentro de cada um.”

Fabício Carpinejar

RESUMO

EFEITOS DA MISTURA SÍLICA ATIVA E DE NANOSSÍLICA NA DURABILIDADE DO CONCRETO

Autora: Ana Luiza Rocha de Souza

Orientadora: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Coorientador: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, fevereiro de 2021.

Na atualidade ocorre uma preocupação constante em relação à durabilidade e vida útil do concreto, em que o estudo de novas tipologias e a adição de diferentes materiais cimentícios suplementares surgem como ferramenta para melhorar e aumentar a durabilidade desse material. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo incorporar essas novas tendências de materiais, especificamente sílica ativa e nanossílica, nos estudos investigativos de durabilidades do concreto. Foi realizado um estudo piloto para investigação do comportamento da nanossílica em materiais cimentícios, avaliando o módulo de elasticidade desde o estado plástico, para diferentes relações de a/c. Para estudos em concreto, foi realizada a dosagem utilizando o software Bétonlab Pro 3, que se respalda no método do empacotamento compressível. No concreto com adição de sílica ativa, a adição foi de 10% (CSF), no com nanossílica utilizou-se um teor de 2% (CNS), e o traço utilizando a mistura dos dois materiais, seguiu os mesmos percentuais, 10% de sílica e 2% de nanossílica, considerando em todos os traços, em substituição volumétrica. Partindo do uso de tais materiais, foi possível avaliar as possíveis influências em algumas propriedades de durabilidade e na microestrutura do concreto. Ademais, foram propostos além de ensaios no estado fresco, os ensaios microestruturais com o intuito de avaliar as alterações causadas na estrutura interna e na escala micro dos materiais, bem como os ensaios acelerados para avaliar a influência da mistura ternária de nanossílica e sílica ativa nos concretos produzidos. Os traços com adição de NS apresentaram visivelmente perda na trabalhabilidade, necessitando de maior quantidade de aditivo para manter a consistência estabelecida previamente para o traço de referência. Com relação à resistência à compressão, o uso de nanossílica proporcionou um ganho considerável nos valores nas idades iniciais, embora em idade avançada a mistura de sílica e nanossílica se apresentou mais vantajosa. Nas análises propostas para durabilidade do concreto por meio da investigação da absorção de água, a mistura dos dois materiais em um único traço se mostrou mais eficiente. No entanto, com relação à resistividade elétrica superficial e volumétrica e migração de cloretos no estado não estacionário, ficou evidente que a adição de sílica ativa proporcionou melhorias aos 63 dias de idade. Analisando a microestrutura do material cimentício, foi perceptível que o uso de adições ocasionou reações pozolânicas mais intensas e rápidas, principalmente com adição de nanossílica, pela escala de suas partículas e elevada reatividade.

Palavras-chave: Concreto. Nanossílica. Sílica Ativa. Durabilidade.

ABSTRACT

EFFECTS OF SILICA FUME AND NANOSILICA MIXTURE ON CONCRETE DURABILITY

Author: Ana Luiza Rocha de Souza

Advisor: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Advisor: Rodrigo de Melo Lameiras

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, february of 2021

Currently, there is a constant concern in relation to the durability and useful life of concrete, in which the study of new types and the addition of different supplementary cementitious materials appear as a tool to improve and increase the durability of this material. Thus, this work aims to incorporate these new material trends, specifically active silica and nanosilica, in investigative studies of concrete durability. A pilot study was carried out to investigate the behavior of nanosilica in cementitious materials, evaluating the modulus of elasticity from the plastic state, for different a / c ratios. For concrete studies, dosing was performed using the Bétonlab Pro 3 software, which is supported by the compressible packaging method. In concrete with the addition of silica fume, the addition was 10% (CSF), in the case of nanosilica a content of 2% (CNS) was used, and the mixture using the mixture of the two materials followed the same percentages, 10% silica and 2% nanosilica, considering in all traces, in volumetric substitution. Starting from the use of such materials, it was possible to evaluate the possible influences on some durability properties and on the microstructure of the concrete. In addition, in addition to tests in the fresh state, microstructural tests were proposed in order to evaluate the changes caused in the internal structure and the micro scale of the materials, as well as accelerated tests to evaluate the influence of the ternary mixture of nanosilica and active silica in the concrete produced. Traces with the addition of NS showed a noticeable loss in workability, requiring a greater amount of additive to maintain the consistency previously established for the reference trace. Regarding the compressive strength, the use of nanosilica provided a considerable gain in the values in the initial ages, although in old age the mixture of silica and nanosilica was more advantageous. In the analyzes proposed for the durability of concrete through the investigation of water absorption, the mixture of the two materials in a single line proved to be more efficient. However, with respect to surface and volumetric electrical resistivity and chloride migration in the non-steady state, it was evident that the addition of active silica provided improvements at 63 days of age. Analyzing the microstructure of the cementitious material, it was noticeable that the use of additions caused more intense and faster pozzolanic reactions, mainly with the addition of nanosilica, due to the scale of its particles and high reactivity.

Keywords: Concrete. Nanosilica. Silica fume. Durability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Justificativa da pesquisa e importância do tema	25
1.2	Objetivos	26
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	26
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	26
1.3	Estrutura do trabalho.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Concreto e suas propriedades.....	28
2.2	Métodos de dosagem.....	30
2.3	Método do empacotamento compressível (MEC).....	30
2.3.1	<i>Conceitos fundamentais para aplicação do MEC</i>	31
2.4	Efeito da Nanossílica em materiais cimentícios	35
2.5	Efeito da Sílica ativa em materiais cimentícios	39
2.6	Efeito combinado da sílica ativa com a nanossílica	40
2.7	Durabilidade dos concretos.....	44
2.7.1	<i>Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto</i>	44
2.7.1.1	<i>Permeabilidade</i>	45
2.7.1.2	<i>Absorção por sucção capilar</i>	46
2.7.1.3	<i>Difusão</i>	47
2.7.1.4	<i>Migração iônica</i>	48
2.7.2	<i>Absorção de água</i>	49
2.7.3	<i>Resistividade elétrica</i>	50
2.7.4	<i>Carbonatação</i>	51
2.7.5	<i>Ação de cloretos</i>	53
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	Materiais e métodos	58
3.1.1	<i>Aglomerante</i>	59
3.1.2	<i>Sílica ativa</i>	61

3.1.3 Nanossílica.....	63
3.1.4 Agregado graúdo natural	64
3.1.5 Agregado miúdo natural.....	65
3.1.6 Aditivo	66
3.1.7 Água de amassamento	67
3.2 Estudo piloto em pastas para definição da relação a/c do concreto.....	67
3.2.1 Determinação da consistência da pasta	67
3.2.2 Ensaio de resistência à compressão	69
3.2.3 Ensaio de módulo de elasticidade	69
3.2.3.1 Módulo estático de elasticidade através da compressão clássica.....	69
3.2.3.2 Ensaio EMM-ARM.....	69
3.2.3.3 Método da Frequência Ressonante.....	71
3.2.3.4 Validação do método	72
3.3 Parâmetros para dosagem do concreto.....	77
3.3.1 Composição do cimento	78
3.3.2 Ensaio para obtenção dos parâmetros iniciais.....	79
3.3.2.1 Agregados graúdo e miúdo.....	79
3.3.2.2 Cimento	82
3.3.2.3 Aditivo Superplastificante.....	86
3.3.2.4 Sílica ativa.....	86
3.3.2.5 Nanossílica.....	87
3.3.2.6 Mistura de Sílica ativa e Nanossílica	88
3.3.3 Dosagem de concreto utilizando o Bétonlab Pro 3.....	88
3.4 Produção e ensaios em concreto	90
3.4.1 Estado Fresco.....	90
3.4.2 Estado Endurecido.....	90
3.4.3 Ensaio de Durabilidade.....	90
3.4.3.1 Absorção de água por imersão	91
3.4.3.2 Absorção de água por capilaridade.....	91
3.4.3.3 Resistividade elétrica volumétrica	91
3.4.3.4 Resistividade elétrica superficial.....	94

3.4.3.5	<i>Carbonatação acelerada</i>	95
3.4.3.6	<i>Migração de cloretos no estado não estacionário</i>	98
3.5	Ensaio microestruturais	101
3.5.1	<i>Produção das pastas e paralisação da hidratação</i>	102
3.5.2	<i>Termogravimetria</i>	103
3.5.3	<i>Difratometria de raios-X</i>	104
3.6	Análise Estatística	105
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
4.1	Estudo piloto em pastas de cimento Portland	106
4.1.1	<i>Análise da consistência das pastas</i>	106
4.1.2	<i>Resultados de resistência à compressão das pastas</i>	107
4.1.3	<i>Evolução do módulo de elasticidade das pastas</i>	108
4.2	Propriedades no estado fresco	113
4.2.1	<i>Consistência pelo abatimento do tronco de cone</i>	113
4.2.2	<i>Massa específica</i>	115
4.3	Propriedades no estado endurecido	116
4.3.1	<i>Resistência à compressão simples</i>	116
4.4	Avaliação da durabilidade dos concretos	118
4.4.1	<i>Absorção de água por imersão</i>	118
4.4.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	121
4.4.3	<i>Resistividade elétrica superficial e volumétrica</i>	123
4.4.4	<i>Migração de cloretos no estado não estacionário</i>	125
4.4.5	<i>Carbonatação acelerada</i>	126
4.5	Ensaio de análise microestrutural	129
4.5.1	<i>Análise termogravimétrica (TG)</i>	129
4.5.2	<i>Difratometria de raios-X (DRX)</i>	133
4.6	Resumo dos principais resultados	138
5	CONCLUSÃO	141
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
APÊNDICE A - FORMAÇÃO DO BANCO DE DADOS DO BÉTONLAB PRO3 E DOSAGEM	154
APÊNDICE B – PARÂMETROS DA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	164
APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIO MECÂNICOS E DE DURABILIDADE.....	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de arranjos de partículas. (a) Cubos idênticos; (b) Cúbico de face centrada; (c) Cúbico de corpo centrado; (d) Cúbico simples.....	32
Figura 2.2 – Classes dominantes: (a) grãos de maior dimensão dominantes; (b) grãos de menor dimensão dominante.....	32
Figura 2.3 – Efeito afastamento	33
Figura 2.4 – Efeito parede	33
Figura 2.5 – Compacidade virtual em estruturas binárias	34
Figura 2.6 - Tamanho de partícula e área de superfície específica relacionada aos materiais de concreto	36
Figura 2.7 – Comparação entre a granulometria dos materiais.....	37
Figura 2.8 – Efeitos da adição de nanossílica em argamassas e concretos	38
Figura 2.9 - Retração autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência.....	39
Figura 2.10 - Representação do avanço da frente de carbonatação no concreto e alteração do pH em função do tempo.	53
Figura 3.1 - Organograma com as etapas do programa experimental.....	57
Figura 3.2 - Difratoograma de raios-X do cimento CP V - ARI.....	60
Figura 3.3 - Curva granulométrica do cimento Portland CP V.....	61
Figura 3.4 - Difratoograma de raios-X da sílica ativa.....	62
Figura 3.5 - Curva granulométrica da sílica ativa	63
Figura 3.6 - Difratoograma de raios-X da nanossílica.	64
Figura 3.7 - Curva granulométrica do agregado graúdo	65
Figura 3.8 - Curva granulométrica do agregado miúdo	66
Figura 3.9 - Procedimentos experimentais. a) Mistura dos materiais b) Aferição do espalhamento.....	68
Figura 3.10 - Sistemas de ensaio EMM-ARM para pasta de cimento	70
Figura 3.11 – Ensaio EMM-ARM em andamento.	71
Figura 3.12 - Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras em pastas de cimento.....	72
Figura 3.13 - Resultados do EMM-ARM e resultados médios e intervalo de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, dos ensaios de compressão clássica e frequência ressonante.	73

Figura 3.14 - Curvas analíticas ajustadas aos resultados do EMM-ARM e resultados médios e intervalo de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, dos ensaios de compressão clássica e frequência ressonante.	75
Figura 3.15 - Valores médios e intervalos de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, para os resultados dos ensaios EMM-ARM, compressão clássica e frequência ressonante.	77
Figura 3.16 - Determinação da compacidade dos agregados	80
Figura 3.17 – Fases do ensaio de compacidade. (a) Estado seco, (b) estado pendular, (c) estado funicular e (d) estado capilar	83
Figura 3.18 - Cone e suporte utilizados para a realização do ensaio.	86
Figura 3.19 - Esquema para a determinação da resistividade: método dos dois eletrodos	92
Figura 3.20 - Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento	93
Figura 3.21 - Esquema para a determinação da resistividade: método dos quatro eletrodos...	94
Figura 3.22 - Ensaio de resistividade elétrica superficial em andamento	95
Figura 3.23 - Câmara de carbonatação utilizada no ensaio.....	96
Figura 3.24 - Corpo de prova antes e após aplicação de fenolftaleína em idade de 56 dias	97
Figura 3.25 – (a) Pré-condicionamento das amostras para realização do ensaio de migração. (b) Amostra posicionada sobre o suporte com inclinação de 30°	99
Figura 3.26 - Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em andamento.	99
Figura 3.27 – Amostras após aplicação de nitrato de prata.....	100
Figura 3.28 - Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos ...	101
Figura 3.29 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de TG.....	104
Figura 3.30 – a) Fragmentos das pastas em isopropanol para paralisação da hidratação. b) Pulverização dos fragmentos das pastas de utilizando o almofariz; c) Pó da amostra total posicionada e identificada na lâmina.	104
Figura 4.1 - Resistência à compressão das pastas de cimento nas idades analisadas.	107
Figura 4.2 – Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,3.	109
Figura 4.3 - Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,4.....	109
Figura 4.4 - Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,5.....	109
Figura 4.5 - Curvas médias do módulo de elasticidade para cada mistura.	110
Figura 4.6 - Relação entre as curvas de desenvolvimento do módulo de elasticidade de pastas com NS e REF de um mesmo teor de a/c.....	112
Figura 4.7 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos.....	114
Figura 4.8 - Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	115

Figura 4.9 - Massa específica no estado fresco dos concretos produzidos	115
Figura 4.10 - Resistência à compressão simples dos concretos produzidos	116
Figura 4.11 - Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos, aos 63 dias de idade.	119
Figura 4.12 - Correlação entre a absorção de água por imersão e índice de vazios com a resistência à compressão simples, aos 63 dias.	120
Figura 4.13 - Absorção de água por capilaridade e ascensão capilar.....	121
Figura 4.14 - Coeficiente de sorvidade dos concretos produzidos.....	122
Figura 4.15 – Resistividade elétrica superficial e volumétrica	123
Figura 4.16 - Coeficiente de migração de cloretos aos 63 dias de idade dos concretos produzidos	125
Figura 4.17 – Valores de frente de carbonatação dos concretos produzidos, em diferentes idades.	127
Figura 4.18 – Coeficiente de carbonatação.	128
Figura 4.19 - Corpos de prova após leitura da frente de carbonatação	128
Figura 4.20 - Análise termogravimétrica da pasta REF com 63 dias de hidratação.	130
Figura 4.21 - Análise termogravimétrica da pasta SF com 63 dias de hidratação.	130
Figura 4.22 - Análise termogravimétrica da pasta NS com 63 dias de hidratação.	130
Figura 4.23 - Análise termogravimétrica da pasta SF-NS com 63 dias de hidratação.....	131
Figura 4.24 – Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia de referência nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo... 134	
Figura 4.25 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia com adição de sílica ativa (SF) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.	135
Figura 4.26 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia com nanossílica (NS) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.	136
Figura 4.27 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia com sílica ativa e nanossílica (SF-NS) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.	137
Figura A 1 - Banco de materiais constituintes.....	154
Figura A 2 - Criação do material Areia Natural” no banco de dados e propriedades da areia.	155
Figura A 3 - Esqueleto granulométrico da Areia Natural e distribuição granulométrica	155

Figura A 4 - Faixa granulométrica 1 e faixa granulométrica 2	156
Figura A 5 - Faixa granulométrica 3 e faixa granulométrica 4	156
Figura A 6 - Criação do material "Brita" no banco de dados e propriedades da brita	157
Figura A 7 - Esqueleto granulométrico da brita e distribuição granulométrica	157
Figura A 8 - Faixa granulométrica 1 e faixa granulométrica 2	158
Figura A 9 - Faixa granulométrica 3 e faixa granulométrica 4	158
Figura A 10 - Criação do material cimento CP V no banco de dados e constituintes	159
Figura A 11 - Propriedades do cimento e esqueleto granulométrico	159
Figura A 12 - Distribuição granulométrica do cimento e resultados da compactidade	160
Figura A 13 - Propriedades do aditivo superplastificante.	160
Figura A 14 - Seleção de materiais para calibração da Areia Natural e inserção de dados ...	161
Figura A 15 - Calibração da Areia Natural e valores de " p " e " q " para a Areia Natural	162
Figura A 16 - Seleção de materiais para calibração da Brita e inserção de dados	162
Figura A 17 - Calibração da Brita e valores de " p " e " q " para a Brita	163
Figura A 18 - Dosagem do concreto convencional	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Índice de empacotamento (K) para diferentes protocolos de empacotamento	35
Tabela 2.2 - Teores máximos de cloretos permitidos no concreto	54
Tabela 3.1 - Variáveis independentes e dependentes do programa experimental.....	56
Tabela 3.2 – Quantidade de corpos de prova moldados para a realização dos ensaios.	58
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios para a caracterização física do aglomerante.....	59
Tabela 3.4 – Resultados obtidos para a caracterização química do cimento	60
Tabela 3.5 - Caracterização da sílica ativa	61
Tabela 3.5 - Caracterização da sílica ativa (Continuação).....	62
Tabela 3.6 - Propriedades físicas e químicas da nanossílica.....	63
Tabela 3.7 – Ensaios de caracterização do agregado graúdo	64
Tabela 3.8 – Ensaios de caracterização do agregado miúdo	65
Tabela 3.9 - Propriedades do aditivo superplastificante	66
Tabela 3.10 - Quantitativo de materiais utilizados em cada traço	67
Tabela 3.11 - Erros relativos médios e desvio padrão das amostras do EMM-ARM.....	75
Tabela 3.12 - Comparação de valores médios e desvio padrão dos resultados de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios EMM-ARM, compressão clássica e frequência ressonante.	76
Tabela 3.13 - Nomenclatura e características dos traços de concreto	78
Tabela 3.14 - Parâmetros necessários para montar banco de dados do Bétonlab	79
Tabela 3.15 – Faixas granulométricas e respectivos valores de compactidade experimental... ..	81
Tabela 3.16 - Traços de concreto e argamassa utilizados para calibração dos agregados	82
Tabela 3.17 – Valores de resistência à compressão dos traços de argamassa e concreto	82
Tabela 3.18 - Valores de Compactidade para o cimento Portland	85
Tabela 3.19 - Valores de Compactidade para o cimento Portland composto com sílica ativa .	87
Tabela 3.20 - Valores de Compactidade para o cimento Portland composto com nanossílica.	87
Tabela 3.21 - Valores de Compactidade para o cimento Portland composto com sílica ativa e nanossílica	88
Tabela 3.22 - Traços de concreto dosados pelo Bétonlab Pro 3	89
Tabela 3.23 - Ensaios do concreto no estado fresco	90
Tabela 3.24 - Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de cloretos	94
Tabela 3.25 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário.....	100

Tabela 3.26 – Resumo dos ensaios realizados em pastas.....	102
Tabela 3.27 – Quantitativo de materiais utilizados em cada traço.....	102
Tabela 4.1 - Valores médios de resistência à compressão simples para as pastas de cimento Portland aos 1, 3, 7 e 28 dias de idade.	107
Tabela 4.2 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples ..	117
Tabela 4.3 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples	118
Tabela 4.4 - Resistividade elétrica volumétrica e superficial.....	123
Tabela 4.5 - Classificação quanto ao risco de corrosão e penetração de cloretos para os valores de resistividade elétrica volumétrica dos concretos produzidos	124
Tabela 4.6 - Classificação quanto ao risco de corrosão para os valores de resistividade elétrica superficial dos concretos produzidos	124
Tabela 4.7 – Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, corrigidos para a mesma base de não voláteis, de acordo com Hoppe Filho <i>et al.</i> (2017)	132
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados obtido em estado fresco e endurecido.	140
Tabela B.1 – Parâmetros da câmara de carbonatação enviados durante o período de ensaio.	164
Tabela B.2 – Parâmetros da câmara de carbonatação enviados durante o período de ensaio. (Continuação).....	165
Tabela C 1 - Valores individuais de resistência à compressão simples (MPa).....	166
Tabela C 2 - Valores individuais de absorção de água por imersão (%) e índice de vazios (%).	167
Tabela C 3 - Valores individuais de absorção de água por capilaridade (g/cm ²) e ascensão capilar (mm).	168
Tabela C 4 - Valores individuais de resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm).....	169
Tabela C 5 - Valores individuais de resistividade elétrica superficial (kΩ.cm).....	169
Tabela C 6 - Valores individuais obtidos no ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário.....	170
Tabela C 7 - Valores individuais obtidos no ensaio de carbonatação acelerada.....	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Pesquisas realizadas em materiais cimentícios utilizando sílica ativa e/ou nanossílica.....	41
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/agl	Água/aglomerante
B	Compacidade virtual
ϕ	Empacotamento real
a/c	Água/cimento
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AgCl	Cloreto de prata
AgNO ₃	Nitrato de prata
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CaCo ₃	Carbonato de Cálcio
Ca+(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CREF	Concreto de referência
CSF	Concreto com sílica ativa
CNS	Concreto com nanossílica
CSF-NS	Concreto com sílica ativa e nanossílica
CO ₂	Dióxido de carbono
CH	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CP	Cimento Portland
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de face centrada
CS	Cúbico simples
d1	Diâmetro maior
d2	Diâmetro menor
DF	Distrito Federal
DRX	Difratometria de raios-x
EDX	Espectroscopia por fluorescência de raio-x
DTG	Termogravimetria
IG	Instituto de Geociências
HNO ₃	Ácido Nítrico
ISO	Organização Internacional de Normalização
K	Índice de empacotamento
K _s	Coefficiente de sorvidade
LAI	Laboratório de Análise Instrumental
Ldh	Desidratação
Ldx	Desidroxilação

Ldc	Descarbonatação
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
MEC	Método do Empacotamento Compressível
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
MPa	Megapascal
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
NS	Nanossílica
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio
PSA	Polímero super absorvente
Qz	Quartzo
SAP	Polímero Superabsorvente
SF	Sílica Ativa
SiO	Óxido de silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de enxofre
TEMAC	Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado
TG	Termogravimetria
μm	Micrômetro
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
ZTI	Zona de transição à interface

1 INTRODUÇÃO

O setor construtivo apresenta uma alta demanda de materiais e como consequência há um aumento da taxa de emissão de CO₂ durante o processo de produção, exemplificado pelo processo de produção do cimento Portland, material base para produção de concreto. É nítido o interesse e o incentivo ao uso de materiais que substituam o cimento Portland no momento da dosagem do concreto. O mercado atualmente conta com vários materiais que possuem essa aplicação, além de proporcionarem melhoria em algumas propriedades do material.

O estudo de nanomateriais é um segmento que tem crescido nos últimos anos, possuindo novas e promissoras aplicações em materiais cimentícios. O uso de micro e nano partículas de sílica ativa, tem proporcionado melhoria nas propriedades dos materiais, além de uma maior durabilidade quando utilizadas nos compósitos cimentícios (ZHANG, 2019). Com essa utilização, é indispensável o estudo de suas propriedades físicas e químicas, além do seu comportamento juntamente com outros materiais em idades diferentes. Um dos produtos em escala nanométrica mais empregados é a nanossílica (NS) e, mesmo sendo largamente utilizada, suas aplicações e efeitos sobre as misturas em materiais cimentícios ainda não são completamente conhecidos (GEYER, 2019).

A nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que em substituição ao cimento Portland tem demonstrado uma melhoria na resistência dos materiais cimentícios e o aumento da resistência à penetração de água, que influencia fortemente na durabilidade (GLEIZE, 2011). Devido ao tamanho das partículas, a nanossílica apresenta uma elevada reatividade pozolânica, que é responsável por tornar a microestrutura dos materiais cimentícios mais densa. Como consequência dessa alteração, é capaz de reduzir o ingresso de água, que é considerado um dos principais fatores responsáveis por afetar a durabilidade dos materiais à base de cimento. Por suas dimensões reduzidas, os efeitos da NS em formulações cimentícias são potencializados, influenciando positivamente mesmo quando aplicada em teores relativamente baixos de até 5% (DU *et al.*, 2014).

Buscando melhorar as propriedades dos materiais cimentícios, o uso de partículas menores vem ganhando destaque nos estudos recentes, como os realizados por Biricik *et al.* (2014), Flores *et al.* (2017), Abd El Allem *et al.* (2014), Singh *et al.* (2015), Santos (2016), Andrade *et al.* (2019) e Agostinho (2017), Zhang *et al.* (2016), Crucho *et al.* (2019), Fraga (2019) e Fraga *et al.* (2020). Nos trabalhos citados são apresentados resultados em que, quando se utiliza nanossílica

em materiais cimentícios, a atuação da NS ocorre de maneira concentrada e mais significativa nas idades iniciais.

Além da questão sustentável, a utilização de materiais cimentícios pode sofrer degradação, o que em alguns casos resulta em enormes perdas econômicas. Diante disto, a melhoria da durabilidade dos materiais à base de cimento é de grande importância (ZHANG, 2019). A utilização de nano e micro partículas de sílica ativa vem se mostrando eficiente na melhoria das propriedades dos materiais cimentícios, principalmente naquelas relacionadas à durabilidade.

Du *et al.* (2014) destacam que pelo tamanho das partículas em escala nanométrica, a nanossílica apresenta uma elevada reatividade pozolânica, e que ainda é responsável por tornar a microestrutura dos materiais cimentícios mais densa reduzindo assim o ingresso de água, que é considerado um dos principais fatores responsáveis por afetar a durabilidade dos materiais.

De acordo com Gleize (2011), a nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que em substituição ao cimento Portland tem demonstrado uma melhoria na resistência dos materiais cimentícios e o aumento da resistência à penetração de água, que influencia fortemente na durabilidade.

Zhang *et al.* (2016) avaliam que a adição de sílica ativa juntamente com a nanossílica pode melhorar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, fato que se deve ao efeito sinérgico entre as partículas que atuam melhorando o empacotamento e aumentando os pontos de nucleação. Quando se trabalha com esses dois materiais em conjunto se tem ainda efeitos químicos e físicos, como redução dos poros capilares levando a menor absorção de água, a melhoria da zona de transição entre os agregados e aglomerante, incremento da resistência mecânica, principalmente em idades iniciais.

Essa pesquisa está inserida na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília. O trabalho possui a importância de mostrar e motivar a utilização de novos materiais no concreto, que se apresenta como uma alternativa inteligente propiciando melhorias significativas no comportamento e desempenho do material. O programa apresenta uma linha de pesquisa que vem se desenvolvendo com a utilização de nanomateriais, com destaque para as pesquisas de SANTOS (2016), SILVA JÚNIOR (2017), AGOSTINHO (2017), ANDRADE (2017), FRAGA (2019) e RIBEIRO (2019). Além das pesquisas no

segmento dos nanomateriais, o PECC também apresenta uma área de pesquisa bem desenvolvida e consolidada no estudo da durabilidade dos materiais.

1.1 Justificativa da pesquisa e importância do tema

É importante que se busque por um concreto que além de desempenhar a resistência requerida, apresente uma maior durabilidade, que garanta uma maior vida útil de uma edificação ou estrutura. A durabilidade das estruturas de concreto depende de diferentes fatores ligados à fase de projeto, produção e caracterização dos insumos, preparação do concreto, execução da estrutura e manutenções. Arelado às novas tipologias do concreto, como é o caso dos concretos autoadensável e de alto desempenho que colaboram para o aumento da durabilidade, tem-se também o uso de materiais cimentícios suplementares em substituição ao cimento Portland e o uso de nanomateriais. O tema desta pesquisa apresenta relevância justamente por estudar o empacotamento dos materiais utilizados na dosagem, desde o agregado graúdo até materiais com escala nano, como é o caso da nanossílica que foi utilizada, buscando analisar quais os impactos do seu uso juntamente com sílica ativa na durabilidade do concreto.

Não há dúvidas de que o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil. Com a evolução do segmento da construção e dos materiais empregados, foram surgindo novas alternativas e tipologias do concreto convencional, visando sempre a melhoria de suas propriedades e a busca por uma maior durabilidade de estruturas e edificações. Por meio do estudo do empacotamento dos materiais que serão utilizados no traço é possível que a dosagem do concreto seja otimizada e contribui ainda para a melhoria das propriedades do material.

Buscando melhorar as propriedades dos materiais cimentícios, o uso de partículas menores vem ganhando destaque nos estudos recentes e esse trabalho se enquadra nessa temática abordando o uso de sílica ativa e principalmente de nanossílica - materiais cimentícios que ganharam notoriedade nesses últimos anos.

Diante da utilização de novos materiais no concreto é importante estudar quais efeitos podem trazer e quais as modificações que podem ocorrer em relação à durabilidade do concreto. Além disso, é interessante conhecer o efeito da mistura ternária de sílica ativa com nanossílica no concreto.

Por meio da utilização da Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC), buscou-se fazer um levantamento quantitativo dos artigos publicados relacionados ao tema nos últimos

5 anos. Para a realização dessa pesquisa foram escolhidas duas bases de dados conceituadas e consolidadas no meio acadêmico. A primeira delas *Web of Science*, teve como resultado utilizando as palavras “concrete” e “nanosilica”, 271 artigos no total, sendo a maioria deles na China e Estados Unidos. Refinando a busca, acrescentando a palavra-chave “durability”, esse número de artigos encontrados reduziu para 121. Utilizando as mesmas palavras para a busca na base de dados *Scopus*, os resultados obtidos na primeira busca foram 247 artigos, e quando se refinou a busca acrescentando a palavra “durabilidade”, foram encontrados um total de 80 artigos, para o mesmo intervalo de tempo pré-definido de 5 anos.

O presente trabalho visa estudar a influência da adição de nanossílica e sílica ativa no concreto, em comparação com uma mistura de referência, avaliando as propriedades microestruturais, mecânicas e de durabilidade. Apesar do crescente número de pesquisas avaliando o comportamento do concreto com a adição da mistura de nanossílica e sílica ativa, a literatura apresenta poucos estudos voltados para comportamento do material desde escala microestrutural até as implicações na durabilidade em idades avançadas. Isso representa uma lacuna importante para a comunidade científica, mostrando a grande motivação deste estudo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar o efeito da adição de sílica ativa e nanossílica em concretos dosados considerando o empacotamento dos materiais, avaliando as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido.

1.2.2 Objetivos específicos

Para cumprir o que foi proposto no objetivo geral, foi necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Adaptar o uso do Método do Empacotamento Compressível (MEC) para dosagem de concreto de forma a utilizar sílica ativa, nanossílica e a mistura desses dois materiais;
- Observar por meio de um estudo piloto o comportamento do módulo de elasticidade de pastas de cimento Portland com adição de NS desde o estado plástico utilizando o EMM-ARM;

- Avaliar o comportamento dos concretos produzidos no estado fresco e endurecido;
- Avaliar a durabilidade dos concretos produzidos;
- Observar possíveis alterações microestruturais com a utilização dessas adições.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Este primeiro capítulo, de introdução, apresenta a relevância do tema, a justificativa do trabalho, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada como referência nesse trabalho. São abordados os temas de dosagem de concreto, método do empacotamento compressível (MEC), o uso de sílica ativa (SF) e nanossílica (NS) em materiais cimentícios e a durabilidade de concretos.

O terceiro capítulo trata da metodologia, apresentando todos os materiais utilizados e os respectivos métodos de caracterização, o método de dosagem utilizando o *software* Bétonlab Pro3. Além disso, contempla o estudo piloto em pastas de cimento, os ensaios realizados no estado fresco e endurecido, estudo para avaliação da durabilidade, ensaios de análise microestrutural e detalha como foi realizada a análise estatística.

No quarto capítulo são apresentados os resultados do ensaio piloto em pastas, os resultados de ensaios realizados em cada estado do concreto - fresco e endurecido, bem como o que foi obtido para o estudo de durabilidade e, por fim, resultado dos ensaios microestruturais realizados em pastas e suas respectivas análises.

No quinto e último capítulo estão as conclusões obtidas com a pesquisa, e ainda algumas sugestões para trabalhos futuros nessa linha temática.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre os principais conceitos abordados e pertinentes ao desenvolvimento da dissertação, como concreto, utilização da sílica ativa e nanossílica, empacotamento de materiais sólidos para dosagem de concretos e estudo da durabilidade.

2.1 Concreto e suas propriedades

Considerado um material amplamente utilizado na construção civil, é resultante da mistura, em quantidades racionais, de aglomerante, agregados e água basicamente. Logo após a mistura o concreto deve possuir propriedades suficientes que garantam operações de manuseio, transporte e lançamento em formas, adquirindo coesão e resistência com o passar do tempo, devido às reações de hidratação que ocorrem do aglomerante em contato com a água. Na maioria dos casos são adicionados aditivos que modificam suas características físicas e químicas, ou algum outro material que auxilia na obtenção das propriedades requeridas, como é o caso da sílica ativa e da nanossílica.

O concreto deve ser satisfatório atendendo a requisitos pré-determinados em dosagem tanto no estado endurecido quanto no estado fresco, enquanto transportado da betoneira e lançado nas fôrmas. No estado fresco, é imprescindível que a consistência da mistura permita que o concreto possa ser adensado pelos meios desejados sem esforço excessivo, e ainda que a mistura tenha coesão suficiente para que os meios de transporte e de lançamento adotados não produzam segregação com a conseqüente falta de homogeneidade do produto final. Já no estado endurecido, as principais exigências comuns são uma resistência à compressão satisfatória e uma durabilidade adequada para determinada situação e vida útil (NEVILLE, 2016).

É essencial controlar as propriedades no estado fresco do concreto, uma vez que, quando existe controle neste estado, conseqüentemente o concreto no estado endurecido também apresentará suas propriedades controladas, aumentando assim a possibilidade de se obter um concreto com maior qualidade (AÏTCIN, 2000).

É comum em traços com uma baixa relação água/aglomerante, que a reologia seja sensível a alterações na qualidade dos materiais utilizados, na formulação do concreto e na temperatura. Diante disso, é importante medir as propriedades do concreto no estado fresco, logo após o

processo de mistura. Proceder desta forma é a maneira mais simples de identificar algum problema durante a fase de produção, possibilitando uma correção rápida sempre que possível.

Aïtcin (2000) considera o ensaio de massa unitária simples e de fácil realização. Quando usada isoladamente, tal propriedade, pode não trazer respostas significativas. Porém, quando utilizada em conjunto com outras determinações das propriedades do estado fresco, como consistência e teor de ar, pode ser capaz de indicar alguma possível modificação das propriedades desejadas decorrente da produção.

A consistência é uma das principais propriedades a ser analisada no concreto no estado fresco, considerando que esta exerce influência nas propriedades do estado endurecido e conseqüentemente na sua funcionalidade. Esta propriedade afeta diretamente sobre a capacidade de bombeamento, pois determina a facilidade com que uma mistura de concreto será manipulada sem a ocorrência de segregação (MEHTA e MONTEIRO, 2014). No caso do abatimento, considera-se que ele depende diretamente de fatores que são relacionados ao esqueleto dos agregados e da quantidade de fluidez da pasta usada na mistura do concreto.

Neville (2013) destaca que em decorrência da perda de consistência do concreto, aditivos superplastificantes são utilizados buscando garantir esta propriedade. Estes produtos são eficazes quanto à prevenção da reaglomeração das partículas de cimento, as quais tendem a se repelir enquanto há moléculas de superplastificante disponíveis sobre sua superfície. Garcia-Taengua *et al.* (2015) comentam que a nanossílica afeta potencialmente a interatividade entre o cimento, superplastificantes e adições minerais. Normalmente aumentando-se os teores de nanossílica, a consistência no estado fresco tende a aumentar de forma significativa.

A resistência de um concreto e o seu desempenho final são influenciados pelos materiais que o constituem. Diante disso, é importante considerar além das propriedades do estado fresco e das características dos materiais, as suas propriedades no estado endurecido, que normalmente funcionam como base para dimensionamento de estruturas. Singh *et al.* (2015) relatam que a aplicação da nanossílica em sistemas cimentícios melhora a resistência mecânica, principalmente nas idades iniciais, devido às suas características, principalmente em relação ao tamanho das partículas.

2.2 Métodos de dosagem

A dosagem do concreto é considerada uma etapa em que se encontra as proporções adequadas entre os materiais que irão compor a mistura, com o propósito de se alcançar determinadas propriedades pré-estabelecidas no estado fresco e endurecido que foram previstas e ainda atendendo determinado orçamento, visando certo desempenho e durabilidade.

Formagini (2005) destaca que os métodos de dosagem foram sendo alterados com o passar do tempo e se tornando mais complexos. Não se tem mais a composição básica inicial que possuía apenas cimento, areia, brita e água, pois surgiram diversos materiais que também são utilizados na composição do concreto. Existem vários tipos de adições, aditivos, polímeros e fibras, cujas quantidades vão variar de acordo com a necessidade e propriedades exigidas para aplicação de determinado concreto, já que as condições de lançamento e adensamento são variáveis e particulares. Além disso, podem existir algumas situações que exijam maior resistência e durabilidade.

Dos métodos convencionais que existem para dosagem, alguns exemplos muito utilizados para concretos convencionais são o da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), o Método Helene & Terzian (IPT), da ACI (*American Concrete Institute*) e o BSI (Norma Britânica). Para o caso do concreto de alto desempenho, é comum utilizar na dosagem os métodos do Aïtcin, modificado Aïtcin-Faury e o de De Larrard.

O método proposto por De Larrard é diferente do que se existe para dosagem convencional, pois se baseia em um modelo de empacotamento das partículas para conseguir uma otimização do traço, atingindo uma compacidade máxima. Além de ser utilizado para dosagem de concretos de alto desempenho, esse método possui eficiência comprovada para concretos convencionais, jateados, com pós reativos, autoadensável e compactados a rolo (SEDRAN e DE LARRARD, 2002).

2.3 Método do empacotamento compressível (MEC)

Para De Larrard (1999), a dosagem de concretos é um problema principalmente de compacidade e densidade de empacotamento. Diante disso, o método proposto por ele, tem por objetivo fazer uma dosagem de concreto otimizada e obter uma proporção entre os grãos que resulte na maior massa unitária possível. O método do empacotamento compressível parte desse princípio, para encontrar a maior compacidade possível para um concreto com as características desejadas.

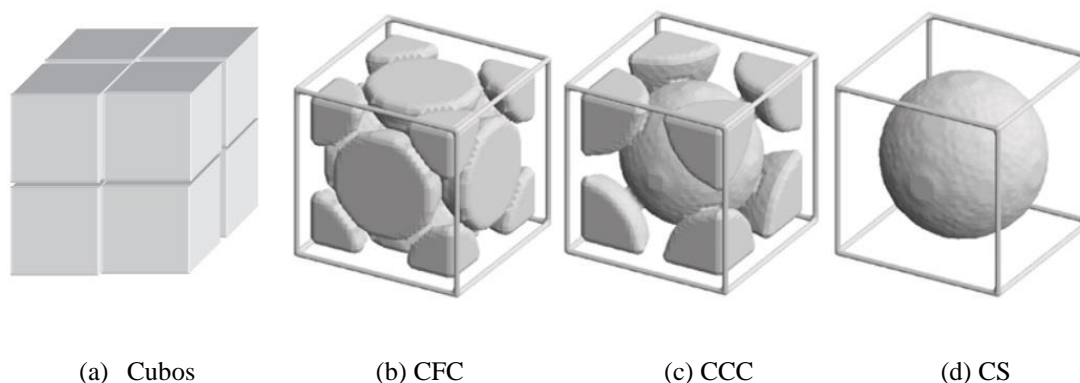
De Larrard (1999) em seus estudos propôs um modelo com dois módulos. O primeiro deles estabelece uma álgebra para o cálculo da compacidade virtual e o segundo relaciona essa álgebra com as propriedades reais da mistura. Ele propõe equações que relacionam o método com as características do concreto no estado fresco e endurecido. Uma vantagem da utilização do método é a existência de parâmetros científicos para otimizar as dosagens de concretos.

Silva (2004) destaca como vantagens do método do empacotamento compressível, o fato de ser fundamentado na observação dos fenômenos, levantamento de hipóteses, estabelecimento de modelos matemáticos que representam os fenômenos e nas comprovações experimentais dos modelos estabelecidos. O método contempla ainda a inclusão dos novos materiais que vem sendo utilizados nos concretos atualmente, como sílica ativa, fíler calcário e superplastificantes. Como pode ser testada a sua veracidade, os modelos desse método utilizam grande quantidade de dados experimentais. Além disso, outra característica considerada vantajosa é a possibilidade de ser implementado computacionalmente, permitindo dosagem com a utilização de *softwares*.

2.3.1 Conceitos fundamentais para aplicação do MEC

Para partículas cúbicas idênticas, consideradas de uma única classe granulométrica, funciona como um exemplo teórico em que a compacidade virtual de empacotamento seria a máxima possível para misturas granulares considerando empilhamento dos grãos um a um, ou seja, resultaria em $\beta = 1$. No caso de partículas esféricas idênticas, a compacidade virtual depende do tipo de arranjo que existe entre elas. Para o arranjo do tipo cúbico de face centrada (CFC), a compacidade virtual é $\beta = 0,74$, que é o maior valor possível de empacotamento para esferas. Porém, se as partículas apresentarem um arranjo cúbico de corpo centrado (CCC) ou cúbico simples (CS), a compacidade real terá valores de 0,68 e 0,52, respectivamente (CALLISTER, 2016), Figura 2.1.

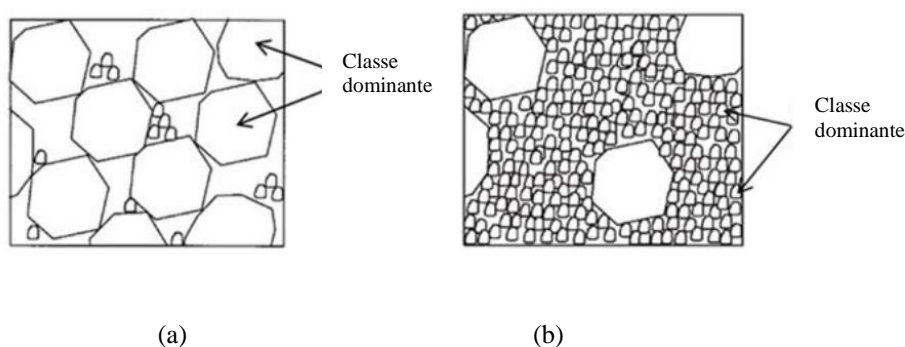
Figura 2.1 - Tipos de arranjos de partículas. (a) Cubos idênticos; (b) Cúbico de face centrada; (c) Cúbico de corpo centrado; (d) Cúbico simples



Fonte: Callister (2016).

Um conceito importante para utilização do MEC é a classe de grão dominante, responsável pelo empacotamento, já que garante a continuidade sólida da mistura. Em misturas binárias, composta por duas classes de grãos de dimensões diferentes, quando os grãos de maior dimensão são dominantes, as partículas menores preenchem os vazios deixados pelas partículas maiores, sem interferir na acomodação destas. O empacotamento máximo é atingido quando os grãos menores preenchem os vazios deixados entre os grãos de maiores dimensões. Quando os grãos da classe de menor dimensão pertencem a classe dominante, eles estão empacotados na porosidade das partículas de maior dimensão, Figura 2.2.

Figura 2.2 – Classes dominantes: (a) grãos de maior dimensão dominantes; (b) grãos de menor dimensão dominante

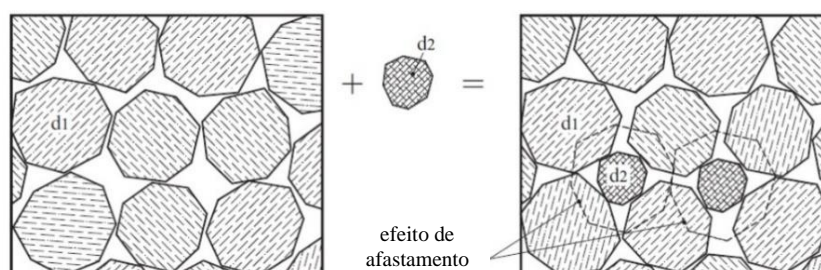


Fonte: De Larrard (1999)

Em seus estudos, De Larrard (1999) verificou que nas situações em que os grãos maiores são dominantes, ocorre o fenômeno de afastamento, quando os vazios deixados pelas partículas maiores são menores que a dimensão das partículas menores, e assim os grãos menores provocam um afastamento dos grãos maiores. Já em casos em que os grãos menores são

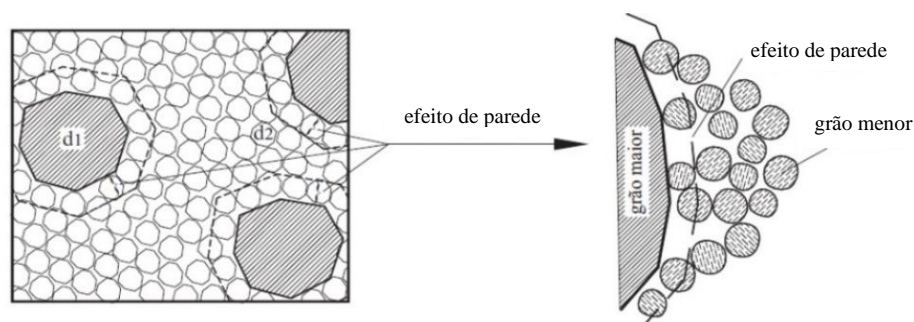
considerados dominantes, ocorre o chamado efeito parede, surgindo certa quantidade de vazios na superfície de contato entre as duas classes, devido à diferença significativa do tamanho entre as partículas, de forma que a superfície de contato do grão maior é praticamente plana, Figuras 2.3 e 2.4.

Figura 2.3 – Efeito afastamento



Fonte: De Larrard (1999).

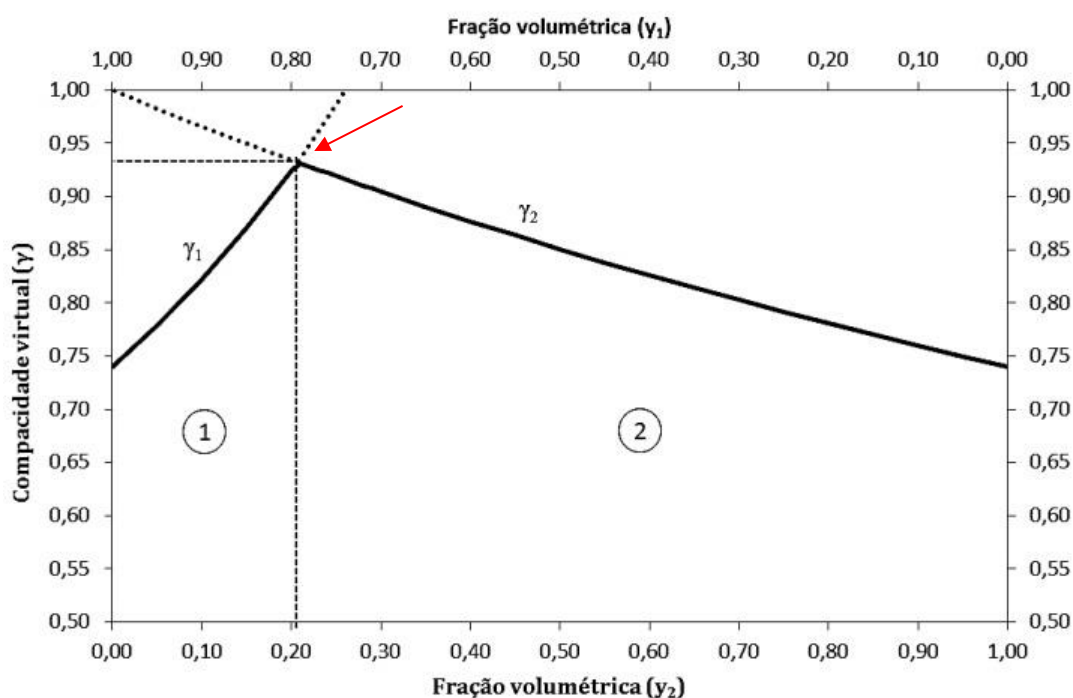
Figura 2.4 – Efeito parede



Fonte: De Larrard (1999).

Em uma mistura binária, constituída por duas classes granulares de diâmetro, d_1 (diâmetro maior) e d_2 (diâmetro menor), o domínio da classe formada pelos grãos maiores se estende até que os vazios deixados pelo seu empacotamento sejam preenchidos por completo pelos grãos finos. Desse ponto em diante, qualquer grão fino que for adicionado à mistura, irá produzir um afastamento dos grãos da classe maior ao ser encaixado. O máximo valor de empacotamento ocorre quando todos os espaços vazios da classe 1 são preenchidos pelos grãos da classe 2, o que ocorre no ponto $y_2 = 0,205$ da fração granulométrica, conforme Figura 2.5. A partir deste ponto, qualquer incremento de grãos finos só será possível se forem retirados grãos maiores (DE LARRARD, 1999).

Figura 2.5 – Compacidade virtual em estruturas binárias



Fonte : De Larrard (1999).

É importante discutir também sobre a compacidade dos materiais utilizados na mistura. O conceito de compacidade virtual (β), definida como a máxima compacidade que uma mistura granular monodispersa, cujas partículas apresentam aproximadamente mesmo tamanho, pode atingir empilhando-se os grãos um a um, sem alterar sua forma original, em um volume infinito.

A compacidade real que difere em alguns pontos da compacidade virtual. O empacotamento de misturas obtidas experimentalmente não pode ser considerado igual à compacidade (β) calculada pelo modelo de empacotamento virtual. No empacotamento virtual, considera-se como compacidade virtual (β), o maior empacotamento possível de se obter para uma mistura granular. Este empacotamento ocorre de forma teórica, como se os grãos fossem organizados, um a um, de forma a se obter o melhor arranjo possível.

O empacotamento real (ϕ) de uma mistura granular depende diretamente de alguns fatores como da distribuição granulométrica das partículas e do tipo de protocolo experimental de empacotamento utilizado. Por meio deste método é possível então correlacionar a compacidade virtual à compacidade real através de um parâmetro conhecido como índice de compactação K, índice que leva em consideração a energia associada ao procedimento experimental de empacotamento, de forma que quanto maior for esse índice, mais próxima a compacidade real

será da virtual. De Larrard (1999) obteve valores de índices de empacotamento (K), para diferentes protocolos de empacotamento, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Índice de empacotamento (K) para diferentes protocolos de empacotamento

Protocolo de empacotamento	Índice de empacotamento (K)
Lançamento simples	4,1
Lançamento + golpes com bastão	4,5
Vibração	4,75
Demanda d'água	6,7
Vibração + compactação	9
Concreto compactado ao rolo	12
Empacotamento virtual	∞

Fonte: De Larrard (1999).

O índice K é utilizado para obter experimentalmente a compacidade real, que se correlaciona por meio da Equação 1, com a compacidade virtual. O ensaio de compacidade é feito de duas maneiras distintas, variando de acordo com o diâmetro das partículas. Para diâmetros menores que $100 \mu m$ é feito o ensaio de demanda de água, e para diâmetros maiores que essa faixa granulométrica é feito o ensaio de compressão e vibração, que apresenta o valor de K igual à 9, que depende diretamente do método e equipamento de ensaio.

$$\beta = \frac{1+K}{K} \phi \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

β = compacidade virtual

K= índice de protocolo de empacotamento

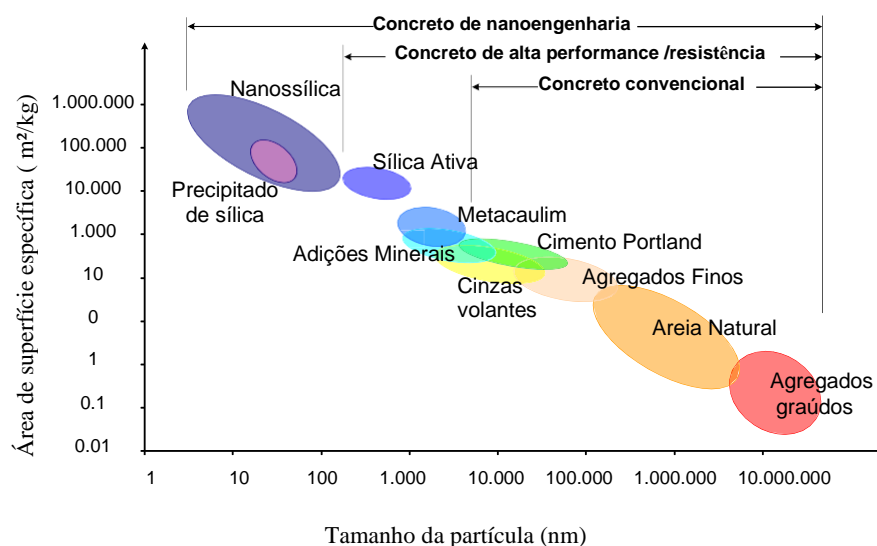
ϕ = empacotamento real

2.4 Efeito da Nanossílica em compósitos cimentícios

A incorporação de nanopartículas nos materiais cimentícios, tem como característica efeitos potencializadores tanto nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Biricik (2014), ressalta que as nanopartículas de sílica apresentam maior reatividade quando comparadas às partículas de mesma composição química em escala maior, uma vez que quanto menor é a partícula, maior é a superfície específica e, portanto, maior é a velocidade de ocorrência das reações químicas. Diante de tal fato, a nanossílica é muito utilizada em materiais cimentícios com o objetivo de conferir melhoria nas propriedades mecânicas e nas características microestruturais, contribuindo para materiais mais resistentes e duráveis.

Sobolev (2010) por meio de representação gráfica (Figura 2.6), demonstra os materiais utilizados em concreto quais os tipos de concreto produzidos com os diferentes componentes. Percebe-se que o uso de partículas de menor tamanho o concreto passa a possuir características de alta resistência.

Figura 2.6 - Tamanho de partícula e área de superfície específica relacionada aos materiais de concreto

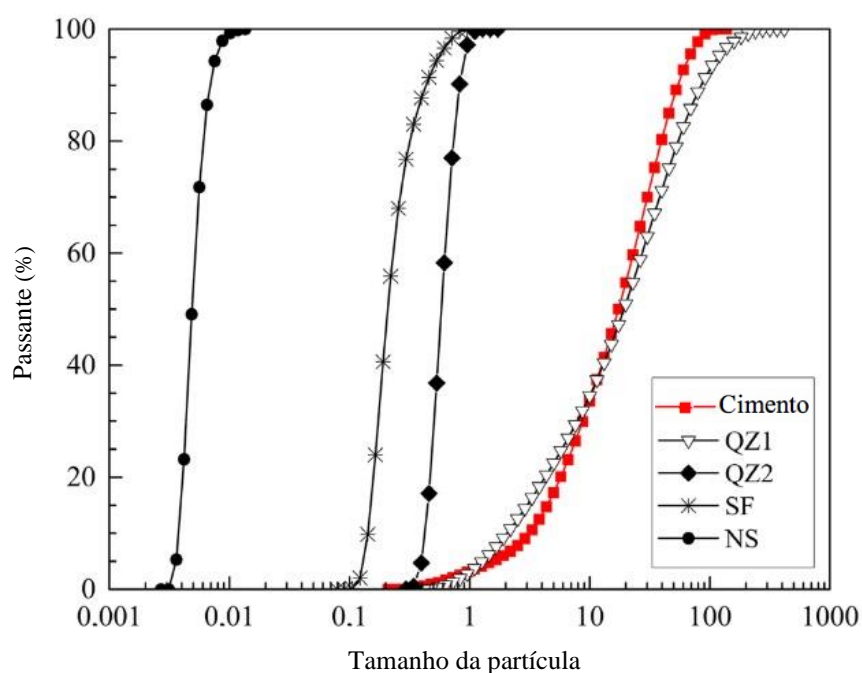


Fonte: Sobolev (2010).

De acordo com Biricik (2014), as partículas coloidais da nanossílica interagem com o hidróxido de cálcio, que surge durante a hidratação do cimento, criando ligantes de silicato de cálcio. Esses ligantes são responsáveis por produzirem uma estrutura de gel coesa que aumenta a densidade da pasta de cimento, reforça a estrutura entre os grãos de cimento e elimina a água livre.

Na Figura 2.7 é apresentada a distribuição granulométrica de quatro materiais: cimento, sílica ativa, quartzo e nanossílica. Analisando as curvas é possível observar que a nanossílica apresenta o menor tamanho de partículas quando comparada aos demais materiais. O menor tamanho das partículas justifica sua maior reatividade e a sua maior superfície específica.

Figura 2.7 – Comparação entre a granulometria dos materiais

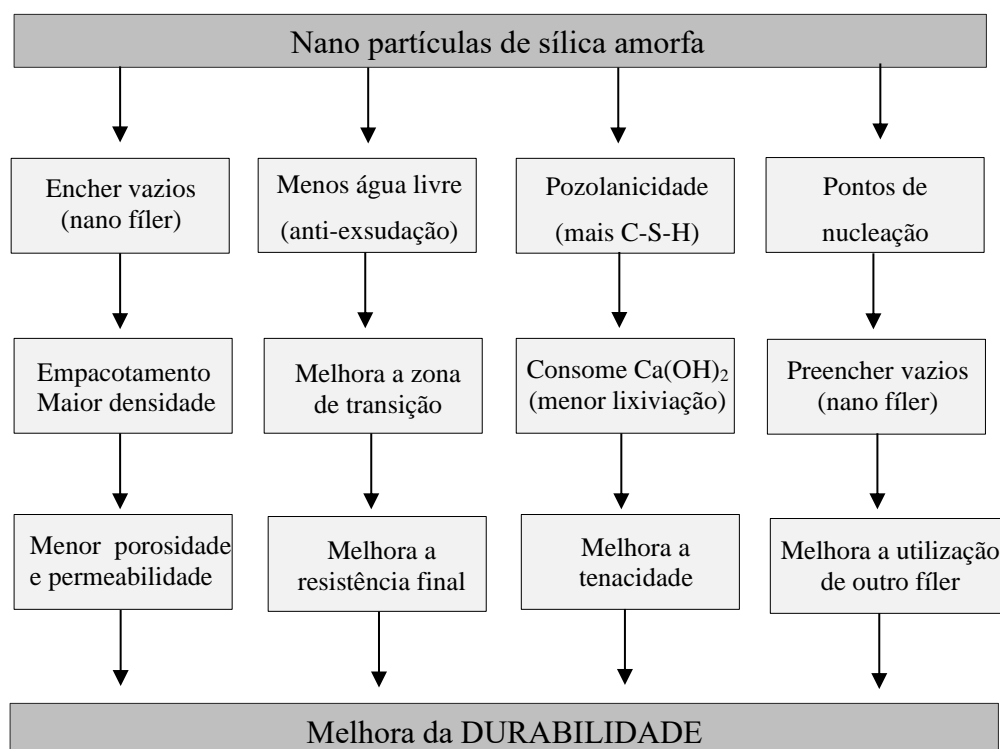


Fonte: Flores *et al.* (2017).

A incorporação da nanossílica em materiais cimentícios atua de forma química, como pozolana e de forma física, atuando como fíler. Na atuação química, a nanossílica reage rapidamente com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos resistentes de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que tendem a preencher os vazios capilares. Já na atuação física, as nanopartículas atuam como fíler, no preenchimento dos espaços intersticiais contribuindo para o refinamento da microestrutura. O efeito fíler está ligado ainda à formação de pontos de nucleação que contribuem para o aumento dos produtos de hidratação de cimento. Independente da forma de atuação, a nanossílica contribui para uma estrutura mais densa, menos porosa e com menor permeabilidade, conferindo maior resistência ao material (BIRICIK, 2014).

De acordo com Flores *et al.* (2017), a incorporação da nanossílica em pastas de cimento resulta em uma rede porosa mais refinada do que a incorporação da sílica ativa. Quanto menor o tamanho dos materiais cimentícios suplementares, maior o refinamento da estrutura porosa. Quercia (2014) enfatiza que os efeitos da nanossílica são significativos e propiciam melhoria no desempenho tanto mecânico como na durabilidade de concretos e argamassas. Na Figura 2.8 são apresentados esquematicamente os efeitos da adição no material.

Figura 2.8 – Efeitos da adição de nanossílica em argamassas e concretos

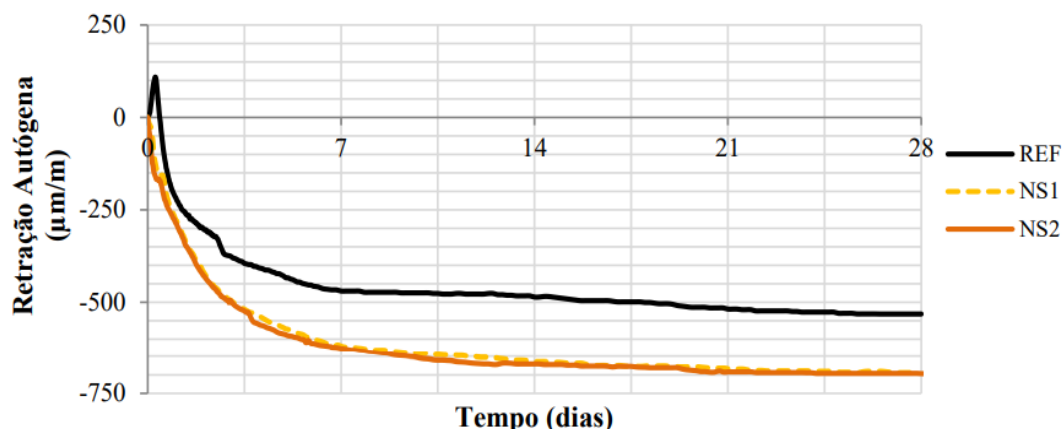


Fonte: Quercia, 2014.

O estudo proposto por Zhang *et al.* (2019) teve como foco a avaliação da durabilidade do concreto convencional, cobrindo-o com argamassa modificada com nanossílica. Para tal estudo utilizou princípios do empacotamento, para que fosse produzida uma argamassa com baixa porosidade e maior durabilidade, melhorada pela adição de NS. Obteve-se bons resultados, como diminuição no coeficiente de difusão de cloretos. Além disso, aumentou a resistência ao congelamento e melhorou a resistência à carbonatação do concreto. Por meio da técnica microestrutural de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível perceber uma ligação compactada entre o concreto e a argamassa produzida com adição de nanossílica.

Segundo Santos (2016), o uso da nanossílica em materiais cimentícios pode ter como efeito a ocorrência mais intensa de retração autógena. Como pode ser observado na Figura 2.9, os valores absolutos para a retração autógena nos traços com NS foram maiores que para os traços de referência na ordem de 8 a 10%. Proposta para mitigar tal efeito é adicionar polímero super absorvente à mistura.

Figura 2.9 - Retração autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência.



Fonte: Santos (2016).

Belkowitz *et al.* (2015) destaca que o aumento da retração em misturas com nanossílica pode ter relação com o aumento da temperatura durante o processo de hidratação, já que a NS apresenta elevado impacto na velocidade das reações de hidratação. Além disso, misturas contendo nanossílica são em geral menos porosas e, portanto, tem menos espaços para acomodar alterações volumétricas.

2.5 Efeito da Sílica ativa em compósitos cimentícios

A sílica ativa (SF) é um material pozolânico muito reativo devido às suas características como alto teor de SiO_2 , seu elevado grau de amorfismo e a sua granulometria muito fina. Esse material age de duas maneiras na microestrutura dos materiais cimentícios: o efeito pozolânico, considerado químico, no qual a sílica ativa reage com o CH (hidróxido de cálcio) liberado durante a hidratação do cimento, formando mais C-S-H (silicato de cálcio hidratado) que tende a preencher os vazios capilares e o efeito fíler, considerado como físico, que é responsável por densificar a microestrutura, uma vez que as pequenas partículas preenchem os espaços entre os grãos de cimento Portland, diminuindo a sua porosidade (LOTHENBACH *et al.*, 2011). A norma brasileira que estabelece os requisitos físicos e químicos para a utilização da sílica ativa em materiais cimentícios é a ABNT NBR 13956:2012. Segundo essa norma, a sílica ativa pode ser classificada em sílica ativa não densificada e sílica ativa densificada, variando de acordo com sua classificação, a densidade.

A SF é um pó fino pulverizado decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. É um produto de origem metalúrgica, o que lhe confere maior estabilidade quanto a sua composição química e física. No processo de fabricação do silício metálico, é gerado um gás

(SiO) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica ativa amorfa (SiO₂). As partículas de sílica ativa possuem formato esférico e possuem um diâmetro médio menor do que 1µm e área superficial específica entre 15 e 25 m²/kg, apresentando assim uma elevada superfície específica e uma massa específica aparentemente baixa (TECNOSIL, 2019). O alto teor de SiO₂ amorfo, aliado à sua elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação cimento, conferindo melhor desempenho a concretos e argamassa. A capacidade de reação às temperaturas normais com hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento hidratada e de tornar silicato de cálcio hidratado adicional ocasiona uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface.

Segundo o fabricante, suas principais vantagens estão relacionadas à sustentabilidade, pois leva à redução do consumo de cimento. Além disso, no âmbito das propriedades mecânicas é capaz de conferir uma baixa permeabilidade, melhorar a aderência pasta/armaduras e pasta/agregados e aumentar a coesão. Em se tratando da durabilidade de concretos e argamassas é capaz de melhorar o desempenho inibindo agressões químicas, penetração de íons cloreto, aumentar a resistência mecânica, apresentar alta resistência a ambientes agressivos, diminuir a exsudação e ainda melhorar desempenho a abrasão.

2.6 Efeito combinado da sílica ativa com a nanossílica

De acordo com a pesquisa realizada por Zhang *et al.* (2016), a adição da sílica ativa (SF) juntamente com a nanossílica (NS) pode melhorar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. Isso acontece devido à sinergia entre as partículas que melhora o empacotamento e aumenta os pontos de nucleação dos compósitos cimentícios.

Lincy (2018) realizou um estudo da durabilidade em concretos por meio de diferentes mecanismos de transporte, adicionando sílica a ativa e nanossílica. O uso da NS se mostrou mais benéfico pelo refinamento dos poros do concreto e maior resistência à absorção de água. Quando se adicionou nanossílica, foi possível observar uma microestrutura mais densa e compacta, com aumento de silicato de cálcio hidratado e redução do hidróxido de cálcio e, além disso, as zonas de transição interfaciais também ficaram mais compactas.

No Quadro 2.1 são apresentadas algumas pesquisas que foram realizadas nos últimos anos utilizando nanossílica (NS) e sílica ativa (SF), além da utilização juntamente com outros materiais. É possível observar quais resultados relevantes foram obtidos, bem como o ano e o autor responsável pela pesquisa.

Quadro 2.1 – Pesquisas realizadas em materiais cimentícios utilizando sílica ativa e/ou nanossílica.

Autor	Ano	Material	Resultado
CHEN <i>et al.</i>	2016	Sílica ativa e Nanossílica	Teores de 2%, 4% e 6% de NS ou SF aumentaram à resistência à compressão e à flexão de pastas ao se comparar com pastas de referência.
ZHANG <i>et al.</i>	2016	Sílica ativa e Nanossílica	No estudo da substituição de 10% de cimento Portland por sílica e nanossílica, variando SF de 7% a 10% e NS de 1% a 3%, resultou em uma maior resistência à compressão das pastas. Foi observado também um efeito sinérgico de SF com NS.
LI <i>et al.</i>	2017	Sílica ativa e Nanossílica	Estudou argamassas com substituição de cimento Portland por 1% e 2% de NS, 10% de SF, 1% de NS + 10% de SF e 2% de NS + 10% de SF. As misturas ternárias demandaram maior quantidade de aditivo, e se obteve melhoria nos valores de resistência à compressão.
ALONSO DOMINGUEZ <i>et al.</i>	2017	Sílica ativa e Nanossílica	Utilização de 4% de NS e 10% de SF, em pastas e argamassas ocasionou um refinamento na estrutura porosa. Foi observado ainda melhoria nas propriedades de durabilidade.
BHATTACHARYA E HARISH	2018	Sílica ativa	Foi observado que o desempenho da argamassa com 4% de SF foi superior ao desempenho mecânico da argamassa com 8% de SF, sendo ambas superiores à argamassa referência. Porém, ao utilizar o teor de 12% de substituição a argamassa resultou em menor resistência à compressão que a argamassa referência.
GHODDOUSI <i>et al.</i>	2018	Sílica ativa e Nanossílica	Variando os teores de NS e SF, com 2%NS + 10%SF, atingiu-se uma resistência à compressão 22% maior que a pasta de referência. Tal ocorrência se justifica pelo efeito de nano preenchimento dos poros, ao efeito de nucleação e à reação pozolânica durante a hidratação.
SHAFIQ <i>et al.</i>	2019	Metacaulim e Nanossílica	Utilização da NS na modificação do metacaulim para avaliação de propriedades mecânicas e de durabilidade. Uma mistura de 10% MK + 1% NS resultou nos melhores resultados para as propriedades mecânicas avaliadas no estudo.

Quadro 2.1 – Pesquisas realizadas em materiais cimentícios utilizando sílica ativa e/ou nanossílica (Continuação).

ANDRADE <i>et al.</i>	2019	Sílica ativa e Nanossílica	NS apresenta maior superfície específica que a SF, portanto pastas com NS exigiram maior teor de aditivo superplastificante. Com NS, observou-se a reação pozolânica até 3 dias de hidratação, enquanto com SF essa reação só foi observada após 7 dias de hidratação. Foi identificado um efeito sinérgico de SF com NS.
FRAGA	2019	Sílica ativa e nanossílica	Ao ultrasonicar a SF, houve maior produção de C-S-H, maior refinamento dos poros e maior resistência à compressão. Já na NS não resultou em diferenças significativas na microestrutura e no desempenho mecânico das pastas. Foi observado o aumento significativo da resistência à compressão com 1 e 3 dias da pasta com SF e NS coloidal ultrasonicadas em conjunto. A ultrasonicação das misturas ternárias alterou a morfologia do C-S-H e refinou a estrutura porosa das pastas.
NASCIMENTO FILHO	2019	Nanossílica	Avaliou a influência da relação água cimento (a/c) na atuação da nanossílica em dispersão coloidal nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas de cimento Portland. Foram propostas relações a/c de 0,35 e 0,50, para argamassas com traço 1:3, utilizando 1% de NS em relação à massa de cimento. Utilizando a menor relação a/c, observou-se um acréscimo de 10% de resistência mecânica.
ANDRADE <i>et al.</i>	2019	Sílica ativa e Nanossílica	NS apresenta maior superfície específica que a SF, portanto pastas com NS exigiram maior teor de aditivo superplastificante. Com NS, observou-se a reação pozolânica até 3 dias de hidratação, enquanto com SF essa reação só foi observada após 7 dias de hidratação. Foi identificado um efeito sinérgico de SF com NS.
AZAMBUJA <i>et al.</i>	2019	Sílica ativa	Avaliaram a durabilidade de microconcretos com adição de sílica ativa com a utilização de polímero superabsorvente (SAP), visando diminuição dos efeitos de retração. A adição do SAP tornou o material mais resistente à entrada de íons de cloreto, contribuindo para maior durabilidade.

Quadro 2.1 – Pesquisas realizadas em materiais cimentícios utilizando sílica ativa e/ou nanossílica (Continuação).

TAWFIK <i>et al.</i>	2020	Nanossílica e resíduo de cerâmica	Produziu concretos com resíduo de cerâmica de construção (2 a 10 %) civil e nanossílica (1 a 4%) em substituição ao cimento, avaliando propriedades mecânicas e por meio de ensaios não destrutivos. Melhoria no desempenho foi encontrada principalmente na combinação 3% de NS e 6% de resíduo.
ALKHATIB <i>et al.</i>	2020	Nanossílica e resíduo industrial	Incorporação de resíduo industrial (pó de forno de cimento) em concreto de alto desempenho para análise de propriedades mecânicas e de durabilidade. O uso apenas do resíduo interferiu negativamente nas propriedades mecânicas, enquanto a resistência com NS aumentou. Já a combinação dos dois materiais reduziu a permeabilidade do concreto, proporcionou um micro estrutura mais densa e a zona de transição interfacial compacta.
FRAGA <i>et al.</i>	2020	Sílica ativa	Utilização de sílica ativa densificada e não densificada em micro concretos. A sílica não densificada proporcionou maior consumo do hidróxido de cálcio e menor relação cálcio/sílica (Ca/Si) da matriz cimentícia, resultando em maior resistência à compressão do microconcreto.

Através das pesquisas apresentadas foi possível constatar que com a utilização da sílica ativa e/ou da nanossílica em materiais cimentícios, houve aumento no desempenho mecânico em comparação com as amostras somente com cimento Portland. A diferença percebida no desempenho mecânico ocorreu devido à alteração da microestrutura dos materiais cimentícios estudados contendo sílica ativa e/ou nanossílica. Foi possível observar que ainda há necessidade de estudos relacionados aos impactos e consequências da utilização de NS e SF na durabilidade de materiais cimentícios.

Com base nos trabalhos recentes elencados no Quadro 2.1, ficou evidente que os estudos não analisaram o comportamento de materiais cimentícios com utilização de sílica ativa e nanossílica e os efeitos e consequências de tal uso desde a transição suspensão sólido até os impactos e implicações nos parâmetros de durabilidade a longo prazo. Chen *et al.* (2016)

analisaram o comportamento mecânico, assim como Zhang *et al.* (2016) avaliaram a resistência à compressão com diferentes teores de NS e SF, observações também obtidas por Li *et al.* (2017). Alonso Dominguez *et al.* (2017) e Lincy (2018), analisaram propriedades relacionadas a durabilidade. Já Fraga (2019) focou seus estudos em pastas cimentícias e suas propriedades microestruturais, utilizando NS ultrasonicada.

2.7 Durabilidade dos concretos

Nos concretos que se deseja determinadas características específicas, é recorrente o uso de adições que antes não eram empregadas. Dependendo do material e da proporção empregada, tem a capacidade de alterar suas propriedades macroscópicas e microestruturais, contribuindo para uma maior durabilidade dos elementos e estruturas de concreto. Aplicação recente para exemplificar essa alteração se tem com o uso de sílica ativa, nanossílica e até mesmo da mistura desses dois materiais em um único traço de material cimentício.

Neville e Brooks (2013) considera que, na maioria dos casos, a degradação de um elemento ou estrutura de concreto é resultado do efeito conjunto e simultâneo de fatores ambientais e carregamentos. A perda de durabilidade, pode ser associada tanto a fatores físicos, como é o caso do desgaste físico e das fissuras, como também a fatores químicos que englobam carbonatação e penetração de cloretos, que podem causar danos como uma possível despassivação da armadura, ataques por sulfatos e até mesmo ataques biológicos por fungos e bactérias (METHA e MONTEIRO, 2014).

A interação entre o elemento de concreto e o ambiente de exposição é influenciado na maioria das vezes pela porosidade do concreto, concentração de substâncias no ambiente e os seus mecanismos de transporte, por meio do concreto. Os materiais utilizados na dosagem de concreto são capazes de funcionar como uma barreira para a entrada de agentes agressivos presentes no ambiente externo.

2.7.1 Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto

A estrutura porosa e os mecanismos de transporte do concreto, podem ser alterados através do emprego de adições minerais ou de cimentos binários ou ternários. As adições utilizadas em materiais cimentícios tem por capacidade, alterar a microestrutura do material, o que influi diretamente nos mecanismos de transporte de agentes agressivos pelo concreto, pastas e/ou argamassas.

Como a durabilidade dos concretos está ligada diretamente à sua microestrutura é, portanto, essencial estudar a estrutura dos poros do concreto, bem como os mecanismos de transporte dos agentes agressivos capazes de influenciar na durabilidade do material.

Os mecanismos de transporte apresentam possibilidade de atuação combinada o que acaba intensificando o transporte de agentes agressivos. Portanto seu estudo e entendimento são fundamentais para o estudo proposto envolvendo durabilidade de concretos com adição de sílica ativa e nanossílica.

2.7.1.1 Permeabilidade

Para materiais cimentícios, em especial os concretos, a sua durabilidade também se relaciona com a propriedade macroscópica da permeabilidade. Concretos considerados duráveis, normalmente tem por característica baixa permeabilidade, o que limite consideravelmente a penetração de agentes agressivos, considerando as condições de exposição ao ambiente.

A permeabilidade é um mecanismo de transporte comumente observado em concretos. Nesse processo acontece basicamente o transporte com facilidade de um fluido por um meio poroso, por meio da ação de diferença de pressão (SILVA, 2019).

Visando aumentar a durabilidade de concretos, é interessante reduzir a permeabilidade do material. Segundo Vilasboas (2013) o mecanismo de permeabilidade acontece através da pasta de cimento hidratado, do agregado, da zona de transição pasta-agregado, principalmente quando se trata dos agregados graúdos que proporcionam maior facilidade de percolação de fluidos, e de fissuras e fendas decorrentes de defeitos em grandes volumes de concreto.

Fatores capazes de alterar o volume e a conectividade dos poros capilares do concreto, podem influenciar na permeabilidade do material. Como exemplo desses fatores influenciadores na permeabilidade é possível destacar a relação água/cimento, o consumo de cimento, o teor de agregados, emprego de adições minerais e o grau de hidratação (SANTOS, 2006).

A permeabilidade não depende das propriedades do líquido, e sim das características do material, podendo ser representada por um coeficiente (KROPP *et al.*, 1995), aplicando a lei de Darcy para um fluxo laminar, estacionário e não turbulento através de um meio poroso, conforme a Equação 2:

$$Vf = \frac{Kh.A.H}{L} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

V_f = velocidade de escoamento do fluido (m^3/s);

K_h = permeabilidade hidráulica (m/s);

A = seção do meio poroso (m^2);

H = altura da coluna d'água (m);

L = comprimento da amostra (m)

Os poros capilares se tornam cada vez mais estreitos à medida que se reduz a relação a/c, diminuindo com isso, a permeabilidade e a comunicação entre os poros. Fato também observado quando se utiliza adições nos materiais cimentícios que atuando no refinamento dos poros, como é o caso de sílica ativa e também desse material em escala nanométrica.

Zhang *et al.* (2012) avaliaram a penetrabilidade de cloretos em concretos. Eles fixaram a relação ag/lig em 0,45 e produziram concretos contendo alto teor de escória de alto forno (50%) como referência e adicionaram a estes concretos 2% de sílica ativa e 2% de nanossílica, em relação a massa de material cimentício. Os autores constataram que os concretos com nanossílica obtiveram melhor desempenho em tendo uma redução de 25% para o concreto de referência e 20% para o concreto com adição de sílica ativa.

Du *et al.* (2015) realizaram um trabalho no qual foram elaborados concretos com relação ag/lig fixa de 0,42. Os autores avaliaram a penetrabilidade de cloretos em concretos sem adição mineral, com adição de nanossílica (1 e 2%) e com adição combinada de escória de alto forno e nanossílica. Eles constataram que os concretos com nanossílica e escória de alto forno apresentaram maior resistência à penetração de cloretos que os concretos de referência e obtiveram uma redução de 23% na penetrabilidade de cloretos. Os autores também avaliaram a difusão de cloretos e observaram comportamento semelhante à penetrabilidade de cloretos. Os concretos ternários com cimento, escória de alto forno e 2% de nanossílica apresentaram redução de quase 80% em relação aos concretos sem nenhum tipo de adição.

2.7.1.2 Absorção por sucção capilar

Ribeiro *et al.* (2014) define a absorção capilar como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. No concreto pode ser caracterizada como um transporte de líquidos devido à tensão superficial que atua nos poros capilares. Ressalta-se que esse fenômeno só ocorre quando o concreto não está saturado.

Medeiros (2008) define que o mecanismo de absorção por capilaridade é um dos maiores causadores do ingresso de cloretos no concreto, em situações que exista um ciclo favorável de umedecimento e secagem. Lara (2003), o fenômeno da absorção capilar é dependente de algumas características do líquido como viscosidade, densidade e tensão superficial, e também características do sólido, como o raio do poro, tortuosidade, continuidade dos poros e energia superficial.

Quando os líquidos possuem como característica uma viscosidade elevada, Cascudo (1997) observou que a penetração em concretos é mais difícil. Além do que, verificou que quanto mais elevada é a tensão superficial no interior dos poros, maior também é a ascensão capilar. É comum observar que em poros capilares com menor diâmetro, as pressões capilares são maiores e por consequência, mais rapidamente e com maior intensidade ocorre o mecanismo da absorção. Dependendo da adição utilizada nos materiais cimentícios, elas são capazes de modificar o arranjo interno dos componentes da mistura, trazendo impactos diretos para a rede porosa do material cimentício, podendo alterar não só o tamanho dos poros como também a sua distribuição.

A microestrutura porosa tem influência determinante na absorção capilar, quer seja no volume da água absorvido, na velocidade de absorção, como também na altura de sucção. Em muitos casos, o comportamento microestrutural de um material reflete no seu comportamento macroestrutural, inclusive na sua durabilidade no decorrer do tempo.

2.7.1.3 Difusão

Quando se tem um sistema de poros saturado, em situações de pressões normais, ocorre predominantemente a difusão iônica, que é basicamente um processo em que se tem o transporte de substâncias de um meio para outro através da existência de um gradiente de concentração (GUIMARÃES, 1997).

Pinto (2016) destaca que o fenômeno da difusão é influenciado pela variação da concentração de íons na superfície, variação do coeficiente de difusão, pela idade do material cimentício, pela variação da temperatura e ainda, grau de saturação do concreto ou pelas adições utilizadas, por exemplo. Para que ocorra a movimentação de íons cloro dentro do concreto pelo mecanismo da difusão, é necessário a existência de um cloreto e conexão entre os capilares.

A difusão ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso e é um fenômeno que controla a penetração de íons de cloreto e dióxido de carbono,

considerados os agentes agressivos responsáveis por comprometer as armaduras no caso de concretos armados (SANTOS, 2006).

O fluxo por difusão é caracterizado pelo fluxo constante das substâncias, e não depende do tempo e do sentido do fluxo. O fluxo é representado pela 1ª Lei de Fick, na qual o coeficiente de difusão no estado estacionário dado pela Equação 3:

$$qm = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

qm representa o fluxo de massa;
 x é a profundidade de penetração de íons;
 C é a concentração;
 D é o coeficiente de difusão.

Em situações práticas e reais, o processo de difusão de agentes agressivos pelo concreto não é constante, ocorrendo variações de concentração ao longo do tempo e também de exposição. Diante do exposto, é importante associar ao fluxo por difusão no estado não estacionário, o qual é dependente do tempo e da profundidade de penetração e pode ser representado pela 2ª Lei de Fick (Equação 4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 4})$$

Madani *et al.* (2014) estudaram o efeito de vários tipos de nanossílica tendo como referência concretos sem adição mineral e concretos com diferentes teores de sílica ativa, na penetrabilidade e difusão de cloretos. Observou-se que os concretos com adição de nanossílica apresentam desempenho superior aos concretos sem adição mineral e os com sílica ativa nas primeiras idades. Nas idades mais avançadas, os concretos com sílica ativa são os que apresentam melhor desempenho, isso pode ser explicado pela reação pozolânica da sílica ativa que ocorre de forma gradativa com o passar do tempo.

2.7.1.4 Migração iônica

Ribeiro *et al.* (2014) define que o mecanismo da migração iônica consiste no transporte decorrente da diferença de potencial elétrico que permite o deslocamento de íons. Nepomuceno (2005) destaca que este processo pode ocorrer em estruturas com passagem de corrente elétrica,

concretos com proteção catódica, estruturas submetidas à extração de cloretos e à realcalinização pela aplicação de uma diferença de potencial.

O ensaio de migração de cloretos, por exemplo, é feito com o intuito de medir a resistência dos concretos à penetração de cloretos, por meio da aplicação de uma diferença de potencial elétrico nas extremidades da amostra de concreto, forçando os íons a migrar de um potencial para outro. Esse tipo de ensaio permite a obtenção indireta de coeficientes de difusão de uma forma mais rápida (MITTRI, 2016).

2.7.2 Absorção de água

A durabilidade das estruturas de concreto é influenciada pela permeabilidade deste material, fator que tem relação direta com a absorção de água do concreto no seu estado endurecido. O arranjo dos poros diz muito sobre o comportamento do material submetido à absorção de água. No caso de um grande volume de poros e interligação entre eles, haverá uma contribuição para o deslocamento de fluidos através do concreto, aumentando a permeabilidade. Em situações de poros descontínuos, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo que exista um volume de poros elevados no material. Ressalta-se que a permeabilidade do concreto depende principalmente da rede de poros capilares, uma vez que resistem menos ao movimento da água. (CARRIJO, 2005).

Existem algumas alternativas que podem contribuir para a diminuição da porosidade dos concretos. Dentre as possibilidades que proporcionam tal redução está a utilização de baixa relação a/c, consumo adequado de cimento Portland e cura eficiente e correta. Nos últimos anos, o uso de adições minerais, como a sílica ativa, por exemplo, tem reduzido o tamanho dos poros, auxiliando na redução da velocidade de transporte de agentes agressivos. A causa dessa redução está relacionada com a formação de uma matriz cimentícia densa, com menor quantidade de poros interconectados (MEIRA, 2017).

A absorção de água, geralmente é analisada pela realização de dois tipos de ensaios, a absorção por imersão e a absorção por capilaridade. Levy (2001) destaca que a absorção por imersão é a técnica que caracteriza da melhor forma a estrutura dos poros, por permitir avaliar a quantidade total de água absorvida. Para Alexandridou *et al.* (2018), o ensaio de absorção de água por imersão é utilizado para avaliar a porosidade aberta do concreto, que dependente de fatores como porosidade do agregado, do ar incorporado após a mistura e do excesso de água além da quantidade necessária à hidratação do cimento. A absorção por capilaridade é utilizada ainda

para avaliação da permeabilidade, no entanto é efetiva para análise em casos especiais, em que o concreto não esteja saturado.

Khanzadi *et al.* (2010) avaliaram a influência da adição de partículas de nanossílica (1,5 % de substituição em massa) na absorção de água de concretos. Os autores concluíram que os concretos contendo nanossílica apresentam maior resistência à permeabilidade quando comparados aos concretos de referência estudados.

Diante da influência da nanossílica nas propriedades de transporte do concreto é possível citar o trabalho desenvolvido por Ghafari *et al.* (2014), que estudaram o efeito da nanossílica em concretos de baixa relação ag/lig (0,16), tendo sido utilizados teores de 1, 2, 3 e 4%, em relação à massa de cimento. Foi constatado que o concreto com teor de 3% apresentou melhor resultado em relação às propriedades de transporte estudadas, em relação à absorção capilar, permeabilidade ao gás e absorção de água.

Massana *et al.* (2018) avaliaram a influência da combinação da nanossílica coloidal e sílica ativa na absorção capilar de concreto, relataram que as misturas ternárias absorveram menor quantidade de água no concreto na idade de 28 dias, sem diferença acentuada de absorção entre os teores 0,35 S2,5N2,5, 0,35 S2,5N5 e 0,35 S5N2,5. Os autores associaram esse comportamento ao melhor empacotamento do sistema, o qual reduziu a porosidade da matriz de cimento hidratada e aumentou a durabilidade do material.

2.7.3 Resistividade elétrica

A resistividade do concreto é caracterizada pela sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Pode ser definida como a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção transversal constante, na qual a corrente é uniforme e continuamente distribuída, ou seja, resistência elétrica entre as faces opostas (SANTOS, 2006). A resistividade se relaciona com a microestrutura do concreto, do volume, da distribuição do tamanho de poros e mobilidade dos íons presentes na solução aquosa da estrutura dos poros (WHITING; NAGI, 2003). A densificação da matriz e aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, mais tortuoso e descontínuos, dificultam a condução da corrente no concreto e aumentam a resistividade elétrica. Conforme Costa e Azzi (2017), quanto mais poroso um concreto, menor será sua resistividade elétrica e conseqüentemente maior a possibilidade de ocorrer a corrosão.

Um valor de resistividade reduzido indica maior facilidade no transporte de cargas elétricas das zonas catódicas para as anódicas, o que implica, caso a armadura esteja despassivada, o

processo corrosivo da armadura acontece em maior velocidade (RIBEIRO *et al.*, 2014). Santos (2006) considera a resistividade do concreto como uma propriedade sensível às suas características microestruturais. Portanto, a proporção de materiais na mistura, a relação água/cimento, o tipo e quantidade de agregados, o consumo de cimento e a utilização de adições minerais e de aditivos são fatores que a influenciam. Além disso, características ambientais, como temperatura e umidade relativa, e a ação de agentes agressivos também influenciam nesta propriedade.

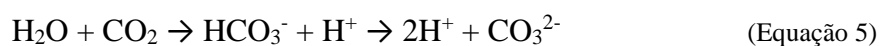
Farias (2019) ressalta que a presença de materiais cimentícios suplementares também são capazes de influenciar na resistividade elétrica do concreto. Estes materiais alteram a microestrutura da matriz do concreto, o refinamento da estrutura de poros, proporcionando consequentemente um aumento na resistividade.

2.7.4 Carbonatação

A carbonatação em concretos é responsável pela diminuição do pH e por despassivar a armadura, o que pode desencadear o processo de corrosão de armaduras, que se inicia basicamente quando a armadura é despassivada e há presença de umidade. Tal fenômeno pode, em muitos casos, comprometer a durabilidade das estruturas, afetando também a sua segurança (SILVA, 2007).

Para a ocorrência da carbonatação acelerada é necessária a presença de CO₂ e de um certo teor de umidade na atmosfera. O processo é considerado físico-químico e nele o dióxido de carbono (CO₂) presente no ar consegue penetrar no concreto por meio do mecanismo de difusão, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando assim, o carbonato de cálcio (CaCO₃), responsável pela redução da alcalinidade (MAZZA, 2015).

Taylor (1997) destaca que quando o CO₂ penetra no concreto, ele é dissolvido em água presente nos poros da pasta de cimento, formando ácido carbônico, conforme Equação 5. Devido as hidroxilas e íons de Ca²⁺ (Equação 6), a dissolução dos aluminatos e silicatos hidratados resultantes da hidratação do cimento, alteram a alcalinidade da água presente nos poros para um pH alto, entre 13 e 14. A reação entre os íons carbonatos oriundos do CO₂ com os álcalis de cálcio (Ca²⁺), formam o carbonato de cálcio que tem pH em torno de 9, havendo assim, uma conversão dos compostos hidratados em elementos menos alcalinos (Equação 7).





Neville (2013) destaca que a carbonatação é influenciada por vários fatores, entre eles a umidade relativa do ambiente, com maior intensidade em ambientes com umidade relativa de 50 a 70%; saturação dos poros da matriz cimentícia; porosidade do concreto; relação água/cimento e presença de fissuras no concreto. O seu principal efeito maléfico decorre da redução do pH do CaCO_3 , o que altera as condições de estabilidade química da película passivadora do aço (TAYLOR, 1997).

Como as condições de exposição naturais são em torno de 0,03 a 1% de CO_2 , o processo de carbonatação acontece lentamente ao longo dos anos. Para fins de investigação e pesquisas, é comum utilizar sistemas de ensaios acelerados, que submetem o concreto a elevados teores de CO_2 com um controle rígido das condições de exposição, além de CO_2 , umidade e temperatura (RICHARDSON, 1988).

Segundo Richardson (1988), por meio da profundidade de carbonatação medida experimentalmente, é possível estimar a velocidade de carbonatação do concreto através da determinação do coeficiente de carbonatação (K), dependente do ambiente e do material. A determinação do K pode ser feita utilizando a Equação 8, que mostra claramente que a relação entre a profundidade de carbonatação e a idade de concreto é não linear.

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

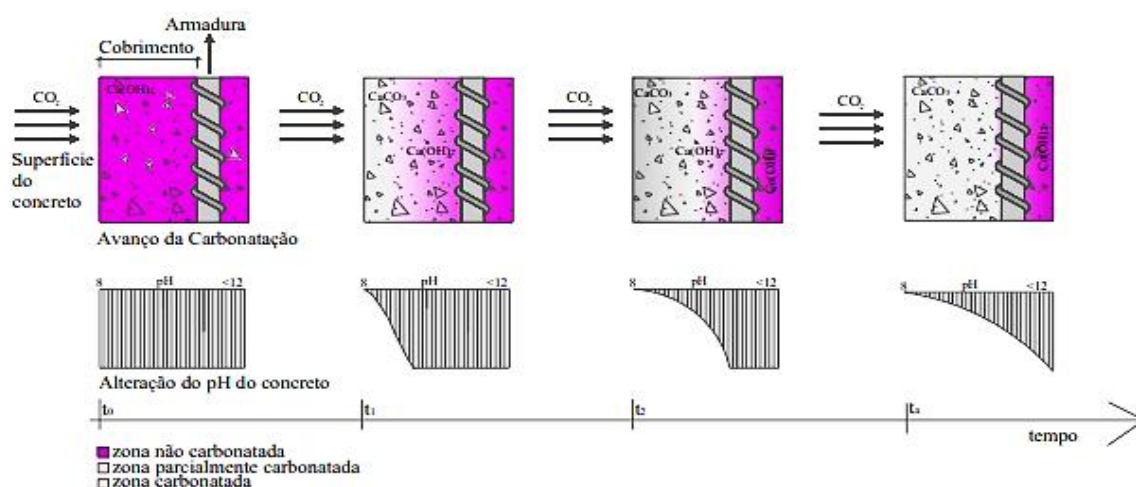
x é a profundidade de carbonatação em mm;

K é o coeficiente de carbonatação em mm/semana^{0,5}

t é o tempo de exposição ao ambiente acelerado de carbonatação, em semanas.

O principal efeito da carbonatação é diminuição da alcalinidade do concreto, ou seja, diminuição do seu pH (potencial hidrogeniônico). O seu pH que normalmente é em torno de 12,5 se reduz a 8,5. Possan (2010) identificou três zonas distintas no concreto quando ocorre carbonatação: uma carbonatada com pH inferior a 8,5, uma parcialmente carbonatada com pH aproximadamente 10 e uma zona não carbonatada com pH maior que 12,5. Este processo é iniciado primeiramente na superfície do concreto, formando a frente de carbonatação, que podem atingir a armadura no interior do concreto, Figura 2.10.

Figura 2.10 - Representação do avanço da frente de carbonatação no concreto e alteração do pH em função do tempo.



Fonte: Possan (2010).

Na figura apresentada está evidente que o avanço da frente de carbonatação do concreto ocorre em função do tempo. No tempo t_0 , o concreto tem pH inalterado, sem zona carbonatada. Com o ingresso de CO_2 (t_1 e t_2) ocorre a formação do CaCO_3 e a conseqüente redução do pH do concreto. Quando chega na armadura, ela se encontra despassivada, susceptível então à corrosão.

Os resultados de pesquisas e estudos envolvendo o mecanismo de carbonatação de concretos, apresenta dificuldades ao comparar resultados obtidos, uma vez que não há uma padronização no procedimento de ensaio, variando-se as dimensões e formato dos corpos de prova, a umidade, os teores de CO_2 , o tempo de exposição e os intervalos das medições. Na maioria dos trabalhos é comum utilizar como referência a ISO 1920-12:2015, buscando assim uma maior padronização para fins comparativos.

2.7.5 Ação de cloretos

Os íons cloro são originados de produtos que entram em contato com o concreto, como, por exemplo, produtos de limpeza, água do mar, respingos e névoa relacionados ao ambiente marinho, sais de degelo a base de cloretos, uso de água de amassamento contaminada, agregados de origem marinha, contato com água ou solo contaminado e aceleradores de pega a base de cloretos (SILVA, 2006).

A ABNT NBR 12655:2015 estabelece um teor máximo de cloretos no concreto, através de um percentual sobre a massa do cimento, conforme as condições de serviço da estrutura. Na Tabela 2.2 estão apresentados os limites descritos na referida norma.

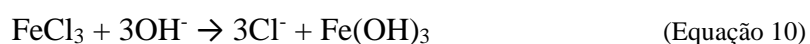
Tabela 2.2 - Teores máximos de cloretos permitidos no concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de cloreto no concreto (% sobre a massa de cimento)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015).

De acordo com Ribeiro *et al.* (2014), o processo de ingresso e progressão dos cloretos no concreto pode ser explicado por ação de um mecanismo duplo. Quando os íons cloro provêm do meio externo, eles são absorvidos pelo concreto, primordialmente, por absorção capilar na camada mais externa. Em seguida, eles penetram por difusão devido ao gradiente de concentração de íons. Os principais fatores que influenciam na velocidade e profundidade de penetração estão ligados à permeabilidade do concreto, ao cimento utilizado e às condições de saturação do concreto.

No concreto os cloretos podem estar quimicamente ligados ao C₃A, formando o sal de Friedel (cloro-aluminato de cálcio), adsorvido na superfície dos poros, e também sob a forma de íons livres. Os cloretos livres são os causadores de danos ao concreto dando origem processo de corrosão das armaduras. De modo geral, os cloretos provocam a acidificação local da armadura, desestabilizando a película passivadora e gerando a dissolução do aço com atuação ativa dos íons cloro, conforme as Equações 9 e 10 (CASCUDO, 1997; RIBEIRO *et al.*, 2014). O ataque por cloretos pode destruir a película passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se, permitindo, desta forma, que o mecanismo prossiga de maneira rápida.



3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados para o desenvolvimento do programa experimental, estruturado conforme os objetivos do trabalho. Os procedimentos foram divididos em cinco fases: a primeira compreende a caracterização dos materiais, a fase 2 trata do estudo com pastas de cimento Portland para definição da relação a/c, a fase 3 aborda os parâmetros e dosagem dos concretos, a fase 4 é referente aos ensaios realizados em concretos no estado fresco, endurecido e ensaios de durabilidade, e a última fase compreende os ensaios microestruturais realizados em pastas. O organograma apresentado na Figura 3.1 destaca cada fase do programa experimental, as quais serão detalhadas nos itens seguintes.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM – UnB), com exceção dos ensaios de carbonatação acelerada, que foi realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST – UnB); frequência ressonante, no Laboratório de Termo-Mecânica e Micro-Estrutura de Materiais Inteligentes do Departamento de Engenharia Mecânica; módulo de elasticidade pelo EMM-ARM no Laboratório de Ensaio em Estruturas da Universidade de Brasília – UnB; ensaio espectrometria por fluorescência de raio – x (EDX), no Instituto de Química (IQ/UnB); difratometria de raio – X (DRX) no Instituto de Geociências (IG/UnB) e a análise termogravimétrica, no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) na Universidade Federal de Goiás (UFG).

De acordo com Rampazzo (2005), a pesquisa experimental consiste na manipulação das variáveis, proporcionando o estudo da relação entre as causas e efeitos de um determinado fenômeno. Para atingir os resultados, o pesquisador utiliza aparelhos e instrumentos apropriados, capazes de tornar perceptíveis as relações existentes entre as variáveis envolvidas no objeto de estudo.

A variável independente é aquela que influencia, determina ou afeta outra variável, sendo o fator determinante para o resultado. Pode ser manipulada pelo investigador, na tentativa de assegurar a relação do fator com um fenômeno a ser descoberto e qual influência exerce sobre um possível resultado. Já a variável dependente consiste nos valores a serem descobertos, em virtude da influência da variável independente. Este fator varia à medida que o investigador modifica a variável independente (MARCONI e LAKATOS, 2003).

Os autores Prodanov e Freitas (2013) afirmam que ao determinar um objeto de estudo, deve-se selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definindo as formas de controle e

de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Diante das definições apresentadas, neste estudo, as variáveis independentes são os teores de substituição adotados na pesquisa, enquanto as variáveis dependentes, consideradas como sendo as respostas do programa experimental realizado, são: as propriedades dos concretos no estado fresco, propriedades do concreto no estado endurecido, durabilidade do concreto e ainda, algumas características microestruturais.

Os teores das adições foram fixados com base em trabalhos já realizados com sílica ativa e nanossílica, adotando valores de referência de acordo com a bibliografia. Para a sílica ativa, os teores para dosagem do concreto foram de 10%, enquanto para a nanossílica o valor foi de 2%. Ressalta-se que para esses dois materiais utilizados na dosagem dos concretos, considerou-se substituição volumétrica, em relação à massa do cimento Portland.

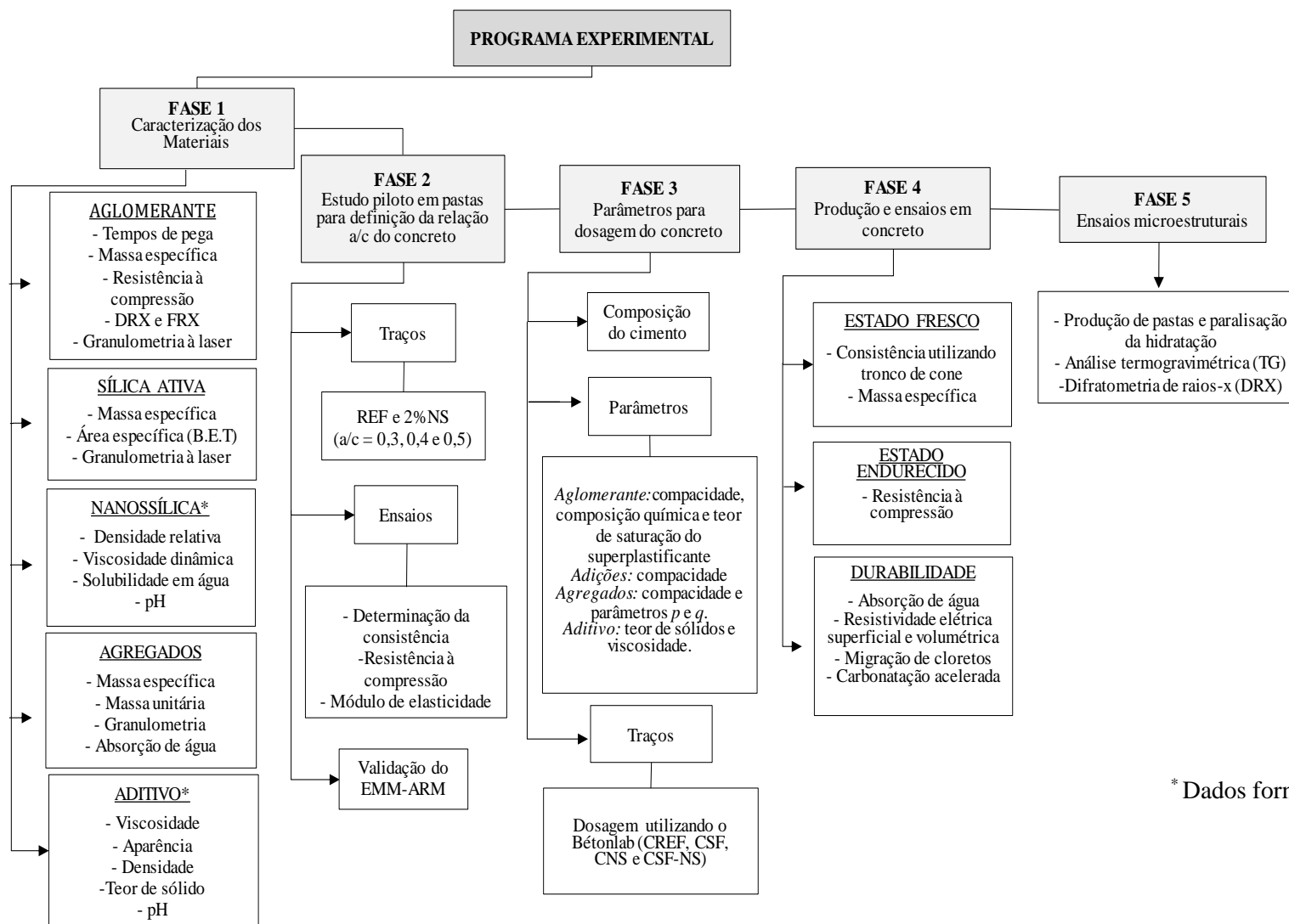
No caso dos concretos produzidos com adição de nanossílica e sílica ativa, seus teores foram fixados e foi feita uma adaptação para a dosagem utilizando o método do empacotamento compressível (MEC), uma vez que esses materiais foram considerados como parte do cimento Portland. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as variáveis independentes e dependentes.

Tabela 3.1 - Variáveis independentes e dependentes do programa experimental

Variáveis Independentes	Teor de adição	CREF
		CSF
		CNS
		CSF-NS
Variáveis Dependentes	Propriedades no estado fresco	Consistência
		Massa específica
	Propriedades no estado endurecido	Resistência à compressão simples
	Propriedades relacionadas à durabilidade	Absorção de água por imersão
		Absorção de água por capilaridade
		Resistividade elétrica superficial
		Resistividade elétrica volumétrica
		Migração de cloretos
	Características Microestruturais	Carbonatação acelerada
		Composição mineralógica
		Teores de CH e C-SH

Fonte: Elaboração própria.

Figura 3.1 - Organograma com as etapas do programa experimental



* Dados fornecidos pelo fabricante.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 3.2 está apresentada a quantidade de corpos de prova utilizados para a realização de cada ensaio. Foram utilizados no total de 104 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm. Além dos corpos de prova cilíndricos, foram utilizados 8 corpos de prova em formato prismático para a realização do ensaio de carbonatação acelerada. Na Tabela 3.2 estão algumas observações para os casos que permitiram usar os mesmos corpos de prova em dois ensaios distintos.

Tabela 3.2 – Quantidade de corpos de prova moldados para a realização dos ensaios.

Ensaio	Amostras por idade	Idades do ensaio (dias)	Traços	Total	Dimensões (cm)
Resistência à compressão simples	3	1, 3, 7, 28 e 63	4	60	10 x 20
Absorção de água por imersão	3	63	4	12	10 x 20
Absorção de água por capilaridade	3	63	4	12	10 x 20
Resistividade elétrica volumétrica	3	63	4	12	10 x 20
Resistividade elétrica superficial	3	63	4	12	10 x 20 ^(a)
Migração de cloretos no estado não estacionário	2	63	4	8	10 x 20 ^(b)
Carbonatação acelerada	2	56, 49 e 42	4	8	Prismático

Fonte: Elaboração própria.

Notas:

^(a) Para a realização do ensaio de resistividade elétrica superficial, foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.

^(b) Para a realização do ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para extrair 16 amostras cilíndricas 10 x 5 cm, conforme recomendações da norma NT BUILD 492:2011.

3.1 Materiais e métodos

Nos itens a seguir são descritos os materiais utilizados na pesquisa e os respectivos métodos para a sua caracterização. Os materiais utilizados na pesquisa para a produção do concreto foram adquiridos de acordo com as características necessárias e adequadas, conforme disponibilidade dos fornecedores locais. Em sequência à escolha dos materiais, procedeu-se com a caracterização dos materiais por se tratar de uma etapa de grande relevância para se conhecer os materiais utilizados e assim garantir a qualidade final. Os ensaios de caracterização seguiram as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.1.1 Aglomerante

Foi utilizado como aglomerante o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI), conforme a ABNT NBR 16697:2018. A escolha deste aglomerante se deu com o objetivo de utilizar o cimento com menor quantidade de adições disponível, o que o torna o mais puro possível em relação às opções de mercado. Os ensaios realizados para a classificação física do cimento utilizado estão apresentados na Tabela 3.3, bem como os métodos utilizados para a caracterização deste material e os resultados obtidos.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios para a caracterização física do aglomerante.

Propriedade		Resultados	Método de ensaio	Limites NBR 16697 (2018)
Tempos de início de pega (min)		140	NBR NM 65 (2003)	≥ 60
Tempos de fim de pega (min)		180		≤ 600
Diâmetro (μm)	D10	1,30	Granulometria à laser	-
	D50	13,10		-
	D90	31,76		-
Massa específica (g/cm^3)		3,0	NBR NM 23 (2001)	-
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	21,5	NBR 7215 (1996)	$\geq 14,0$
	3 dias	39,3		$\geq 24,0$
	7 dias	44,4		$\geq 34,0$
	28 dias	52,2		-

Fonte: Elaboração própria.

Além dos ensaios listados na Tabela 3.3, foram realizados os ensaios de difratometria de raio – X (DRX) e espectrometria por fluorescência de raio – X (EDX) para a caracterização química do cimento. E os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3.4 e na Figura 3.2. Por meio do EDX foi possível obter os compostos químicos constituintes da amostra analisada de CP V, e o DRX mostrou os materiais constituintes de forma qualitativa por meio de picos de intensidades distintas.

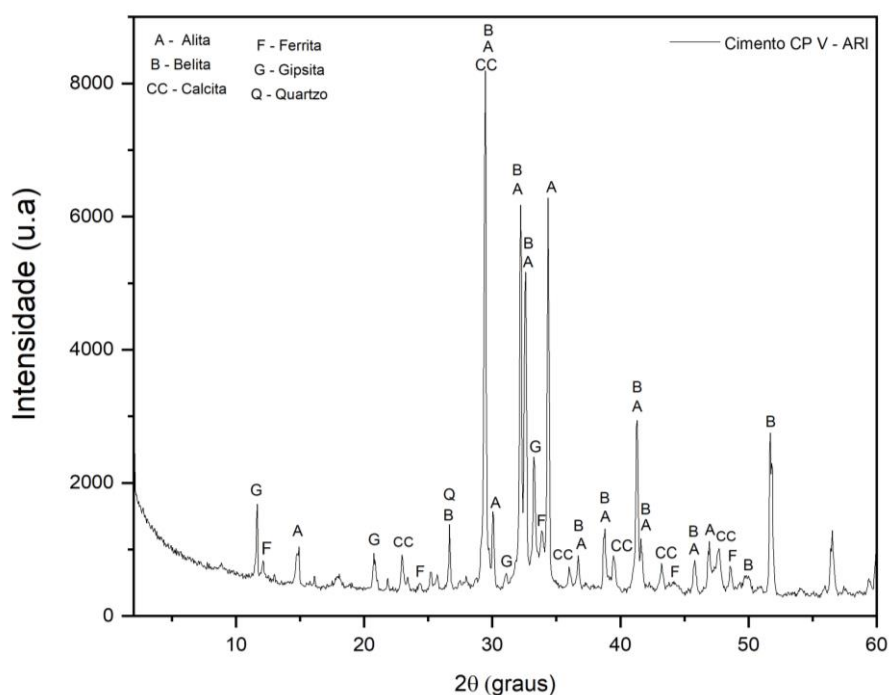
Tabela 3.4 – Resultados obtidos para a caracterização química do cimento

Caracterização	Resultados	Limites NBR 16697 (2018)	
Composição química, em óxidos (%)	CaO	72,25	-
	SiO ₂	15,04	-
	Al ₂ O ₃	3,87	-
	SO ₃	3,71	≤ 4,5
	Fe ₂ O ₃	3,02	-
	MgO	0,88	≤ 6,5
	SrO	0,47	-
	TiO ₂	0,35	-
	K ₂ O	0,33	-
	MnO	0,07	-
	ZnO	0,01	-
	L.O.I.*	6,13	≤ 6,5

* Perda ao fogo

Fonte: Elaboração própria.

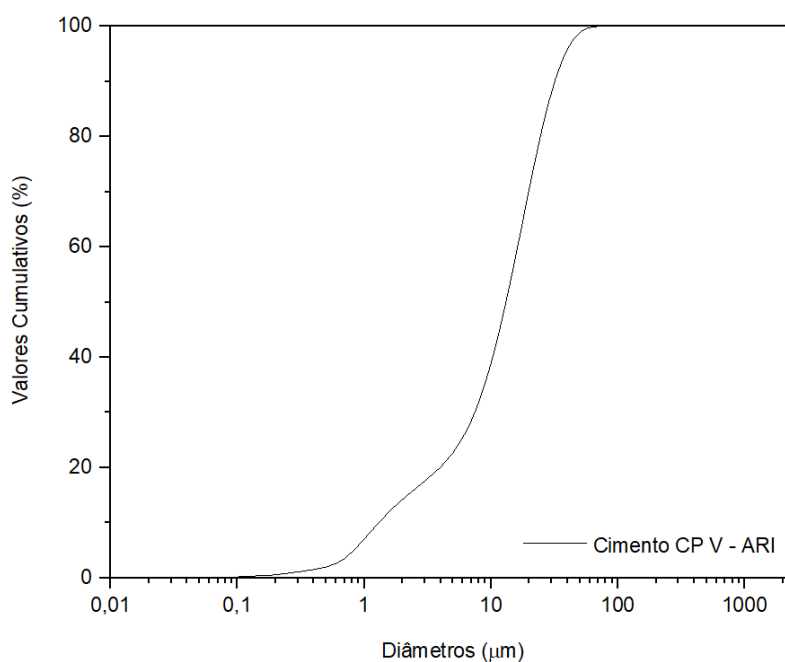
Figura 3.2 - Difratoograma de raios-X do cimento CP V - ARI



Fonte: Elaboração própria.

A curva granulométrica no ensaio pode ser visualizada na Figura 3.3. Os valores dos diâmetros (D10, D50 e D90) foram apresentados na Tabela 3.3 juntamente com os outros dados de caracterização física do material.

Figura 3.3 - Curva granulométrica do cimento Portland CP V



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa que foi utilizada na pesquisa é do tipo densificada da marca Tecnosil. As propriedades e resultados de caracterização do material foi realizada pelo grupo de pesquisa e podem ser visualizados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Caracterização da sílica ativa

Propriedades		Resultado	Limites
Massa específica (g/cm^3)		2,37	-
Densidade aparente no estado solto (kg/m^3)		595,07	-
Finura na peneira 45 μm (%)		9,10	10,0% (ABNT NBR 13956-1:2012)
Diâmetro (μm)	D10	5,19	-
	D50	31,37	-
	D90	58,75	-
	D médio	31,55	-
Área específica B.E.T (m^2/g)		19,722	$15 \leq \text{B.E.T} \leq 30$ (ABNT NBR 13956-1:2012)
Composição química (%)	SiO_2	94,33	$\geq 85\%$ (ABNT NBR 13956-1:2012)
	Al_2O_3	<0,01	-
	MgO	0,49	-
	Fe_2O_3	0,19	-
	CaO	0,78	-

Tabela 3.6 - Caracterização da sílica ativa (Continuação).

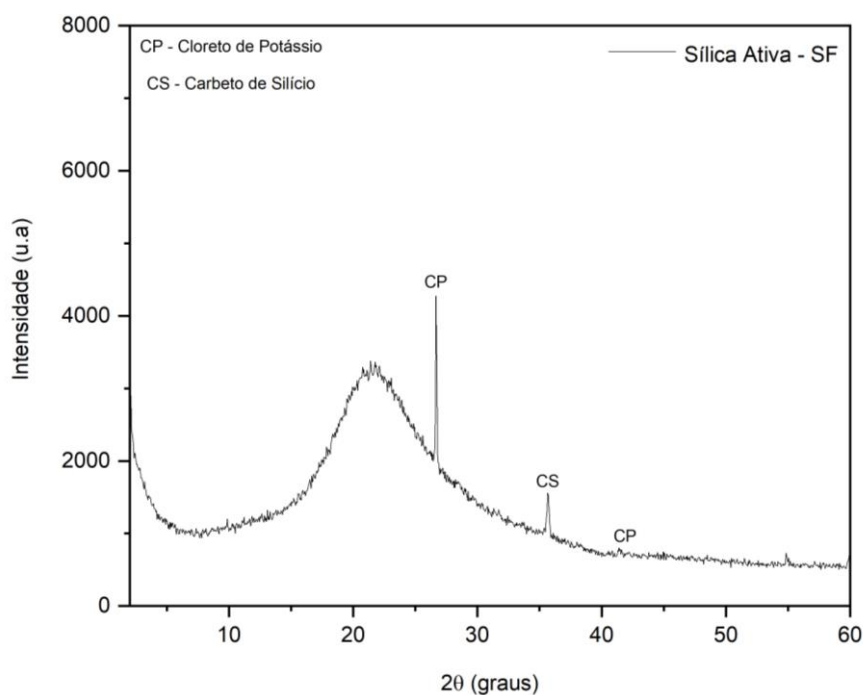
Composição química (%)	Na ₂ O	0,39	-
	K ₂ O	1,04	-
	TiO ₂	0,02	-
	P ₂ O ₅	0,14	-
	MnO	0,06	-
	LOI*	2,28	≤ 6,0 % (ABNT NBR 13956-1:2012)

* Perda ao fogo

Fonte: Fraga (2019)

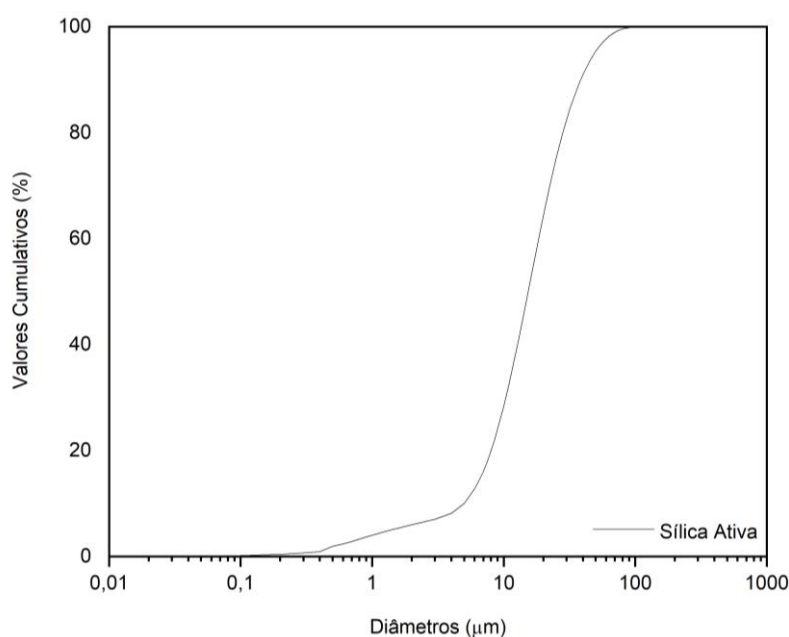
Foi realizado o ensaio de DRX para identificar os materiais constituintes de forma qualitativa por meio de picos de intensidades distintas, Figura 3.4. O material apresentou elevado grau de amorfismo e, além disso, foram identificados picos característicos do cloreto de potássio (KCl) e do carbeto de silício (SiC). A curva granulométrica obtida para este material, está apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.4 - Difratoograma de raios-X da sílica ativa.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3.5 - Curva granulométrica da sílica ativa



Fonte: Elaboração própria.

3.1.3 Nanossílica

Com finalidade de analisar os efeitos na durabilidade do concreto foi utilizada nanossílica Levasil CB45 A, com 15% de teor de sólidos, doada pela empresa Nouryon. A nanossílica apresenta diversos usos e na construção civil especificamente, tem sido usada em concretos funcionando como estabilizadora, intensificadora de durabilidade, além de contribuir para o desenvolvimento de resistência. As propriedades químicas e físicas da nanossílica, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 3.6.

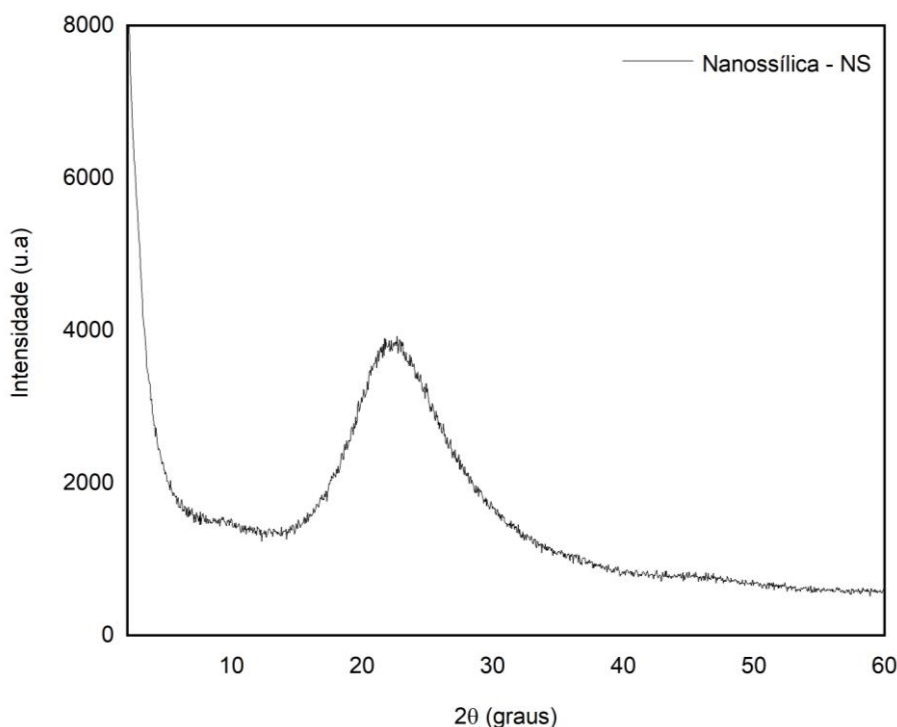
Tabela 3.7 - Propriedades físicas e químicas da nanossílica

Nanossílica	Levasil CB45 A
Estado físico	Líquido
Cor	Claro/turvo
pH	9,5
Densidade relativa (g/cm ³)	1,050 – 1,400
Solubilidade em água	Dispersível
Viscosidade dinâmica	< 50 mPa.s em 20 °C

Fonte: Nouryon (2019).

Foi realizado também o ensaio de DRX para a nanossílica, e como pode ser observado na Figura 3.6, no material não foi observado nenhum pico cristalino, sendo caracterizada como material totalmente amorfo. Ressalta que para a nanossílica utilizada na pesquisa não foi sonicada.

Figura 3.6 - Difratoograma de raios-X da nanossílica.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.4 Agregado graúdo natural

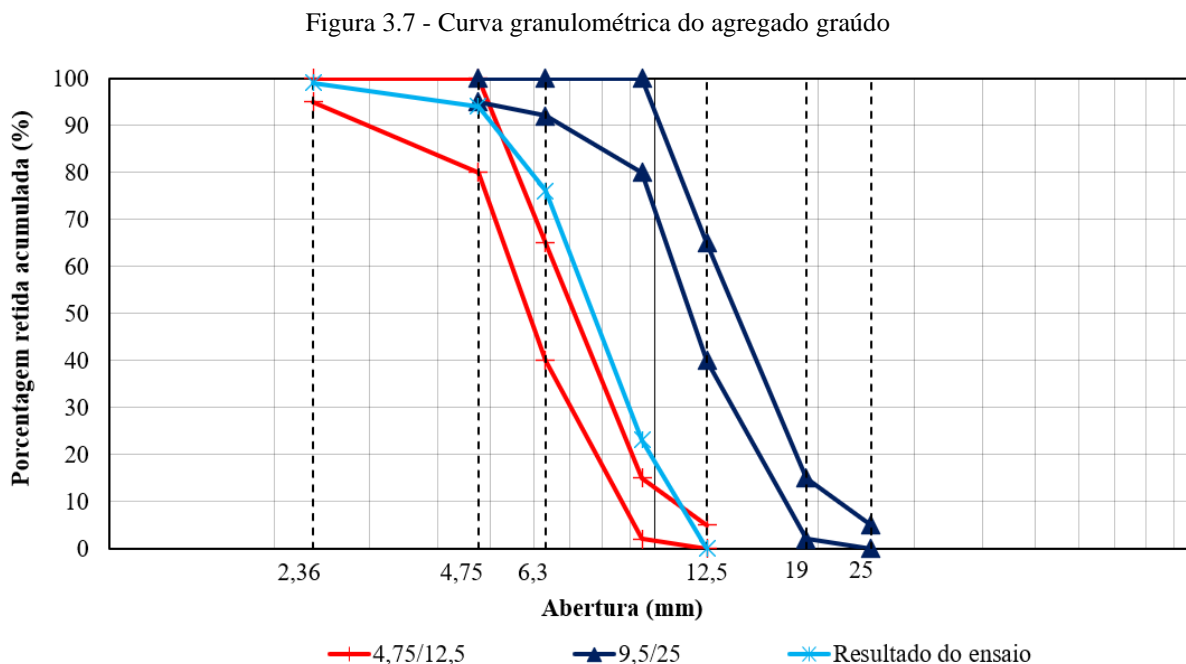
Para a produção dos concretos foi utilizado agregado graúdo adquirido na região de Brasília – DF, doado pelo Grupotecn Sistemas Construtivos, de origem calcário calcítico. Antes da realização dos ensaios, o material foi previamente seco em estufa. Os ensaios necessários para a caracterização do agregado seguiram as normas específicas e estão listados na Tabela 3.7, bem como os resultados obtidos.

Tabela 3.8 – Ensaios de caracterização do agregado graúdo

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,73	NBR NM 52 (2009) NBR NM 53 (2009)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,63	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,51	NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura	5,87	NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima (mm)	12,5	
Absorção de água (%)	0,45	NBR NM 53 (2009)

Fonte: Elaboração própria.

Foi traçada a curva granulométrica do agregado graúdo, e como pode ser observado na Figura 3.7, na curva correspondente ao resultado do ensaio, o material ficou na faixa 4,75/12,5.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.5 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado foi proveniente da região de Brasília – DF, e optou-se pela utilização de areia quartzosa média lavada extraída de rio. Para os ensaios de caracterização foram seguidas normas pertinentes. Os ensaios que foram realizados, as normas seguidas e os resultados obtidos estão listados na Tabela 3.8.

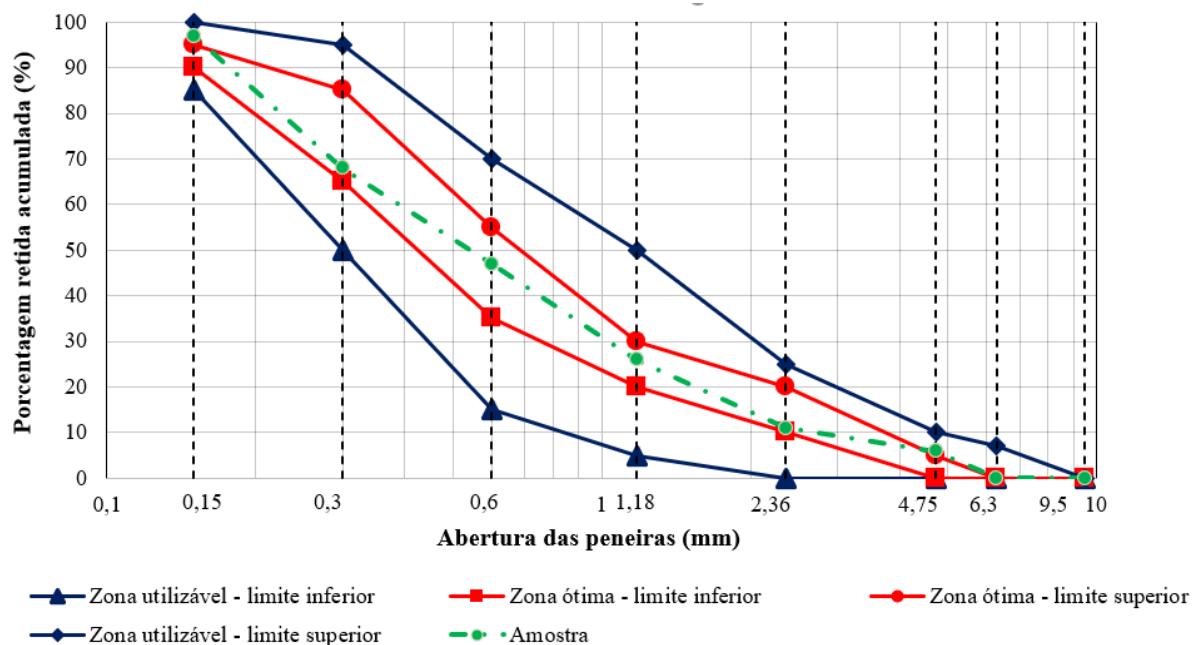
Tabela 3.9 – Ensaios de caracterização do agregado miúdo

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52 (2009) NBR NM 53 (2009)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,58	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,47	NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura	2,60	NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima (mm)	4,75	
Absorção de água (%)	0,35	NBR NM 30 (2001)

Fonte: Elaboração própria.

Foi traçada a curva granulométrica do agregado miúdo, e como pode ser observado na Figura 3.8, o material apresentou características entre a zona ótima inferior e a superior e está representado pela linha tracejada.

Figura 3.8 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaboração própria.

3.1.6 Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado na pesquisa foi o Master Glenium® 51, considerado de terceira geração, doado pela empresa BASF. Este aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução água, tornado o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. As propriedades do aditivo utilizado na pesquisa foram fornecidas pelo fabricante e estão elencadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.10 - Propriedades do aditivo superplastificante

Aditivo superplastificante	Master Glenium® 51
Base química	Éter policarboxílico
Dosagem recomendada (%)	0,2 a 1,0
Aparência	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107
pH	5,0 - 7,0
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5
Viscosidade (cps)	< 150

Fonte: BASF (2019).

3.1.7 Água de amassamento

A água utilizada para o amassamento de acordo com a ABNT NBR 15900-1:2009, foi fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), responsável pelo tratamento e distribuição da água consumida em Brasília-DF.

3.2 Estudo piloto em pastas para definição da relação a/c do concreto

Para a definição da relação a/c que foi utilizada nos concretos, realizou-se um estudo em pastas de cimento Portland utilizando três diferentes relações a/c para a definição da mais adequada. Após a produção das pastas, foi analisado o comportamento do material, por meio de ensaios de consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

3.2.1 Determinação da consistência da pasta

As pastas foram preparadas considerando a nanossílica como adição em relação à massa de cimento. Foi utilizado o teor de 2% na mistura devido à recomendação de estudos de referência (QUING *et al.*, 2007; KAWASHIMA *et al.*, 2012; STEFANIDOU, 2012; JALAL *et al.*, 2012; GIVI, 2012).

Foram adotadas três relações a/c, sendo elas 0,3, 0,4 e 0,5. Para cada valor de a/c foram feitos dois traços, o primeiro de referência sem nenhuma adição e o segundo com adição de nanossílica. Os quantitativos de materiais estão mostrados na Tabela 3.10. Vale destacar que a massa utilizada de NS coloidal foi calculada com base no teor de sólidos desse material (15 %), para se obter o teor efetivo de 2,0 % de NS em relação à massa de cimento.

Tabela 3.11 - Quantitativo de materiais utilizados em cada traço

TRAÇOS	(a/c)	MATERIAL (g)			
		CP V - ARI	NS coloidal	Aditivo SP	Água*
REF	0,3	1500,0	0,0	4,20	447,06
REF	0,4	1500,0	0,0	2,55	598,21
REF	0,5	1500,0	0,0	2,10	748,53
NS	0,3	1500,0	200,0	31,50	257,95
NS	0,4	1500,0	200,0	22,50	414,25
NS	0,5	1500,0	200,0	17,50	567,75

* Quantidade de água ajustada levando em consideração a água presente na nanossílica e no aditivo.

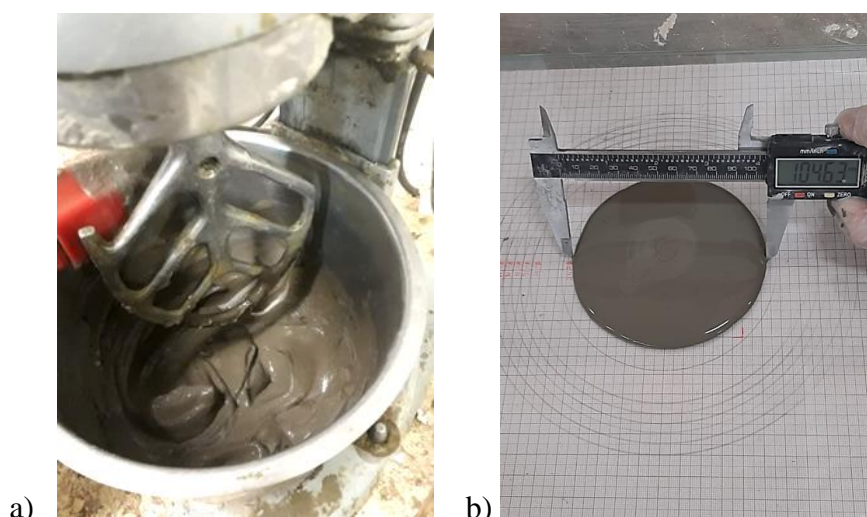
Fonte: Elaboração própria.

A sequência de mistura foi realizada respeitando a seguinte ordem: primeiramente, foi colocada na cuba a mistura de água e nanossílica coloidal; com o misturador ligado foi acrescentado o

cimento, com tempo de mistura de 30 segundos na velocidade baixa; prosseguiu-se com a adição do aditivo superplastificante, misturando por 1 minuto em velocidade alta; 30 segundos para limpeza das bordas da cuba e por fim, mais 30 segundos de mistura em velocidade alta.

Para a fixação da consistência das pastas foi realizado o ensaio de mini abatimento, baseado na técnica de Kantro (1980), que permite a comparação entre a consistência das pastas frescas produzidas. Para a realização de tal ensaio, utilizou-se um dispositivo de mini *slump*. Com os valores de *a/c* fixados para as pastas, acrescentou-se os teores necessários de aditivo superplastificante no intuito de manter a consistência para todas as pastas em 105 ± 5 mm. A quantidade de água de cada traço foi ajustada de acordo com o teor de água do aditivo superplastificante e da nanossílica coloidal. Na Figura 3.9 podem ser observadas as etapas de mistura e aferição do espalhamento.

Figura 3.9 - Procedimentos experimentais. a) Mistura dos materiais b) Aferição do espalhamento.



Fonte: Elaboração própria.

Procedeu-se com a moldagem dos corpos de prova nas dimensões 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, e em seguida foram colocados em câmara úmida por 24 horas. Para impedir alterações na relação *a/c* fixada para cada traço, a parte superior dos moldes foi vedada com placas de vidro. Passado o intervalo de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura submersos em água saturada com cal até a idade de realização dos ensaios propostos.

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 1, 3, 7, e 28 dias, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215: 2019, para os seis traços produzidos. Foram utilizados quatro corpos de prova para cada idade e antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retificados para que a carga fosse distribuída de maneira uniforme na área transversal do corpo de prova.

3.2.3 Ensaios de módulo de elasticidade

Foi avaliado o módulo de elasticidade das pastas de cimento Portland produzidas. Para tal avaliação, optou-se por utilizar o Método do EMM-ARM, proposto por Azenha *et al.* (2012) e utilizado no Programa de Pós Graduação de Estruturas e Construção Civil da UnB, por Ribeiro (2019). O método de ensaio EMM-ARM foi adaptado para possibilitar uma execução de baixo custo, e por tal adaptação ser recente, foi analisado o ensaio de módulo de elasticidade por três diferentes métodos para um dos traço de pasta de cimento Portland. A repetição do ensaio por metodologias diferentes, visou validá-lo para assim, replicá-lo para os demais traços, analisando o comportamento do material nas idades iniciais. A escolha destas idades iniciais se justifica pelo fato da contribuição da nanossílica em materiais cimentícios apresentar melhores resultados nas primeiras idades.

3.2.3.1 Módulo estático de elasticidade através da compressão clássica

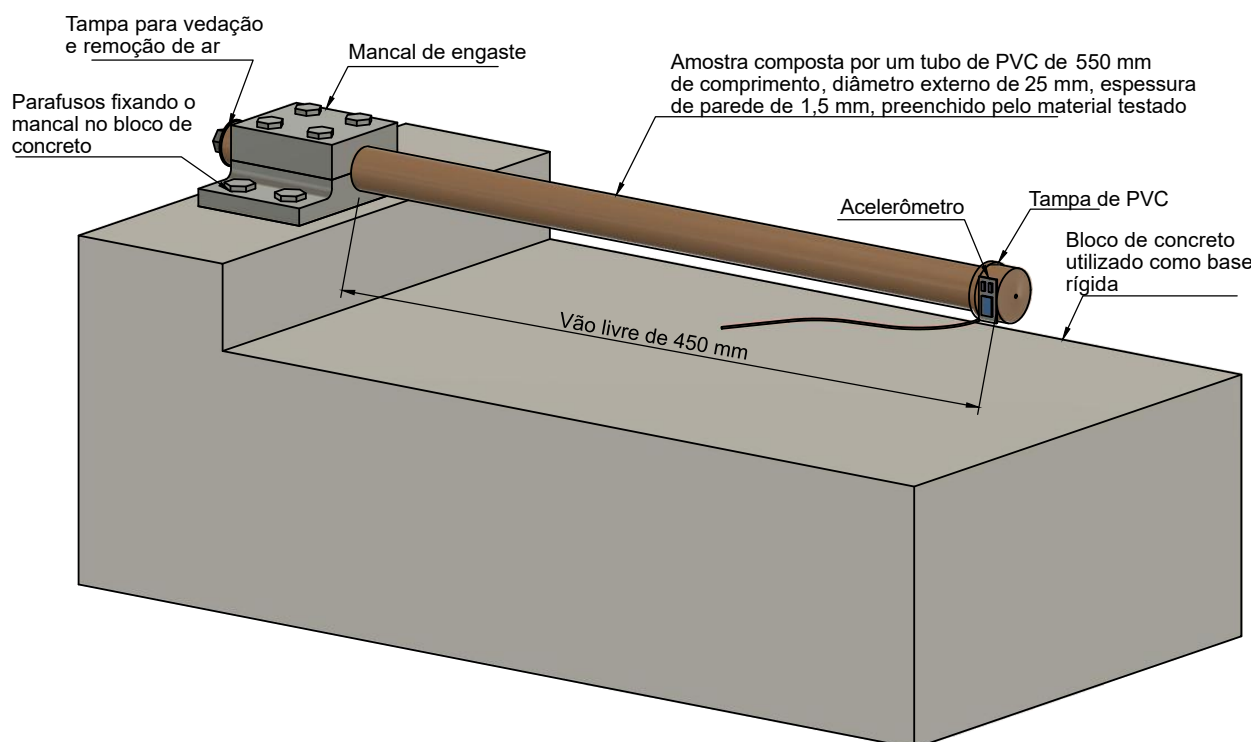
Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático pelo método da compressão clássica foram realizados conforme a ABNT NBR 8522:2017. Foram ensaiadas quatro amostras por idade na forma de corpos de prova cilíndricos moldados com diâmetro de 50 mm e altura entre 100 mm. As amostras foram ensaiadas nas idades de 1, 2 e 5 dias. O valor do módulo de elasticidade estático para uma determinada idade foi obtido a partir da média dos resultados individuais de cada corpo de prova, observados os critérios de descarte de resultados da ABNT NBR 8522:2017.

3.2.3.2 Ensaio EMM-ARM

O ensaio EMM-ARM foi realizado de acordo com a metodologia apresentada por Azenha *et al.* (2012). A cada 5 minutos, o sistema de aquisição de dados utilizado iniciava uma sessão de amostragem de 90 segundos. Os ensaios foram conduzidos por um período de 5 dias, até que se observasse uma estabilização da evolução do módulo de elasticidade.

Para se garantir uma intensidade de vibração ambiente compatível com a sensibilidade do equipamento utilizado, foi utilizado um ventilador para promover correntes de ar no entorno do corpo de prova. As amostras utilizadas no ensaio EMM-ARM consistiram em tubos de PVC, com as dimensões especificadas na Figura 3.10, apoiados na forma de vigas engastadas e livres, sendo ensaiados para a validação do método, quatro corpos de prova. A configuração de ensaio seguiu a proposta de Granja *et al.* (2014). Na Figura 3.11 pode ser visualizado o ensaio em andamento, com base nas especificações do sistema EMM-ARM.

Figura 3.10 - Sistemas de ensaio EMM-ARM para pasta de cimento



Fonte: Ribeiro (2019).

Figura 3.11 – Ensaio EMM-ARM em andamento.



Fonte: Elaboração própria.

Em uma etapa de pós-processamento, os dados de cada sessão eram tratados para produzir uma estimativa do módulo de elasticidade estático do material representativa do período de amostragem e associada, arbitrariamente e para fins de visualização dos resultados, ao instante de início da sessão de amostragem.

Para permitir uma melhor visualização dos resultados, e obtenção de valores médios para comparações, curvas analíticas de evolução do módulo de elasticidade foram ajustadas aos dados experimentais. Foi utilizada a Equação 11, de Carette (2012):

$$f(t) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{\tau_1}{t}\right)^{\beta_1}} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{\tau_2}{t}\right)^{\beta_2}} + a_3 \quad (\text{Equação 11})$$

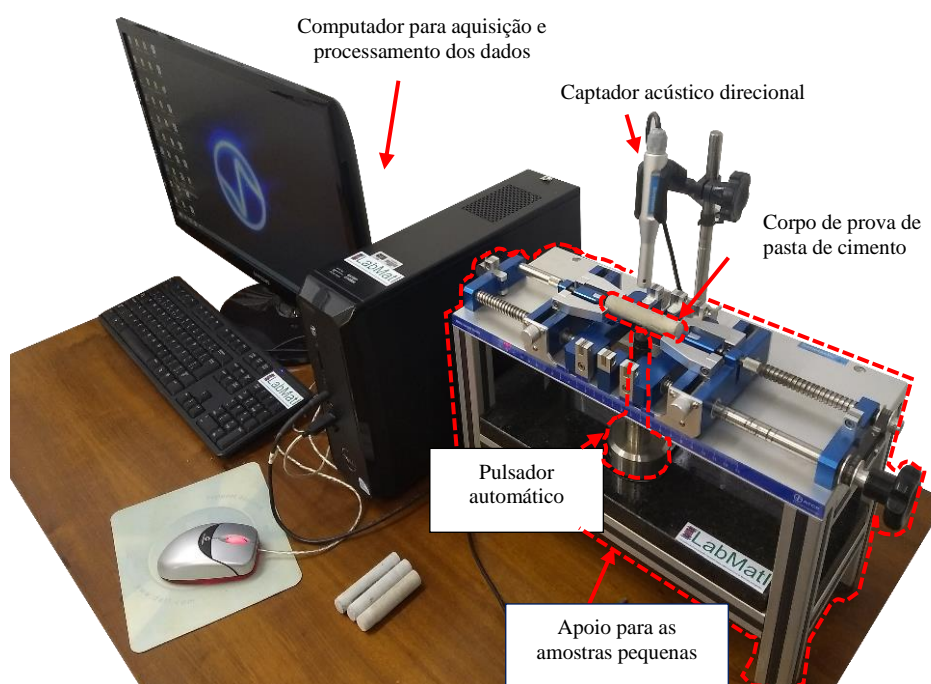
Em que a_1 , a_2 , a_3 , τ_1 , τ_2 , β_1 , e β_2 são os parâmetros de ajuste da equação aos dados experimentais. O ajuste da curva foi realizado pelo algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt.

3.2.3.3 Método da Frequência Ressonante

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência ressonante pelo método de vibração por impulso foram realizados de acordo com a ASTM E 1876 (2015), e executados com o sistema Sonelastic (ATCP Engenharia Física, 2018), que pode ser visualizado na Figura 3.12. Foram ensaiadas cinco amostras na forma de

corpos de prova cilíndricos moldados com diâmetro de 16 mm e altura entre 70 mm e 80 mm, seguindo as proporções sugeridas pela ASTM E 1876 (2015). As amostras foram ensaiadas nas idades de 1 e 5 dias. As amostras foram moldadas em tubos de PVC fechados em uma das extremidades por uma tampa rosqueada, e serrados ao longo de seu comprimento para permitir a posterior desforma das amostras. Para cada idade, o valor do módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pela média dos resultados individuais obtidos em cada amostra, sendo que, em cada amostra, foram realizadas cinco aferições repetidas.

Figura 3.12 - Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras em pastas de cimento



Fonte: Ribeiro (2019).

Para converter os resultados de módulo de elasticidade dinâmico, obtidos pelo ensaio de frequência ressonante, para valores comparáveis ao módulo de elasticidade estático, obtido pelo EMM-ARM, foi utilizada a Equação 12, proposta por Neville (2012).

$$E_{\text{estático}} = 0,83 \times E_{\text{dinâmico}} \quad (\text{Equação 12})$$

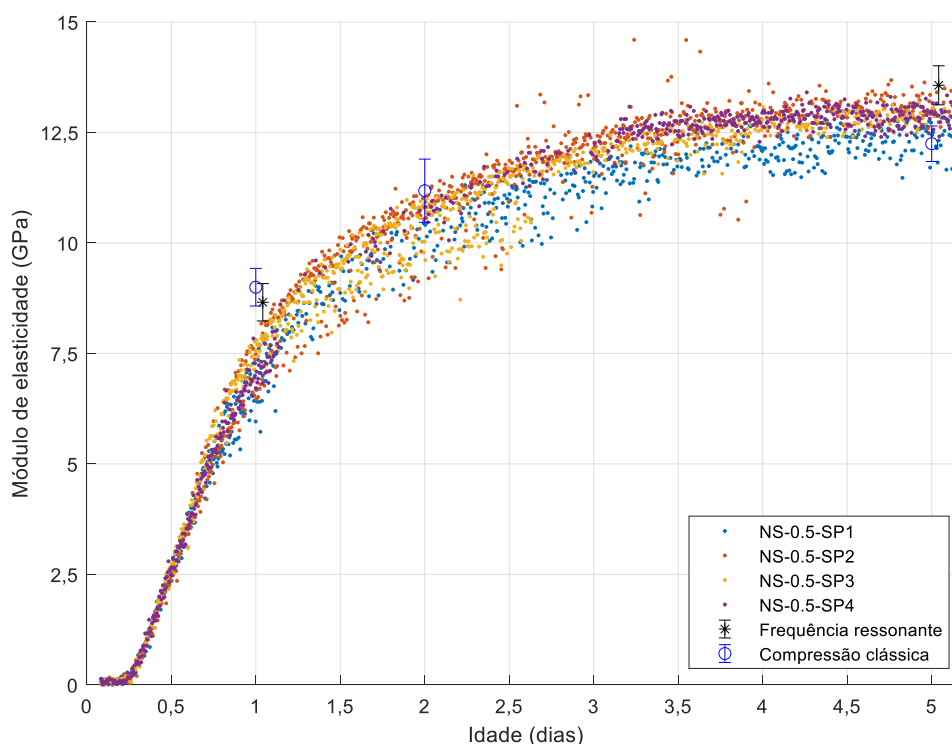
3.2.3.4 Validação do método

Para a validação dos resultados obtidos no ensaio EMM-ARM, foi realizada uma análise comparativa entre o módulo de elasticidade obtido pelo EMM-ARM e aqueles obtidos pelos métodos já consolidados de compressão clássica e frequência ressonante. Esta análise de

validação foi realizada apenas com o traço com relação $a/c=0,5$ com adição de NS. Para tornar a análise de validação mais robusta, foram ensaiados quatro corpos de prova simultâneos do EMM-ARM.

Os valores de módulo de elasticidade estático estimados em cada sessão de amostragem do EMM-ARM, para cada um dos corpos de prova, são representados na Figura 3.13 por um gráfico de dispersão. Os valores de módulo de elasticidade estático estimados pelos ensaios de compressão clássica, realizados nas idades de 1, 2 e 5 dias, são representados pelo valor médio obtido no ensaio, e uma barra de erro cujo intervalo é igual a um valor do desvio padrão acima e abaixo do valor médio. Esta mesma representação gráfica foi adotada para os resultados de módulo de elasticidade estáticos obtidos pela conversão dos resultados dos ensaios de frequência ressonante, realizados nas idades de 1 e 5 dias. Uma inspeção visual dos resultados permite uma análise preliminar de que os três ensaios apresentam boa concordância de resultados entre si.

Figura 3.13 - Resultados do EMM-ARM e resultados médios e intervalo de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, dos ensaios de compressão clássica e frequência ressonante.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 3.13 estão apresentadas as curvas analíticas ajustadas a cada uma das quatro replicatas, em comparação aos resultados dos ensaios de compressão clássica e frequência

ressonante. A partir destas curvas analíticas, uma curva média foi computada por meio da média das curvas, e o erro relativo médio de cada corpo de prova em relação a esta curva foi computado, por meio da Equação 13:

$$Err(\%) = \frac{100}{N_{\text{points}}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{points}}} \left(\frac{|Average_i - Replicate_i|}{Average_i} \right) \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo:

N_{points} = quantidade de pontos amostrados nas curvas analíticas para cálculo do erro, considerado, arbitrariamente, como sendo 500 pontos igualmente espaçados, o que equivale, considerando a escala temporal de 5 dias de ensaio, a um intervalo de aproximadamente 14,4 minutos;

$Average_i$ = valor do i-ésimo ponto na curva média;

$Replicate_i$ = valor do i-ésimo ponto na curva da replicata considerada.

O desvio-padrão em cada ponto amostrado nas curvas analíticas também foi computado a partir da curva média e das curvas de cada replicata, por meio da Equação 14:

$$StdDev_i = \sqrt{\frac{1}{(N_{\text{replicates}} - 1)} \sum_{j=1}^{N_{\text{replicates}}} (Average_i - Replicate_{i,j})^2} \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo:

$StdDev_i$ = desvio-padrão do ponto i amostrado nas curvas analíticas;

$N_{\text{replicates}}$ = quantidade de replicatas ensaiadas no ensaio EMM-ARM;

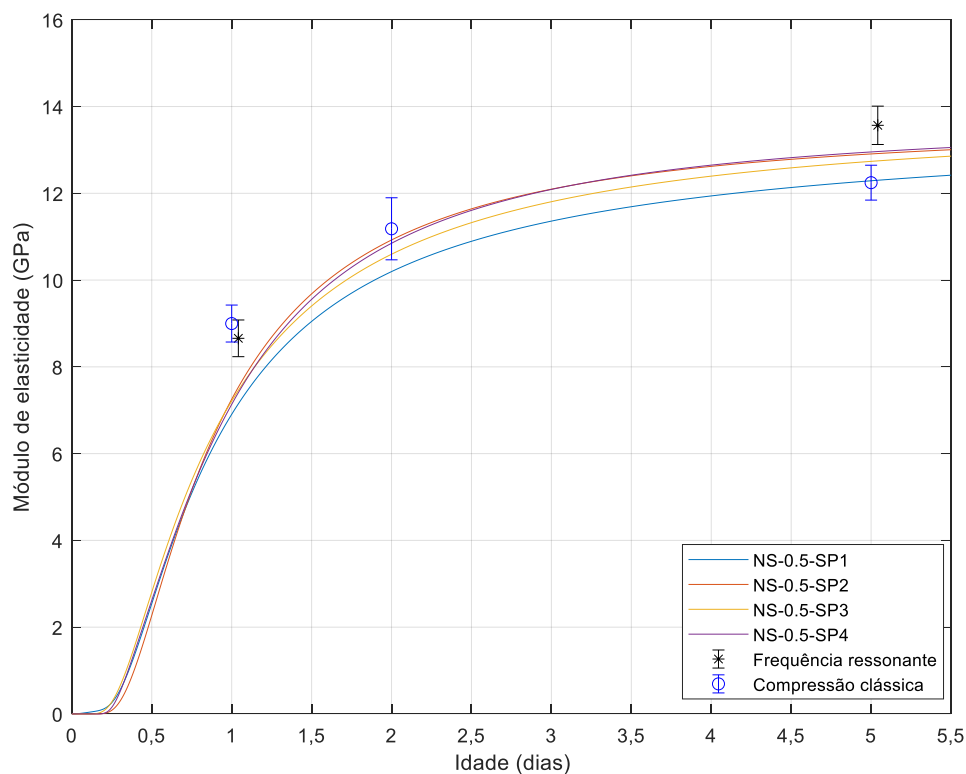
$Average_i$ = valor do i-ésimo ponto na curva média;

$Replicate_{i,j}$ = valor do i-ésimo ponto na curva da replicata j.

Em seguida, computou-se a média e o valor máximo da série de desvios-padrão obtida. Os erros relativos médios de cada replicata e os desvios-padrão médio e máximo são apresentados na Tabela 3.11. A replicata 1, conforme pode ser visualmente constatado na Figura 3.14, apresentou o maior erro relativo médio, o que significa que, em média, foi a replicata que mais se desviou da média dos resultados do EMM-ARM. Desconsiderando esta replicata, as demais apresentaram erros relativos médios da ordem de 5% a 8%, o que pode ser considerado satisfatório em comparação a limites de repetitividade adotados por normas de outros métodos de determinação do módulo de elasticidade, como a NBR 8522:2017, que adota o valor de 5%. O mesmo pode ser constatado a partir da análise dos valores médio e máximo de desvio-padrão, que, sendo representativos do conjunto de desvios-padrão de todos os pontos considerados na análise, sugerem que a magnitude de variação das replicatas se encontra na ordem de 5% da ordem de grandeza do módulo de elasticidade aos 5 dias. Diante de limitações no cronograma

da pesquisa considerou-se a execução do EMM-ARM com apenas dois corpos de prova para cada traço.

Figura 3.14 - Curvas analíticas ajustadas aos resultados do EMM-ARM e resultados médios e intervalo de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, dos ensaios de compressão clássica e frequência ressonante.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.12 - Erros relativos médios e desvio padrão das amostras do EMM-ARM.

Amostras	Erro relativo médio (%)	Desvio padrão médio (GPa)	Desvio padrão máximo (GPa)
1	14,725	0,120	0,47
2	7,922		
3	5,132		
4	6,087		

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 3.12 é apresentada a comparação numérica entre os valores médios e desvio padrão obtidos dos resultados dos ensaios EMM-ARM, compressão cíclica e frequência ressonante. A Figura 3.15 apresenta visualmente estas grandezas para todo o intervalo de tempo em que o ensaio EMM-ARM foi executado. Da Tabela 3.12, observa-se que o valor do módulo de elasticidade estimado pelo EMM-ARM tendeu a ser consistentemente inferior ao estimado pelo método da compressão clássica e frequência ressonante, sendo este um fenômeno observado

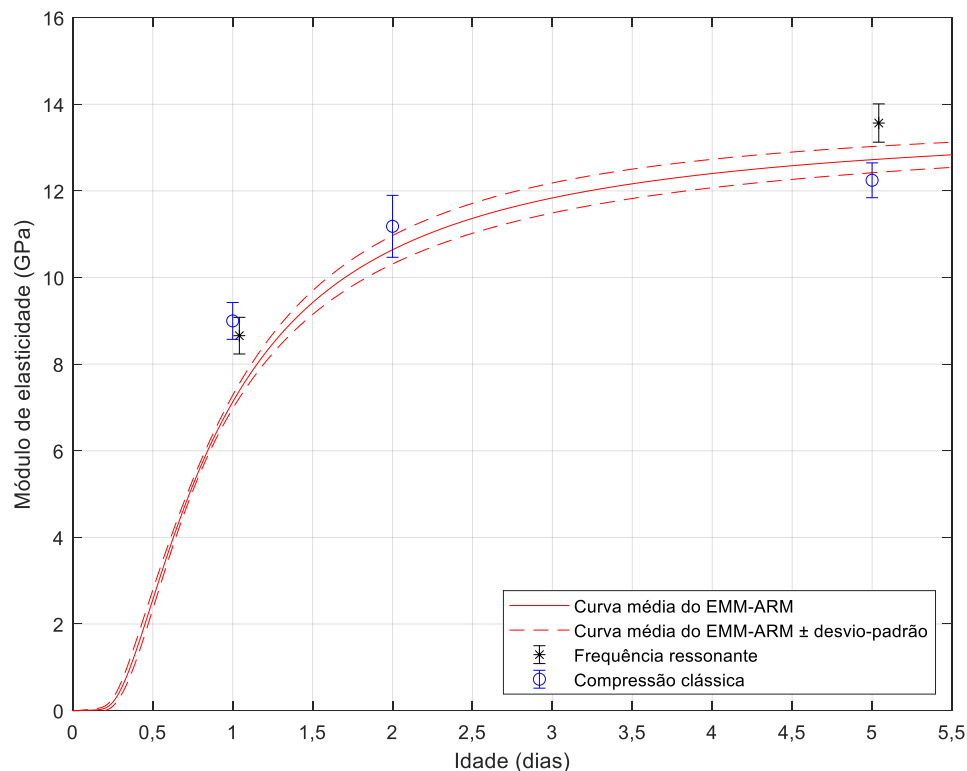
em outros trabalhos que utilizaram o EMM-ARM, como Azenha *et al.* (2012)^a, Maia *et al.* (2012) e Azenha *et al.* (2012)^b. Com base nos resultados do ensaio é possível que a ocorrência dos valores inferiores de módulo ao usar o EMM-ARM em comparação aos outros métodos utilizados, seja por interferência do tempo zero. É de interesse notar, no entanto, que o desvio-padrão do EMM-ARM foi consistentemente menor que os ensaios de compressão clássica e frequência ressonante, para todas as idades consideradas. Este fato novamente reforça que a execução do ensaio EMM-ARM com apenas duas replicatas, conforme feito no presente trabalho para os demais traços, é suficiente para representar a variabilidade intrínseca do método de ensaio.

Tabela 3.13 - Comparação de valores médios e desvio padrão dos resultados de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios EMM-ARM, compressão clássica e frequência ressonante.

Idade (dias)	Módulo de elasticidade médio (GPa)			Desvio padrão (GPa)		
	EMM-ARM	Compressão Clássica	Frequência ressonante	EMM-ARM	Compressão Clássica	Frequência ressonante
1	7,126	8,998	8,658	0,155	0,426	0,423
2	10,641	11,182	-	0,329	0,715	-
5	12,721	12,245	13,567	0,303	0,402	0,442

Fonte: Elaboração própria.

Figura 3.15 - Valores médios e intervalos de variação, com um valor de desvio-padrão abaixo e acima dos valores médios, para os resultados dos ensaios EMM-ARM, compressão clássica e frequência ressonante.



Fonte: Elaboração própria.

3.3 Parâmetros para dosagem do concreto

A escolha da relação água/cimento foi pautada no comportamento avaliado em pastas de cimento Portland com adição de nanossílica para três diferentes relações de a/c, realizado na etapa 2 do programa experimental. Além disso, a dosagem do concreto foi realizada atendendo os parâmetros da classe de agressividade IV, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, por apresentar uma relação água/cimento em massa menor ou igual a 0,45. Tal decisão se justifica pela utilização da nanossílica, que atua no refinamento dos poros do concreto. Com a utilização de valores de relação água/cimento mais elevados, é possível que a adição das nano partículas de sílica não seja tão eficiente em sua atuação.

O concreto foi dosado utilizando o *software* Bétonlab Pro 3, que se baseia no empacotamento das partículas, fornecendo assim traços otimizados. Foram produzidos quatro traços de concreto, os quais foram nomeados como: CREF, CSF, CNS e CSF-NS. Para a dosagem dos traços CSF, CNS e CSF-NS considerou-se a utilização da nanossílica e da sílica ativa em adição em relação à massa de cimento. Nos traços com adição, diante das particularidades de dosagem

do Bétonlab, trabalhou-se com cimentos compostos, seguindo as proporções das adições fixadas, conforme Tabela 3.13.

Tabela 3.14 - Nomenclatura e características dos traços de concreto

Traço	Característica
CREF	Concreto de referência
CSF	Concreto com 10% de sílica ativa
CNS	Concreto com 2% de nanossílica
CSF-NS	Concreto com 10% de sílica ativa e 2% nanossílica

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1 Composição do cimento

No caso dos traços que possuem adições, tanto de sílica ativa como de nanossílica, pela dosagem dos concretos ser realizada utilizando o *software* Bétonlab Pro3, foi necessário trabalhar com cimentos compostos devido as particularidades do programa para a inserção de dados. Alguns ensaios de caracterização dos materiais, como granulometria e massa específica, foram realizados para os materiais componentes dos traços de maneira individual e para a composição do cimento, tais resultados foram também compostos com base nos teores de cada adição. Para os ensaios específicos exigidos pelo Bétonlab para a dosagem dos traços, que são detalhados ao longo da metodologia, foi realizada a composição do cimento com as adições seguindo os teores necessários para cada traço, para posterior realização dos ensaios.

Como a dosagem foi feita utilizando o *software* Bétonlab Pro 3, não foi possível entrar com cada uma das adições utilizadas separadamente. Diante disso, optou-se por trabalhar com a composição do cimento com as adições utilizadas, inserindo no programa um único material, como solução para considerar o empacotamento no procedimento de dosagem, mesmo com adição de nano partículas de sílica ativa.

Para o traço CSF, as características necessárias para inserção do *software* foram referentes ao cimento composto por cimento Portland CP V + sílica ativa, enquanto para o traço CNS, o cimento foi composto por cimento Portland CP V + nanossílica. O último traço apresentou composição utilizando cimento Portland CP V + sílica ativa + nanossílica. Ressalta que o teor de cada uma das adições foi fixado, adotando 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica, inclusive no traço que utilizou os dois materiais juntos, esses teores foram respeitados, totalizando 12% de adições em massa.

3.3.2 Ensaios para obtenção dos parâmetros iniciais

O primeiro passo para a utilização do *software* foi a inserção dos dados de caracterização dos materiais utilizados. A dosagem por meio desta ferramenta necessita de algumas informações e propriedades obrigatórias, enquanto outras já são facultativas e não restringem a utilização do programa, mas são limitantes quanto à previsão de determinadas propriedades dos concretos simulados. Na Tabela 3.14 são mostrados os parâmetros que foram obtidos e inseridos para formar e complementar o banco de dados do *software*.

Tabela 3.15 - Parâmetros necessários para montar banco de dados do Bétonlab

Material	Parâmetro
<i>Agregados graúdo e miúdo</i>	Massa específica, absorção de água, granulometria, compactidade e Parâmetro p e q
<i>Cimento</i>	Massa específica, granulometria, compactidade, composição do cimento, resistência à compressão em pelo menos 2 idades e teor de saturação do superplastificante
<i>Superplastificante</i>	Teor de sólidos e viscosidade
<i>Sílica ativa</i>	Massa específica, granulometria, compactidade e teor de saturação do superplastificante
<i>Nanossílica</i>	Massa específica, viscosidade dinâmica, densidade relativa, compactidade e teor de saturação do superplastificante
<i>Sílica ativa + Nanossílica</i>	Compactidade e teor de saturação do superplastificante

Fonte: Elaboração própria.

Os subitens a seguir descrevem como foram obtidos os parâmetros exigidos para o *software*, diferentes dos ensaios de caracterização comumente usados quando se trabalha com concreto. Optou-se pela separação dos materiais por itens, permitindo uma maior clareza dos ensaios que foram realizados para cada um deles, conforme necessidade do programa utilizado na dosagem.

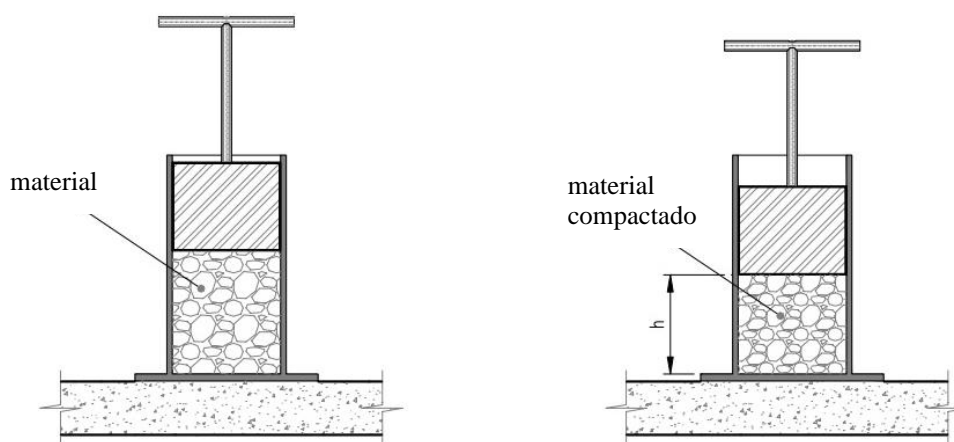
3.3.2.1 Agregados graúdo e miúdo

Os ensaios para determinação da massa específica, absorção de água e granulometria dos agregados utilizados nos concretos foram realizados conforme as normas específicas. Como exigência específica para o uso do Bétonlab, foram realizados os ensaios de compactidade e de calibração dos parâmetros p e q .

Para a compacidade dos agregados, que são materiais com diâmetro maior que 100 μm , De Larrard (1999), propõe que a compacidade experimental seja determinada por meio de ensaios que utilizem energia de vibração. O valor k do protocolo de empacotamento deve ser verificado para cada método de ensaio e equipamento. No caso desse trabalho foi adotado o valor de $k = 9$, já aferido por outros alunos do grupo de pesquisa que usaram o método de dosagem pelo empacotamento compressível (CARDOSO, 2020).

Para a realização de tal ensaio, utilizou-se um cilindro para colocação dos agregados, e sobre este, foram aplicadas forças por meio de vibração e pressão. Como equipamento para o ensaio foi utilizada uma mesa de vibração com a adaptação do cilindro de 150 mm de diâmetro e 22,65 de altura; e um peso de 19,71 kg e 149 mm de diâmetro. Neste procedimento foi feita a aferição da altura da camada do material antes da compactação e após a realização do processo de vibração. Para a realização do ensaio foi utilizada uma mesa de vibração do aparelho *Vebe test* com a adaptação do cilindro e para a realização da compressão foi confeccionado um peso de 19,71 kg. Na Figura 3.16 está apresentado o esquema do cilindro utilizado para a realização do ensaio de compacidade dos agregados miúdo e graúdo.

Figura 3.16 - Determinação da compacidade dos agregados



Fonte: Silva (2004).

Visando a obtenção de resultados mais precisos, os agregados miúdo e graúdo foram divididos em 4 diferentes faixas, de acordo com sua granulometria. A separação por faixas foi realizada por meio do peneiramento dos agregados.

Para cada uma das faixas adotadas foi seguido o mesmo protocolo de ensaio. Inicialmente pesou-se 2,0 kg do material seco e ele foi colocado no interior do cilindro, sendo necessário espalhamento manual do material para nivelamento antes da colocação do peso. Colocado o

peso na posição adequada, a mesa vibratória foi ligada por 3 minutos. Após o desligamento do equipamento, foram realizadas 4 medidas, em pontos fixos, da diferença da altura do peso de aço em relação à borda do cilindro. De posse do valor aferido da altura da camada de material compactada ao final do ensaio, foi possível calcular a compacidade experimental através da Equação 15:

$$C = \frac{4 M_s}{\pi \cdot D_c^2 \cdot h \cdot \delta} \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo:

C = compacidade experimental;

M_s = massa de material seco;

D_c = diâmetro interno do cilindro;

h = altura da camada de material compactada ao final do ensaio;

δ = massa específica do material.

A separação das faixas por granulometria, bem como os valores obtidos para a compacidade experimental dos agregados e que foram inseridos no Bétonlab, podem ser visualizados na Tabela 3.15.

Tabela 3.16 – Faixas granulométricas e respectivos valores de compacidade experimental

Material	Faixa	Granulometria	Compacidade experimental
Agregado gráúdo	n° 1	Entre 12,5 mm e 9,5 mm	0,601
	n° 2	Entre 9,50 mm e 6,30 mm	0,610
	n° 3	Entre 6,30 mm e 4,75 mm	0,628
	n° 4	Abaixo de 4,75 mm	0,709
Agregado miúdo	n° 1	Acima de 2,40 mm	0,660
	n° 2	Entre 2,40 mm e 1,20 mm	0,643
	n° 3	Entre 1,20 mm e 0,6 mm	0,598
	n° 4	Abaixo de 0,6 mm	0,594

Fonte: Elaboração própria.

Realizados esses ensaios de compacidade foi feita uma verificação para dosagem no *software*, por meio da calibração dos parâmetros p e q . Eles são considerados importantes e necessários porque representam a influência dos agregados na resistência à compressão do concreto, através da sua aderência à pasta de cimento (“ p ”) e da sua resistência intrínseca (“ q ”). A calibração leva em consideração os grãos de maior dimensão da mistura e, portanto, para a calibração do agregado gráúdo foram feitos traços de concreto e para a calibração do agregado miúdo, foram produzidas argamassas.

Foram feitos dois traços de concreto e dois traços de argamassa, com o objetivo de atingir uma resistência alta e outra baixa, ficando assim conhecidos como traço rico (TR) e traço pobre (TP). A dosagem dos concretos foi baseada no método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). O traço rico para concreto adotado foi 1: 1,16: 1,84: 0,43, com consumo de cimento de 532,37 kg/m³. Já para o traço pobre de concreto, o traço foi 1: 3,05: 3,45: 0,80, com consumo de cimento de 281,15 kg/m³. Para a produção das argamassas os traços foram TR de 1: 3,0 : 0,57 e TP de 1: 6,5: 1,17, com consumo de cimento de 489,23 kg/m³ e 251,58 kg/m³, respectivamente. Os quantitativos dosados de cada material para concreto e argamassa para a calibração dos agregados estão demonstrados na Tabela 3.16.

Tabela 3.17 - Traços de concreto e argamassa utilizados para calibração dos agregados

Materiais utilizados (kg)	Concreto		Argamassa	
	Traço rico	Traço pobre	Traço rico	Traço pobre
Brita	26,00	26,00	-	-
Areia	16,39	22,99	3,90	4,225
Cimento	14,13	7,54	1,30	0,650
Água	6,08	6,03	0,741	0,761

Fonte: Elaboração própria.

A análise por meio do ensaio de resistência à compressão foi realizada nas idades de 1, 7 e 28 dias, conforme demonstrado na Tabela 3.17. Feito isso, foi possível completar o banco de dados com os parâmetros dos agregados, necessários para prosseguir com a dosagem utilizando o *software*.

Tabela 3.18 – Valores de resistência à compressão dos traços de argamassa e concreto

Idades (dias)	Resistência à compressão simples (MPa)			
	Concreto		Argamassa	
	Traço rico	Traço pobre	Traço rico	Traço pobre
1	26,01	8,17	16,03	3,78
7	41,98	18,29	35,51	8,37
28	51,57	23,85	37,66	9,06

Fonte: Elaboração própria.

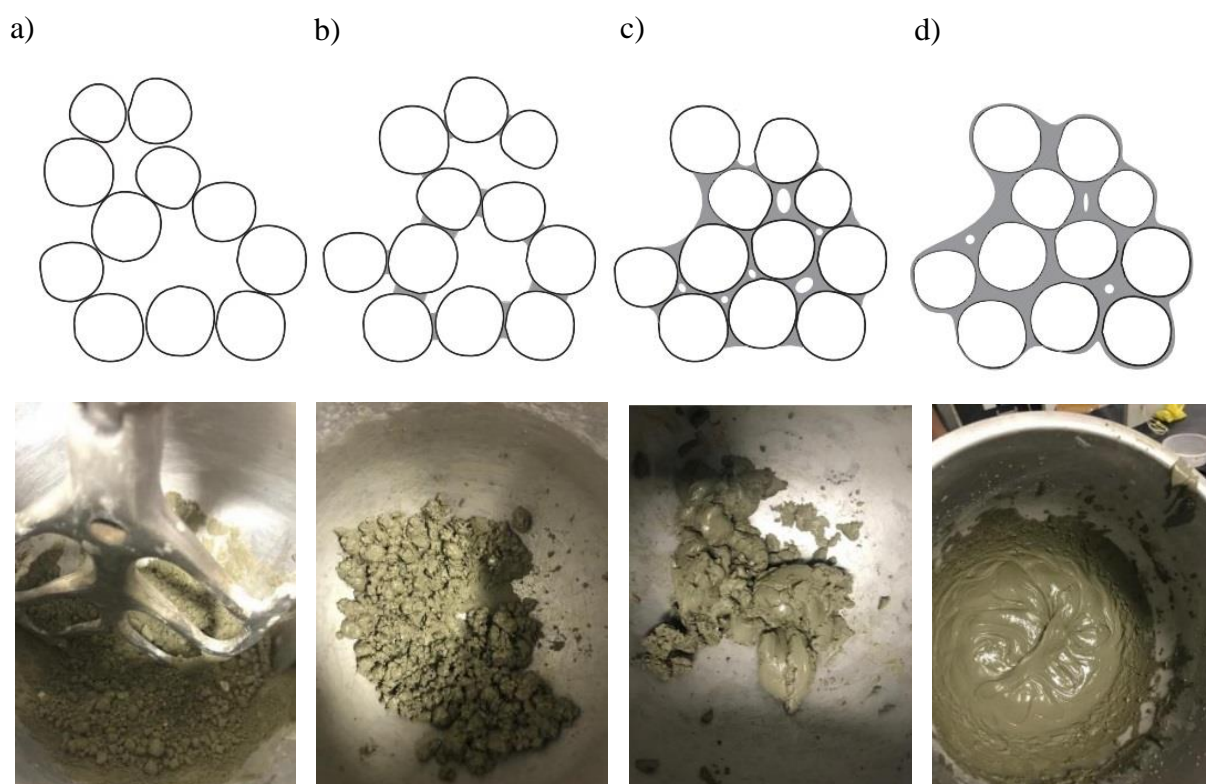
3.3.2.2 Cimento

Além dos ensaios de massa específica e granulometria, foram necessários alguns ensaios para formação do banco de dados do *software*, sendo um deles o ensaio de compacidade. A compacidade para materiais que apresentam partículas finas, diâmetro menor que 100 µm como

é o caso do cimento, pode ser realizado de maneira satisfatória por meio do ensaio de demanda de água.

Andrade (2018) destaca que esse ensaio tem por objetivo a determinação da quantidade de água necessária para preenchimento de todos os vazios de uma mistura granular. Durante o procedimento ocorrem 4 fases com características distintas, que podem ser visualizadas na Figura 3.17. A primeira delas é caracterizada pelo material em seu estado seco, sem aderência e com alto índice de vazios. Com a adição de água, o material entra na segunda fase, denominada pendular, que perdura até que a superfície de todos os grãos esteja completamente molhada. Posteriormente, na terceira fase 3, em que se tem o estado funicular, há presença de bolhas de ar no interior da mistura. Com mais adição de água, o material entra na fase capilar, em que se atinge o ponto de saturação, etapa na qual todos os vazios entre os grãos estão completamente preenchidos por água.

Figura 3.17 – Fases do ensaio de compacidade. (a) Estado seco, (b) estado pendular, (c) estado funicular e (d) estado capilar



Fonte: Formagini (2005); Santana e Oliveira (2018).

Para a realização do ensaio de compacidade dos finos, foi adotado um protocolo de ensaio, baseando-se no procedimento adotado por Silva (2004). Inicialmente, foi pesado 350,0 gramas de material totalmente seco, e em seguida colocado no misturador. Foi adicionada água em quantidade correspondente à 50% do que é previsto para que se atinja a demanda de água. O misturador foi ligado em velocidade baixa por 1 minuto. Foram adicionadas pequenas quantidades de água, e logo em seguida, após cada adição, foi feita a mistura do material por 1 minuto, em velocidade média, até a formação de aglomerados. Em seguida, com a mistura em repouso por 30 segundos, foi retirado o material retido na cuba e na pá com o auxílio de uma espátula. Por fim, o material foi misturado em velocidade alta por aproximadamente 1 minuto, encerrando-se o ensaio quando se obteve uma pasta homogênea. Foi anotado o consumo final de água e por meio da Equação 16, foi calculada a compacidade:

$$\Phi = \frac{1}{1 + me \cdot \frac{M_{\text{água}}}{M_1}} \quad (\text{Equação 16})$$

Sendo:

Φ = compacidade experimental;

me = é a massa específica do material (g/cm^3);

$M_{\text{água}}$ = é a massa de água para atingir o ponto de saturação (g);

M_1 = é a massa do material (g).

O ensaio é considerado subjetivo, uma vez que a determinação do ponto de saturação é visual. Em decorrência dessa característica do ensaio, a adição de água é realizada em pequenas quantidades, justamente para que a mudança das fases seja percebida visualmente.

A compacidade para os materiais considerados finos, foi realizada para duas amostras, em duas situações distintas: material sem adição de aditivo superplastificante e material com o aditivo, nos teores determinados experimentalmente para cada material. A colocação do aditivo, se deu logo após a primeira mistura, com a adição de 50% da água prevista. Para a compacidade final de cada material que foi inserido no *software* de dosagem, considerou-se a média das compacidades para as amostras 1 e 2. Os valores obtidos no ensaio, podem ser visualizados na Tabela 3.18.

Tabela 3.19 - Valores de Compacidade para o cimento Portland

Material	Amostra	Ponto de demanda de água (g)	Compacidade
Cimento Portland, sem superplastificante	1	100,0	0,538
	2	100,0	0,538
Cimento Portland, com superplastificante	1	80,0	0,593
	2	80,0	0,593

Fonte: Elaboração própria.

Ainda referente à formação do banco de dados dos materiais, durante a utilização do *software* de dosagem, foi percebido que valores de resistência à compressão do cimento Portland em pelo menos duas idades não é uma exigência obrigatória para se proceder com o processo de dosagem. Porém com a inserção de tais valores, é possível estimar a resistência à compressão do concreto dosado em diferentes idades.

Os valores de resistência do cimento Portland inseridos no software para complementação do banco e dados, foram inseridos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Devido a limitações de tempo do cronograma experimental da pesquisa, não foi possível realizar a verificação da resistência à compressão dos cimentos compostos com sílica ativa e nanossílica, e foi inserida a mesma resistência do cimento Portland CP V na idade de 28 dias, para o software fizesse a simulação de resistência para todos os traços de concreto dosados.

Para complementar o banco de dados do programa para posterior dosagem dos concretos, foi também necessário inserir a composição do cimento Portland CP V, usado na pesquisa. Não foi realizado nenhum ensaio específico e optou-se por inserir os valores limites da ANBT NBR 16697:2018, para essa tipologia de cimento, adotando 95% de clínquer e 5% de fíler calcário.

Foi necessário também realizar o ensaio para a determinação do teor de saturação do superplastificante. Foi seguido a metodologia proposta por Aïtcin (2000), por meio do cone de Marsh. Foram produzidas pastas de cimento Portland com um fator a/c de 0,4 e teores de aditivo superplastificante variando de 0 a 1%, considerando o seu teor de sólidos em relação à massa de cimento.

O ensaio consistiu em preparar uma pasta de cimento, segundo as recomendações de Aïtcin (2000), com medição do tempo de escoamento de 1000 ml de pasta pelo cone que tem diâmetro de 12,5 mm, em intervalos de tempo de 5, 10 e 30 min, contados após o processo de mistura. O cone e o suporte utilizados para a realização do ensaio podem ser visualizados na Figura 3.18. Entre cada intervalo para medição do tempo de escoamento, a pasta foi mantida na cuba em repouso, coberta por um pano úmido, evitando assim a perda de água da mistura.

Figura 3.18 - Cone e suporte utilizados para a realização do ensaio.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Aïtcin (2000), o teor do ponto de saturação do aditivo corresponde ao ponto, que nas condições experimentais adotadas para a mediação do tempo de escoamento, qualquer adição na dosagem do aditivo não gera efeito significativo na reologia da pasta de cimento. O ponto de saturação encontrado, foi expresso como o percentual da fração sólida do aditivo químico em relação à massa total do cimento e determinado através da curva obtida utilizando o Método AFREM desenvolvido por De Larrard *et al.* (1997). Neste método, o ponto de saturação do aditivo superplastificante é considerado como o teor de aditivo onde uma reta com inclinação de 2:5 tangencia a curva ‘logaritmo do tempo de escoamento versus teor de superplastificante’.

Para o teor de saturação de superplastificante com o cimento Portland, o valor encontrado foi de 0,2. O valor obtido por meio do ensaio está dentro da faixa orientativa considerada pelo fabricante, 0,2 a 1,0%, sobre o peso do cimento.

3.3.2.3 Aditivo Superplastificante

Para o aditivo que foi utilizado no trabalho, doado pela BASF, para as propriedades de teor de sólidos e viscosidade não foram feitos ensaios, uma vez que os dados foram obtidos diretamente com o fabricante do produto.

3.3.2.4 Sílica ativa

Foi necessária a realização do ensaio de compactidade do material, propriedade exigida para formação do banco de dados do *software* Bétonlab Pro 3. Como se trabalhou com cimento

composto por cimento com adição de sílica ativa, a compacidade foi realizada para a composição, respeitando os teores determinados para cada traço, seguindo o mesmo protocolo adotado para a compacidade do cimento Portland CP V – ARI. Os valores obtidos para a compacidade desse material, podem ser visualizados na Tabela 3.19.

Tabela 3.20 - Valores de Compacidade para o cimento Portland composto com sílica ativa

Material	Amostra	Ponto de demanda de água (g)	Compacidade
Cimento Portland e sílica ativa, sem superplastificante	1	105,0	0,532
	2	105,0	0,532
Cimento Portland e sílica ativa, com superplastificante	1	85,0	0,584
	2	85,0	0,584

Fonte: Elaboração própria.

O teor de saturação do superplastificante para o cimento composto com sílica ativa, obtido por meio do ensaio do funil Marsh foi de 0,2.

3.3.2.5 Nanossílica

Características como massa específica, viscosidade dinâmica e a densidade relativa da nanossílica utilizada, foram obtidas consultando diretamente o fabricante que fez a doação do material, a empresa Nouryon. No caso do ensaio de compacidade, ele não foi realizado individualmente para a nanossílica, e sim, para a composição de cimento Portland CP-V com NS, respeitando os teores estabelecidos para os traços que foram dosados e descontando o teor de água da solução coloidal, seguindo também o protocolo de ensaio adotado para a compacidade realizada individualmente para o cimento Portland CP V - ARI. Os valores referentes à compacidade do cimento composto com nanossílica podem ser encontrados na Tabela 3.20.

Tabela 3.21 - Valores de Compacidade para o cimento Portland composto com nanossílica

Material	Amostra	Ponto de demanda de água (g)	Compacidade
Cimento Portland e nanossílica, sem superplastificante	1	100,0	0,529
	2	100,0	0,529
Cimento Portland e nanossílica, com superplastificante	1	80,0	0,581
	2	80,0	0,581

Fonte: Elaboração própria.

Em se tratando do cimento composto com nano partículas de sílica ativa, o teor de saturação do superplastificante foi de 0,45. O valor considerado elevado em comparação ao obtido para o cimento Portland e cimento com adição de SF, se justifica pelo tamanho das partículas de sílica

ativa em escala nanométrica, o que faz com que o material composto tenha uma maior demanda de aditivo superplastificante.

3.3.2.6 Mistura de Sílica ativa e Nanossílica

Como um dos traços de concreto da pesquisa era composto pela adição de sílica ativa e nanossílica (CSF-NS), foi necessária a realização de alguns ensaios específicos para o cimento composto por sílica e nanossílica. Foi necessária verificação da compacidade da composição, bem como o teor de saturação do superplastificante.

Com base nos valores encontrados para complementação do banco de dados do *software* de dosagem, percebeu-se que a composição de cimento com a mistura de sílica ativa e nanossílica apresentou valores de compacidade e teor de saturação do superplastificante, bastante semelhantes ao que foi encontrado para cimento composto com nanossílica.

Os valores encontrados para a compacidade da mistura cimento, sílica ativa e nanossílica estão listados na Tabela 3.21. Já o ponto do teor de saturação do aditivo superplastificante encontrado para a mistura, foi de 0,45.

Tabela 3.22 - Valores de Compacidade para o cimento Portland composto com sílica ativa e nanossílica

Material	Amostra	Ponto de demanda de água (g)	Compacidade
Cimento Portland e nanossílica, sem superplastificante	1	105,0	0,532
	2	105,0	0,532
Cimento Portland e nanossílica, com superplastificante	1	85,0	0,584
	2	85,0	0,584

Fonte: Elaboração própria.

3.3.3 Dosagem de concreto utilizando o Bétonlab Pro 3

Esta ferramenta computacional utilizada para dosagem de concretos se baseia no Método do Empacotamento compressível (MEC), abordando o empacotamento dos grãos de uma mistura seca, para dosagem de concretos com a utilização de diversos tipos de material, como cimento, agregados miúdo, graúdo e adições.

De posse dos parâmetros iniciais de cada material utilizado para a formação do banco de dados do *software*, foi iniciado o procedimento de dosagem. Os detalhes de todos os passos para a formação do banco de dados com todos os constituintes podem ser encontrados no Anexo A.

Após complementação do banco de dados de acordo com os materiais utilizados na pesquisa, partiu-se de um traço de concreto convencional piloto que foi produzido na pesquisa de

mestrado de Silva (2019), que possui como traço unitário: 1:2,13:2,87:0,5. Além disso o percentual de aditivo superplastificante era de 0,38, a sua massa específica do concreto 2393,68 (kg/m³) e consumo de cimento de 368,26 (kg/m³).

A partir do traço piloto inserido no *software*, foram fixados alguns parâmetros para a obtenção dos 4 traços de concreto desejados, como foi o caso da relação a/c fixada em 0,4 e do abatimento fixado no intervalo de 120 ± 10 mm. Na Tabela 3.22 é possível visualizar todos os 4 traços que foram dosados utilizando o software. Embora tenha se trabalhado com cimento composto para conseguir dosar os concretos com adições, os quantitativos dos materiais encontrados foram bem próximos e conseqüentemente o traço unitário também.

Tabela 3.23 - Traços de concreto dosados pelo Bétonlab Pro 3

Propriedades	REF	SF	NS	SF_NS
G1 (kg/m ³)	1086,3	1079,7	1079,5	1075
S1 (kg/m ³)	785,9	776,1	786,5	783,2
C1 (kg/m ³)	392,7	394,6	393,2	393,2
SP (kg/m ³)	2,62	2,63	5,9	5,9
W (kg/m ³)	162,9	166,2	160,8	160,8
G1 %	57,11	57,27	56,94	56,94
S1%	42,89	42,73	43,06	43,06
Saturação do aditivo (%)	0,2	0,2	0,45	0,45
Quantidade de superplastificante (%)	0,2	0,2	0,45	0,45
Água efetiva	157,1	160,5	157,3	157,3
Total de ar (%)	1,5	1,4	1,6	1,6
G/S radio	1,382	1,391	1,373	1,373
Weff/C	0,4	0,407	0,409	0,4
C + KA	393	395	393	393
Weff/(C+KA)	0,4	0,407	0,409	0,4
Massa específica	2,43	2,419	2,426	2,418
Tensão de escoamento de cisalhamento (Pa)	1715	1531	1456	1652
Viscosidade plástica (Pa.s)	428	412	375	427
Slump (cm)	11	13	11,2	11,6
fc28(MPa)	53,6	51,3	53,5	54,7
Índice de segregação (confinado)	0,969	0,97	0,97	0,97
Índice de empacotamento de concreto não confinado	8,112	8,026	7,855	8,098
Empacotamento de esqueleto não confinado	0,8515	0,8492	0,8514	0,8512
Contribuição de finos K'f	2,717	2,857	2,621	2,813
Contribuição de agregado graúdo k'gg	1,594	1,556	1,558	1,56
Empacotamento dos agregados g*	0,7956	0,7959	0,7954	0,7954

Fonte: Bétonlab Pro 3

3.4 Produção e ensaios em concreto

De acordo com a dosagem do concreto utilizando o *software* Bétonlab Pro 3, os materiais utilizados foram secos em estufa. Após a mistura foram realizados os ensaios em estado fresco e em estado endurecido, nas idades especificadas para cada. Os procedimentos de moldagem e cura dos concretos seguiram o prescrito pela ABNT NBR: 5738:2015.

3.4.1 Estado Fresco

Para estudo do concreto produzido, ainda no estado fresco, foram realizados os três ensaios mostrados na Tabela 3.23, seguindo suas respectivas normas.

Tabela 3.24 - Ensaio do concreto no estado fresco

Propriedade	Método de ensaio
Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (<i>Slump test</i>)	ABNT NBR NM 67:1998
Massa específica	IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992)

Fonte: Elaboração própria.

O primeiro ensaio realizado foi para determinação da consistência dos concretos, realizado por meio do abatimento do tronco de cone de acordo com as prescrições da ABNT NBR NM 67:1998. Foi fixado para os quatro traços produzidos o valor de 120 ± 10 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio de massa específica seguindo as recomendações do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), em que um recipiente de volume e massa conhecidos, foi preenchido com duas camadas de concreto adensadas, e em seguida teve sua massa registrada.

3.4.2 Estado Endurecido

Para a avaliação das propriedades no estado endurecido do concreto produzido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples, de acordo com ABNT NBR 5739:2007. Para tal ensaio foram adotadas as idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias. Antes da realização dos ensaios as superfícies dos corpos de prova foram retificadas para que a carga fosse distribuída de forma uniforme em toda a sua área transversal.

3.4.3 Ensaios de Durabilidade

Para analisar os parâmetros de durabilidade dos concretos, foram realizados alguns ensaios específicos, como de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade,

resistividade elétrica, tanto volumétrica como superficial, carbonatação acelerada e migração de cloretos no estado não estacionário.

3.4.3.1 Absorção de água por imersão

O ensaio por imersão é regulamentado pela ABNT NBR 9778:2005. Utilizou-se três corpos de prova para cada um dos traços produzidos, com as dimensões de 10 x 20 cm, e idade de análise aos 63 dias.

As amostras foram secas em estufa em temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, até constância de massa e foi feita a aferição das massas dos corpos de prova. Em seguida, foram saturados durante 72 horas em água a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente, as amostras foram levadas para ebulição durante 5 horas em volume de água constante. A água resfriou de forma natural e a massa dos corpos de prova foram aferidas novamente.

3.4.3.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade, que ocorre através de ascensão capilar pelos poros do concreto, foi realizado conforme a ABNT NBR 9779:2012. Foram utilizados três corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm e a idade analisada foi 63 dias.

Mantidos em cura na câmara úmida até a idade de realização do ensaio, os corpos de prova foram secos em estufa em temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até constância de massa e após resfriamento foram colocados em lâmina de água com altura de 5 ± 1 mm, de forma a garantir um contato homogêneo da água com as faces inferiores dos corpos de prova.

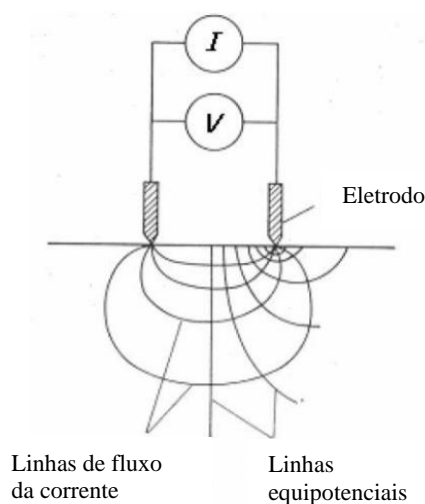
Seguindo as prescrições da norma, foi determinada a massa saturada dos corpos de prova com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 horas, a partir do momento da colocação na lâmina d'água. Por fim, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral para análise da altura da ascensão capilar ocorrida.

3.4.3.3 Resistividade elétrica volumétrica

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado diante da importância de associação deste parâmetro com a durabilidade dos concretos. A resistividade elétrica volumétrica do concreto, método de dois eletrodos, foi realizada seguindo a norma internacional AASHTO TP 199-15. O esquema para a determinação da resistividade pelo método de dois eletrodos pode ser

visualizado na Figura 3.19. Para ser possível corrente alternada, foi utilizado um transformador 220/110 V, e a corrente elétrica e a diferença de potencial elétrico produzidos foram medidos pela utilização de multímetros digitais. Os três corpos de prova de concreto de cada traço produzido, possuíam dimensões de 10 x 20 cm e idade adotada para realização do ensaio foi de 63 dias.

Figura 3.19 - Esquema para a determinação da resistividade: método dos dois eletrodos



Fonte: Millard (1991).

Antes da montagem e realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados visando proporcionar um maior contato entre os corpos de prova de concreto e os eletrodos. Pelo mesmo motivo foi utilizado um papel filtro com gramatura de 80 g/m², saturado em solução de cal hidratada e sua resistividade foi aferida, o que mostrou ser desprezível quando comparada aos resultados obtidos com os corpos de prova de concreto.

A indicação normativa foi de utilização dos corpos de prova na condição saturada com superfície seca, por isso ficaram em cura na câmara úmida e nas 24 horas que antecederam a realização do ensaio, as amostras ficaram imersas em solução de cal hidratada. Em seguida, cada amostra de concreto foi colocada entre um conjunto de placas de aço inoxidável, que funcionaram como eletrodos. Nessas placas, foi aplicada uma corrente elétrica e então foi feita a medição da diferença de potencial elétrico. No ensaio considerando a resistividade elétrica volumétrica, a corrente aplicada passa por toda a extensão do corpo de prova, da sua base até o topo. Na Figura 3.20 pode ser visualizado o ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.

Figura 3.20 - Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento



Fonte: Elaboração própria.

Após obtenção dos dados de corrente elétrica e tensão por meio do ensaio, foi possível por meio da Lei de Ohm, encontrar o valor da resistência elétrica, conforme a Equação 17.

$$R = \frac{V}{i} \quad (\text{Equação 17})$$

Sendo:

R = Resistência elétrica (Ω)

V = Diferença de potencial elétrico (V)

i = Corrente elétrica (A)

De posse da resistência elétrica, foi possível obter a resistividade elétrica volumétrica através da Equação 18.

$$\rho = R_{\text{cilindro}} \frac{A}{L} \quad (\text{Equação 18})$$

Sendo:

ρ = Resistividade elétrica volumétrica do concreto ($\Omega \cdot \text{cm}$)

R_{cilindro} = Resistência elétrica (Ω)

A/L = Fator referente à geometria do corpo de prova de concreto, no caso desta pesquisa, equivale ao valor 4. (A = área da seção transversal - cm^2 ; L = comprimento do corpo de prova - cm).

Ainda de acordo com a AASHTO TP119:2015, existe uma classificação quanto à penetração de cloretos baseada nos valores da resistividade elétrica volumétrica. Os valores para a classificação se dividem em quatro faixas e os valores estão apresentados na Tabela 3.24.

Tabela 3.25 - Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de cloretos

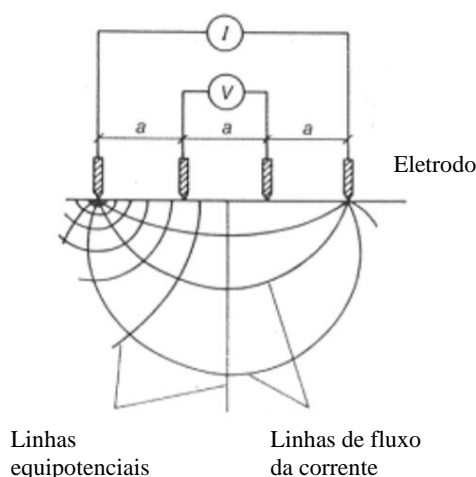
Classificação quanto à penetração de cloretos	Resistividade uniaxial (k Ω .cm)
Alta	< 5,2
Moderada	5,2 – 10,4
Baixa	10,4 – 20,8
Muito Baixa	20,8 – 207

Fonte: AASHTO TP119 (2015).

3.4.3.4 Resistividade elétrica superficial

Para a resistividade elétrica superficial, pelo método dos quatro eletrodos de Wenner, foi seguida a norma internacional ASTM G57-06:2012. Conforme apresentado na Figura 3.21, o esquema do aparato utilizado no ensaio apresenta quatro eletrodos posicionados de forma linear espaçados entre si por uma mesma distância.

Figura 3.21 - Esquema para a determinação da resistividade: método dos quatro eletrodos

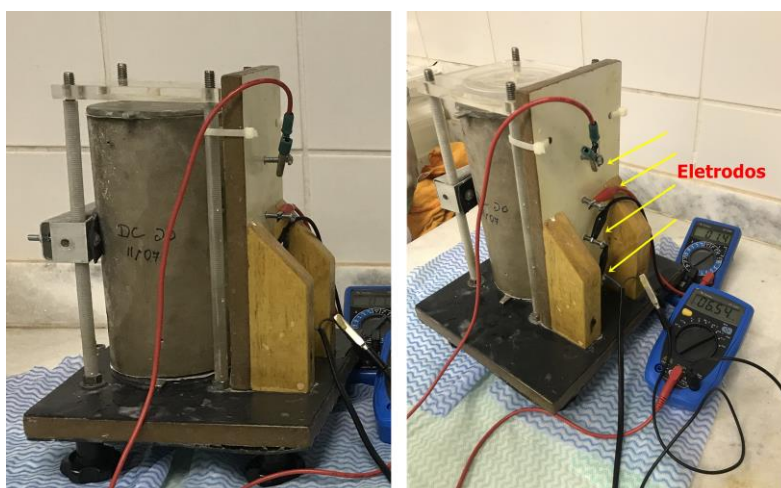


Fonte: Millard (1991).

Os quatro eletrodos ficaram em contato com a superfície lateral do corpo de prova de concreto, com dimensão de 10 x 20 cm. Também foram utilizados três corpos de prova para cada um dos traços de concreto produzidos, e a análise foi feita aos 63 dias de idade.

O ensaio consistiu em aplicar uma corrente alternada entre os dois eletrodos mais externos, enquanto os eletrodos internos são utilizados para a medição da diferença de potencial elétrico, por meio do uso de multímetros digitais, Figura 3.22.

Figura 3.22 - Ensaio de resistividade elétrica superficial em andamento



Fonte: Silva (2019).

A resistência elétrica foi novamente calculada com base na Lei de Ohm (Equação 10), e a resistividade elétrica foi calculada por meio da Equação 19:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R \quad (\text{Equação 19})$$

Sendo:

ρ = Resistividade elétrica superficial do concreto ($\Omega \cdot \text{cm}$)

α = Espaçamento entre os eletrodos (cm)

R = Resistência elétrica (Ω)

É importante ressaltar que existe uma diferença considerável nos valores obtidos por meio dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial. No caso de análise dos resultados e possíveis comparações é necessário se atentar ao fato de que os valores de resistividade elétrica superficial geralmente são o dobro do que se obtém no ensaio de resistividade elétrica volumétrica (COSTA e AZZI, 2017).

3.4.3.5 Carbonatação acelerada

A câmara de carbonatação acelerada utilizada no ensaio seguiu as exigências de ISO 1920-12:2015 e as condições adotadas para realização do ensaio de carbonatação acelerada foram a temperatura na faixa de $27 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade relativa equivalente em $65 \pm 5\%$ e concentração de CO_2 de $3 \pm 0,5\%$ em volume. As condições e parâmetros necessários foram controlados através de sensores e de uma placa arduino, que controlava de forma automatizada a concentração de CO_2 e a temperatura.

Quando a temperatura atingia um valor abaixo da faixa necessária, uma lâmpada era acionada até que o valor atingisse o desejado. No caso do CO₂ quando estava em um valor inferior ao recomendado era acionada uma válvula para liberação do elemento. No caso da umidade no interior da câmara, o controle foi feito por meio da utilização de sílica gel, com troca do material sempre que necessário. Para garantir a circulação de ar e a homogeneidade da concentração, foram utilizados pequenos ventiladores no interior da câmara. Na Figura 3.23 pode ser visualizada a câmara de carbonatação utilizada neste ensaio.

Figura 3.23 - Câmara de carbonatação utilizada no ensaio.



Fonte: Elaboração própria.

Na câmara de carbonatação acelerada existia um display que possibilitava o monitoramento dos parâmetros do ensaio no interior do dispositivo, controlados por meio de uma placa Arduino e sensores de temperatura, umidade e concentração de CO₂. A umidade e temperatura eram determinadas através de um sensor DHT11 e para a determinação da concentração de CO₂, era utilizado um sensor COZIR-WR da CO₂ METER Inc. Em seu interior, era utilizado um sistema solenoide, para que os parâmetros se mantivessem estabelecidos conforme as recomendações normativas. Quando os valores estavam abaixo do planejado, a válvula (para a concentração do CO₂) ou a lâmpada (para a temperatura) eram acionadas para o valor retornar ao intervalo desejado. Para a umidade, o procedimento era diferente, na qual foi controlada por um recipiente com sílica gel no interior da câmara. Além disso, também foram colocados ventiladores para que a circulação de ar, para garantir a homogeneidade da concentração de

CO₂. Os parâmetros aferidos durante a carbonatação dos concretos, podem ser visualizados no Anexo B, para cada hora de leitura dos dados correspondente.

Foram utilizados corpos de prova de formato prismático, com dimensões de 40 x 10 x 10 cm. Para cada traço de concreto foram utilizados dois corpos de prova. Após a etapa de produção do concreto e moldagem dos corpos de prova, eles foram mantidos em cura úmida até completarem 28 dias de idade. O pré condicionados dos corpos de prova, foi feito por 14 dias, processo no qual foram mantidos em ambiente laboratorial para estabilização da umidade. Quatro faces do prisma foram seladas com parafina, de forma a direcionar o fluxo de difusão unidirecional do dióxido de carbono, permitindo assim a carbonatação apenas em duas faces. Em seguida, os corpos de prova foram levados para a câmara de carbonatação, permanecendo por 56 dias. Para os dois últimos traços de concreto produzidos, em razão da pandemia e de limitações no cronograma, não foi possível a realização da leitura na idade de 56 dias, e as leituras foram realizadas aos 49 dias no traço CNS e aos 42 dias para o traço CSF-NS. Em função das diferentes idades em que as leituras foram realizadas, foi calculado o coeficiente de carbonatação.

Após serem submetidos à carbonatação, os corpos de prova foram rompidos e na sua face interna foi aspergida uma solução composta por 70% de álcool etílico, 29% de água destilada e 1% de fenolftaleína, que funcionou como indicador de pH. Em cada lateral da face exposta foram realizadas 10 leituras por meio de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, e como resultado adotou-se a média dos 40 valores obtidos por meio da medição. Na Figura 3.24 está apresentado um corpo de prova rompido após a aplicação da solução de fenolftaleína.

Figura 3.24 - Corpo de prova antes e após aplicação de fenolftaleína em idade de 56 dias



Fonte: Elaboração própria.

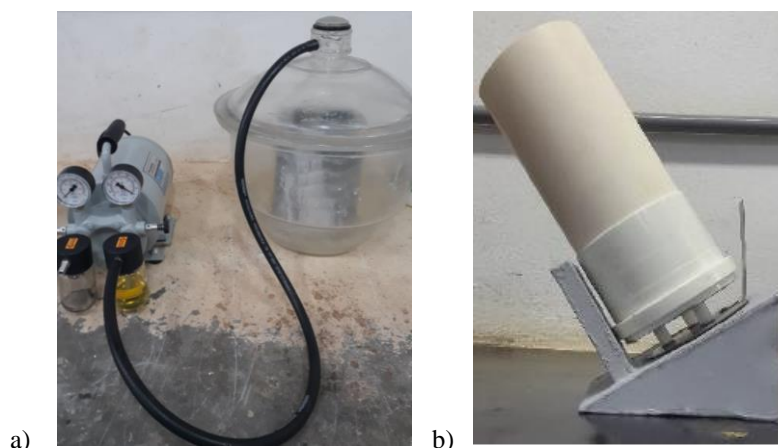
3.4.3.6 Migração de cloretos no estado não estacionário

Para obtenção do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário foi realizado o ensaio seguindo as prescrições de NT Build 492:2011. Os corpos de prova utilizados foram no formato cilíndrico com dimensões de 10 x 20 cm e foram cortados em quatro partes iguais de 10 x 5 cm, e as duas partes internas foram utilizadas no ensaio. Após o corte, procedeu-se com lavagem em água corrente para a retirada de material pulverulento e as superfícies foram secas para evitar excesso de água. Para cada traço de concreto, foram utilizadas 4 amostras.

Em seguida, foi dado início à fase de pré-condicionamento da amostra, em que elas foram colocadas em um recipiente à vácuo com exposição de suas faces a uma pressão interna entre 1 e 5 KPa, por um período de 3 horas. O recipiente com as amostras foi preenchido com solução de hidróxido de cálcio dissolvido em água destilada até imersão total. O vácuo foi mantido para garantir que os poros ficassem saturados com a solução. Após a finalização do pré-condicionamento, as amostras foram colocadas em aparatos de pvc e as partes inferior e superior foram vedadas com selante de silicone para que as soluções não vazassem pelas bordas.

Foram então posicionadas duas placas de aço inox para aplicação da diferença de potencial, necessária para a realização do ensaio. Das placas de inox utilizadas, a superior possuía perfurações em toda a seção de forma a permitir contato da solução com o corpo de prova de concreto, enquanto a placa inferior possuía pinos plásticos para que fosse possível a solução catódica entrar em contato direto com a amostra, por meio do espaço existente. As amostras devidamente preparadas e vedadas foram colocadas sobre um suporte com inclinação de 30° dentro de um recipiente plástico com capacidade para colocação de quatro conjuntos com amostras de um mesmo traço. Na Figura 3.25 estão apresentadas as amostras em pré-condicionamento e colocadas corretamente no suporte inclinado.

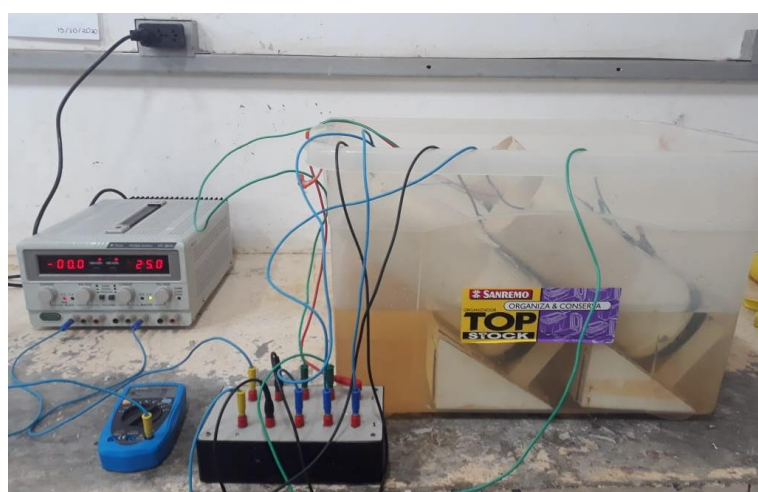
Figura 3.25 – (a) Pré-condicionamento das amostras para realização do ensaio de migração. (b) Amostra posicionada sobre o suporte com inclinação de 30°



Fonte: Elaboração própria.

No recipiente plástico foi colocada uma solução catódica de 10% de cloreto de sódio em relação a massa de água. Em cada aparato com amostra de concreto foi colocada uma solução anódica de hidróxido de sódio em água destilada, seguindo a proporção de 1,2 g de NaOH para cada 100 g de água. Finalizadas as etapas de preparo de amostras e montagem do aparato, foi feita uma conexão em paralelo, de forma que os cátodos foram ligados ao polo negativo e os ânodos ao polo positivo de uma fonte de corrente contínua da marca Minipa, modelo Power Supply MPC-3003 D. A Figura 3.26 apresenta todo o aparato já montado e o ensaio já em andamento.

Figura 3.26 - Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em andamento.



Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente a fonte foi ajustada para 30 V e com o auxílio de um multímetro digital foi aferida a corrente inicial em cada amostra. Com base nesse valor inicial a corrente foi ajustada de acordo com a Tabela 3.25, seguindo a NT Build 492:2011.

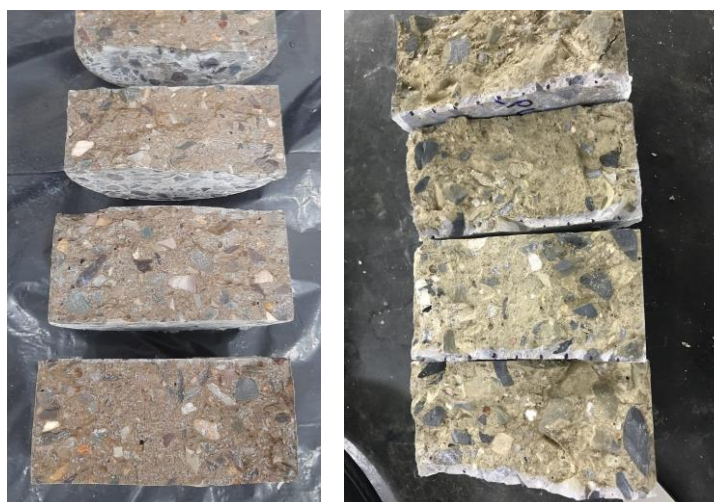
Tabela 3.26 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário

Corrente inicial I30V (Com 30V) (mA)	Tensão aplicada U (depois do ajuste) (V)	Provável nova corrente inicial (mA)	Duração do ensaio (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: NT BUILD 492 (2011).

Após os ajustes necessários anotou-se os valores da corrente inicial de cada amostra e a temperatura da solução anódica. Ao final do ensaio, essas medições foram registradas novamente e registradas. As amostras foram então rompidas por compressão diametral e na superfície fraturada foi feita a aspersão de nitrato de prata (AgNO_3) 0,1 molar. A aspersão do nitrato de prata teve como objetivo a medição da frente de penetração de cloretos, uma vez que, ao entrar em contato com o cloreto impregnado no concreto ocorre uma reação química que resulta em cloreto de prata (AgCl). O contraste visual da amostra em duas cores distintas torna possível a medição da frente penetração de cloretos, pois a parte que contém cloretos se torna mais clara e prateada, em relação a tonalidade do restante da superfície da amostra, Figura 3.27.

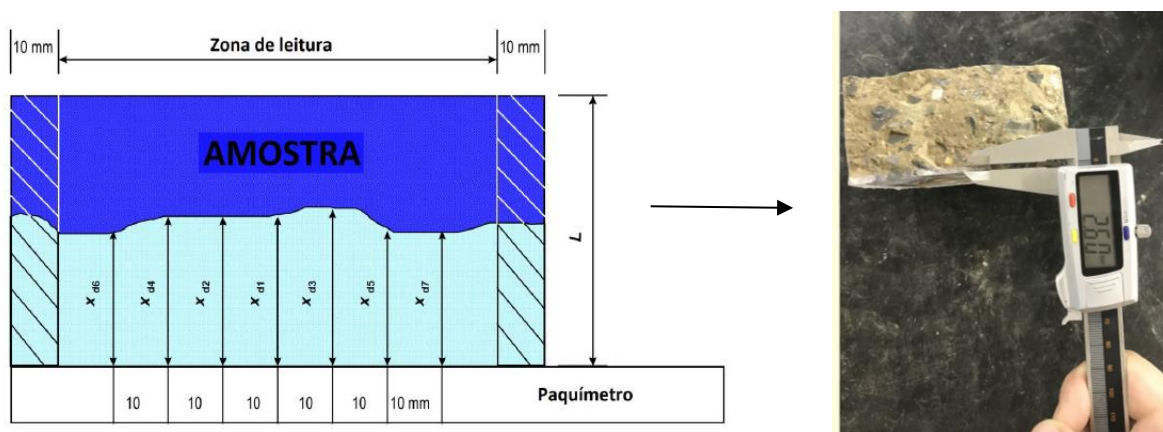
Figura 3.27 – Amostras após aplicação de nitrato de prata



Fonte: Elaboração própria.

A forma correta para a leitura da frente de penetração de cloretos de acordo com a NT Build 492:2011, é começar do centro para as duas extremidades, respeitando o intervalo de 10 mm entre cada ponto de leitura, realizando um total de 7 medições. Na Figura 3.28 está indicado o procedimento correto para a realização da medição da frente de penetração de cloretos. Medições muito próximas à borda devem ser evitadas justamente pelo efeito de borda devido a um grau não homogêneo de saturação ou até mesmo por um possível vazamento.

Figura 3.28 - Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos



Fonte: Adaptado de NT BUILD 492 (2011).

De posse dos dados obtidos durante a realização do ensaio e da Equação 20, é possível calcular o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273+T)L}{(U-2)t} \left(Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T) L Xd}{U-2}} \right) \quad (\text{Equação 20})$$

Sendo:

D_{nssm} = Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário (10^{-12} m²/s);

U = Valor da tensão (V);

T = Média entre as temperaturas finais e iniciais (°C);

t = Duração do ensaio (h);

L = Espessura do corpo de prova (mm);

Xd = Média da frente de penetração de cloretos (mm).

3.5 Ensaios microestruturais

Os ensaios microestruturais foram realizados para possibilitar análise e verificação do comportamento dos materiais, arranjo de suas partículas e sua estrutura interna. Foram

propostos os ensaios de difração de raios-X (DRX) e análise termogravimétrica (TG). A Tabela 3.26 apresenta de forma resumida os ensaios microestruturais que serão realizados, bem como o local de realização de cada um e as respectivas idades analisadas.

Tabela 3.27 – Resumo dos ensaios realizados em pastas

Ensaio	Idade	Local
Difratometria de raios-x (DRX)	1,3,7 e 63 dias	IG/UnB
Análise termogravimétrica (TG)	63 dias	CRTI/UFG

Fonte: Elaboração própria.

3.5.1 Produção das pastas e paralisação da hidratação

Ressalta-se que tais ensaios não foram realizados em concretos, e sim em pastas de cimento Portland, respeitando as proporções dos quatro traços de concretos produzidos. Os quantitativos de materiais para cada traço podem ser visualizados na Tabela 3.27. Para a produção das pastas para os ensaios microestruturais, foi mantida a consistência para todas os traços em 100 ± 10 mm, verificada por meio do ensaio de mini abatimento, baseado na técnica de Kantro (1980), que permite a comparação entre a consistência das pastas frescas. Ressalta-se que a quantidade de água de cada traço foi ajustada de acordo com o teor de água do aditivo superplastificante e da nanossílica coloidal.

Tabela 3.28 – Quantitativo de materiais utilizados em cada traço

TRAÇOS	MATERIAL (g)				
	CP V - ARI	Sílica ativa	NS coloidal	Aditivo SP	Água*
REF	1500,00	0,0	0,0	1,95	598,64
SF	1363,50	136,50	0,0	6,00	595,80
NS	1470,60	0,0	29,4	17,00	421,50
SF-NS	1334,25	136,35	29,4	20,00	419,40

* Quantidade de água ajustada levando em consideração a água presente na nanossílica e no aditivo.

Fonte: Elaboração própria.

A sequência de mistura foi realizada respeitando a seguinte ordem: primeiramente, foi colocada na cuba a mistura de água e nanossílica coloidal para os traços que utilizaram essa adição; com o misturador ligado foi acrescentado o cimento, juntamente com sílica ativa nos traços SF e SF-NS, com tempo de mistura de 30 segundos na velocidade baixa; prosseguiu-se com a adição do aditivo superplastificante, misturando por 1 minuto em velocidade alta; 30 segundos para foi retirado o material retido na cuba e na pá com o auxílio de uma espátula e, por fim, mais 30 segundos de mistura em velocidade alta.

Na preparação das amostras, após moldagem e cura, os corpos de prova foram armazenados em recipiente com água saturada de cal até a data que cada corpo de prova precisava ser retirado, respeitando as idades definidas. Foi feita fratura dos corpos de prova rompidos com talhadeira e marreta para retirar fragmentos de sua parte central. O procedimento de paralisação da hidratação das pastas, seguindo a metodologia de Scrivener (2016), foi por meio de imersão em isopropanol por cerca de 6 horas e em estufa a 40 ± 1 °C durante 24 horas. As amostras foram acondicionadas em embalagens com sílica gel e cal sodada. Ao final, foi realizada a pulverização dos fragmentos das pastas de cimento em pedaços menores com o uso de um martelo e almofariz de ágata.

3.5.2 Termogravimetria

A termogravimetria, técnica utilizada para avaliar o desenvolvimento da hidratação de materiais cimentícios e consiste na análise de três regiões referentes a desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), cada uma delas em uma faixa de temperatura específica. Essas regiões estão relacionadas com a decomposição do C-S-H, do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e do CaCO_3 , respectivamente. A análise térmica foi utilizada para avaliar o teor de CH presente nas pastas, que é calculado por meio da perda de massa das pastas que ocorre na faixa da temperatura da desidroxilação do CH, determinada por meio da análise do gráfico gerado durante o ensaio. A curva TG consiste na perda de massa de uma amostra em função do aumento de temperatura, enquanto a DTG é uma derivada de curva TG, que representa a diferença da perda de massa em cada faixa de temperatura.

As amostras para a realização do ensaio foram obtidas a partir dos fragmentos de pastas que tiveram a sua hidratação paralisada. Próximo a data de realização do ensaio, os fragmentos foram moídos com auxílio do almofariz de ágata, até que o material passasse totalmente pela peneira 200 (0,075 μm), sendo repetido o processo de recolocação do almofariz e repetindo a moagem quando necessário.

O ensaio de TG/DTG foi realizado para as amostras na idade de 63 dias. O analisador termogravimétrico é um equipamento com balança acoplada a um forno com capacidade de alcançar elevadas temperaturas e pode ser visualizado na Figura 3.31. Para a realização do ensaio foram seguidos alguns parâmetros como massa da amostra de 10 ± 1 mg, faixa de temperatura analisada de 50 a 1000 °C, rampa de aquecimento de 10°C/min, atmosfera de N_2 com fluxo de 100 ml/min e cadinho de platina para colocação das amostras. Para a realização

do ensaio com duas amostras simultâneas foi utilizada a função Dual Sample do equipamento (Figura 3.29).

Figura 3.29 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de TG

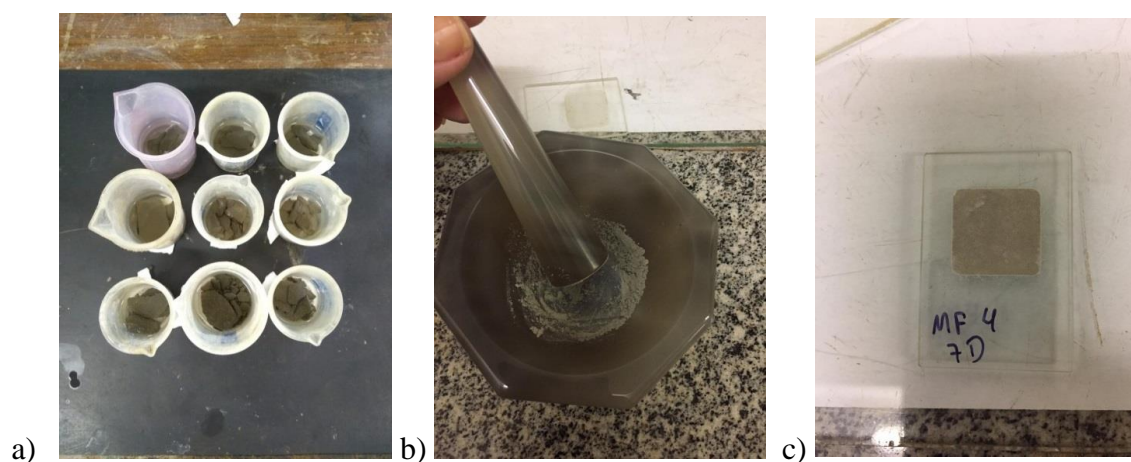


Fonte: Elaboração própria.

3.5.3 Difratometria de raios-x

O ensaio de difração de raios-x (DRX) foi realizado para pastas aos 1, 3, 7 e 63 dias de hidratação. Para a realização deste ensaio, as amostras foram moídas com auxílio de um almofariz de ágata, visando a diminuição da granulometria, até que o material passasse totalmente pela peneira 200 (0,075 μm). Em seguida, a amostra em pó foi espalhada sobre a lâmina de vidro escavada, por meio de movimentos não orientados, pressionando-se a amostra com auxílio de uma espátula, de modo que a amostra ficasse homogênea, evitando a possível sobreposição dos cristais, o que causaria interferências durante a varredura dos raios-x. Na Figura 3.30 podem ser visualizadas etapas de paralisação da hidratação e preparação das amostras para ensaio de DRX.

Figura 3.30 – a) Fragmentos das pastas em isopropanol para paralisação da hidratação. b) Pulverização dos fragmentos das pastas de utilizando o almofariz; c) Pó da amostra total posicionada e identificada na lâmina.



Fonte: Elaboração própria.

Depois das amostras devidamente preparadas, por meio do ensaio de difração de raios-x (DRX), foi possível realizar identificar a composição mineralógica, as fases cristalinas e a avaliação da intensidade dos picos característicos de CH nas pastas estudadas. Foi utilizado o difratômetro de raios-x modelo Ultima IV da marca RIGAKU, operando com um filamento de tungstênio como cátodo e um tubo de raios-x de cobre ($\text{CuK}\alpha=1,54056\text{\AA}$), sob potência de 35 kV e corrente de 15 mA, no intervalo de 2θ igual a 2° até 60° . A velocidade de varredura foi de $5^\circ/\text{min}$ e passos de $0,05^\circ$. A identificação das fases cristalinas foi realizada com o auxílio do software JADE 3.0, com banco de dados Powder Diffraction File produzido pelo International Centre for Diffraction Data (ICDD).

3.6 Análise Estatística

Os resultados do programa experimental foram analisados estatisticamente, por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Duncan (caso necessário), através do software STATISTICA v10, desenvolvido pela StatSoft®.

Utilizou-se ainda o Teste de Duncan, nos casos que o tipo de traço e tipo de adição tem influência sobre a variável dependente analisada, com o objetivo de verificar se existe diferença significativa entre as médias obtidas, agrupando assim os valores semelhantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo piloto em pastas para a determinação da relação a/c dos concretos (item 4.1), resultado dos ensaios realizados em concreto no estado fresco (4.2), no estado endurecido (item 4.3), resultados do estudo realizado para análise das propriedades de durabilidade dos concretos produzidos (item 4.4), e por fim, os resultados obtidos por meio do estudo do comportamento microestrutural de pastas de cimento (item 4.5).

4.1 Estudo piloto em pastas de cimento Portland

O estudo preliminar para avaliação do comportamento de pastas de cimento Portland com adição de nanossílica realizado para três relações de a/c diferentes, tem os resultados obtidos apresentados a seguir, que abordam as três análises realizadas: consistência das pastas em estado fresco, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade pelo método EMM-ARM.

4.1.1 Análise da consistência das pastas

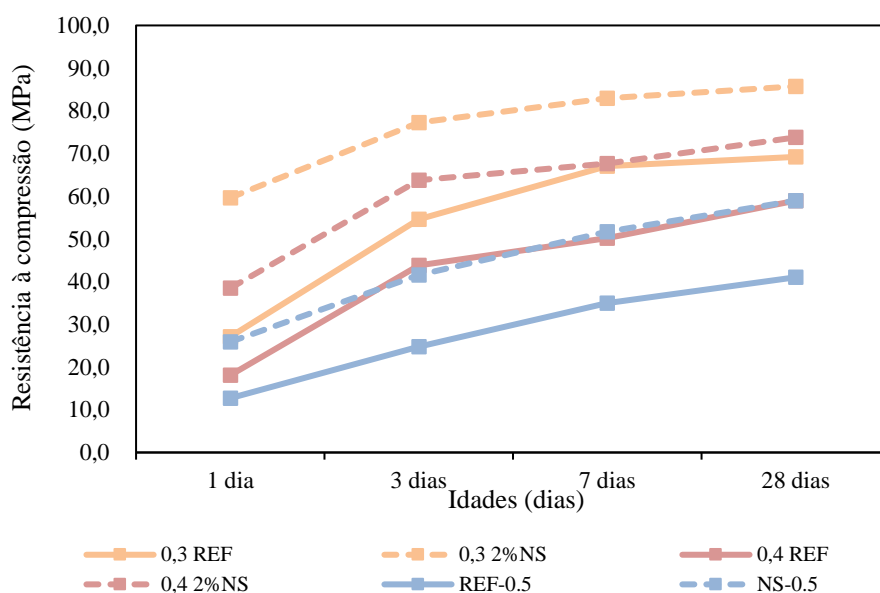
Na etapa de preparação das pastas e ainda em estado fresco, foi possível perceber uma alteração nos teores de aditivo superplastificante entre as pastas de referência e as pastas com adição de nanossílica, para que fosse mantida a consistência determinada. Para as três relações de a/c utilizadas na pesquisa realizada, foi perceptível a necessidade de uma maior quantidade de aditivo superplastificante nos traços com adição de NS, para que fosse mantida a consistência determinada. No caso do presente estudo os valores de a/c foram fixados, e por isso, necessários ajustes na quantidade do aditivo. Abd El Aleem *et al.* (2014) comprovou em seu estudo que para maiores teores de NS, é necessária maior quantidade de água para manter a consistência.

Kahallo *et al.* (2016) também observaram o aumento da consistência em materiais cimentícios com a adição de teores de nanossílica. Os autores afirmam que tal ocorrência pode estar relacionada à elevada área superficial específica das nanopartículas de sílica e a sua tendência de aglomeração. As partículas aglomeradas são responsáveis por elevada absorção e retenção de água.

4.1.2 Resultados de resistência à compressão das pastas

Com base nos valores apresentados na Figura 4.1 e Tabela 4.1, é perceptível que a adição de nanossílica proporciona aumento considerável na resistência à compressão das pastas para todas as idades, de forma mais acentuada nas idades iniciais. Esse ganho de resistência à compressão das pastas binárias contendo nanossílica é consistente com outros trabalhos já reportados na literatura (FLORES *et al.*, 2017; ABD EL ALEEM *et al.*, 2014). Por apresentar menor quantidade de água, as pastas de referência e com adição de NS para relação a/c de 0,3 apresentaram, para todas as idades analisadas, os maiores valores de resistência. O maior ganho de resistências nas idades iniciais também foi observado em trabalhos anteriores (FLORES *et al.*, 2017).

Figura 4.1 - Resistência à compressão das pastas de cimento nas idades analisadas.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.1 - Valores médios de resistência à compressão simples para as pastas de cimento Portland aos 1, 3, 7 e 28 dias de idade.

Relação a/c	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		Aumento de resistência à compressão das pastas com NS em relação às pastas REF (%)
		REF	NS	
0,30	1	23,9	60,3	152,36
	3	54,5	77,3	41,83
	7	69,3	82,9	19,62
	28	70,5	84,9	20,45
0,40	1	16,7	36,7	119,69
	3	44,6	63,8	43,05
	7	47,3	67,7	43,13
	28	58,4	79,8	36,64

Tabela 4.1 - Valores médios de resistência à compressão simples para as pastas de cimento Portland aos 1, 3, 7 e 28 dias de idade (Continuação).

0,50	1	12,0	25,7	113,41
	3	27,1	43,1	58,95
	7	34,5	49,5	43,34
	28	39,9	56,7	41,88

Fonte: Elaboração própria.

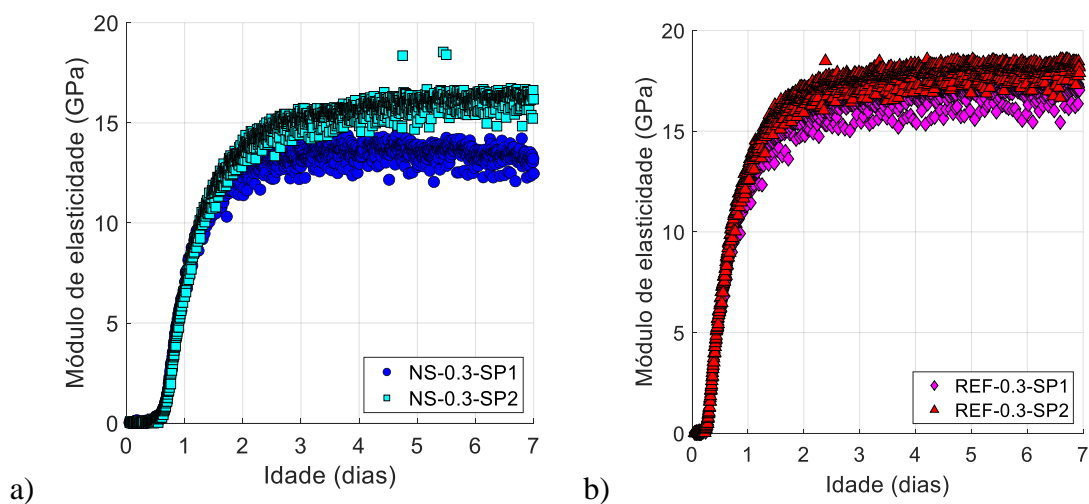
Conforme observado, em todas as idades analisadas e para todas as relações a/c estudadas, as pastas com adição de 2% de nanossílica, apresentaram ganho de resistência considerável. Abd El Aleen *et al.* (2014), justificaram em suas pesquisas que o ganho de resistência proporcionado pela NS ocorre devido à hidratação contínua promovida pela mesma e a formação de grandes quantidades de C-S-H e aluminossilicato. Além disso, as nano partículas se acumulam nos poros disponíveis, formando uma estrutura mais compacta. Outra razão para este comportamento é o fato da adição NS comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a macroestrutura e microestrutura, mas também como um ativador para promover as reações pozolânicas, reagindo com o CH e levando a uma maior precipitação dos produtos hidratados, tornando a microestrutura homogênea e mais densa.

A adição de NS se mostrou mais eficiente para as relações de a/c mais baixas, conferindo assim, uma elevação nos valores de resistência à compressão. Porém, nas idades iniciais, até 7 dias, e para o traço com relação a/c = 0,3, os materiais cimentícios ficam mais suscetíveis à ocorrência de retração autógena, o que pode desencadear um processo de fissuração do material (SANTOS, 2016). O comportamento de fissuras são, como consequência da retração autógena pode ter ocorrido nas pastas estudadas nas idades iniciais, fato que não pode ser comprovado, uma vez que não foi efetivado um estudo de retração.

4.1.3 Evolução do módulo de elasticidade das pastas

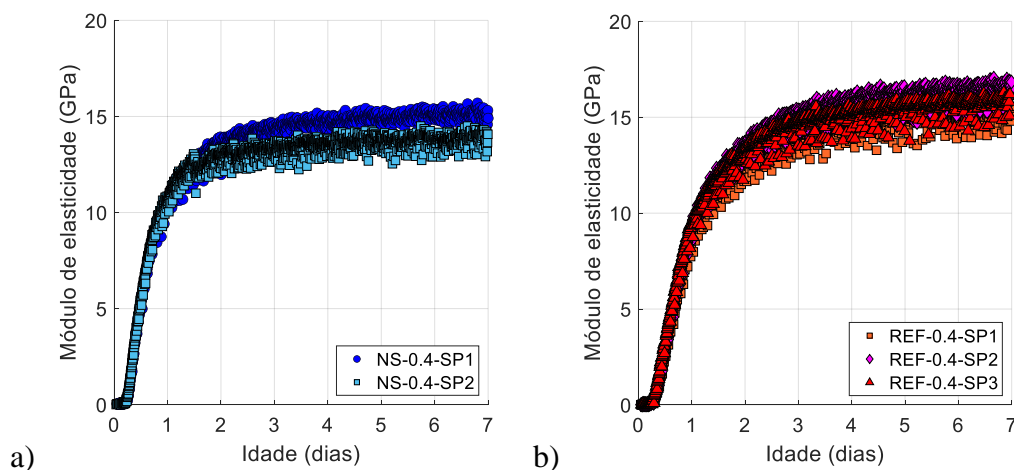
De maneira geral, todas as misturas apresentaram uma boa coerência entre as repetições testadas. Portanto, não houve necessidade de descartar amostras para realizar o ajuste da curva de evolução do módulo de elasticidade. O comportamento obtido para as pastas pode ser visualizado nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Para facilitar a visualização e discussão dos resultados, as análises foram realizadas nas curvas de evolução do módulo de elasticidade médias de cada mistura, obtidas a partir do ajuste da curva de evolução do módulo de elasticidade para cada amostra (SP) e, a seguir, calculando a média delas.

Figura 4.2 – Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,3.



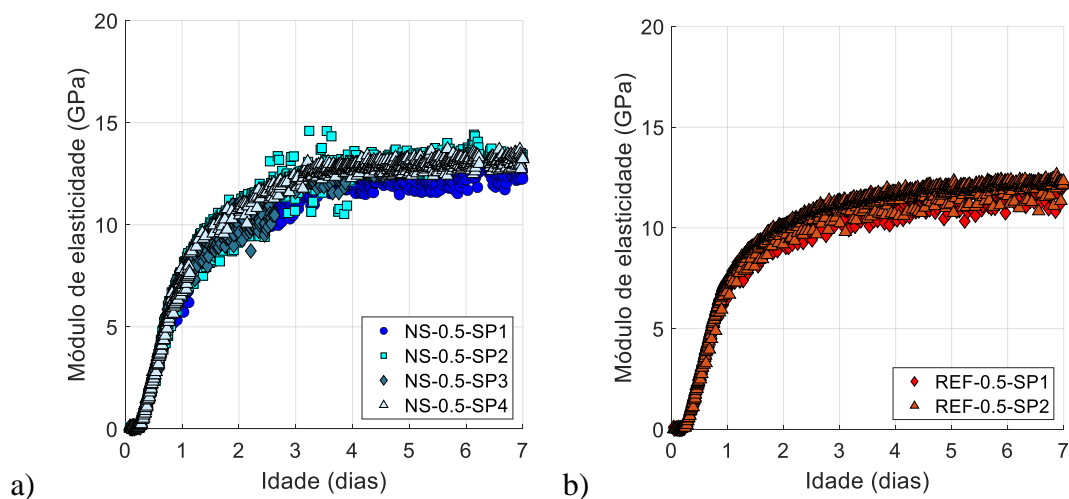
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.3 - Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,4.



Fonte: Elaboração própria.

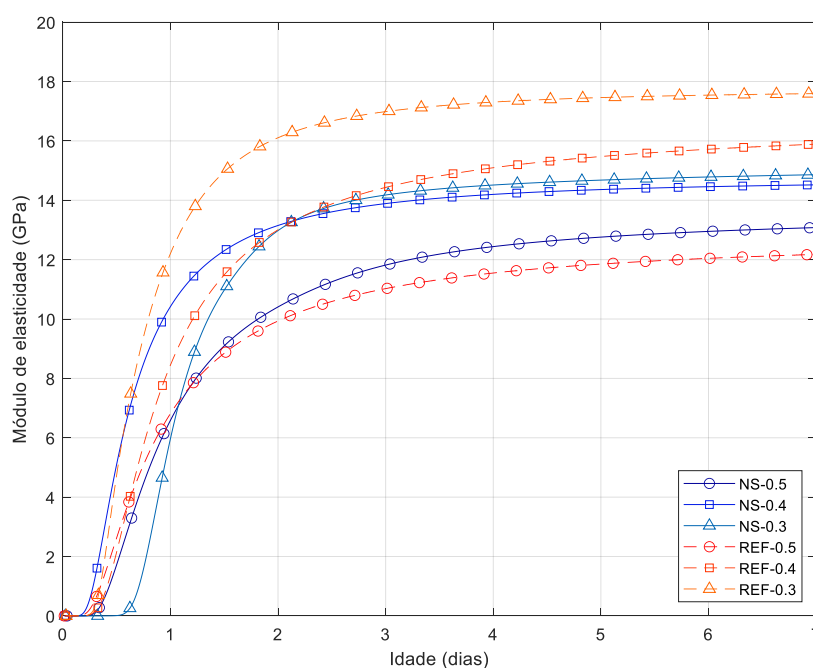
Figura 4.4 - Resultados do EMM-ARM para pastas com a/c de 0,5.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme esperado, o aumento da relação a/c levou à diminuição dos valores do módulo de elasticidade, que foram observados tanto nas pastas de cimento NS quanto REF. No entanto, as misturas NS parecem ser mais sensíveis à relação a/c do que os cimentos REF. Na verdade, enquanto o NS-0,5 atingiu, respectivamente, 87,9% e 89,9% das misturas NS-0,3 e NS-0,4, a mistura REF-0,5 atingiu, respectivamente, 69,10% e 76,61% das misturas REF-0,3 e REF-0,4. O comportamento das pastas com três diferentes relações de a/c, podem ser observados na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Curvas médias do módulo de elasticidade para cada mistura.



Fonte: Elaboração própria.

Finalizada a etapa de validação do método EMM-ARM, para a análise de evolução do módulo de elasticidade dos traços analisados, duas replicatas foram ensaiadas simultaneamente. Esta análise foi realizada em todos os traços com adição de NS, e também de referência, para as relações de a/c de 0,3; 0,4 e 0,5.

Observando o comportamento dos dois traços com a relação de a/c = 0,3, nota-se que a evolução dos valores de módulo de elasticidade do traço referência foi levemente superior nos três primeiros dias, em relação ao traço com NS. O desenvolvimento visualmente tardio do traço com NS, cujo módulo de elasticidade iniciou seu desenvolvimento algumas horas depois do traço REF, pode ser atribuído a um possível efeito retardante do superplastificante. Para a relação a/c = 0,3, o traço NS apresentou valores finais para o módulo de elasticidade consideravelmente menores que os do traço REF.

Para relação a/c de 0,4 observou-se que o módulo de elasticidade para as pastas que possuíam NS foi inferior ao que se obteve no traço de referência. O início do desenvolvimento do módulo de elasticidade para o traço NS se mostrou mais acelerado que o REF, efeito da NS nas idades iniciais. Após dois dias de idade tem-se uma inversão de comportamento.

Já para o traço com relação a/c de 0,5, o módulo de elasticidade para as pastas com NS foi superior às pastas de referência. O início do desenvolvimento do módulo de elasticidade se mostrou muito similar em ambos os traços. Após um dias de idade o traço com NS apresentou maiores resultados.

Analisando as 3 relações de a/c utilizadas no estudo piloto, observa-se que para a relação 0,3 é necessário utilizar maiores teores de superplastificante, o que interfere no comportamento do módulo de elasticidade. Além disso, um problema recorrente em materiais cimentícios com baixas relações de a/c é a ocorrência da retração autógena, podendo ocasionar fissuração. Para a relação 0,4, nas idades iniciais analisadas, obteve-se um bom comportamento o que justificou a escolha esta relação a/c para o estudo realizado nos concretos. Na relação a/c = 0,5, embora o material seja mais poroso, a utilização de nanossílica refletiu em maiores valores de módulo de elasticidade, portando a NS se mostra também eficiente para maiores relações a/c.

A escolha do a/c dos concretos foi pautada neste estudo piloto, além da ABNT NBR 6118:2014, embora realizado em pastas cimentícias. Destaca-se que quando estudos avaliam concretos, o comportamento é diferente e apresenta particularidades, devido a presença dos agregados e da zona de transição, por exemplo. O estudo piloto foi importante por possibilitar o entendimento prévio do comportamento da nanossílica utilizada na pesquisa, embasar a escolha do a/c e analisar a sinergia entre os materiais.

Na Figura 4.6 está apresenta a relação entre as curvas de desenvolvimento do módulo de elasticidade de pastas com NS e REF de um mesmo teor de a/c. No eixo vertical, apresenta-se, para cada idade, o resultado da divisão do valor do módulo de elasticidade do traço com NS pelo valor do módulo de elasticidade do traço REF. Assim, valores maiores que 1 indicam valores de módulo de elasticidade maiores em traços com NS, e valores menores que 1 indicam valores de módulo de elasticidade maiores em traços de referência.

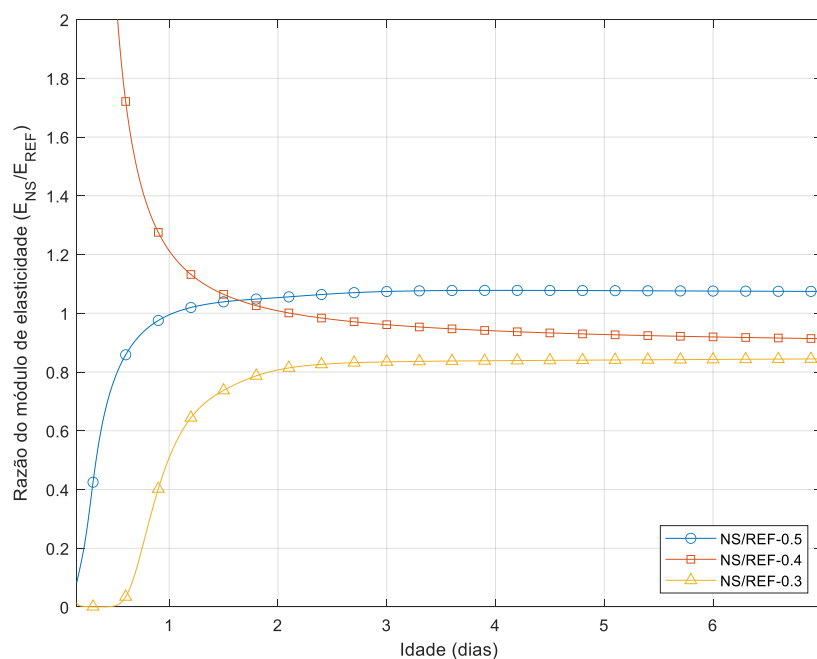
Apenas o traço de NS com a/c de 0,4 obteve um desenvolvimento do módulo de elasticidade maior nas idades iniciais (< 2 dias) em relação ao seu respectivo traço REF. Os demais traços apresentam valores nas idades iniciais menores que os seus respectivos traços REF, indicando

que a nanossílica aparentemente não consegue induzir uma evolução rápida do módulo de elasticidade nas primeiras idades para estas relações a/c.

Em termos de valor de módulo de elasticidade em idades mais avançadas, a partir dos 7 dias, a Figura 4.6 indica que aparenta haver uma relação entre a relação a/c e o módulo de elasticidade final apresentado pelos traços NS. A partir da análise dos valores de módulo de elasticidade final sugeridos pelos valores apresentados a 7 dias de idade, à medida que a relação a/c aumenta, os traços NS aparentam atingir valores relativamente maiores que seus respectivos traços REF. Assim, enquanto o traço NS-0.3 atingiu cerca 84.43% do módulo de seu respectivo traço REF, o traço NS-0.4 atingiu 91.51% e o traço NS-0.5 atingiu 107.5%.

O fenômeno descrito pode estar relacionado ao fato de que em cimentos com hidratação muito rápida, como nos traços de NS com a/c de 0,4, pode ocorrer formação de revestimentos hidratados em torno de grãos ainda não hidratados de cimento, prejudicando o atingimento de valores finais de módulo de elasticidade pela dificuldade de difusão da água até estas regiões não hidratadas. É discutido e consolidado que para a ocorrência completa e eficiente da hidratação do cimento, existe a necessidade de espaço disponível suficiente para para que ocorra o crescimento dos produtos resultantes do processo de hidratação, fato que pode ser influenciado pela mistura de clínquere e materiais cimentícios suplementares (MCS) (MISHRA; EMMANUEL; BISHNOI, 2019).

Figura 4.6 - Relação entre as curvas de desenvolvimento do módulo de elasticidade de pastas com NS e REF de um mesmo teor de a/c



Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que, de forma geral, o desenvolvimento do módulo de elasticidade não acompanhou o desenvolvimento da resistência à compressão simples do material nas idades iniciais. Enquanto os valores de resistência à compressão foram superiores em todos os traços com adição de NS, independente da relação a/c dos traços, o módulo de elasticidade aparenta ser sistematicamente menor, com apenas o traço NS-0.5 apresentado valores finais maiores que o seu respectivo traço REF-0.5.

Diante do resultado diferente do comportamento esperado para os traços com relação a/c de 0,3 e 0,4 para afirmar com precisão que o módulo de elasticidade não é superior aos traços correspondentes de referência, é necessário avaliar a evolução do módulo de elasticidade por meio do método da compressão clássica, para verificação dos resultados obtidos pelo ensaio EMM-ARM. A evolução do módulo observada pode ser consequência do comportamento da nanossílica para relações de a/c mais baixas, ou até mesmo alguma particularidade do ensaio que foi realizado.

Outro a fato a ser considerado, é que quando se trabalha com nanossílica em materiais cimentícios a ocorrência da retração autógena é maior (SANTOS, 2016). Provavelmente pode ter provocado interferência na aderência entre a pasta e o tudo utilizado no ensaio, o que reforça a necessidade de investigações mais aprofundadas no assunto.

4.2 Propriedades no estado fresco

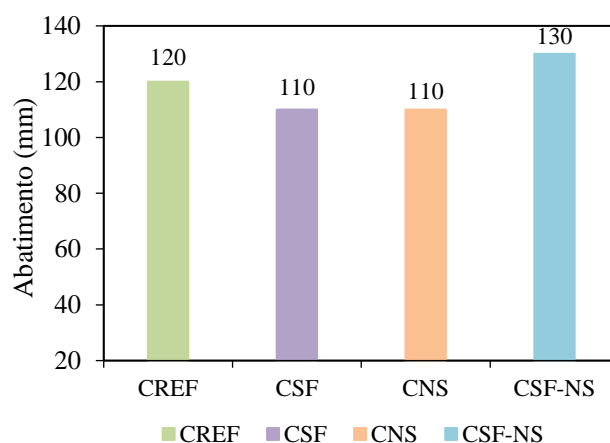
No estado fresco foram realizados os ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone e massa específica. O comportamento observado está elencado nos itens seguintes.

4.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Ainda no processo de dosagem no concreto, foi fixado através do Bétonlab um abatimento de 120 ± 10 mm. De acordo com a classificação da ABNT NBR 8953:2015, com esse abatimento, fixado por meio do *software*, o concreto pertence à classe S100, podendo ser utilizado em elementos estruturais com lançamento convencional.

Para os quatro traços de concreto produzidos, o abatimento alcançou o que foi fixado, em decorrência da utilização de aditivo superplastificante, porém, em quantidades diferentes do que foi indicado pelo *software* para cada traço. Na Figura 4.7 estão apresentados os valores equivalentes ao abatimento dos concretos.

Figura 4.7 - Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos



Fonte: Elaboração própria.

Durante a realização do ensaio, foi perceptível que para os traços que utilizaram as adições (CFS, CNS e CSF-NS), a consistência dos concretos apresentaram mudanças mais rapidamente com o tempo, quando comparados com o traço de referência que não possuía nenhuma adição de materiais finos.

Para o traço REF foi utilizado apenas 80% da quantidade de superplastificante indicada pelo Bétonlab, para se atingir o intervalo de abatimento necessário. Para o traço com adição apenas de sílica ativa (CSF) utilizar 88% do aditivo dosado pelo programa foi suficiente para obter o abatimento pré-determinado. Quando se trabalhou com a adição de nansossílica, nos traços CNS e CSF-NS, observou-se que a quantidade sugerida pelo *software* não foi suficiente para que os dois traços alcançassem o abatimento fixado inicialmente. Para os dois traços em questão, foi utilizado um adicional de 40 % em relação à quantidade de superplastificante dosada inicialmente pelo *software*.

Experimentalmente, durante a produção dos concretos, foi preciso fazer ajustes na quantidade do superplastificante, pois o valor recomendado pelo *software* não proporcionou um abatimento dentro do intervalo desejado e fixado inicialmente, o que também foi observado por Martins (2014). Diante do comportamento na consistência, optou-se por adicionar mais superplastificante até que o abatimento ficasse no intervalo de 120 ± 10 mm. A causa da diferença entre o valor dosado e o que realmente foi necessário para atingir o abatimento estabelecido, pode ser relação com a falta de parâmetros de entrada para caracterização efetiva do superplastificante e da sua influência na trabalhabilidade do material, o que Velasco (2008) e Amario (2015) também observaram em suas respectivas pesquisas.

Na Figura 4.8 está apresentado o processo de aferição do *slump* por meio do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone para um dos traços produzidos.

Figura 4.8 - Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.

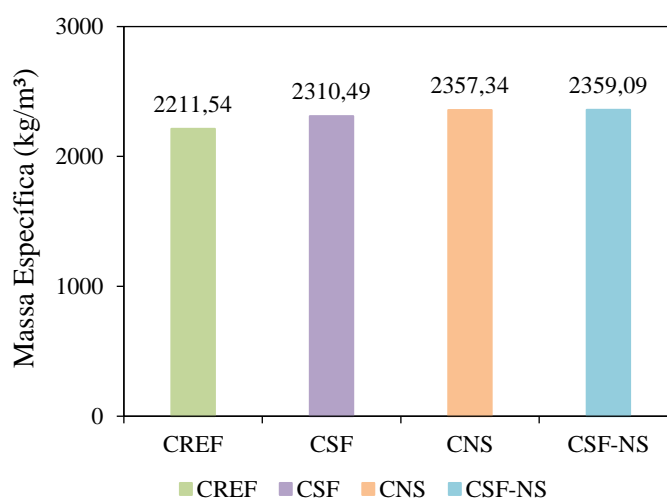


Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Massa específica

Os valores de massa específica no estado fresco para os quatro traços de concreto produzidos estão apresentados na Figura 4.9. Todos os concretos com adição (CSF, CNS E CSF-NS) apresentaram massa específica maior que o concreto de referência. Além disso, foi possível observar que os traços com adição de nanossílica atingiram os maiores valores de massa específica.

Figura 4.9 - Massa específica no estado fresco dos concretos produzidos



Fonte: Elaboração própria.

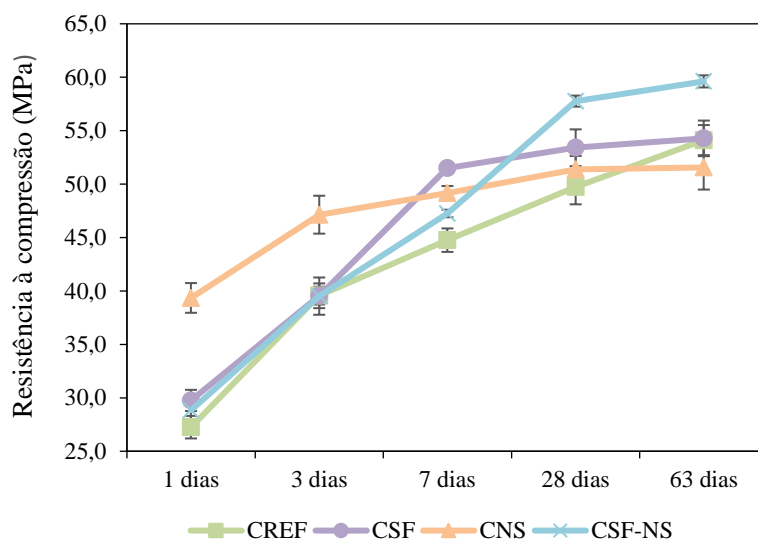
4.3 Propriedades no estado endurecido

No estado endurecido, para avaliar propriedades mecânicas dos concretos produzidos, foi realizado o ensaio de compressão simples, desde as idades iniciais, conforme está apresentado no item a seguir.

4.3.1 Resistência à compressão simples

Na Figura 4.10 está apresentada a evolução da resistência à compressão simples dos concretos produzidos para as idades indicadas, por meio da média dos resultados para cada traço produzido.

Figura 4.10 - Resistência à compressão simples dos concretos produzidos



Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que todos os concretos apresentaram ganho de resistência ao longo das idades de análise. Comparando o traço CSF, com adição de sílica ativa, com o traço REF, os valores para as duas idades iniciais analisadas foram bem próximos. Pela evolução da resistência à compressão é possível observar um aumento entre as idades de 3 e 7 dias, e posteriormente esse valor de manteve entre 53 e 54 MPa.

O traço CNS, com adição de 2% de nanossílica, apresentou nas idades de 1 e 3 dias elevado ganho de resistência, quando comparado ao traço REF nas duas primeiras idades analisadas, apresentando para a idade de 1 dia, aumento de 44,3% e para 3 dias, aumento de 19,1%. Para as idades de 7 e 28 dias do traço CNS, os valores de resistência também foram maiores do que aqueles encontrados para o traço REF, porém um aumento mais brando, atingindo valores

inferiores a 10%. Já na idade mais avançada de análise, aos 63 dias, o valor da média da resistência obtido foi menor que o valor do traço REF na mesma idade.

Foi notável que a NS influenciou na propriedade mecânica de resistência à compressão com mais intensidade nas primeiras idades. A influência da nanossílica na resistência à compressão, se justifica pelo efeito do material ser capaz de preencher os poros do concreto, além dos efeitos de nucleação e elevada reação pozolânica durante a hidratação.

A mistura de sílica ativa e nanossílica analisada no traço CSF-NS, nas idades de 1, 3 e 7 dias apresentou valores semelhantes ao traço de referência, sem variações consideráveis. A elevação da resistência à compressão simples se concentrou nas últimas idades analisadas de 28 e 63 dias, atingindo inclusive, as maiores resistências comparando com os outros traços dosados.

O uso da adição apenas de nanossílica no concreto, proporcionou um elevado pico de resistência até 3 dias de idade. Por esse comportamento observado é possível que um dos efeitos negativos de tal adição seja problemas relacionados à retração. Portanto, é indicado que se realize um estudo específico avaliando o comportamento de retração em concretos com a adição de NS.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito das 5 idades de cura (1, 3, 7, 28 e 63 dias) nos traços. A interação entre tipo de traço e as idades de cura do ensaio obteve um Valor-p = 0,000000 indicando que essas variáveis apresentaram efeitos significativos na resistência à compressão simples do concreto.

Tabela 4.2 - Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA) sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Resultado
TRAÇO	167,90	3,00	56,00	24,63	0,000215	Significativo
TEMPO	4435,60	4,00	1108,90	667,33	0,000000	Significativo
TRAÇO*TEMPO	604,00	12,00	50,30	30,29	0,000000	Significativo
Erro	53,20	32,00	1,70			

SQ = Soma dos quadrados; C = Número de categorias; MQ = Média dos quadrados; F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor compreensão dos dados, realizou-se o teste de Duncan, com a finalidade de agrupar valores que não diferem estatisticamente entre si. Os resultados do agrupamento desse teste são apresentados na Tabela 4.3, totalizando em 10 grupos distintos.

Tabela 4.3 - Resultado da análise do teste de Duncan sobre o efeito da interação entre o tipo de traço e idade de cura para a resistência à compressão simples

Idades (dias)	Traços			
	CREF	CSF	CNS	CSF-NS
1	1	2	3	1 e 2
3	3	3	5	3
7	4	8 e 9	5 e 6	4
28	6 e 7	8 e 9	6, 7 e 8	10
63	9	9	7 e 8	10

Fonte: Elaboração própria.

Através da Tabela 4.3 percebe-se que a resistência à compressão simples dos concretos apresentou 10 variações. As variações são grupos com médias estatisticamente equivalentes, em que quanto maior o número do grupo, maior a média do resultado de resistência. Percebe-se que há uma tendência do aumento de resistência dos concretos com adições de sílica ativa e nanossílica já nas idades iniciais.

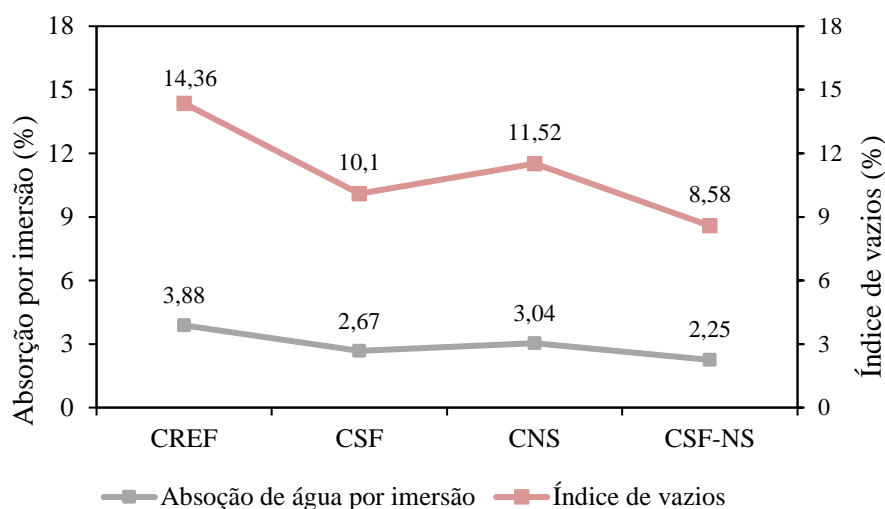
4.4 Avaliação da durabilidade dos concretos

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para avaliar os concretos no que se refere à durabilidade, como a absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica – volumétrica e superficial, migração de cloretos no estado não estacionário e carbonatação acelerada.

4.4.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é governado, principalmente, pelos poros capilares presentes no concreto e a sua conectividade. Na Figura 4.11 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão dos concretos aos 63 dias de idade, por meio do qual foi possível obter também o índice de vazios dos concretos produzidos.

Figura 4.11 - Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos, aos 63 dias de idade.



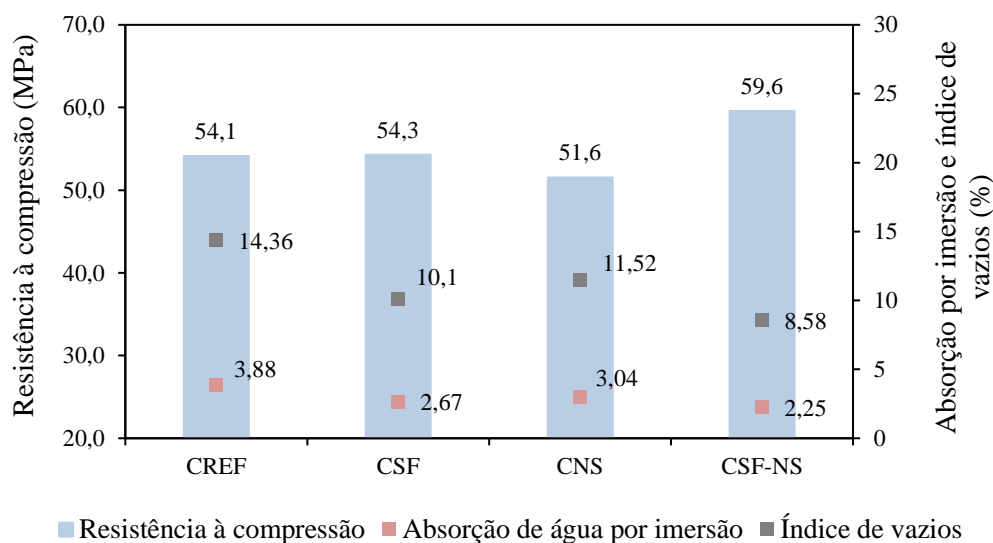
Fonte: Elaboração própria.

Para os resultados obtidos por meio do ensaio de absorção de água por imersão, foi perceptível que o maior valor de absorção foi encontrado para o traço REF, sem nenhum tipo de adição. O uso tanto de sílica ativa como de nanossílica, proporcionou uma diminuição no percentual de absorção por imersão, e conseqüentemente, esse comportamento também foi observado no índice de vazios dos concretos produzidos, o que era esperado.

O menor valor encontrado para a absorção por imersão e também para o índice de vazios foi obtido para o traço CSF-NF. Tal resultado pode ser justificado pelo efeito sinérgico que existe entre a sílica ativa e a nanossílica, que, quando usadas em conjunto, trabalham efetivamente na alteração da porosidade do material cimentício.

Na Figura 4.12 pode ser visualizado um gráfico, com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios correlacionados também com os valores de resistência à compressão simples, todos os valores referentes aos 63 dias de idade.

Figura 4.12 - Correlação entre a absorção de água por imersão e índice de vazios com a resistência à compressão simples, aos 63 dias.



Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que os concretos que apresentam maiores valores de resistência à compressão, tendem a ter menores valores médios de absorção de água por imersão e índice de vazios, o que apresenta coerência entre os dois ensaios correlacionados. A diminuição na absorção de água por imersão e índice de vazios do traço CSF-NS deve-se, provavelmente, a reação sinérgica entre as duas adições, e conectividade dos poros.

O comportamento analisado de absorção de água por imersão e índice de vazios, depende da porosidade do material estudado, que é afetada diretamente pela utilização de adições, que atua modificando o comportamento microestrutural do concreto e sua porosidade interna. Analisando os valores encontrados para o traço CSF e os valores do traço CREF, fica evidente que a adição de sílica ativa proporcionou melhoria no concreto em relação a essa propriedade, provavelmente por alterar a porosidade do material.

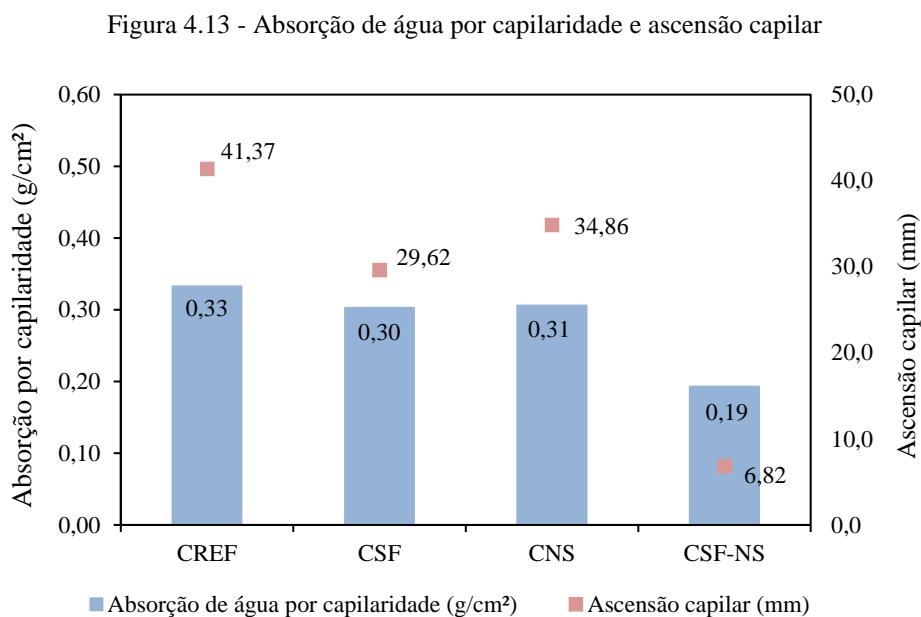
Helene (1993) classifica os concretos segundo a absorção de água e índice de vazios em três grupos distintos: duráveis, normal e deficientes. Quanto a absorção de água, os valores abaixo de 4,2% são duráveis, entre 4,2 e 6,3% classifica-se em normais e quando maior que 6,3%, são considerados deficientes. Já para o índice de vazios, pode ser classificado em duráveis quando menor que 10%, em normais entre 10 e 15% e quando acima de 15% são classificados como deficientes. Com base nessa classificação, analisando-se a absorção de água, todos os concretos produzidos tiveram valores menores que 4,2%, portanto enquadrados como duráveis. Em

relação ao índice de vazios pela classificação proposta, se enquadra em concreto durável apenas o CSF-NS, sendo os demais traços classificados como normais.

Através dos resultados obtidos por meio do ensaio experimental, a análise de variância simples (ANOVA) foi realizada, obtendo Valores-p de 0,00001 e 0,000001 para absorção de água e índice de vazios, respectivamente. Conforme os valores apresentados, percebe-se que para a absorção de água e índice de vazios, o traço teve influência (significativo). Diante dos resultados significativos, foi realizado o teste de Duncan, a fim de mostrar se existe diferença entre grupos. Os resultados do teste de Duncan com relação absorção de água e índice de vazios, indicou o grupo 1 composto pelo traço CSF-NS, o grupo 2 composto pelo traço CSF, os grupos 3 e 4, composto pelos traços CNS e CREF, respectivamente.

4.4.2 Absorção de água por capilaridade

Os valores obtidos para o ensaio de absorção por capilaridade para os quatro de concreto produzidos, podem ser observados na Figura 4.13, em que também são apresentados os valores de ascensão capilar de cada traço.



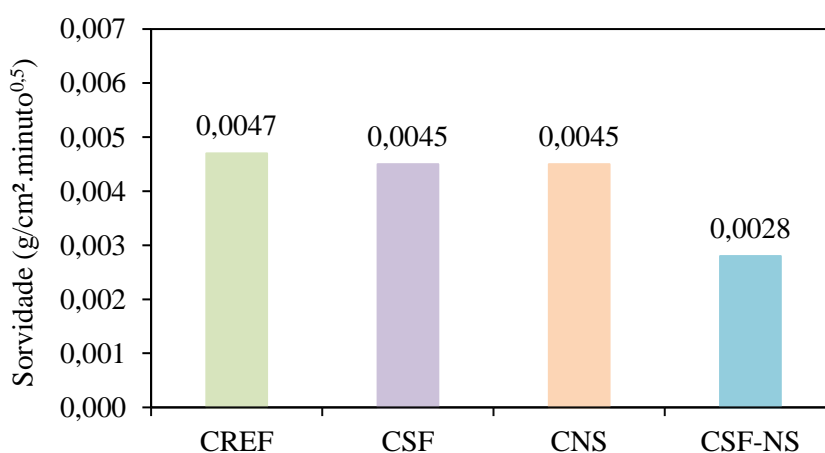
Fonte: Elaboração própria.

A absorção capilar para os traços CREF, CSF e CNS, apresentou valores bem próximos, ficando entre 0,30 e 0,33 g/cm². A maior variação foi para o traço CSF-NS que apresentou valores menores que os demais traços produzidos.

Por meio do ensaio de absorção por capilaridade é possível afirmar que o uso de sílica ativa e nanossílica em um mesmo traço, é capaz de proporcionar baixa absorção de água e conseqüentemente baixa ascensão capilar. O fato observado, pode ser decorrência de alterações na rede porosa do concreto, devido a utilização da mistura de SF e NS, que tem efeito sinérgico.

Com o ensaio de absorção por capilaridade, foi possível determinar, o coeficiente de sorvidade dos concretos (K_s). A sorvidade é relacionada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão entre poros, ou seja, trata-se do fenômeno de transporte de fluídos nos materiais porosos. O coeficiente de sorvidade é uma maneira de analisar comparativamente materiais de diferentes composições, uma vez que se trata de uma característica intrínseca do material (MEDEIROS *et al.*, 2017). É calculado através da linearização do gráfico da absorção capilar *versus* raiz quadrada do tempo, segundo procedimento proposto pela RILEM TC 116-PCD (1999). Na Figura 4.14 podem ser vistos os coeficientes de sorvidade dos concretos.

Figura 4.14 - Coeficiente de sorvidade dos concretos produzidos



Fonte: Elaboração própria

Os valores obtidos para o coeficiente de sorvidade, foram bem próximos entre os traços produzidos, com exceção ao traço CSF-NS que apresentou um valor menor ($K_s = 0,0028$). Essa diminuição da sorvidade em relação ao traço CREF, é provavelmente, devido ao refinamento dos poros promovido pela reação pozolânica das adições e do efeito sinérgico que ocorre com a sílica ativa e nanossílica.

Através dos resultados obtidos por meio do ensaio experimental de absorção de água por capilaridade, a análise de variância simples (ANOVA) foi realizada, mostrando que houve diferença significativa entre os resultados. Conforme o teste de Duncan, os concretos foram

divididos em dois grupos. O grupo 1, composto pelo traço CSF-NS e o grupo 2 composto pelos demais traços da pesquisa (CREF, CSF E CNS).

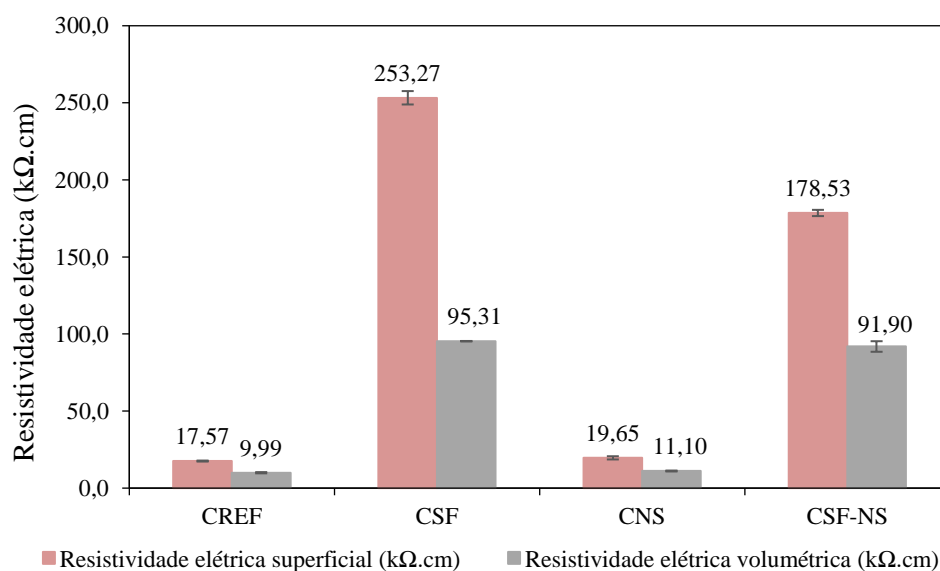
4.4.3 Resistividade elétrica superficial e volumétrica

A resistividade elétrica está relacionada à permeabilidade do concreto a fluidos e a difusividade de íons através da porosidade do material. Quanto maior o valor da resistividade elétrica, mais durável tende ser o concreto. Na Tabela 4.4 e na Figura 4.15 estão apresentados os dados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica (volumétrica e superficial), na idade de 63 dias de cura úmida.

Tabela 4.4 - Resistividade elétrica volumétrica e superficial.

Traço	Resistividade elétrica volumétrica (k Ω .cm)	Resistividade elétrica superficial (k Ω .cm)
CREF	9,99	17,57
CSF	95,31	253,27
CNS	11,10	19,65
CSF-NS	91,90	178,53

Figura 4.15 – Resistividade elétrica superficial e volumétrica



Fonte: Elaboração própria.

Embora o traço com 10 % de sílica ativa tenha apresentado comportamento melhor que os traços de REF e com NS em ensaios como de absorção de água (por capilaridade e imersão)

no índice de vazios e também na ascensão capilar, não era esperado comportamento superior no ensaio de resistividade elétrica, tanto superficial como volumétrica. Diante do comportamento observado, os ensaios de resistividade foram repetidos para o traço CSF e a leitura se manteve, comprovando o bom desempenho do traço. O comportamento observado é inerente à presença da sílica ativa e de seus efeitos físicos e químicos. Conseqüentemente, o traço CSF-NS apresentou comportamento semelhante, mesmo com a adição de nanossílica.

O traço em que se trabalhou com a adição de nanossílica, apresentou resultados semelhantes ao traço REF, tanto para a resistividade elétrica superficial, como para a volumétrica. A partir dos resultados de resistividade elétrica superficial e volumétrica, foi realizada a classificação dos concretos quanto ao risco de corrosão e à penetração de cloretos, conforme apresentado nas Tabela 4.5 e Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Classificação quanto ao risco de corrosão e penetração de cloretos para os valores de resistividade elétrica volumétrica dos concretos produzidos

Traço	Risco de corrosão (CEB – 192)	Risco de corrosão (COST 509)	Classificação quanto a penetração de cloretos (AASHTO TP119:15)
CREF	Alto	Alto	Moderada
CSF	Desprezível	Baixo	Muito baixa
CNS	Baixo	Moderado	Baixa
CSF-NS	Desprezível	Baixo	Muito baixa

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.6 - Classificação quanto ao risco de corrosão para os valores de resistividade elétrica superficial dos concretos produzidos

Traço	Risco de corrosão (CEB – 192)	Risco de corrosão (COST 509)
CREF	Baixo	Moderado
CSF	Desprezível	Desprezível
CNS	Baixo	Moderado
CSF-NS	Desprezível	Desprezível

Fonte: Elaboração própria.

Considerando as classificações da norma CEB – 192 e do boletim europeu COST 509 e os valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica volumétrica, os traços de concreto com maior risco de corrosão são os traços REF e NS, enquanto para os dois traços com utilização de sílica ativa o risco é desprezível. Em relação à penetração de cloretos, os três traços com adições se mostraram baixa possibilidade. Para os traços CSF e CSF-NS, pelas classificações normativas, se mostraram com risco desprezível.

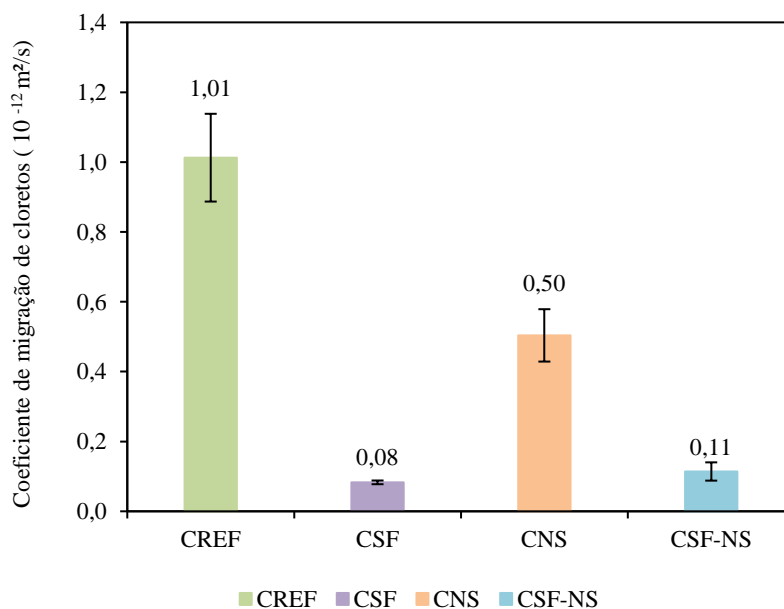
Com base na resistividade elétrica superficial, os concretos CREF e CNS em relação à corrosão, possuem baixo risco e os demais traços, com uso de sílica ativa, apresentarem risco desprezível, apresentando, portanto, o melhor comportamento diante da análise realizada.

Ao realizar a análise de variância (ANOVA) para os valores do ensaio experimental de resistividade volumétrica e superficial, foi obtido Valor-p de 0,00000 e 0,00000, respectivamente. Desta forma, os traços tiveram influência significativa nos resultados do ensaio. Conforme o teste de Duncan, para a resistividade volumétrica e superficial, os concretos foram divididos em três grupos. O grupo 1, composto pelos traços CREF e CNS, o grupo 2 composto pelo traço CSF-NS e o último grupo pelo traço CSF.

4.4.4 Migração de cloretos no estado não estacionário

A migração de cloretos no estado não estacionário foi realizada objetivando obter os coeficientes de migração de cloretos, sendo este dado bastante representativo no que se refere ao real mecanismo de transporte de cloretos no concreto. É válido destacar que quanto maior o valor do coeficiente de migração de cloretos, pior é o desempenho do concreto. Na Figura 4.16 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio, realizado apenas aos 63 dias de idade.

Figura 4.16 - Coeficiente de migração de cloretos aos 63 dias de idade dos concretos produzidos



Fonte: Elaboração própria.

O maior coeficiente obtido para tal ensaio foi encontrado no traço sem nenhum tipo de adição, o traço REF. Os menores resultados foram encontrados nos traços com adição de sílica ativa

(CSF e CSF-NS), sendo o menor coeficiente de migração de cloretos o correspondente ao traço que usou apenas a adição de sílica ativa, sem nanossílica.

De acordo com os coeficientes encontrados para cada traço, é possível observar um comportamento coerente no que foi obtido nos ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial. Os traços com sílica ativa (CSF e CSF-NS), de acordo com a AASHTO TP 119:15, referente a penetração de cloretos, receberam a classificação ‘Muito baixo’, foram exatamente os traços que apresentaram os menores valores de coeficiente de migração após verificação experimental.

A análise de variância (ANOVA) e teste de Duncan confirmaram a diferença entre os traços com Valor-p de 0,000001 e três grupos distintos, sendo o grupo 1 formado pelos traços que contém sílica ativa (CSF e CSF-NS), o grupo 2 pelo traço CNS e o terceiro grupo formado pelo traço de referência.

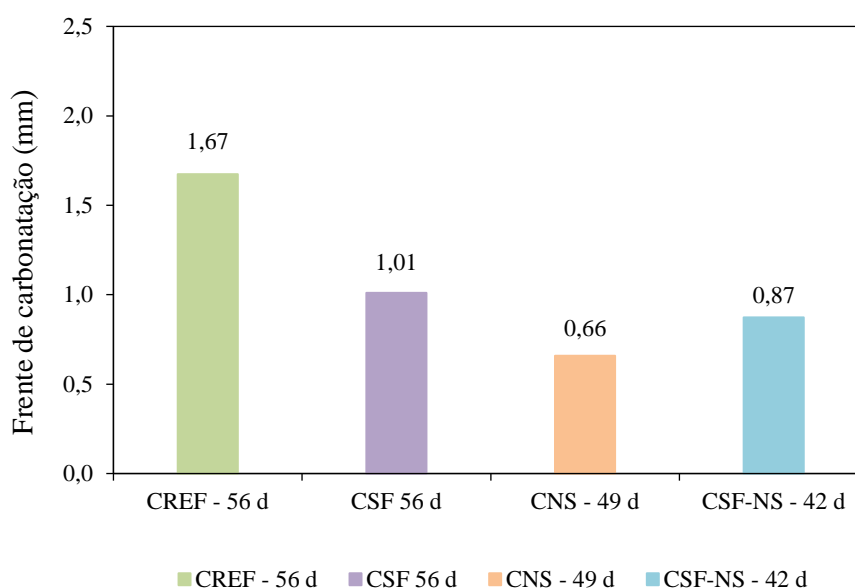
4.4.5 Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com as prescrições normativas da ISO 1920-12 (2015) com exposição do concreto ao CO₂. Esta análise é importante para avaliar como o concreto irá se comportar em alta exposição de concentração de CO₂ no decorrer do tempo.

Por limitações no cronograma devido à paralisações decorrentes da pandemia, não foi possível finalizar o ensaio de carbonatação acelerada com todas as idades de leitura previstas pela norma. Para o traço CREF e CSF foram realizadas duas leituras da frente de carbonatação, na idade de 56 dias, para o traço CNS a leitura foi aos 49 dias e o último traço produzido, teve leitura realizada em 42 dias de carbonatação acelerada. O ensaio foi paralisado diante do cenário atual da pandemia, e em condições favoráveis serão retomados e os resultados finais serão publicados em periódico.

As médias obtidas para leitura da frente de carbonatação em cada um dos traços produzidos pode ser visualizada na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Valores de frente de carbonatação dos concretos produzidos, em diferentes idades.



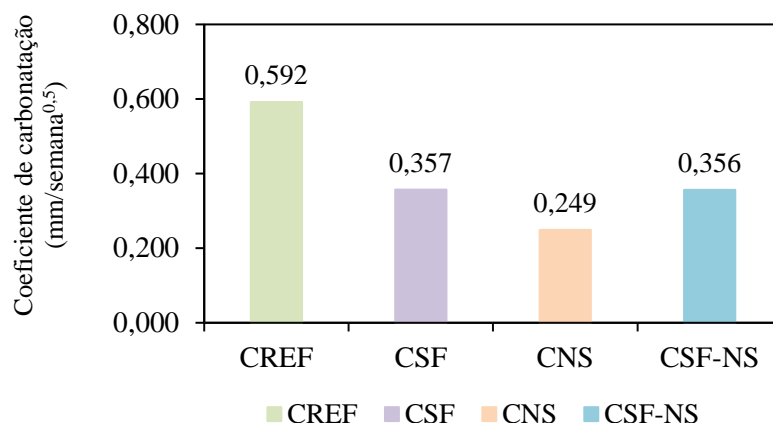
Fonte: Elaboração própria.

Como não se tem todos os dados para o ensaio de carbonatação não é possível realizar uma análise comparativa do fenômeno em cada um dos traços. A análise comparativa só foi possível para os traços CREF e CSF, que tiveram aferição com mesma idade. O traço com sílica ativa apresentou um desempenho melhor que o traço de referência sem nenhum tipo de adição. A diminuição da frente de carbonatação percebida no traço com sílica ativa pode ser atribuída à menor porosidade do material, o que torna o concreto menos permeável à penetração de agentes agressivos.

A medida de frente de carbonatação evidenciada como inferior no traço com sílica ativa aos 56 dias de idade pode ser consequência da porosidade e alcalinidade do concreto. Conforme observado pelas primeiras leituras que mesmo adicionando sílica ativa no teor de 10%, a alcalinidade de concreto não foi consideravelmente alterada.

Foi calculado também o coeficiente de carbonatação, uma vez que as idades são diferentes e o coeficiente permite uma melhor comparação entre os resultados, se referindo diretamente ao comportamento do material, conforme pode ser visualizado na Figura 4.18

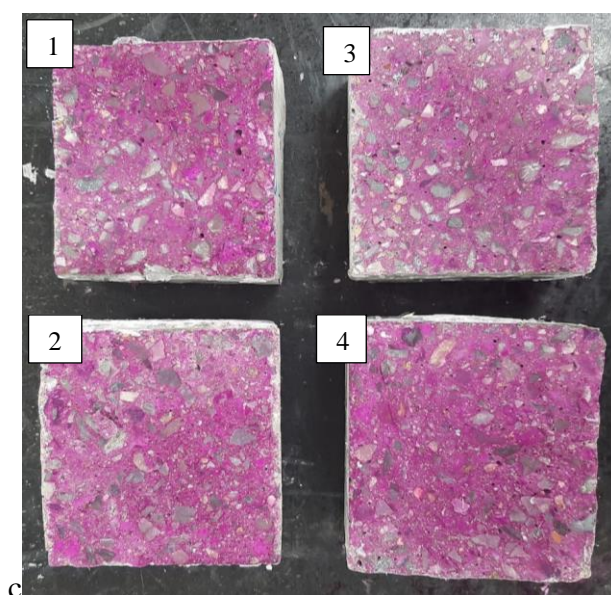
Figura 4.18 – Coeficiente de carbonatação.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.19 podem ser vistos os corpos de prova de concreto, para os quatro traços, utilizados no ensaio após leitura da frente de carbonatação. É possível perceber que a frente de carbonatação foi bastante estreita nas bordas dos corpos de prova.

Figura 4.19 - Corpos de prova após leitura da frente de carbonatação



1 = Traço CREF; 2 = Traço CSF; 3 = Traço CNS; 4 = Traço CSF-NS

A grande preocupação quando ocorre a carbonatação no concreto, devido a despassivação da armadura, é que na presença de umidade pode desencadear um processo corrosivo. Como os resultados prévios do ensaio demonstraram que os concretos tiveram frente de carbonatação relativamente baixa, indicando que os concretos produzidos com e sem adição de sílica ativa e

nanossílica, apresentam durabilidade satisfatória, analisando o processo de carbonatação acelerada. O comportamento satisfatório observado pode ser consequência do método de dosagem utilizado para os concretos produzidos, que levou em consideração o empacotamento compressível dos materiais com otimização do esqueleto granular da mistura.

4.5 Ensaios de análise microestrutural

A análise microestrutural foi realizada por meio dos ensaios de Análise termogravimétrica e Difractometria de raios-x.

4.5.1 Análise termogravimétrica (TG)

Quando pastas de cimento Portland são submetidas a um aumento progressivo de temperatura, as reações que ocorrem costumam apresentar três contribuições endotérmicas características, que podem ser quantitativamente analisadas utilizando as curvas de TG/DTG. Diante desse comportamento, é possível realizar a quantificação do teor dos principais compostos hidratados formados e os teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio remanescentes na matriz hidratada (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; MONTEAGUDO *et al.*, 2014).

Cada uma das três fases apresentam uma faixa de temperatura correspondente, que é utilizada para a identificação dos compostos. Os intervalos de temperatura correspondem aos processos de desidratação (LDH), de 35 a 385°C, de desidroxilação (LDX), de 385 a 485°C, e de descarbonatação (LDC), que se enquadra na faixa de 485°C a 1000°C. Nesta pesquisa adotou-se os intervalos de temperatura propostos por Hoppe Filho *et al.* (2017).

Com os dados obtidos no ensaio, foram obtidas as curvas da análise térmica (TG) e análise térmica diferencial (DTG), para as pastas referentes aos quatro traços estudados aos 63 dias de hidratação e estão mostradas nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23. Conforme identificado por legenda nas respectivas imagens, a linha contínua corresponde à curva TG e a linha pontilhada se refere à curva DTG.

Figura 4.20 - Análise termogravimétrica da pasta REF com 63 dias de hidratação.

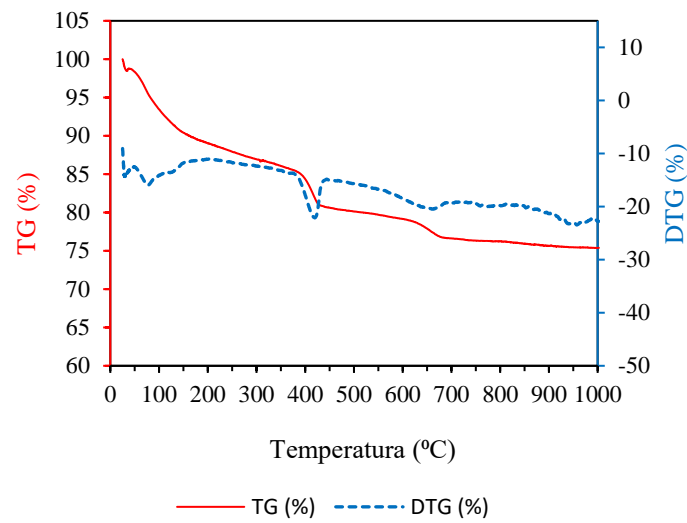


Figura 4.21 - Análise termogravimétrica da pasta SF com 63 dias de hidratação.

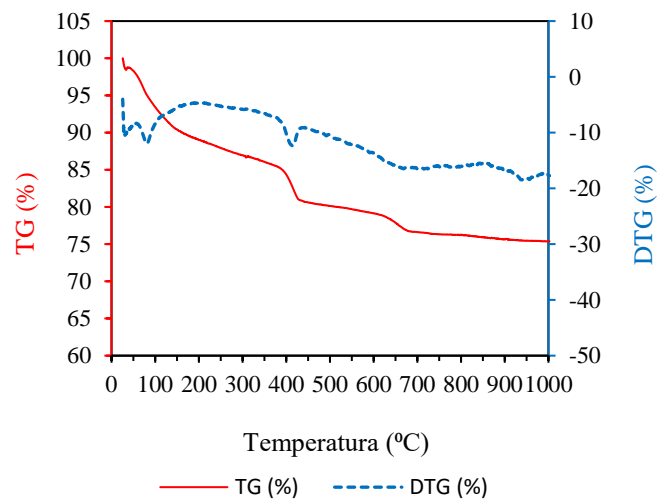
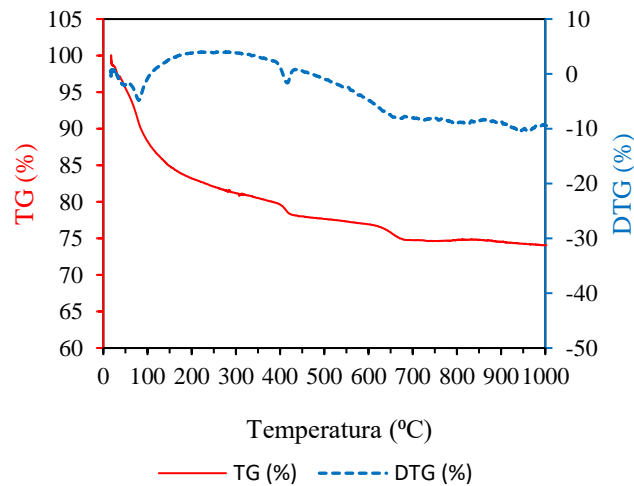
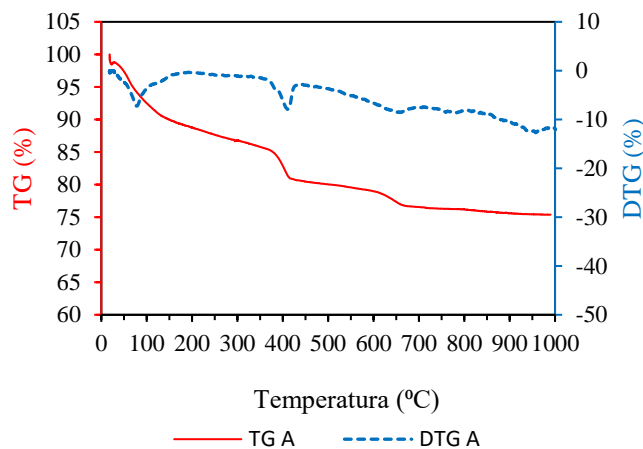


Figura 4.22 - Análise termogravimétrica da pasta NS com 63 dias de hidratação.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.23 - Análise termogravimétrica da pasta SF-NS com 63 dias de hidratação.



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se notar por meio das curvas que os quatro traços estudados (REF, SF, NS e SF-NS) tiveram um comportamento de perda de massa diferente ao longo da rampa de temperatura aplicada durante a análise, mas ao final do ensaio, é possível observar que as amostras atingiram valores bem próximos independente do uso de adições de sílica ativa e nanossílica, sendo essas perdas de 24,82; 25,83; 25,10 e 24,68%, respectivamente.

Considerando a faixa de temperatura correspondente ao C-S-H nas pastas de cimento, há indícios de que os traços SF, NS e SF-NS apresentam picos mais intensos nessa região inicial do gráfico. Tal observação é coerente com o comportamento esperado, pois em materiais cimentícios com adições reativas, como é o caso da sílica ativa e da nanossílica, é comum uma maior quantidade de C-S-H em relação à pasta de referência, com efeito também foi observado nos resultados obtidos no ensaio de difratometria de raios-x.

A segunda faixa de temperatura, corresponde a desidroxilação da amostra, ou seja, é possível avaliar a influência das adições minerais na quantidade de água não evaporável relacionada ao hidróxido de cálcio. Pelo comportamento nos picos correspondentes a essa faixa é perceptível que no traço de referência, há uma maior quantidade de Ca(OH)_2 em relação aos demais traços estudados.

A terceira faixa de temperatura, , corresponde a descarbonatação da amostra, tendo relação direta teor de carbonato de cálcio da pasta. Os traços REF, SF, NS e SF-NS apresentam comportamento semelhante, sem grandes divergências de comportamento. Tal ocorrência se justifica pelo fato de que em nenhum dos traços com adições tenham taxas consideráveis de

carbonato de cálcio, predominando apenas o percentual que compõe o cimento Portland na sua etapa de produção.

Seguindo o que é proposto por Hoppe Filho *et al.* (2017), foi possível calcular o percentual dos produtos de hidratação formado, de acordo com a perda de massa observada nas três faixas características de decomposição dos hidratos. A determinação do teor de água quimicamente combinada (AQC) é por meio da perda de massa que ocorre na primeira faixa de temperatura e está relacionado à formação de C-S-H e das fases aluminato hidratadas. A quantificação de Ca(OH)_2 é obtida mediante a multiplicação da perda de água na segunda faixa de temperatura pela relação entre a massa molecular do hidróxido de cálcio e da água que é de 4,11. Já a quantificação do CaCO_3 , na terceira faixa de temperatura, é realizada por intermédio da multiplicação da perda de massa pela relação de massa molecular de carbonato de cálcio e dióxido de carbono que corresponde a 2,27.

Existe uma diferença das massas residuais das amostras após o ensaio, portanto não é possível realizar uma comparação direta dos resultados. Para tal, é necessário realizar a correção dessas perdas de massa para a mesma base de não voláteis, para que assim os resultados sejam apropriados para comparação. Foi realizada uma normalização para 100%, o que promove um aumento nas perdas de massa relativas a cada faixa de temperatura considerada. Na Tabela 4.7 podem ser visualizados os resultados já corrigidos das amostras, bem como os fatores de normalização para cada mistura.

Tabela 4.7 – Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, corrigidos para a mesma base de não voláteis, de acordo com Hoppe Filho *et al.* (2017)

Traços	REF	SF	NS	SF-NS
Massa residual da amostra (%)	75,18	74,18	74,89	75,32
Fator de normalização*	1,330	1,348	1,335	1,327
C-S-H	17,65	21,37	22,82	20,48
Ca(OH)_2	26,94	16,13	12,06	17,82
CaCO_3	14,67	10,56	11,16	12,66

* Fator de normalização = 100/massa residual da amostra (%)

Como as perdas durante o processo de aquecimento foram próximas para os traços estudados, os valores de massa residual da amostra ficaram aproximadamente entre 74 e 75%. Diante dos valores apresentados na Tabela 4.7, é notável uma redução nos teores de Ca(OH)_2 e de CaCO_3 quando se faz comparação entre a pasta de referência e as outras três pastas estudadas na pesquisa. Relação diferente é observada ao se comparar os teores de C-S-H das quatro pastas

produzidas. Nota-se que a pasta com adição de 2% de nanossílica, foi a pasta com maior teor de C-S-H primário, enquanto a pasta REF, atingiu o menor percentual.

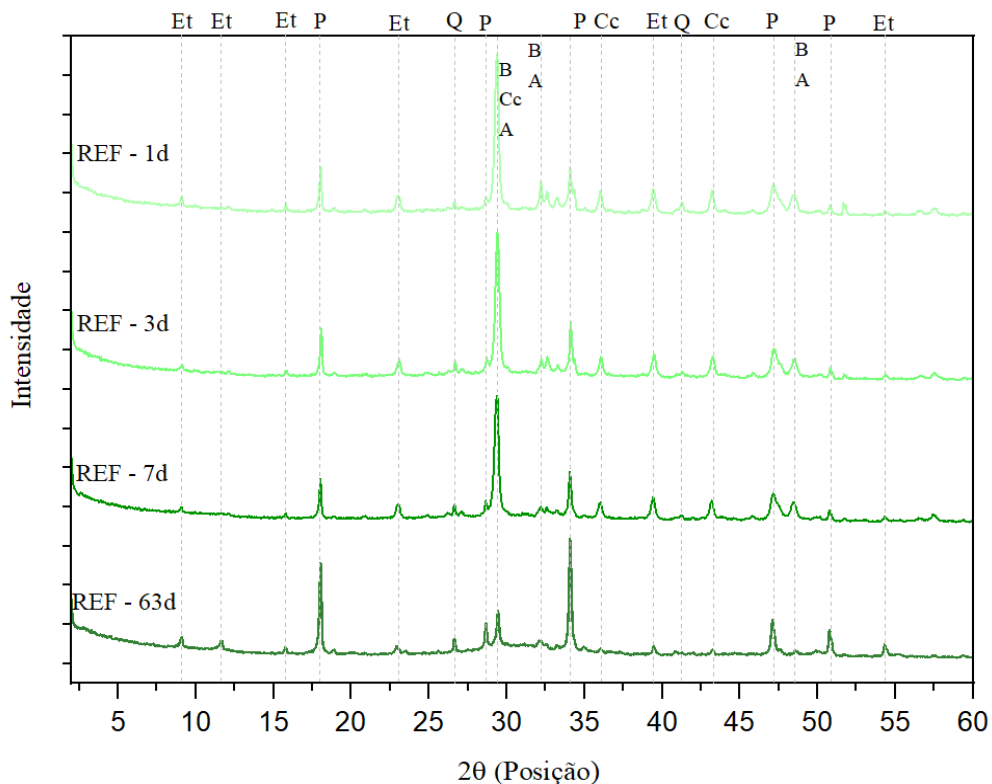
O aumento observado no C-S-H das pastas com as adições de sílica ativa e nanossílica, é condizente com o se obteve na resistência à compressão simples dos concretos, pois com as adições os concretos nas idades analisadas apresentaram aumento nos valores de resistência em comparação ao traço sem nenhum tipo de adição.

4.5.2 Difratomia de raios-x (DRX)

A análise de difração de raios-x foi realizada no intuito de avaliar a evolução da hidratação das pastas cimentícias com e sem a utilização de adições de sílica ativa e nanossílica, nas idades de 1, 3, 7 e 63 dias. Os difratogramas das pastas de cimento Portland contendo o traço de referência (REF), e os traços com adições (SF, NS e SF-NS) são apresentados nas Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27, respectivamente.

As principais fases cristalinas identificadas nesses difratogramas foram: etringita (Et), quartzo (Q), portlandita ou hidróxido de cálcio (P), silicato tricálcico ou alita (A), silicato dicálcico ou belita (B) e calcita (Cc). Durante a hidratação do cimento, outra fase formada a partir das reações da alita e belita é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que não possui picos cristalinos, apresentando uma estrutura amorfa, que quando presente na evolução da hidratação do cimento é identificado através da formação de halo amorfo no difratograma de raios-X.

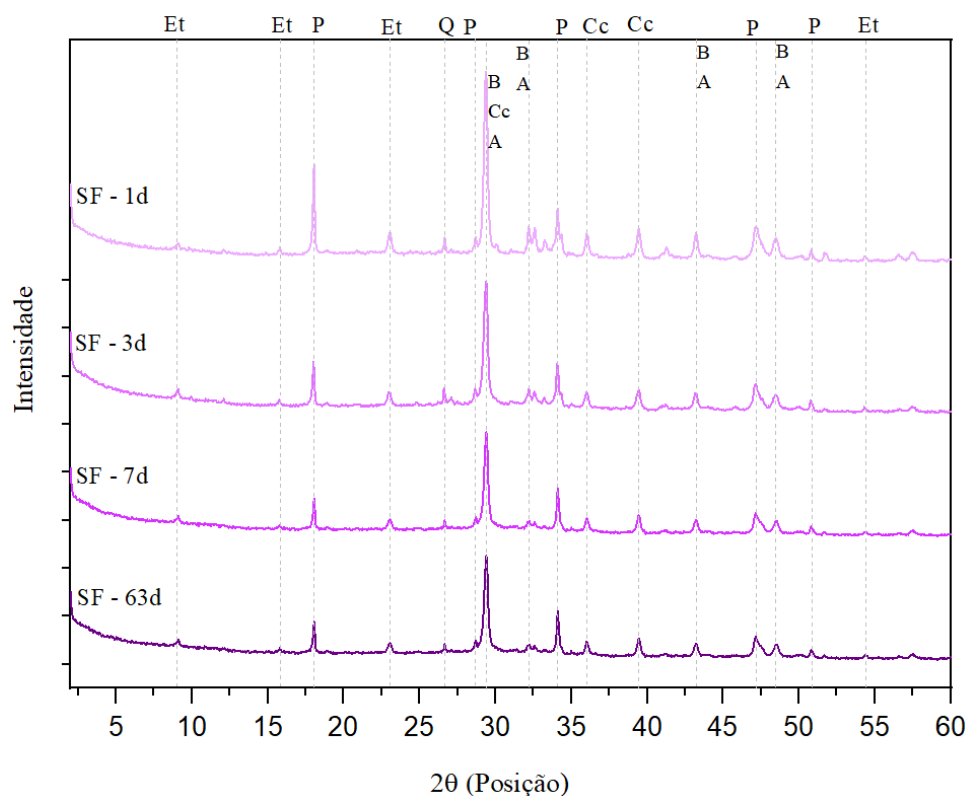
Figura 4.24 – Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia de referência nas idades de 1, 3, 7 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.



Fonte: Elaboração própria.

Através dos difratogramas apresentados por meio da Figura 4.21, pode-se notar que ao longo da hidratação das pastas de referência, houve uma diminuição nos picos dos silicatos (alita-A e belita-B) para a formação dos picos de hidróxido de cálcio ou portlandita (P). Também percebe a presença de etringita (Et), com picos nos primeiros momentos da hidratação, consequência da combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa e das fases aluminatos (C_3A e C_4AF).

Figura 4.25 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia com adição de sílica ativa (SF) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.



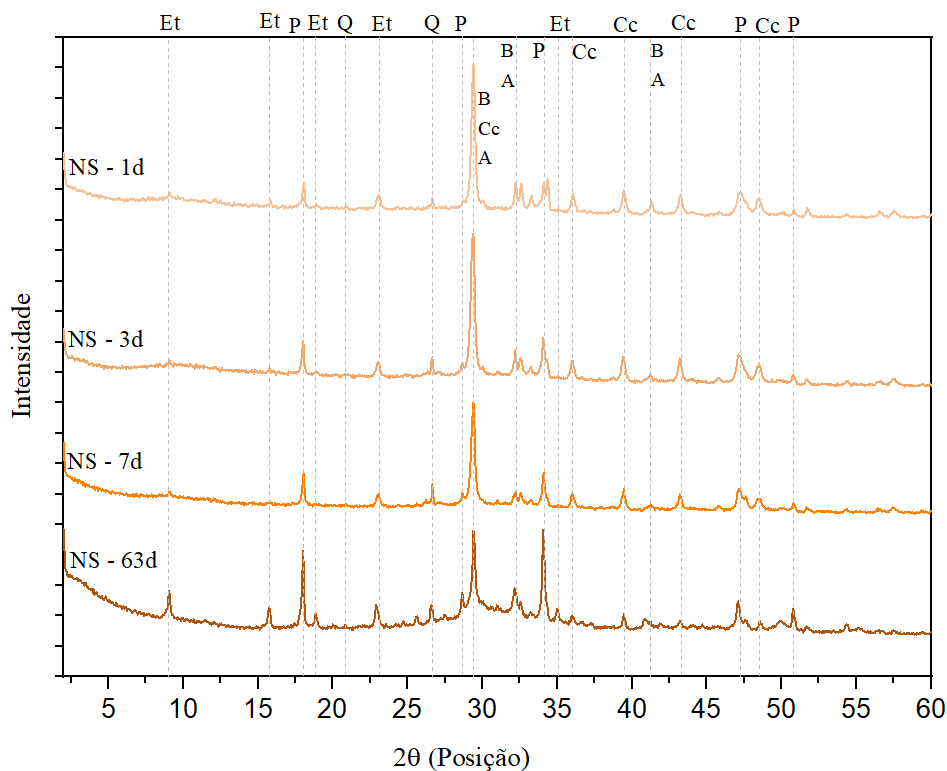
Fonte: Elaboração própria.

Assim como na pasta de referência analisada, a pasta com adição de sílica ativa (Figura 4.22), ao longo da hidratação, foi percebida diminuição nos picos de alita-A e belita-B e consequentemente formação de portlandita-P. É notável a presença de compostos como etringita (Et), calcita (Cc) e quartzo (Q) em todas as idades analisadas. Comparando-se o traço com sílica ativa e o traço de referência, demais traços de pastas analisadas, o traço com nota-se que no traço SF os picos de portlandita-P diminuiram a intensidade nas idades mais avançadas.

No traço com SF observou-se a redução acentuada da quantidade de CH, como por exemplo na posição próxima a 18° , ocorrência atribuída ao efeito fíler e às reações pozolânicas da sílica ativa na matriz de cimento. O fato ocorre porque a sílica ativa reduz a quantidade de vazios da matriz de cimento, diminuindo e limitando, assim, a precipitação do hidróxido de cálcio em grandes cristais. As partículas de sílica ativa podem atuar ainda como pontos de nucleação que também provocam uma aceleração na hidratação do cimento e a reação pozolânica que se desenvolve pela reação entre a sílica ativa e o CH, é capaz reduzir o teor de hidróxido de cálcio. Tal comportamento também foi observado em estudos realizados por RÊGO *et al.* (2019) em materiais cimentícios com a adição de SF.

Nota-se que aos 7 dias a pasta com SF apresentou uma pequena redução na intensidade dos picos característicos do CH em relação à pasta REF devido ao início da reação pozolânica da SF nessa idade. O comportamento de redução, confirma o que foi reportado nos trabalhos de Li *et al.* (2017) e Andrade *et al.* (2019).

Figura 4.26 - Difratoograma de raios-X da pasta cimentícia com nanossílica (NS) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.



Fonte: Elaboração própria.

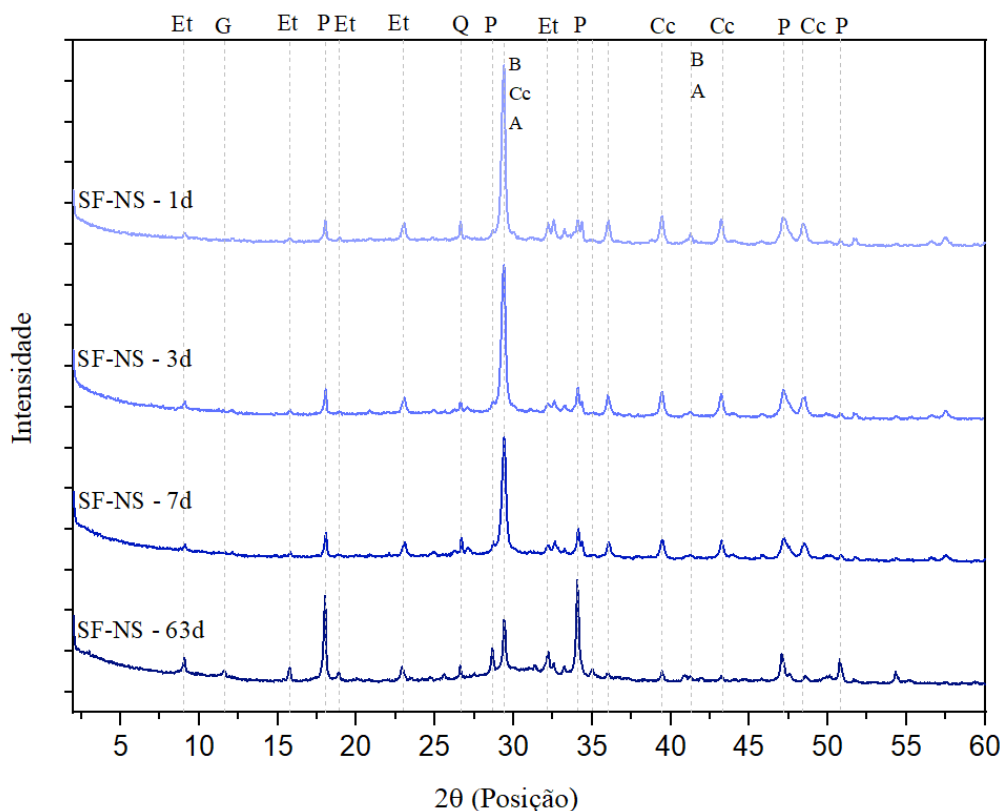
No traço com adição de 2% de nanossílica, observa-se a presença de um halo amorfo entre as posições 27 e 36°. Pela análise obtida, o traço com NS apresentou comportamento parecido com o traço de referência, nesse caso, a nanossílica atuou como pontos de nucleação. O material adicionado, foi responsável por intensificar a formação de C-S-H primário. Ressalta-se que o traço com NS apresentou as maiores intensidades para os picos de etringita.

No traço em que se trabalhou com adição de nanossílica, esperava-se que entre 1 e 3 dias de hidratação ocorresse uma redução na intensidade dos picos característicos do CH das pastas devido à reação pozolânica proporcionada pela NS nas idades iniciais, conforme estudado por Haruehansapong *et al.* (2014) e Khaloo *et al.* (2016).

Isfahani *et al.* (2016) estudaram a microestrutura de concretos com nanossílica por meio da técnica de DRX observaram uma diminuição considerável no pico do hidróxido de cálcio em amostras com 1,5% de nanossílica e relação a/c de 0,5. Ao contrário dos trabalhos citados que estudaram materiais cimentícios com adição de NS, não foi observado esse comportamento de diminuição dos picos de CH ao longo das reações de hidratação.

Observou-se que os picos correspondentes ao CH nos difratogramas, por volta das posições 18° e 35°, aumentaram consideravelmente aos 63 dias em relação às idades de 1,3 e 7 dias. Tal comportamento discrepante de outras pesquisas já realizadas, pode ter relação com algumas particularidades, como tipo, características e propriedades da nanossílica coloidal utilizada e/ou a relação a/c utilizada, que interfere diretamente no processo de hidratação.

Figura 4.27 - Difratograma de raios-X da pasta cimentícia com sílica ativa e nanossílica (SF-NS) nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Et-etringita, P-portlandita, A-alita, B-belita, Cc-calcita e Q-quartzo.



Fonte: Elaboração própria.

Para a pasta com adição de sílica ativa e nanossílica (Figura 4.22) também foram identificados os mesmos compostos encontrados nos outros traços, como etringita (Et), quartzo (Q), portlandita ou hidróxido de cálcio (P), silicato tricálcico ou alita (A), silicato dicálcico ou belita (B) e calcita (Cc). A partir do difratograma observa-se que na posição entre 27 e 36° o halo amorfo é menos intenso que na pasta com adição apenas de nanossílica. Para a mistura SF-NS,

o C-S-H primário também é inferior ao que se observou na pasta NS. Além disso, os picos de portlandita-p são intensos, enquanto os picos referentes à etringita-e apresentam pequena intensidade.

Para a mistura analisada o esperado também é que ocorresse maior consumo de CH, uma vez que a nanossílica deveria proporcionar reação pozolânica intensa e alto grau de hidratação. Uma possível causa para a observação deste comportamento diferente do esperado, pode ser as propriedades intrínsecas da adição utilizada, que não apresentou grande intensificação na reação pozolânica nas idades iniciais.

Observando os resultados obtidos para a pasta com a mistura de sílica ativa e nanossílica, não foi perceptível diferenças acentuadas em relação ao traço de referência, por meio do ensaio de DRX. Por outro lado, o ensaio de termogravimetria deu indícios de um comportamento superior ao traço REF. O mesmo comportamento superior foi observado em relação ao número de vazios do concreto que possuía SF e NS, sendo o traço com o menor índice de vazios. O uso de ensaios para análise microestrutural em estudos não deve ser de maneira individual, por meio da realização de um único ensaio, pois as técnicas se complementam e sempre que possível devem ser realizadas em conjunto, ampliando assim as possibilidades de análise. Além disso, com o uso de sílica e nanossílica, ficou evidente que não basta apenas identificar e quantificar os produtos de hidratação, pois como tais adições tem atuação intensa na microestrutura é necessária uma análise ampla que considere a distribuição da porosidade no material, bem como a tortuosidade e conectividade dos poros.

4.6 Resumo dos principais resultados

Neste item são apresentados os principais resultados obtidos nos concretos e nas pastas cimentícias, após a realização do programa experimental.

- Avaliando o comportamento no estado fresco, em relação ao ensaio de consistência, houve necessidade de maior quantidade de aditivo superplastificante nos traços com adições, para se obter o abatimento estabelecido. Em relação aos valores de massa específica, os resultados de todos os traços foram semelhantes, indicando um discreto aumento nos traços com adições.
- Avaliando o comportamento mecânico por meio da resistência à compressão simples, constatou-se que a utilização de nanossílica provocou um incremento nos resultados,

principalmente em 1 e 3 dias de idade, foi obtido no traço CSF-NS, o que pode ser consequência do efeito pozolânico e sinérgico, reduzindo a porosidade do material.

- Na análise dos parâmetros de durabilidade nos concretos com adição da mistura de sílica ativa e nanossílica obteve-se redução na absorção de água por imersão e no índice de vazios, fato coerente com o comportamento de resistência à compressão, que para este traço, aos 63 dias de idade, atingiu o maior valor.
- O comportamento de absorção de água por capilaridade teve melhor desempenho também no traço com a mistura de sílica e nanossílica. A absorção foi menor no traço CSF-NS em relação aos outros concretos produzidos e, conseqüentemente atingiu uma menor ascensão capilar. Diante dos resultados obtidos o coeficiente de sorvidade (k_s) calculado também foi menor.
- Ao avaliar a resistividade elétrica volumétrica e superficial, o melhor desempenho foi o do traço CSF, com a adição apenas de sílica ativa. O traço com nanossílica obteve resultados levemente superiores ao traço REF, comportamento diferente do esperado.
- Na migração de cloretos não estacionário, todos os traços com adições apresentaram melhoria em relação ao traço de referência. Novamente, o melhor desempenho foi do traço com adição de sílica ativa. O traço com a mistura de SF e NS apresentou também um bom resultado, atingindo coeficiente de migração de cloretos de 0,11.
- Diante da não continuidade e finalização da avaliação da carbonatação acelerada dos concretos produzidos, observou-se apenas uma tendência de redução da frente de carbonatação, em consequência do uso de adições, com base no coeficiente de carbonatação calculado.
- Em relação aos difratogramas das pastas de cimento apresentados, além de observar a presença de picos referentes a materiais característicos de misturas cimentícias, foram observados picos que evidenciaram as reações pozolânicas ao longo da hidratação.
- A avaliação microestrutural realizada por meio do ensaio de termogravimetria indicou perda de massa bastante semelhante entre os traços ao final do processo de aquecimento das misturas. Além disso, ficou claro e evidente o aumento de C-S-H nas pastas em que usou algum tipo de adição, com destaque para a mistura com 2% de nanossílica, que atingiu o maior teor, devido à sua maior reatividade.

Na Tabela 4.8 está apresentado um resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas e durabilidade do programa experimental desta pesquisa. Os resultados individuais para os ensaios realizados podem ser encontrados no Apêndice C.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados obtido em estado fresco e endurecido.

TRAÇOS		CREF	CSF	CNS	CSF-NS
Abatimento (mm)		120	110	110	130
Massa específica (kg/m ³)		2211,54	2310,49	2357,34	2359,09
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	27,2	29,7	39,3	28,8
	3 dias	39,5	39,5	47,1	39,5
	7 dias	44,7	53,5	49,1	44,6
	28 dias	49,7	53,4	51,3	57,7
	63 dias	54,1	54,2	51,5	59,6
Absorção por imersão (%)	63 dias	3,88	2,67	3,04	2,25
Índice de vazios (%)		14,36	10,10	11,52	8,58
Massa específica real (g/cm ³)		4,32	4,20	4,27	4,17
Absorção por capilaridade (%)	3 h	0,13	0,10	0,10	0,07
	6 h	0,17	0,13	0,13	0,09
	24 h	0,26	0,21	0,21	0,15
	48 h	0,30	0,28	0,27	0,17
	72 h	0,33	0,30	0,31	0,19
	Ascensão	41,37	29,62	34,86	6,82
Resistividade Volumétrica (k Ω .cm)	63 dias	9,99	95,31	11,10	91,90
Resistividade Superficial (k Ω .cm)		17,57	253,27	19,65	178,53
Carbonatação (mm)	42 dias	-	-	-	0,873
	49 dias	-	-	0,659	-
	56 dias	1,674	1,010	-	-
	63 dias		-	-	-
Coeficiente de carbonatação (mm/semana ^{0,5})		0,592	0,357	0,249	0,356
Migração de cloretos (10 ⁻¹² m ² /s)	63 dias	1,013	0,083	0,504	0,114

Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas à pesquisa desenvolvida, a qual teve como enfoque a avaliação da durabilidade de concretos com a adição de sílica ativa e nanossílica.

- Para a dosagem dos concretos considerando o empacotamento compressível por meio do *software* Bétonlab, para os traços com o uso de adições, foi necessário fazer adaptações para a entrada dos dados no programa na fase de formação do banco de dados. Conclui-se que era preciso considerar o cimento como um material composto com a adição escolhida já na proporção desejada. O *software* não permite inserção separadamente de materiais em escala nanométrica como é o caso da nanossílica.
- O monitoramento do módulo pelo EMM-ARM, resultou em um comportamento diferente do esperado para os traços com a/c de 0,3 e 0,4. Para todos os traços, a adição de NS conferiu aumento na resistência à compressão, porém, ao analisar o módulo de elasticidade, os traços com as menores relações de a/c, apresentaram valores maiores que os traços correspondentes de referência. O comportamento pode ser consequência do comportamento da nanossílica para relações a/c baixas, ou por alguma particularidade do método de ensaio adotado.
- A adição de nano partículas de sílica conferiu um aumento da consistência no concreto, necessitando de maiores teores de aditivo para atingir o abatimento pré-estabelecido. O comportamento no estado fresco pode estar relacionado à elevada área superficial específica e tendência de aglomeração, com elevada absorção e retenção de água.
- Foi observado que a adição de nanossílica tendeu a aumentar a resistência à compressão simples dos concretos, sobretudo nas primeiras idades. Após a idade de 7 dias, os resultados praticamente se igualaram aos resultados dos outros traços. Na última idade de análise da propriedade em questão (aos 63 dias), o traço com a mistura de sílica ativa e nanossílica superou os demais traços, alcançando um melhor desempenho. Ressaltando que nas situações apresentadas na pesquisa a nanossílica não foi sonicada.
- No geral, os traços com adições proporcionaram melhorias nos resultados de absorção – por imersão e capilaridade, índice de vazios, resistividade elétrica – superficial e

volumétrica, migração de cloretos no estado não estacionário e carbonatação. Este comportamento observado provavelmente ocorre devido à reação pozolânica, que diminui a porosidade e interconexão entre os poros.

- Maior vulnerabilidade foi observada no concreto com 2% de nanossílica quanto à resistividade elétrica. O traço CNS apresentou uma melhoria discreta em relação ao traço de referência, diferindo do desempenho consideravelmente superior que se esperava para este traço.
- A adição de 10% de sílica ativa ao concreto alcançou excelente comportamento no que se refere ao transporte de íons cloreto. Apresentando melhoria considerável, quando comparado aos demais traços e, principalmente ao de referência.
- Diante da não finalização do ensaio de carbonatação acelerada, por meio do coeficiente de carbonatação foi percebido que as adições utilizadas na pesquisa são capazes de contribuir para a redução da frente de carbonatação.
- O estudo microestrutural realizado em pastas de cimento se limitou ao ensaio de difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG). Os picos dos materiais constituintes das pastas de cimento pelo DRX evidenciam as reações pozolânicas ao longo da evolução da hidratação nas idades analisadas. Pelo ensaio de TG, os quatro traços apresentam perda de massa semelhante ao final do processo de aquecimento. O ensaio evidenciou ainda aumento de C-S-H nas misturas com adições, com o maior teor na pasta com 2% de NS, em razão da sua elevada reatividade.

Diante do exposto, percebe-se que a adição de 2% de nanossílica, promove melhoria na resistência à compressão simples nas primeiras idades, e promove inclusive melhoria na absorção de água por capilaridade. Considerando as outras propriedades de avaliação da durabilidade do concreto, o traço CNS apresentou resultados inferiores, apesar da sua alta reatividade. Pensando na melhoria dos resultados quanto aos demais parâmetros de durabilidade, o indicado é utilizar nanossílica juntamente com outro material, como a sílica ativa, e trabalhar com o processo de dispersão de partículas em escala micro e nano.

De maneira geral, o uso apenas de sílica ativa se mostrou vantajoso, melhorando o desempenho quanto aos parâmetros de durabilidade em relação ao traço sem adições. Pela SF não ser em partículas nanométricas, o teor de superplastificante se mantém bem próximo ao traço REF,

algo que não é possível quando se trabalha com nanossílica. Desta forma, fica evidente que para efeitos de durabilidade, o teor de 2% de adição de nanossílica não apresenta eficiência considerável nos casos em que não se tem uma dispersão eficiente, portanto não sendo recomendada quando se busca aumento da durabilidade de concretos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar concretos com a mistura de sílica ativa e nanossílica em diferentes teores, visando encontrar uma relação de teor ótimo para obter um material mais durável.
- Avaliar a durabilidade de concretos com diferentes relações a/c, identificando a influência mediante tal variação.
- Realizar a quantificação dos picos das fases de materiais identificados na difração de raios-X por meio do método de Rietveld.
- Analisar a estrutura porosa, suas dimensões e distribuição da porosidade, por meio de técnicas pertinentes como porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia por varredura eletrônica (MEV).
- Determinar o teor de cloretos nos concretos submetidos ao ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário.
- Estudar propriedades mecânicas e de durabilidade em idades mais avançadas, para identificar as consequências e implicações do uso de adições de sílica ativa e nanossílica ao longo do tempo.
- Determinar o potencial hidrogeniônico (pH) dos concretos.
- Avaliar as propriedades da zona de transição à interface agregado-pasta de cimento (ZTI) de concretos com adições de SF e NS.
- Estudar a influência da adição de nanossílica e sílica ativa na retração dos concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:2005** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:2009** – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2006** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:2001** - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABD.EL.ALEEM, S.; HEIKAL, M.; MORSI, W. M. Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nanosilica. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 151-160. 2014.

AITCIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

AGOSTINHO, L, B. **Estudo reológico de pastas de cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 148. 2017.

ALEXANDRIDOU, C.; *et al.* Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 176, p. 745–757, 2018.

ALKHATIB, A. MASLEHUDDIN, M. AL-DULAIJAN, S. U. Development of high performance concrete using industrial waste materials and nano-silica. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 9, p. 6696-6711. 2020

ALONSO-DOMÍNGUEZ, D.; ÁLVAREZ-SERRANO, I.; REYES, E.; MORAGUES, A. New mortars fabricated by electrostatic dry deposition of nano and microsilica additions: Enhanced properties. **Construction and Building Materials**, v. 135, p.186-193. 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **TP119-2015**: Electrical Resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM. G57:2012** - Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method., 2012.

ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 322. 2017.

ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S.; MORAIS, P. C.; LOPES, A. N. M.; ROJAS, M. F. Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 445-455. 2019.

ASTM, **ASTM E1876 - 15** - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, West Conshohocken, 2015.

ATCP, “**Sonelastic - Advanced Impulse Excitation Technique**,” 2018. [Online]. Available: <https://www.sonelastic.com/pt/%0D>. [Accessed: 03-Oct-2020].

AZENHA, M. FARIA, R. MAGALHÃES, F. RAMOS, L. and CUNHA, Á. Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique, **Mater. Struct. Constr.**, vol. 45, no. 1–2, pp. 81–92, 2012, doi: 10.1617/s11527-011-9750-9.

AZENHA, M. FARIA. R, R. AGUILAR, AND J. L. GRANJA, Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application, **Cem. Concr. Compos.**, vol. 34, no. 7, pp. 881–890, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.004.

BASF. We create chemistry. Glenium® 51, **Aditivo super plastificante de terceira geração**, 2019.

BELKOWITZ, J. S. et al. Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties. **ACI Materials Journal**, 112, nº 3, May 2015. 419-428.

BIRICIK, H., SARIER, N., “Comparative study of the characteristics of nano silica, silica fume and fly ash incorporated cement mortars”, **Materials Research**, v. 17, n.3, pp. 570-582, 2014.

BHATTACHARYA, M.; HARISH, K. V. An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 1179-1192. 2018.

CALABRIA-HOLLEY, J.; PAINE, K.; PAPATZANI, S. Effects of nanosilica on the calcium silicate hydrates in Portland cement–fly ash systems. **Advances in Cement Research**, v. 27, p. 187-200. 2015.

CALLISTER JÚNIOR, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 9ª ed., LTC Editora, 2016.

CARDOSO, M. G. **Contribuições para dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras pelo método do empacotamento compressível**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 144. 2020.

CARETTE, “**Towards Early Age Characterisation of Eco-Concrete**,” Université Libre de Bruxelles, 2012. PhD thesis.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: [s.n.], 1997.

CHEN, Y.; DENG, Y.; LI, M. Influence of nano-sio₂ on the consistency, setting time, early age strength, and shrinkage of composite cement pastes. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 1-8. 2016.

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em cimento Portland CP IV. **Construindo**, v. 9., n° 1, Belo Horizonte, 2017.

CRUCHO, J. M. L.; NEVES, J. M. C.; CAPITÃO, S. D.; SANTOS, L. G. P.; Evaluation of the durability of asphalt concrete modified with nanomaterials using the Teage aging method. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 178-186. 2019.

DE LARRARD, F., **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 pages.

DU, H. S.; DU; LIU, X;. Durability performances of concrete with nanosilica. **Construction and Building Materials**. v 73 (Dec): 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014>. 2014.

DU, H.; DU, S.; LIU, X. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 114-122, 2015.

FLORES, Y. C.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 524-530. 2017.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**, 2005. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil– COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ.

FRAGA, Y.S. B. **Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica na microestrutura das pastas ternárias de cimento**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 109. 2019.

FRAGA, Y. S. B.; REGO, J. H. S. ; CAPUZZO, V. M. S. ; ANDRADE, D. S. ; MORAIS, P. C. . Ultrasonication and synergistic effects of silica fume and colloidal nanosilica on the C-S-H microstructure. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101702, 2020.

FRAGA, Y. S. B.; SOARES, L. M. G.; CAPUZZO, V. M. S. Influência da densificação da sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios. *Ambiente Construído*. p. 17. ISSN 1678-8621 (2020)

GARCÍA-TAENGUA, E.; SONEBI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M.; KHATIB, J. Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. **Elsevier - Composites Part B** 81 (2015) p. 120-129.

GEYER, A. L. B.; CAMPOS NETO, T. F. Effects of using chemical admixture with nanosílica in the consistency and mechanical strength of concrete. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 2, p. 371- 385, 2019.

GIVI, A, N. RASHID, S, A. AZIZ, F, N, A. SALLEH, M, A, M. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. **Composites Part B: Engineering** 2010; 41:673–7. doi:10.1016/j.compositesb.2010.08.003.

GHAFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E.; PORTUGAL, A.; DURÃES, L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. **Materials and Design**, v. 59, p. 1-9, 2014.

GHODDOUSI, P.; JAVID, A. A. S.; ZAREECHIAN, M.; KORAYEM, A. H. Physical and chemical effects of siliceous particles at nano, micro, and macro scales on properties of self consolidating mortar overlays. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 1140-1154. 2018.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

GRANJA, J. L. D. FERNANDES, P. BENEDETTI, A. AZENHA, M. SENA-CRUZ, J. Nova metodologia para o controlo de qualidade de sistemas NSM CFRP durante a cura do adesivo, in **5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**, 2014, no. Novembro.

GUIMARÃES, E. A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 150. 1997.

HARUEHANSAPONG, S.; PULNGERN, T.; CHUCHEEPSAKUL, S. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 471-477. 2014.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI. SENAI, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 231 p. Tese (Livre-docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. de. Atividade pozzolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n.3, 2017.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13823-08**: General principles on the design of structures for durability. Geneva, Switzerland, 2008.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12:2015** - Testing of concrete. Part 12 - Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland, 2015.

ISFAHANI, F. T.; REDAELLI, E.; LOLLINI, F.; LI, W.; BERTOLINI, L. Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different

Water to Binder Ratios. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2016, Article ID 8453567, 16 pages, 2016.

ISO. **ISO 1920-12:2015** - Testing of concrete. Part 12 - Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland, 2015.

JALAL, M., POULADKHAN, R. A., NOROUZI, H., & CHOUBDAR, G. Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume. **Journal of American Science**, 2012; 8, 278–284.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KAWASHIMA, S., HOU, P., CORR, D. J., & SHAH, S. P. Modification of cement-based materials with nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, 2012; 36, 8–15.

KHALOO, A.; MOBINI, H. M.; HOSSEINI, P. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete. Elsevier. **Construction and Building Materials**, 113 (2016) 188–201.

KHANZADI, M.; TADAYON, M.; SEPEHRI, H.; SEPEHRI, M. Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete. In: ZACHAR, J.; CLAISSE, P.; NAIK, T. R.; GANJIAN, E. (Ed.). Second Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010. Proceedings... Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, 2010.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON. Transport mechanisms and definitions. In: KROPP, J.; HILSDORF, H.K. **Performance Criteria for Concrete Durability**. Londres: E & FN Spon, Capítulo 2, p. 4-14, 1995.

LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. 2003. 154 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 208 p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.

LI, L. G.; HUANG, Z. H.; ZHU, J.; KWAN, A. K. H.; CHEN, H. Y. Synergistic effects of micro-silica and nanosilica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229-238. 2017.

LINCY, V. V. A study on nanosilica and microsilica added concretes under different transport mechanisms. **Concrete Research**. v 70, p. 1202-1216. 2018.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1244-1256, 2011.

MAIA, L. AZENHA, M. FARIA, R. FIGUEIRAS, J. Identification of the percolation threshold in cementitious pastes by monitoring the E-modulus evolution. **Cement and Concrete Composites**, vol. 34, no. 6, pp. 739–745, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.03.001.

MAIA, L. AZENHA, M. GEIKER, M. FIGUEIRAS, J. E-modulus evolution and its relation to solids formation of pastes from commercial cements. **Cement and Concrete Research**, vol. 42, no. 7, pp. 928–936, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.03.013.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MASSANA, J.; REYES, E.; BERNAL, J.; LEÓN, N.; SÁNCHEZ-ESPINOSA, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 93 – 103, 2018.

MARTINS, A. P. S, 2014, **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MAZZA, R. **Carbonatação Acelerada de Concretos com Cinza de Casca de Arroz Sem Moagem**. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 156 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 17, n. 4, p. 125-139, out./dez. 2017.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. 127 p. IFPB: João Pessoa, 2017.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 751 p., 2014.

MILLARD, S.G. Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques. Institution of Civil Engineers, Part 2: Research and Theory. Proceedings. v 91, n.2, Mar, 1991, p.71-88.

MISHRA, G.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement. *Materials And Structures*, [s.l.], v. 52, n. 5, p. 1-13, 24 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-019-1390-5>.

MITTRI, S. H. DE M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

MONTEAGUDO, S. M.; MORAGUES, A.; GÁLVEZ, J. C.; CASATI M. J., REYES, E. The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. **Thermochimica Acta**, v. 592, p.37-51, 2014.

NEPOMUCENO, A.A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. In. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, v.2. p. 793-827., 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre:Bookman, 2016. 888p.

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

NEVILLE, Adam. **Properties of Concrete**. 5th. ed. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2013.

NOURYON. The pure component for performance. **Levasil colloidal silica, CB45**, 2019.

NT BUILD. **492:2011** - Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments., 2011.

PINTO, S. DE A. **Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso da sílica ativa na durabilidade do concreto armado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia, 2016.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em meio urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico** [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QUERCIA, G. **Application of nano-silica in concrete**. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 2014.

QING, Y., ZENAN, Z., DEYU, K., & RONGSHEN, C. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. **Construction and Building Materials**, 2007; 21, 539–545.

RAMPAZZO, L. **Metodologia Científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação**. 3ª edição. São Paulo: Edições Loyola, 2005.

RÊGO, J. H. da S; ROJAS, M. F; TARRADES, A. M.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L; E. R. MORALES, E. R.; ROJAS, M. I. S. Effect of partial substitution of highly reactive mineral additions by Nanosilica in cement pastes, **J. Mater. Civ. Eng.**, vol. 31, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002567.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análises**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, R. R. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades.** Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2019

RICHARDSON, M. G. **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management.** New York: CITIS Ltd, Publishers, 1988.

RILEM. TC 116-PCD Permeability of Concrete as a Criterion of Its Durability Final Report: concrete durability - an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 21, n. 126, p. 453-455, 1999.

SANTANA, F. B. F.; OLIVEIRA, T. T. **Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço pelo método do empacotamento compressível.** Monografia de projeto final em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, p. 134, 2018.

SANTOS, T. A. C. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, p. 144, 2016.

SANTOS, L. **Avaliação da Resistividade Elétrica do Concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 178 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós graduação em estruturas e construção civil – PECC, Universidade de Brasília, 2006.

SEDRAN, T. AND DE LARRARD, F., Mixture-Proportioning of High Performance. **Concrete, Cement and Concrete Research**, Volume 32, Issue 11, November, p. 1699-1704, 2002.

SHAFIQ, N.; KUMAR, R.; ZAHID, M.; TUFAIL, R. F. Effects of Modified Metakaolin Using Nano-Silica on the Mechanical Properties and Durability of Concrete. **Journal Materials**. p. 1-22. 2019.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials.** CRC PRESS, 2016.

SINGH, L.P.; BHATTACHARYYA, S. K.; SHAH, S. P.; MISHRA, G.; AHALAWAT, S.; SHARMA, U. Studies on early stage hydration of tricalcium silicate incorporating sílica nanoparticles. Elsevier - **Construction and Building Materials** 74 (2015) p. 278–286.

SILVA, A. D. **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin Faury modificado.** 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA JUNIOR, P. F. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica.** 2017. 345 f. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SILVA, C. M. M. A. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem.** 138 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** 281 p. Tese de Doutorado - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, F.G. **Estudo da resistência à corrosão do concreto de alto desempenho frente à ação de cloretos.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

STEFANIDOU, M. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. **Composites Part B: Engineering**, 2012; 43, 2706–2710.

SOBOLEV, K. SANCHEZ, F. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 2060-2071. 2010.

TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**. 2 ed. Londres. Thomas Telford.

TAWFIK, T. A. ALY METWALLY, K. EL-BESHLAWY, S. A. Exploitation of the nanowaste ceramic incorporated with nano silica to improve concrete properties, **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.06.007>

TECNOSIL. Soluções em sílica ativa e aditivos para concreto, **Sílica ativa densificada**, 2019. VELASCO, R. V., 2008, **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VILASBOAS, J. M. L. **Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade de Salvador-BA.** Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2013.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical Resistivity of Concrete - A Literature Review.** PCA R&D Serial n°. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p.

ZHANG, M. –H.; ISLAM, J.; PEETHAMPARAN, S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 650-662, 2012.

ZHANG, Z.; ZHANG, B.; YAN, P. Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified sílica fume at different curing temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 483-490. 2016.

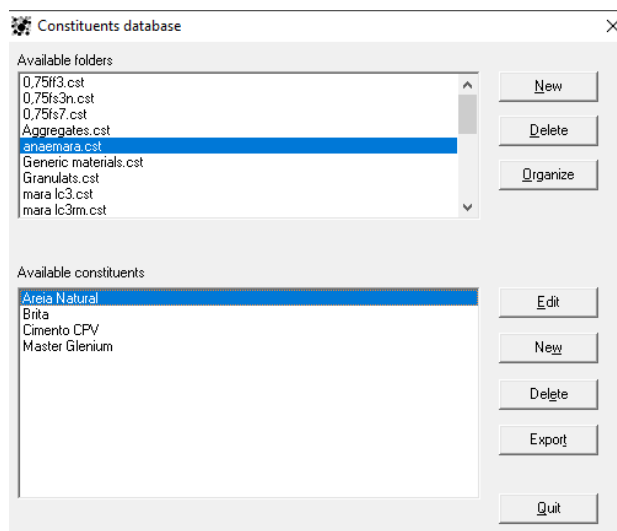
ZHANG, X.; DU, X.; ZHAO, X.; ZHOU, Z.; CHENG, X. Durability and Interfacial Properties of Concrete with Nanosilica Modified Mortar Cover. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v, 31. 2019.

APÊNDICE A - FORMAÇÃO DO BANCO DE DADOS DO BÉTONLAB PRO3 E DOSAGEM

1. Banco de Constituintes

A primeira etapa para a dosagem dos concretos pelo *software* Bétonlab Pro 3 foi a criação do banco de dados dos materiais que foram utilizados, Figura 1. A seguir, é apresentada a sequência de preenchimento do banco de constituintes com os dados dos materiais que foram utilizados no traço CREF: areia natural, brita natural, cimento CPV-ARI e superplastificante.

Figura A 1 - Banco de materiais constituintes



1.1 Areia natural

A sequência de preenchimento de dados referentes à areia natural pode ser observada nas figuras apresentadas a seguir (Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9). Os primeiros dados exigidos pelo programa são referentes às propriedades do material e sobre o seu esqueleto granular, e com isto fornece a curva granulométrica correspondente. Posteriormente, é necessário inserir dados referentes a cada uma das faixas granulométricas nas quais o material foi dividido. Nesse caso, adotaram-se 4 faixas para a realização do ensaio de compactação por vibração.

Figura A 2 - Criação do material “Areia Natural” no banco de dados e propriedades da areia.

Figura A 3 - Esqueleto granulométrico da Areia Natural e distribuição granulométrica

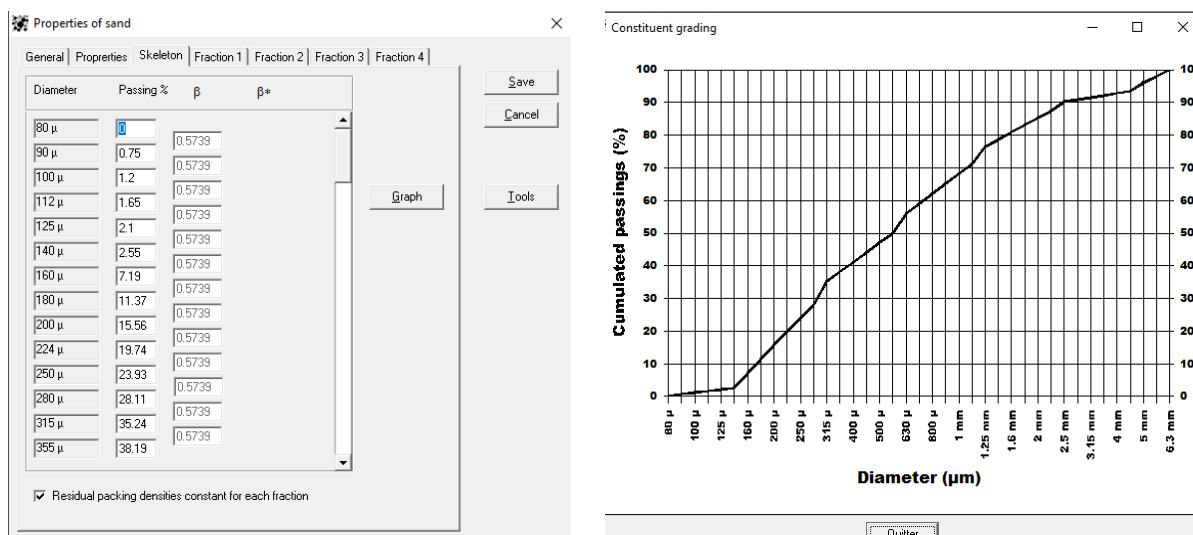


Figura A 4 - Faixa granulométrica 1 e faixa granulométrica 2

The figure displays two screenshots of the 'Properties of sand' software interface, showing the configuration for two different sand fractions.

Left Screenshot (Fraction 1):

- Fraction: 90 μ / 630 μ
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0.594
 - Packing index: 9
 - Confinement: Cylinder
 - Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - \emptyset : 150
 - H: 226.5

Right Screenshot (Fraction 2):

- Fraction: 630 μ / 1.25 mm
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0.598
 - Packing index: 9
 - Confinement: Cylinder
 - Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - \emptyset : 150
 - H: 226.5

Figura A 5 - Faixa granulométrica 3 e faixa granulométrica 4

The figure displays two screenshots of the 'Properties of sand' software interface, showing the configuration for two different sand fractions.

Left Screenshot (Fraction 3):

- Fraction: 1.25 mm / 2.5 mm
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0.616
 - Packing index: 9
 - Confinement: Cylinder
 - Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - \emptyset : 150
 - H: 226.5

Right Screenshot (Fraction 4):

- Fraction: 2.5 mm / 6.3 mm
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0.66
 - Packing index: 9
 - Confinement: Cylinder
 - Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - \emptyset : 150
 - H: 226.5

1.2 Brita

A sequência de preenchimento de dados referentes à brita pode ser observada nas figuras apresentadas a seguir (Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17). Os primeiros dados exigidos pelo programa foram referentes às propriedades do material e sobre o seu esqueleto granular, e com isto fornece a curva granulométrica correspondente. Posteriormente foi necessário inserir dados referentes a cada uma das faixas granulométricas nas quais o material foi dividido. Nesse caso, adotaram-se 4 faixas para a realização do ensaio de compacidade por vibração da brita.

Figura A 6 - Criação do material "Brita" no banco de dados e propriedades da brita

Figura A 7 - Esqueleto granulométrico da brita e distribuição granulométrica

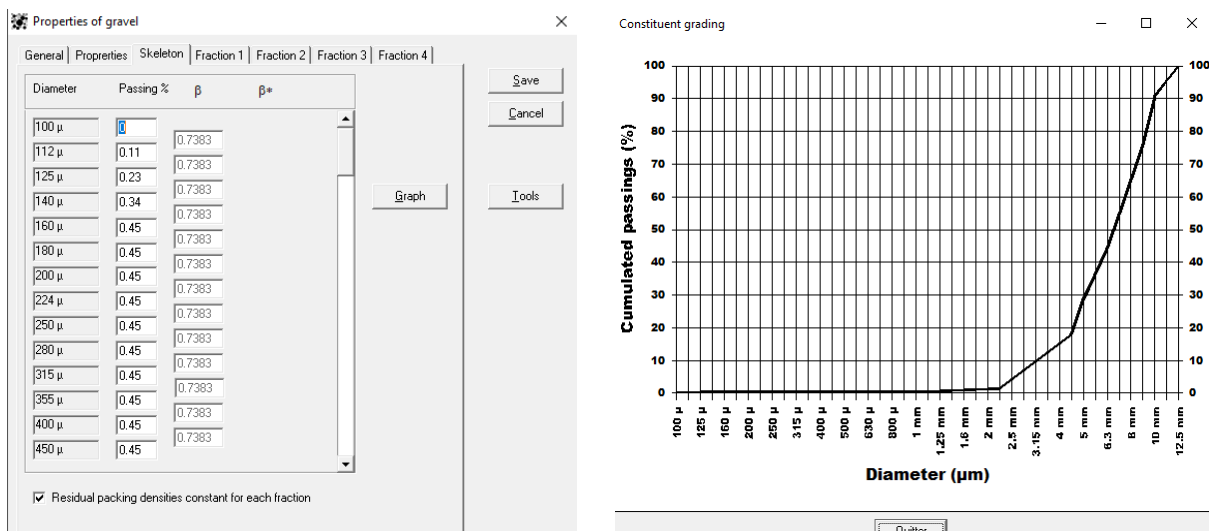


Figura A 8 - Faixa granulométrica 1 e faixa granulométrica 2

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1 | Fraction 2 | Fraction 3 | Fraction 4

Fraction 100 μ / 4.5 mm

Without admixture

Experimental packing density 0.709

Packing index 9

Confinement Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

\emptyset 150

H 226.5

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1 | Fraction 2 | Fraction 3 | Fraction 4

Fraction 4.5 mm / 6.3 mm

Without admixture

Experimental packing density 0.628

Packing index 9

Confinement Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

\emptyset 150

H 226.5

Save

Cancel

Tools

Figura A 9 - Faixa granulométrica 3 e faixa granulométrica 4

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1 | Fraction 2 | Fraction 3 | Fraction 4

Fraction 6.3 mm / 9 mm

Without admixture

Experimental packing density 0.61

Packing index 9

Confinement Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

\emptyset 150

H 226.5

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1 | Fraction 2 | Fraction 3 | Fraction 4

Fraction 9 mm / 12.5 mm

Without admixture

Experimental packing density 0.601

Packing index 9

Confinement Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

\emptyset 150

H 226.5

Save

Cancel

Tools

1.3 Cimento Portland CP V - ARI

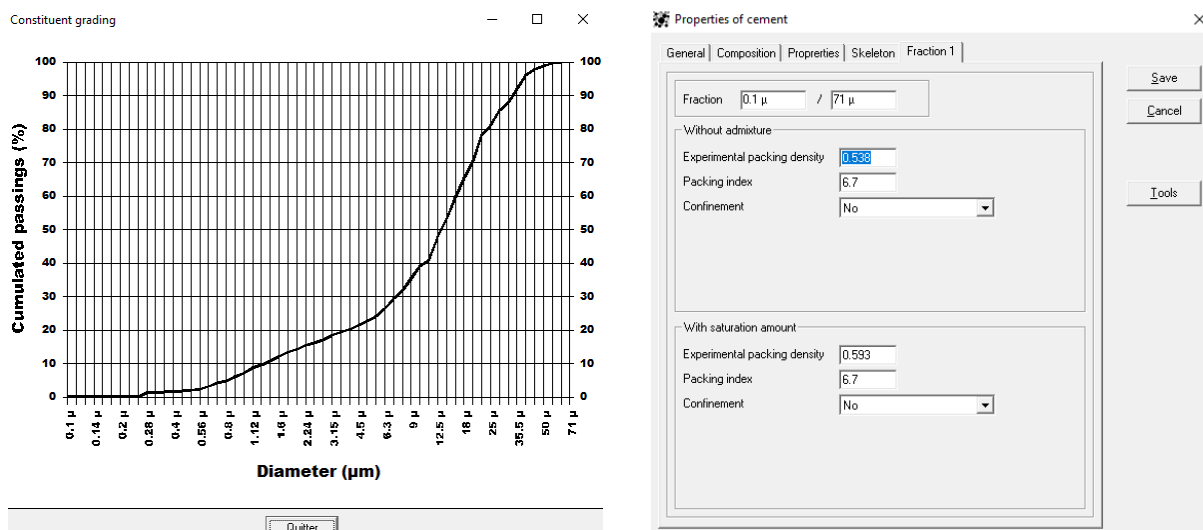
A sequência de preenchimento de dados referentes ao cimento Portland pode ser observada nas figuras apresentadas a seguir (Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23). Os primeiros dados exigidos pelo programa são referentes aos constituintes e à composição do cimento e às suas propriedades gerais, como resistência em duas idades. Em seguida, são preenchidos os valores referentes ao esqueleto granular para geração da curva correspondente. Finalmente, são adicionados os valores correspondentes ao ensaio de compacidade, realizado pelo método de demanda de água, com e sem o uso do aditivo superplastificante.

Figura A 10 - Criação do material cimento CP V no banco de dados e constituintes

Figura A 11 - Propriedades do cimento e esqueleto granulométrico

Diameter	Passing %	β	β^*
0.1 μ	0	0.4509	0.5028
0.112 μ	0	0.4509	0.5028
0.125 μ	0	0.4509	0.5028
0.14 μ	0	0.4509	0.5028
0.16 μ	0	0.4509	0.5028
0.18 μ	0	0.4509	0.5028
0.2 μ	0	0.4509	0.5028
0.224 μ	0	0.4509	0.5028
0.25 μ	0	0.4509	0.5028
0.28 μ	1.11	0.4509	0.5028
0.315 μ	1.25	0.4509	0.5028
0.355 μ	1.4	0.4509	0.5028
0.4 μ	1.54	0.4509	0.5028
0.45 μ	1.76	0.4509	0.5028

Figura A 12 - Distribuição granulométrica do cimento e resultados da compactidade



1.4 Aditivo Superplastificante

Para a dosagem do concreto será necessária a utilização de aditivo superplastificante. Sobre tal material é importante inserir valores referentes à sua densidade e ao teor de sólidos, conforme pode ser visualizado na Figura 24.

Figura A 13 - Propriedades do aditivo superplastificante.

The figure shows a 'Superplasticizer properties' dialog box with the following settings:

Field	Value
Name	Master Gleaum
Date	12/7/2019 1:38:18 PM
Comments	
Cost (Euro/kg)	
Solid content (%)	30
Density (kg/l)	1.1
mean % of active alkali	
maximum % of active alkali	

2. Calibração dos agregados

A segunda etapa adotada para a realização da dosagem é a calibração dos agregados que serão utilizados no concreto por meio dos parâmetros “p” e “q”. O parâmetro “p” está relacionado a aderência dos grãos à pasta de cimento, enquanto o parâmetro “q” relaciona-se com a resistência intrínseca do agregado. Essa calibração é feita para a areia utilizando valores de resistência dos traços rico e pobre de argamassa, enquanto para a brita é feita por meio dos valores de resistência obtidos nos traços de concreto pobre e rico dosados anteriormente.

2.1 Calibração da Areia

Foram selecionados os materiais utilizados na confecção das argamassas e foram inseridos os respectivos valores adotados para os traços. Nesta etapa são necessários dois traços, um considerado rico e de alta resistência e outro pobre com baixa resistência.

Figura A 14 - Seleção de materiais para calibração da Areia Natural e inserção de dados

The figure consists of two screenshots from a software application. The left screenshot shows a 'Selection' dialog box with the following content:

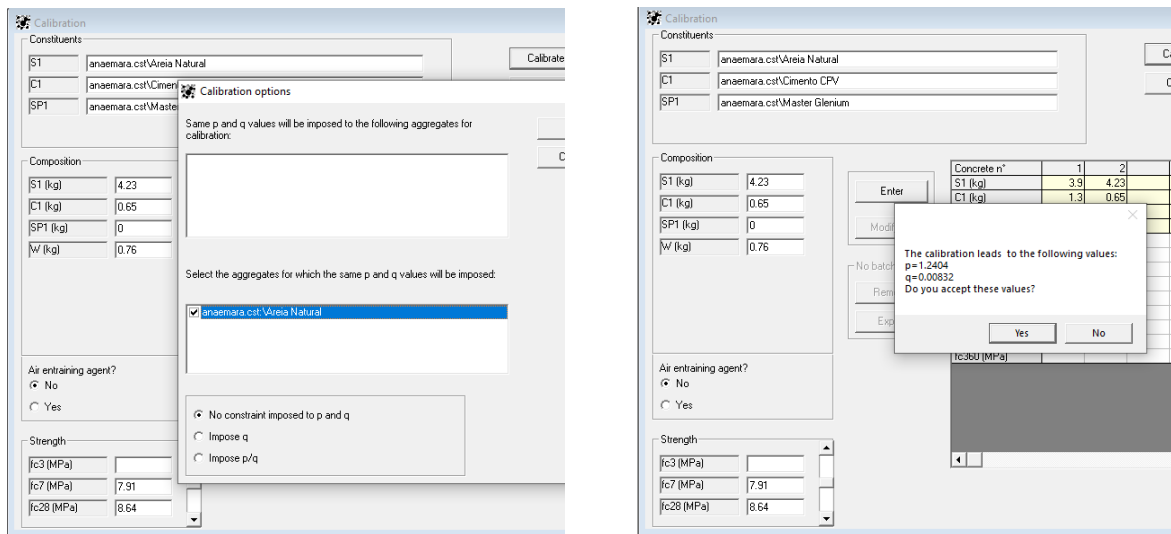
- Available folders:** 0,75f3.cst, 0,75f3n.cst, 0,75f7.cst, **Aggregates.cst** (selected), Generic materials.cst, Granulats.cst.
- Available constituents:** **Areia Natural** (selected), Brita, Cimento CPV, Master Glenium.
- Constituents selected for the mixes:** anaemara.cst\Areia Natural, anaemara.cst\Cimento CPV, anaemara.cst\Master Glenium.

The right screenshot shows a 'Calibration' dialog box with the following content:

- Constituents:** S1: anaemara.cst\Areia Natural, C1: anaemara.cst\Cimento CPV, SP1: anaemara.cst\Master Glenium.
- Composition:** S1 (kg): 4.23, C1 (kg): 0.65, SP1 (kg): 0, W (kg): 0.76.
- Air entraining agent?** No, Yes.
- Strength:** fc3 (MPa): [empty], fc7 (MPa): 7.91, fc28 (MPa): 8.64.
- Table:**

Concrete n°	1	2
S1 (kg)	3.91	4.23
C1 (kg)	1.31	0.65
SP1 (kg)	0	0
W (kg)	0.74	0.76
Total air (%)		
AEA	No	No
fc1 (MPa)	15.67	3.71
fc2 (MPa)		
fc3 (MPa)		
fc7 (MPa)	36.51	7.91
fc28 (MPa)	38.34	8.64
fc90 (MPa)		
fc360 (MPa)		

Figura A 15 - Calibração da Areia Natural e valores de "p" e "q" para a Areia Natural



2.2 Calibração da Brita

Foram selecionados os materiais utilizados na confecção dos concretos e foram inseridos os respectivos valores adotados para os traços. Nesta etapa são necessários dois traços, um considerado rico e de alta resistência e outro pobre com baixa resistência.

Figura A 16 - Seleção de materiais para calibração da Brita e inserção de dados

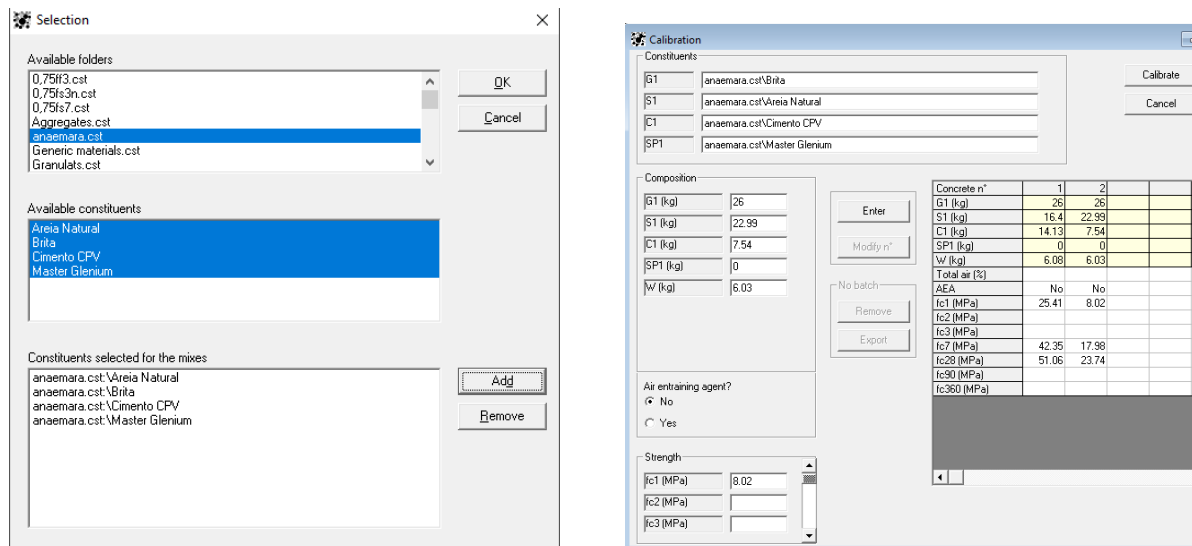
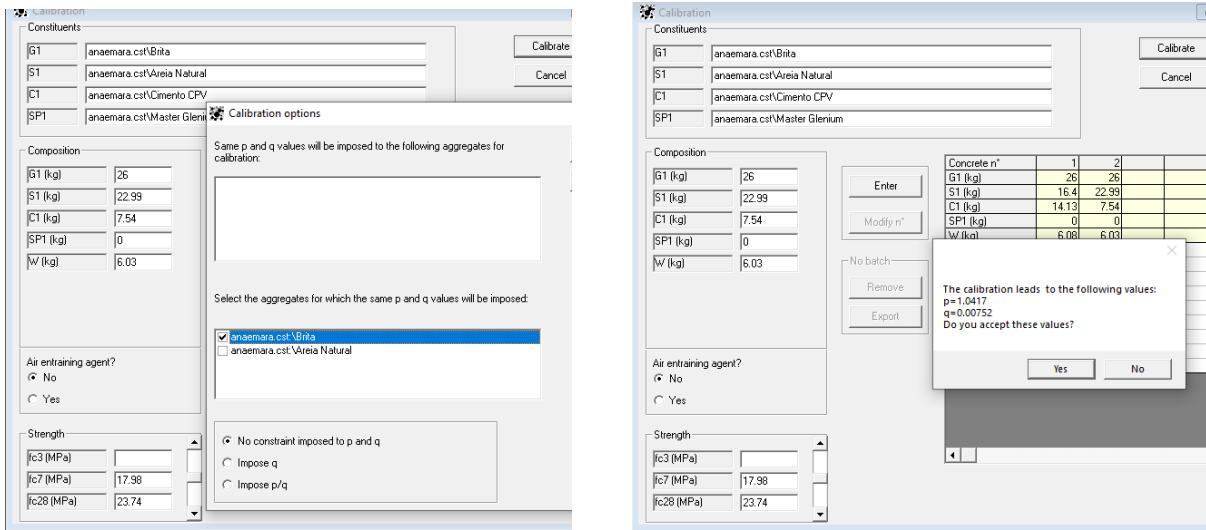


Figura A 17 - Calibração da Brita e valores de "p" e "q" para a Brita

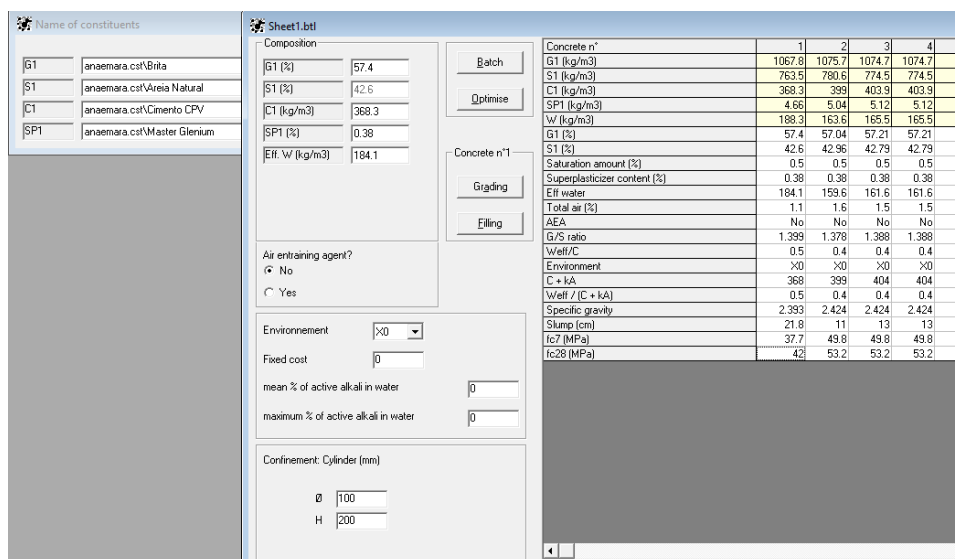


3. Dosagem

Após a inserção dos dados necessários para caracterização e calibração dos materiais utilizados, a etapa seguinte é a de dosagem propriamente dita do concreto, com base nas propriedades e características que se deseja obter. Inicialmente é necessário selecionar os materiais que irão compor a mistura e em seguida, é preciso fornecer uma composição inicial e definir quais parâmetros devem ser otimizados durante a dosagem.

Para a tipologia de concreto convencional escolhida para ser este trabalho, fixou-se o abatimento em 12 cm, admitindo-se um intervalo de 11 a 13 cm, e o parâmetro a ser otimizado foi a relação $a/c = 0,4$.

Figura A 18 - Dosagem do concreto convencional



APÊNDICE B – PARÂMETROS DA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

O controle dos parâmetros da câmara de carbonatação acelerada era realizado através de placa arduino e sensores de temperatura, umidade e concentração de CO₂, e foi possível acompanhar os dados diariamente de forma *online*. As informações eram enviadas via *wi-fi* para uma planilha Excel, possibilitando verificação dos parâmetros. Os parâmetros de funcionamento seguiram as recomendações estabelecidas pela ISO 1920-12:2015. Na Tabela B.1 está apresentado o controle para alguns dias.

Tabela B.1 – Parâmetros da câmara de carbonatação enviados durante o período de ensaio.

Hora e data	CO₂ (%)	Temp. (°C)	Umidade (%)	Aquecimento	Ventilação	Solenóide CO₂	Desumidificador
13:38:03 26/11/2020	3.33	25.98	65	OFF	ON	OFF	OFF
15:38:10 26/11/2020	3.30	26.20	67	OFF	ON	OFF	OFF
15:54:53 01/12/2020	3.19	26.08	64	OFF	ON	OFF	ON
13:55:43 02/12/2020	3.00	26.16	63	OFF	ON	OFF	OFF
05:56:18 03/12/2020	3.13	26.04	65	OFF	ON	OFF	OFF
09:57:20 04/12/2020	3.10	26.58	67	OFF	ON	OFF	OFF
19:43:43 16/12/2020	3.33	26.13	65	OFF	ON	OFF	OFF
21:43:50 16/12/2020	3.34	26.00	66	OFF	ON	OFF	OFF
23:43:55 16/12/2020	3.34	26.35	66	OFF	ON	OFF	OFF
01:43:59 17/12/2020	3.39	27.20	62	OFF	ON	OFF	OFF
03:43:59 17/12/2020	3.37	26.19	67	OFF	ON	OFF	OFF
05:44:04 17/12/2020	3.39	26.02	67	OFF	ON	OFF	OFF
07:44:08 17/12/2020	3.35	26.30	67	OFF	ON	OFF	OFF
09:44:14 17/12/2020	3.37	27.01	64	OFF	ON	OFF	OFF
11:44:16 17/12/2020	3.34	26.73	67	OFF	ON	OFF	OFF
15:44:26 17/12/2020	3.33	26.11	69	OFF	ON	OFF	ON
17:44:33 17/12/2020	3.33	26.10	69	OFF	ON	OFF	ON
09:46:52 20/12/2020	3.30	26.25	64	OFF	ON	OFF	OFF

Tabela B.2 – Parâmetros da câmara de carbonatação enviados durante o período de ensaio. (Continuação)

19:47:17 20/12/2020	3.29	26.02	65	OFF	ON	OFF	OFF
21:47:20 20/12/2020	3.21	26.46	65	OFF	ON	OFF	OFF
23:47:24 20/12/2020	3.24	26.66	64	OFF	ON	OFF	OFF
03:47:33 21/12/2020	3.27	26.05	66	OFF	ON	OFF	OFF
05:47:40 21/12/2020	3.24	25.89	67	OFF	ON	OFF	OFF
07:51:12 25/12/2020	3.34	26.30	64	OFF	ON	OFF	OFF
09:51:18 25/12/2020	3.36	26.50	64	OFF	ON	OFF	OFF
11:51:21 25/12/2020	3.39	27.15	62	OFF	ON	OFF	OFF
13:51:26 25/12/2020	3.36	26.10	65	OFF	ON	OFF	OFF
15:51:31 25/12/2020	3.35	26.21	66	OFF	ON	OFF	OFF
19:51:39 25/12/2020	3.33	26.31	65	OFF	ON	OFF	OFF
21:51:50 25/12/2020	3.36	26.34	66	OFF	ON	OFF	OFF
01:51:54 26/12/2020	3.35	26.02	67	OFF	ON	OFF	OFF
03:51:57 26/12/2020	3.37	26.14	67	OFF	ON	OFF	OFF
07:52:06 26/12/2020	3.35	27.65	58	OFF	ON	OFF	OFF
23:52:41 26/12/2020	3.37	26.00	69	OFF	ON	OFF	OFF
01:52:45 27/12/2020	3.38	26.16	68	OFF	ON	OFF	OFF
05:52:55 27/12/2020	3.42	26.64	67	OFF	ON	OFF	OFF
09:53:02 27/12/2020	3.44	26.21	68	OFF	ON	OFF	OFF
13:53:11 27/12/2020	3.41	26.06	69	OFF	ON	OFF	ON
15:53:16 27/12/2020	3.38	26.54	68	OFF	ON	OFF	OFF
05:54:37 29/12/2020	3.50	26.58	69	OFF	ON	OFF	ON
07:54:42 29/12/2020	3.45	26.36	70	OFF	ON	OFF	ON

Fonte: Sistema de dados da câmara de carbonatação.

APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIO MECÂNICOS E DE DURABILIDADE

Tabela C 1 - Valores individuais de resistência à compressão simples (MPa).

IDADE	CREF	CSF	CNS	CSF-NF
1 DIA	26,58	30,62	37,82	29,7
	28,47	28,67	0,54	27,84
	26,71	29,97	39,68	28,97
Média (MPa)	27,25	29,75	39,35	28,84
Desvio Padrão	1,10	1,00	1,40	0,90
3 DIAS	39,67	40,78	46,99	40,68
	40,34	39,38	48,98	37,51
	38,68	38,4	45,44	40,36
Média (MPa)	39,56	39,55	47,14	39,52
Desvio Padrão	0,80	1,20	1,80	1,70
7 DIAS	45,49	55,22	49,82	43,61
	45,28	51,68	49,16	44,71
	43,49	53,65	48,52	45,50
Média (MPa)	44,80	53,50	49,20	44,60
Desvio Padrão	1,10	1,80	0,70	0,90
28 DIAS	49,97	55,36	50,02	58,12
	51,22	52,13	52,55	58,01
	48,00	52,72	51,52	57,17
Média (MPa)	49,70	53,40	51,40	57,80
Desvio Padrão	1,60	1,70	1,30	0,50
63 DIAS	54,65	52,54	49,45	58,96
	52,52	55,86	51,63	59,87
	55,18	54,44	53,59	60,00
Média (MPa)	54,10	54,30	51,60	59,60
Desvio Padrão	1,40	1,70	2,10	0,60

Tabela C 2 - Valores individuais de absorção de água por imersão (%) e índice de vazios (%).

TRAÇO	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)
CREF	3,96	14,58
	3,84	14,32
	3,84	14,18
Média	3,88	14,36
Desvio Padrão	0,07	0,20
CSF	2,60	9,87
	2,68	10,12
	2,72	10,30
Média	2,67	10,10
Desvio Padrão	0,06	0,22
CNS	2,85	10,77
	3,13	11,85
	3,15	11,93
Média	3,04	11,52
Desvio Padrão	0,17	0,65
CSF-NS	2,12	8,15
	2,37	8,96
	2,27	8,64
Média	2,25	8,5
Desvio Padrão	0,13	0,41

Tabela C 3 - Valores individuais de absorção de água por capilaridade (g/cm²) e ascensão capilar (mm).

	CREF	CSF	CNS	CSF-NS
Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	3 horas			
	0,13	0,11	0,08	0,06
	0,12	0,08	0,11	0,08
	0,13	0,11	0,09	0,08
Média	0,13	0,10	0,10	0,07
Desvio Padrão	0,01	0,02	0,01	0,01
Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	6 horas			
	0,18	0,15	0,11	0,08
	0,16	0,11	0,15	0,10
	0,17	0,15	0,12	0,10
Média	0,17	0,13	0,13	0,09
Desvio Padrão	0,01	0,02	0,02	0,01
Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	24 horas			
	0,27	0,23	0,19	0,13
	0,24	0,16	0,27	0,15
	0,27	0,25	0,18	0,16
Média	0,26	0,21	0,21	0,15
Desvio Padrão	0,02	0,05	0,05	0,02
Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	48 horas			
	0,31	0,30	0,24	0,15
	0,27	0,21	0,35	0,18
	0,32	0,32	0,22	0,19
Média	0,30	0,28	0,27	0,17
Desvio Padrão	0,02	0,06	0,07	0,02
Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	72 horas			
	0,33	0,33	0,27	0,17
	0,30	0,22	0,40	0,20
	0,34	0,35	0,25	0,21
Média	0,33	0,30	0,31	0,1
Desvio Padrão	0,02	0,07	0,08	0,02
Ascensão capilar (mm)	43,46	31,44	33,34	7,69
	38,21	26,65	45,62	6,34
	42,43	30,78	25,63	6,44
	Média	41,37	29,62	34,86
Desvio Padrão	2,78	2,60	10,08	0,75

Tabela C 4 - Valores individuais de resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm).

	CPS	CREF	CSF	CNS	CSF-NS
Resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm)	1	9,49	95,34	10,87	88,24
		9,51	95,49	10,88	88,88
		9,51	95,48	10,73	89,19
		9,50	95,62	10,70	89,30
		9,37	95,55	10,72	90,02
	2	10,29	95,10	11,55	89,86
		10,23	95,13	11,53	89,45
		10,18	95,30	11,35	89,98
		10,12	95,25	11,35	90,64
		9,97	95,31	11,36	90,36
	3	10,49	95,34	11,20	96,24
		10,42	95,21	11,20	96,68
		10,38	95,24	11,02	96,70
		10,32	95,13	11,04	96,38
		10,13	95,22	11,01	96,56
Média	9,99	95,31	11,10	91,90	
Desvio Padrão	0,40	0,16	0,29	3,43	

Tabela C 5 - Valores individuais de resistividade elétrica superficial (kΩ.cm).

	CPS	CREF	CSF	CNS	CSF-NS
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	1	17,21	250,24	18,34	177,44
		17,23	250,30	18,41	177,75
		17,21	251,66	18,44	177,22
		17,22	250,46	18,36	177,89
		17,19	251,93	18,39	177,13
	2	17,52	250,85	19,68	179,96
		17,52	252,06	19,64	181,12
		17,51	254,75	19,70	179,86
		17,60	243,52	19,76	182,36
		17,49	252,28	19,88	181,12
	3	17,99	257,87	20,73	176,62
		17,93	257,22	20,78	176,21
		17,97	257,13	20,87	177,56
		17,94	258,20	20,91	175,76
		17,96	260,51	20,87	179,96
Média	17,57	253,27	19,65	178,53	
Desvio Padrão	0,32	4,34	1,04	2,03	

Tabela C 6 - Valores individuais obtidos no ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário.

CONCRETO		CREF				CSF				CNS				CSF-NS			
Tempo de ensaio (h)		24	24	24	24	48	48	48	48	24	24	24	24	96	96	96	96
Tensão inicial (V)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Corrente p/ 30 V (mA)		43,6	68,0	67,8	70,0	3,6	5,1	6,2	5,3	36,4	37,5	37,6	41,9	3,9	3,9	4,1	4,1
Nova Tensão (V)		25	25	25	25	60	60	60	60	35	35	35	35	60	60	60	60
Corrente inicial (mA)		36,7	58,10	57,8	59,0	7,3	11,7	15,5	11,8	42,7	44,0	44,0	48,9	7,8	7,9	8,3	8,3
Corrente final (mA)		39,3	70,6	65,9	75,5	11,7	12,9	14,8	10,8	44,2	54,3	54,3	56,9	9,5	11,9	9,2	9,5
Temperatura inicial (°C)		25	25	25	25	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25
Temperatura final (°C)		25	25	25	25	23	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	24
Espessura média (mm)	e₁	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	e₂	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	e₃	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Penetração de cloretos (mm)	x_{d1}	2,85	2,24	2,75	2,88	1,12	1,19	1,01	1,07	2,27	2,21	1,61	2,05	2,11	2,47	2,31	2,38
	x_{d2}	2,30	2,06	2,79	2,70	0,98	0,96	1,05	1,02	2,05	2,26	1,12	1,79	2,22	2,20	3,31	2,48
	x_{d3}	2,45	2,46	2,75	2,54	1,01	0,90	0,83	0,85	1,51	1,65	1,75	2,06	2,07	2,31	4,92	1,75
	x_{d4}	2,39	2,62	2,91	2,93	1,02	0,96	0,87	0,95	1,96	2,04	1,67	2,13	2,60	2,19	2,18	0,69
	x_{d5}	2,15	2,4	2,19	2,64	1,15	1,22	0,95	0,99	1,94	1,97	1,93	1,87	2,96	2,89	1,80	1,11
	x_{d6}	2,01	2,38	2,86	2,79	1,09	1,11	1,28	1,15	1,21	2,00	1,58	1,83	2,19	2,87	2,31	1,51
	x_{d7}	1,97	2,25	2,70	2,92	1,21	1,25	0,93	0,98	1,51	1,51	0,94	2,04	2,44	2,72	3,16	2,22
Coeficiente de migração (10 ⁻¹² m ² /s)		0,893	0,917	1,103	1,137	0,09	0,09	0,08	0,08	0,50	0,56	0,40	0,56	0,11	0,12	0,14	0,08
Média (10 ⁻¹² m ² /s)		1,38				2,19				2,11				1,54			
Desvio Padrão		0,41				0,47				0,17				0,30			

Tabela C 7 - Valores individuais obtidos no ensaio de carbonatação acelerada

TRAÇOS	CREF		CSF		CNS		CSF-NS	
Idades	56 dias		56 dias		49 dias		42 dias	
Leituras	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
1	2,13	1,99	1,04	1,36	0,96	0,28	0,93	0,91
2	1,60	2,31	1,00	1,25	1,18	0,37	0,87	0,82
3	1,47	1,95	0,75	1,08	0,94	0,32	0,61	0,95
4	1,87	1,48	0,79	0,80	0,99	0,79	0,75	0,87
5	1,59	0,95	0,77	1,17	0,83	0,62	1,03	0,80
6	1,89	2,06	0,79	0,61	0,49	0,35	1,08	0,79
7	1,27	2,44	0,97	1,43	1,21	0,59	0,99	0,92
8	0,82	1,21	1,21	1,09	0,73	0,70	0,97	0,75
9	1,30	1,75	0,67	1,06	0,97	0,66	1,00	1,02
10	1,54	1,98	0,94	0,75	0,54	0,27	0,89	0,91
11	3,19	1,53	0,59	0,98	0,75	0,55	0,98	1,01
12	2,39	1,84	0,60	0,70	0,59	0,43	0,77	0,79
13	1,64	1,40	0,89	1,46	0,63	0,38	0,92	0,83
14	2,29	1,28	0,46	1,35	0,81	0,49	1,04	0,96
15	1,92	1,84	1,51	1,14	0,68	0,50	0,80	0,85
16	1,46	1,59	0,86	1,23	0,92	0,37	1,05	0,47
17	2,27	1,14	1,34	1,06	0,56	0,41	0,78	0,82
18	1,28	1,92	1,22	0,97	1,01	0,73	0,87	0,91
19	0,88	1,33	1,41	0,81	0,96	0,53	0,91	0,69
20	1,12	1,04	1,18	1,12	0,78	0,47	0,89	0,72
Média	1,70	1,65	0,95	1,07	0,83	0,49	0,91	0,84
Desvio Padrão	0,49	0,42	0,29	0,27	0,21	0,15	0,12	0,13
Média final	1,674		1,010		0,659		0,873	