

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

KELLEN KAROLAINY PEIXOTO DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA E
SÍLICA ATIVA NO CONCRETO**

ANÁPOLIS / GO

2021

KELLEN KAROLAINY PEIXOTO DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA E
SÍLICA ATIVA NO CONCRETO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADORA: KÍRIA NERY ALVES DO ESPÍRITO
SANTOS GOMES**

ANÁPOLIS / GO: 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, KELLEN KAROLAINY PEIXOTO DOS

Estudo comparativo da adição de nanossílica e sílica ativa no concreto.

71p, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Concreto.

2. Nanossílica.

3. Sílica ativa.

4. Desempenho mecânico.

I. ENC/UNI

II. Bacharel

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, Kellen Karolainy Peixoto dos. Estudo comparativo da adição de nanossílica e sílica ativa no concreto. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 71. 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Kellen Karolainy Peixoto dos Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo comparativo da adição de nanossílica e sílica ativa no concreto.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2021

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Kellen Karolainy Peixoto dos Santos

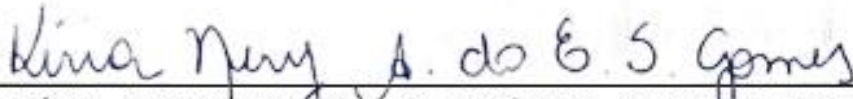
E-mail: engcivil.kellen@gmail.com

KELLEN KAROLAINY PEIXOTO DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA E
SÍLICA ATIVA NO CONCRETO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

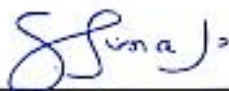
APROVADO POR:



**KÍRIA NERY ALVES DO ESPÍRITO SANTOS GOMES, Mestra
(UnIEVANGÉLICA)
(ORIENTADORA)**



**ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UnIEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**JULLIANA SIMAS VASCONCELLOS, Mestra (UEG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 28 de Maio de 2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente em minha vida, me dando forças todos os dias, me dando sabedoria nos momentos mais difíceis, pois sei que sem ele nada disso seria possível para concluir essa etapa da minha vida.

A todos os meus familiares, que sempre me deram força e estiveram presentes me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação, em especial, Ilda, Genivaldo, Bruno, Deyse e principalmente ao Luis Filipi que sempre buscou ter compreensão e me apoiar em todos os momentos, sempre acreditando nos meus potenciais e me fazendo não desistir. Obrigada por toda a paciência que teve ao decorrer dessa etapa, pois sei que não teria sido o mesmo sem você.

Aos meus verdadeiros amigos, que estiveram comigo nos momentos bons e ruins, o que me possibilitou ter mais motivos para passar pelas dificuldades. Obrigada por me ajudarem a ser forte nos momentos de desespero.

A todos que contribuíram para meu crescimento pessoal.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desse trabalho.

A minha orientadora, Kíria, pela dedicação em me orientar nesse trabalho extenso e desafiador e por descomplicar as partes mais difíceis desse estudo.

Ao Centro tecnológico da UniEvangélica por me permitir o desenvolvimento deste trabalho em suas instalações.

Ao Doutor Leandro Porfiro, um grande professor e amigo que levarei para a vida. Obrigada por nunca medir esforços e sempre ajudar. E a todos os meus professores do curso de engenharia civil da UniEVANGÉLICA que tiveram participação em minha formação.

Obrigada.

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível”.

(Max Weber)

RESUMO

O concreto convencional é, sem dúvidas, um dos mais importantes materiais da Engenharia Civil, pois consegue proporcionar resistências satisfatórias quando é solicitado. Porém, a busca por concretos mais resistentes tornou-se uma necessidade nos últimos anos para se obter maiores resistências em estruturas de grande porte. Portanto, há um crescente aumento nos estudos experimentais com enfoque em aprimorar o concreto convencional. Nesse sentido, algumas adições minerais acrescentadas ao concreto convencional estão ganhando destaque visando obter melhores perfis de resistência mecânica e durabilidade. Dois exemplos de adição são: a sílica ativa e a nanossílica (nanopartículas de sílica em suspensão coloidal). A literatura não apresenta tantos estudos relacionados à nanossílica e seus efeitos no concreto, e os estudos existentes apresentam resultados variados, havendo controvérsias na literatura científica sobretudo quanto ao percentual ideal de substituição ao cimento. Com isso, este trabalho busca comparar ambas as adições, na mesma porcentagem de substituição ao cimento, avaliando as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, entre as duas adições minerais, e definir qual composto apresenta melhor desempenho mecânico. Dessa maneira, realizou-se um estudo experimental do concreto a partir de três traços diferentes: concreto convencional, concreto com adição de sílica ativa e concreto com adição de nanossílica. Os resultados obtidos mostram que a sílica ativa teve um aumento de resistência mecânica maior comparada à nanossílica, quando utilizadas em porcentagens idênticas, mostrando que a sílica ativa tem um bom potencial de aumento na resistência do concreto. Além disso, não houve diferença significativa entre o traço convencional e os traços contendo nanossílica. Inferiu-se que a forma como a nanossílica foi manuseada não trouxe efeitos positivos sobre a resistência mecânica. Por ser um material ainda pouco estudado, ainda não se sabe bem quais influências os demais componentes do concreto, como os agregados e os aditivos, podem exercer na nanossílica. Algumas hipóteses foram abordadas durante a análise dos resultados e pesquisas futuras foram sugeridas, visto que há a necessidade de maiores estudos sobre o uso desse nanomaterial no concreto e na engenharia civil.

PALAVRAS-CHAVE:

Concreto. Sílica ativa. Nanossílica. Resistência mecânica.

ABSTRACT

Conventional concrete is, without a doubt, one of the most important materials in Civil Engineering, as it can provide resistance when requested. However, the search for more resistant concrete has become a necessity in the years to obtain greater resistance in large structures. Therefore, there is a growing increase in experimental studies with a focus on improving conventional concrete. In this sense, some general additions of mechanical strength are gaining. In this sense, some basic additions added to conventional concrete are gaining. Two examples of addition are: active silica and nanossilica (silica nanoparticles in colloidal suspension). The literature does not present as many studies related to nanossilica and its effects on concrete, and the studies show varied results, with controversies in the scientific literature, especially regarding the ideal percentage of substitution to cement. With this, this work seeks to compare both additions, in the same percentage of substitution to the cement, evaluating the properties of the concrete both in the fresh state and in the hardened state, between the two mineral additions, and to define which compound presents the best mechanical performance. In this way, an experimental study of concrete was carried out using three different features: conventional concrete, concrete with the addition of active silica and concrete with the addition of nanossilica. The results presented show that the active silica had a greater increase in mechanical strength compared to the nanossilica, when used in identical percentages, showing that the active silica has a good potential for increasing the strength of the concrete. In addition, there was no significant difference between the conventional and the nanossilic-containing strokes. It was inferred that the way the nanossilica was handled did not have any positive effects on mechanical strength. As it is a material that has not yet been studied, it is still not clear what influences the other concrete components, such as aggregates and additives, may have on nanossilica. Some hypotheses were addressed during the analysis of the results and future research was suggested, since there is a need for further studies on the use of this nanomaterial in concrete and in civil engineering.

KEYWORDS:

Concrete. Active silica. Nanossilica. Mechanical resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland	26
Figura 2 - Diagrama ilustrativo de como a microestrutura, as condições prévias de exposição e condicionantes do processo de fabricação do agregado determinam as suas características e como estas afetam o traço e as propriedades do concreto fresco e endurecido	28
Figura 3 - Defloculação dos grãos de cimento	30
Figura 4 - Esquema gráfico que representa a microestrutura de uma pasta de cimento hidratada com e sem adição pozolânica	33
Figura 5 - Representação da zona de transição entre agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada. A esquerda cimento sem adição pozolânica, a direita cimento com adição	33
Figura 6 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas	35
Figura 7 – Curva de Abrams do cimento.....	42
Figura 8 – Corpos de prova moldados.....	49
Figura 9 – Corpos de prova na câmara úmida.....	50
Figura 10 - Medida do concreto submetido ao ensaio de abatimento de tronco de cone	51
Figura 11- Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto referência.....	55
Figura 12 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 1,5% de sílica ativa....	56
Figura 13 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 2,5% de sílica ativa....	56
Figura 14 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 1,5% de nanossílica ...	56
Figura 15 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 2,5% de nanossílica ...	57
Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto referência.....	59
Figura 17 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 1,5% de sílica ativa ..	59
Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 2,5% de sílica ativa ..	59
Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 1,5% de nanossílica ..	60
Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 2,5% de nanossílica ..	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Nomenclatura dos cimentos Portland.....	18
---	----

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Diferentes classes do Concreto de Alto Desempenho.....	24
Tabela 2 - Composição da microssílica.....	32
Tabela 3 - Limites de composição do cimento Portland	38
Tabela 4 - Requisitos químicos do cimento Portland.....	38
Tabela 5 – Requisitos físicos e mecânicos	38
Tabela 6 – Resultados da caracterização do agregado graúdo	39
Tabela 7– Resultados da caracterização do agregado miúdo	40
Tabela 8 – Características da sílica ativa.....	40
Tabela 9 – Características da nanossílica conforme fabricante.....	41
Tabela 10 – Consumo de água aproximado.....	43
Tabela 11 – Teor de agregado graúdo (m ³)	44
Tabela 12 – Traço unitário do concreto referência.....	47
Tabela 13 – Dosagem experimental do traço contendo 1,5% de sílica ativa em substituição ao cimento	48
Tabela 14 – Dosagem experimental do traço contendo 2,5% de sílica ativa em substituição ao cimento	48
Tabela 15 - Dosagem experimental do traço contendo 1,5% de nanossílica em substituição ao cimento	48
Tabela 16 – Dosagem experimental do traço contendo 2,5% de nanossílica em substituição ao cimento	48
Tabela 17 - Tolerância de tempo para o ensaio de compressão em função da idade de ruptura	51
Tabela 18 – Resultado do batimento dos concretos	55
Tabela 19 - Resultados obtidos da resistência dos concretos (MPa).....	58
Tabela 20 - Média das massas (g) de dois corpos de prova do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica	61
Tabela 21 - Resultados obtidos do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 METODOLOGIA	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 HISTÓRICO E DEFINIÇÃO DO CONCRETO	17
2.2 CONCRETO CONVENCIONAL	17
2.2.1 Tipos de cimento	18
2.2.2 Propriedades do concreto	19
2.2.2.1 Propriedade do concreto no estado fresco	19
2.2.2.2 Propriedade do concreto no estado endurecido	21
2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	22
2.3.1 Definição do CAD	23
2.3.2 Propriedades/princípios básicos do CAD.....	23
2.3.3 Materiais constituintes	25
2.3.3.1 Cimento.....	25
2.3.3.2 Agregados.....	27
2.3.3.3 Aditivos redutores de água	29
2.3.3.4 Adições minerais	30
2.4 SÍLICA ATIVA	31
2.5 NANOSSÍLICA	34
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	37
3.1.1 Cimento Portland	37
3.1.2 Agregado graúdo	39
3.1.3 Agregado miúdo	39
3.1.4 Sílica ativa	40
3.1.5 Nanossílica.....	40
3.1.6 Aditivo redutor de água	41

3.1.7	Água de adensamento	41
3.2	DESENVOLVIMENTO DOS TRAÇOS	41
3.2.1	Determinação da relação a/c	41
3.2.2	Determinação do consumo de materiais.....	43
3.2.2.1	Determinação do consumo de água (C_{ag})	43
3.2.2.2	Determinação do consumo de cimento (C_C).....	43
3.2.2.3	Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b)	44
3.2.2.4	Determinação do consumo de agregado miúdo	45
3.2.3	Apresentação do traço unitário.....	46
3.2.4	Desenvolvimento dos traços.....	47
3.2.5	Moldagem dos corpos de prova.....	49
3.3	ENSAIOS REALIZADOS	50
3.3.1	Trabalhabilidade	50
3.3.2	Resistência à compressão	51
3.3.3	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	52
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	55
4.1.1	Resultados da Trabalhabilidade	55
4.1.2	Resultados da resistência a compressão axial.....	57
4.1.3	Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O concreto é, sem dúvidas, um dos mais importantes materiais da Engenharia Civil. Descoberto no fim do século XIX, passou a ser utilizado em larga escala no século XX e hoje é o segundo produto mais consumido no mundo inteiro, atrás somente da água (HELENE; ANDRADE, 2010). Diante dos avanços tecnológicos e da necessidade de obras cada vez maiores e mais complexas, a busca por concretos mais resistentes tornou-se uma necessidade. Dessa forma, diversos estudos experimentais com foco no aprimoramento do concreto convencional passaram a ser desenvolvidos. Dentre as alternativas estudadas, vem ganhando destaque a adição de nanopartículas de sílica em suspensão coloidal (também conhecida como nanossílica) ao concreto convencional, visando obter melhores perfis de resistência e durabilidade.

As características do concreto podem ser analisadas em dois momentos distintos: nos estados fresco e endurecido. O estado fresco caracteriza-se por sua maleabilidade, permitindo moldar estruturas em formatos diversos que, após adquirir o estado endurecido, torna-se um material altamente resistente do ponto de vista mecânico. Dentre as propriedades mecânicas, a resistência à compressão é, junto com a durabilidade, a propriedade mais importante do concreto e, classicamente, o concreto pode ser dividido em dois tipos, de acordo com essa resistência: o convencional e o de alto desempenho. O primeiro, segundo Recena (2011), tem seu perfil de características mecânicas determinado a partir da relação água/cimento. Já o concreto de alto desempenho necessita do emprego de aditivos para a obtenção de seu perfil de resistência mecânica esperado.

A nanossílica, por sua vez, compõe um dos elementos da chamada nanotecnologia, que representa um dos temas mais modernos no campo da engenharia (NETO; GEYER, 2017). O uso de nanomateriais, segundo Zhu, Bartos e Porro (2004), permite melhor controle de sua microestrutura, além de produzir materiais mais duráveis e resistentes. Além disso, análises de Quercia e Browsers (2010) determinaram que a adição de nanossílica ao concreto é capaz de reduzir a necessidade de cimento da mistura. Dentre os benefícios dessa redução, Neville (2016) elenca a redução dos custos de produção (visto que o cimento é um dos componentes mais caros do concreto), além de reduzir a liberação excessiva de calor de hidratação, o que contribui com menores taxas de retração e fissuração.

É importante citar que um dos benefícios do uso da nanossílica no concreto advém de suas propriedades pozolânicas. Classicamente, Mehta e Monteiro (2006) definem um material pozolânico como sendo um material silicoso ou sílico-aluminoso que, naturalmente, não

apresenta propriedades cimentícias, porém, na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio sob temperatura ambiente para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que é o principal produto de hidratação do concreto. Segundo os mesmos autores, o uso de materiais pozolânicos reduzem a porosidade do concreto, aumentando sua resistência e impermeabilidade.

Ao mensurar a eficácia do uso de nanossílica no concreto, os estudos frequentemente utilizam a sílica ativa (ou microssílica) nos ensaios, a título de comparação. Isso se deve aos seus efeitos sobre o concreto, que são semelhantes ao da nanossílica (NETO; GEYER, 2017). Esse composto também pertence à categoria dos materiais pozolânicos e difere da nanossílica devido ao tamanho de suas partículas, que são maiores. Além disso, pelo fato de a sílica ativa ser uma das adições minerais mais utilizadas no concreto (HERMANN *et al*, 2016), seu comportamento sobre o produto final é mais bem conhecido, permitindo um leque comparativo maior à nanossílica.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme observado por diversos autores (ANDRADE, 2017; NETO & GEYER, 2017; MORAES, 2010; CARNEIRO, 2013), os efeitos da nanossílica sobre os materiais cimentícios ainda são pouco estudados, principalmente no Brasil. Isso promove uma lacuna de conhecimento sobre esse tema, e os poucos estudos produzidos apresentam resultados conflitantes, ora demonstrando benefícios sobre as propriedades mecânicas, ora evidenciando ausência de efeitos positivos. Um dos motivos para essa heterogeneidade de resultados baseia-se nas particularidades de cada estudo, como traço do concreto utilizado, tipo de matéria-prima (incluindo cimento, agregados, aditivos) utilizada e também o desconhecimento de porcentagens ideais de nanossílica a serem avaliadas nos experimentos.

Dessa forma, esse estudo torna-se importante para fornecer uma base experimental mais sólida ao uso da nanossílica nos materiais cimentícios. Para tal, comparar os efeitos da nanossílica com outros materiais semelhantes, como a sílica ativa, propicia maior relevância na aplicação prática, isto é, no dia-a-dia da engenharia civil. Isto porque a sílica ativa é mais largamente empregada na construção civil (HERMANN *et al*, 2016), o que propicia boa base comparativa, e eventuais resultados positivos com o uso da nanossílica vão de encontro às necessidades da engenharia, que busca inovação e eficiência em suas novas tecnologias.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral determinar os efeitos da adição de nanossílica no concreto convencional, comparando-o com o uso da sílica ativa, por meio de ensaios laboratoriais, visando compreender seus benefícios potenciais e a validade de seu uso no âmbito da construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral do trabalho, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o estudo bibliográfico referente ao concreto convencional, nanossílica e sílica ativa;
- Avaliar as propriedades do concreto no estado fresco por meio de ensaios de trabalhabilidade;
- Avaliar as propriedades do concreto no estado endurecido por meio de ensaios de resistência à compressão e seu índice de desempenho aos 28 dias;
- Avaliar a absorção de água, índice de vazios e a massa específica de cada concreto;
- Comparar o concreto convencional com o concreto com adição de nanossílica e concreto com adição de sílica ativa em relação a sua resistência à compressão.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho constitui um estudo experimental baseado em revisão bibliográfica acerca da adição de nanossílica e sílica ativa em concreto e sua influência nas propriedades mecânicas do produto. Os ensaios foram realizados em laboratório, com a utilização de corpos de prova, padronizados pelas normas NBR específicas do tema. Após isso, as informações coletadas foram compiladas e analisadas quanto a trabalhabilidade e resistência à compressão, comparando o concreto convencional aos concretos com adição de nanossílica e sílica ativa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho de conclusão de curso foi escrito em 5 capítulos, conforme a divisão a seguir:

No capítulo 1 é apresentada a introdução sobre o tema, trazendo conceitos sobre o concreto, nanossílica e sílica ativa, abordando suas respectivas importâncias e usos. Além disso, é descrito a justificativa, os objetivos e a metodologia do presente estudo.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do tema, abordando o histórico, as definições e os aspectos gerais relacionados ao concreto convencional, ao concreto de alto desempenho, à sílica ativa e à nanossílica, enfatizando suas principais propriedades.

O capítulo 3 expõe o programa experimental, em que é descrito as caracterizações dos materiais utilizados, os cálculos e o desenvolvimento dos traços de concreto testados. Também apresenta a metodologia utilizada para analisar a trabalhabilidade, a resistência a compressão axial, a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica.

O capítulo 4 apresenta todos os dados obtidos a partir dos ensaios realizados, por meio de tabelas, gráfico e imagens, realizando-se uma análise dos resultados de trabalhabilidade, resistência a compressão axial e absorção de água, índice de vazios e massa específica.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas por meio da análise dos resultados do experimento, além de sugestões para futuros trabalhos.

O trabalho é finalizado com as referências utilizadas para seu desenvolvimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO E DEFINIÇÃO DO CONCRETO

Segundo as análises históricas, o concreto foi inicialmente descoberto na Roma antiga, baseado em uma espécie de cimento hidráulico, caracteristicamente durável, porém pouco resistente, se comparado ao atual. Entretanto, a despeito disso, foi largamente utilizado por essa civilização, para construção de rodovias e obras públicas, como até mesmo o Panteão de Roma (HELENE; ANDRADE, 2010). Porém, somente em 1824, com o patenteamento do cimento Portland, por Josep Aspdin, e em 1878, com o desenvolvimento do concreto armado, por Thaddeus Hyatt, o concreto moderno começou a ser desenvolvido (NEVILLE, 2013), passando a ser utilizado intensivamente no século seguinte (HELENE; ANDRADE, 2010).

Desde então, o uso massivo do concreto moderno moldou civilizações e estimulou seu próprio desenvolvimento, tornando-se um material cada vez mais resistente, versátil e durável, sobretudo nas últimas décadas. Em países subdesenvolvidos, como o Brasil, o Uruguai e a Argentina, inclusive, desprovidos de uma indústria siderúrgica forte, em meados do século XX, o concreto armado foi especialmente importante para a construção civil, e se mantém assim até hoje (HELENE; ANDRADE, 2010).

Segundo Neville (2013), o concreto é qualquer composto produzido por material cimentante, caracterizado pela reação entre cimento e água. Em seu estado fresco, é um composto maleável, podendo ser modelado em inúmeros formatos, e quando endurecido, apresenta-se como composto de alta resistência, além de ser menos propenso à deterioração pela água (LIMA *et al.*, 2014). O concreto pode ser classificado como concreto convencional e concreto de alto desempenho (CAD).

2.2 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto convencional é, segundo Recena (2011), aquele cuja resistência mecânica pode ser obtida através da configuração da relação água/cimento (a/c). Aqui, o uso de aditivos, como os superplastificantes, ou as adições pozolânicas são dispensáveis. Caracteristicamente, possuem resistência mecânica inferior ao CAD.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto convencional é uma espécie de mistura homogênea composta de cimento Portland, agregados miúdos e graúdos e água, que pode ou não receber adição de componentes minoritários, como aditivos químicos, sílicas e

outros materiais pozolânicos, apresentando suas propriedades fundamentais pelo endurecimento da pasta de cimento. O cimento Portland é um pó fino, geralmente acinzentado, advindo da moagem do clínquer, que é misturado com sulfato de cálcio (ABNT, 2018). Quando esse é adicionado aos demais materiais, como pedra, areia, cal, aditivos etc., é possível obter pastas, argamassas e concretos. Dessa forma, é de suma importância o entendimento das características e propriedades dos tipos de cimento (LOPES, 2017).

2.2.1 Tipos de cimento

Segundo Pedrosa (2009), é necessária a existência de especificações para o cimento e o concreto, de forma a garantir maior qualidade ao produto final. Para isso, utilizam-se normas para padronização desses, e no Brasil, o cimento Portland é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), possuindo 8 tipos básicos, com seus subtipos e classes (Quadro 1). Ademais, os cimentos Portland se diferenciam por proporções, composições, adições diversas e também propriedades intrínsecas (BATTAGIN, 2011).

Quadro 1- Nomenclatura dos cimentos Portland

(continua)

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b	
	Com adição	CP I-S			
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E			
	Com material cabonático	CP II-F			
	Com material pozolânico	CP II-Z			
Cimento Portland de alto-forno		CP III			ARI ^d
Cimento Portland pozolânico		CP IV			
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			

Quadro 1 - Nomenclatura dos cimentos Portland

(conclusão)

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Não estrutural	CPB	-	-

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: ABNT, 2018.

2.2.2 Propriedades do concreto

É importante conhecer as características e propriedades do concreto, pois sabe-se que a qualidade final desse dependerá exclusivamente do controle dessas propriedades para melhor entendimento do seu comportamento durante sua aplicação. Distingue-se o concreto em duas fases distintas: concreto no estado fresco e concreto no estado endurecido (HELENE; ANDRADE, 2010), sendo as propriedades desses dois estados as características mais importantes a serem analisadas.

Essas propriedades, segundo Pinheiro (2007), são definidas através de ensaios, para máximo controle de qualidade, minimização de vieses e atendimento às especificações. Segundo o autor, há fatores que podem influenciar nas propriedades do concreto como: tipo e quantidade de cimento, relação a/c, tipos de agregados, presença de aditivos, entre outros. Destaca-se o papel do cimento, que é o principal responsável, do ponto de vista químico, pela reação e mistura dos componentes utilizados no concreto, sendo o resultado final altamente dependente do uso correto desse (ABCP, 2002).

2.2.2.1 Propriedade do concreto no estado fresco

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), conceitua-se o concreto no estado fresco como sendo aquele que encontra-se completamente misturado e com características plásticas, podendo ser adensado por algum método escolhido. O concreto deve atender às propriedades

exigidas em projeto para o estado endurecido. Para que isso ocorra, o concreto no estado fresco deve ter cuidados absolutos, pois o resultado final das propriedades do concreto depende fortemente das reações que acontecem em ambos estados.

Inicialmente, é necessário frisar que o estado fresco do concreto deve permitir fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, de forma a apresentar máxima homogeneidade e mínimo de vazios no estado endurecido (BAUER, 2008). Lopes (2018) elenca a trabalhabilidade, a integralidade da massa (oposto de segregação) e o poder de retenção da água (oposto da exsudação) como as principais propriedades do concreto no estado fresco.

A trabalhabilidade define a quantidade de esforço exigida para manipular o concreto no estado fresco, com mínima perda de sua homogeneidade (LOPES, 2018). A consistência é seu componente físico mais importante, pois traduz propriedades intrínsecas relacionadas a mobilidade da massa e coesão entre os elementos que compõem a mistura. O ponto de trabalhabilidade ideal, contudo, varia para cada tipo de obra. Por exemplo, um concreto adequado para construção de estruturas grandes e com pouca armação pode não ser ideal para uso em estruturas finas e muito armadas (BAUER, 2008).

A trabalhabilidade depende, entre outros fatores, da relação a/c empregada durante o processo de mistura. Quanto maior a relação a/c, maior será a trabalhabilidade da mistura (BAUER, 2008). Contudo, uma maior quantidade de água resulta em maior proporção de índices de vazios, visto que nem toda a água será incorporada à mistura. Como consequência, há redução da resistência mecânica e durabilidade do concreto (MARTINEZ *et al*, 2015).

Outro fator que interfere na trabalhabilidade da mistura é a segregação, ou seja, a separação dos constituintes da mistura em questão, impedindo que a mistura se mantenha uniforme (LOPES, 2018). O concreto no estado fresco não pode apresentar segregação expressiva, pois isso inviabilizaria a compactação adequada desse (BAUER, 2008). Dentre as causas de segregação, tem-se como exemplo: diferenças de tamanho entre as partículas, traço inadequado, vibração excessiva, diferenças na massa específica dos constituintes da mistura etc. (LOPES, 2018). Para minimizar esse efeito, é necessário, dentre outras medidas, haver a granulometria correta dos agregados e cuidados especiais durante o processo de adensamento (BAUER, 2008).

Ademais, um menor poder de retenção de água na mistura em estado fresco também pode interferir negativamente nas propriedades do concreto endurecido. A esse problema, dá-se o nome de exsudação, que é uma forma de segregação da água da mistura (por ser o material

mais leve), que se concentra na superfície do conteúdo, afetando o desempenho desse concreto no estado fresco e endurecido (LOPES, 2018).

Segundo Neville (2016), não há nenhum método consentido que avalie integralmente a trabalhabilidade. Algumas tentativas feitas, podem fornecer informações úteis. Contudo, para que se possa garantir resultados coerentes, são sugeridos alguns ensaios para a padronização, que avaliam a trabalhabilidade do concreto; outros medem somente o índice de consistência, podendo fornecer informações absolutas e/ou a título de comparação. Um método que é geralmente utilizado para avaliar a consistência do concreto fresco é o abatimento pelo tronco de cone regida pela norma NBR 16889 (ABNT, 2020), também chamado de “*slump test*”. É um método de extrema simplicidade que pode oferecer informações relativas, visto que concretos diferentes que apresentem um mesmo “*slump*” podem não apresentar a mesma trabalhabilidade (RECENA, 2011).

2.2.2.2 Propriedade do concreto no estado endurecido

O concreto é considerado endurecido a partir do momento que adquire consistência sólida e resistência mecânica desenvolvida (ABNT, 2015b). Quando o concreto está no estado endurecido, apresenta, além da resistência aos esforços mecânicos, impermeabilidade. Ao apresentar essas características, o composto consegue ser mais durável frente aos agentes agressivos. A propriedade do concreto endurecido mais conhecida e importante é a resistência à compressão, pois é de fácil mensuração e é relacionável a outras propriedades (LOPES, 2018). Tal propriedade pode ser determinada por ensaios simples, normalizados e realizados em condições específicas, de compressão axial em corpos de prova padronizados, possibilitando a comparação entre diferentes concretos. O corpo de prova deve ser cilíndrico e sua altura deve ser igual ao dobro do seu diâmetro; as laterais e a base do molde precisam ser de aço ou outro material não absorvente, para que possa ser capaz de manter a forma durante a moldagem (ABNT, 2016). Comumente, os ensaios para a resistência característica do concreto são executados na idade de 28 dias, quando não são especificados em projeto (ABNT, 2017).

Apesar de em certas situações práticas, a durabilidade e permeabilidade possam ser mais relevantes que a resistência, segundo (NEVILLE, 2016), essa última consegue proporcionar uma concepção integral da qualidade do concreto, uma vez que está de modo direto relacionada à estrutura da pasta de cimento hidratada. Além disso, a resistência é um componente fundamental para o projeto estrutural.

Mehta e Monteiro (2008), ressaltam a capacidade que a durabilidade de um concreto de cimento Portland tem de resistir as ações de intempéries. A taxa de deterioração está relacionada ao nível de permeabilidade do concreto, pois há a locomobilidade da água pelos poros existentes. Assim, quando há um aumento da impermeabilidade, os poros estarão diminuídos, ocasionando maior resistência e, conseqüentemente, maior durabilidade para o composto (LOPES, 2018).

A qualidade do concreto decorre do grau de hidratação e da relação a/c, sendo fundamental esses parâmetros para a condução das propriedades mecânicas, como: resistência à compressão, à tração, abrasão e outras (HELENE; ANDRADE, 2010). A relação a/c, segundo Silva R. (2006), influi na formação da microestrutura do concreto, criando uma dinâmica de disposição nos diâmetros dos poros, sendo essencial para determinar as características de densidade ou porosidade do material no estado endurecido.

2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O (CAD) pode ser compreendido como uma evolução do concreto convencional. Seu uso inicial se deu em Chicago, na década de 60, mais especificamente sob a forma de concreto de alta resistência (CAR) (SILVA G., 2006). É comum confundir o conceito desses dois tipos de concreto. O CAR é qualquer concreto que atinja resistência mecânica superior a 50 MPa (LIMA *et al.*, 2014). Contudo, diferente desse, o CAD apresenta um aprimoramento de todas as suas propriedades, focando no desempenho global do composto, e não somente na sua resistência mecânica (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Na década de 70, Alemanha e Japão começaram a utilizar superplastificantes com a finalidade de potencializar a fluidez do concreto produzido. O intuito disso era, inicialmente, de facilitar o lançamento do concreto, reduzindo o risco de segregação e perda da resistência visto ao se adicionar mais água na mistura. Na década seguinte, observou-se que o uso de dosagens de superplastificantes superiores às recomendadas permitiam reduzir a relação a/c a valores próximos de 0,30 (AÏTCIN, 2000). Com a seleção correta de cimento e aditivos, foi possível, então, atingir relações a/c de 0,23, obtendo concretos com resistência à compressão da ordem de 130 MPa (GODFREY, 1987 *apud* AÏTCIN, 2000).

Hoje, o CAD vem sendo cada vez mais utilizado no mundo. Contudo, seu uso ainda corresponde a apenas uma pequena fração de todo o concreto utilizado no mercado. Diversos países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá, França, Suíça e Japão, possuem importantes programas de pesquisa sobre esse tipo de concreto e hoje, sua fabricação e

utilização não são mais um desafio, visto que o conhecimento acerca desse material já se disseminou por todo o mundo, através de encontros científicos, cursos, artigos, jornais e revistas especializados na construção civil (CASTRO, 2007).

2.3.1 Definição do CAD

A definição de CAD varia muito conforme os autores, não existindo uma única, mas um conceito a ser seguido. Aïtcin (2008) define o CAD como um concreto cujas características específicas são obtidas através da seleção e proporcionamento correto de seus constituintes. Essa definição traz como vantagem a ideia de que não existe um único tipo de CAD, mas um grupo de concretos de alta tecnologia, possuindo cada um certas particularidades que os elencam a determinadas indicações de uso na construção civil.

O CAD, então, não se resume somente a maior resistência mecânica, mas um componente de melhoria global de todas as suas propriedades, sobretudo a impermeabilidade e a durabilidade, conforme Mehta e Monteiro (2008). Para a obtenção desses resultados, o uso não somente de superplastificantes, mas também de adições minerais, como sílica, cinza volante, metacaulinita e pó de calcário, é frequentemente utilizado para a confecção desse material. Quimicamente, esses aditivos, ao possuírem área específica elevada e granulometria mais fina que o cimento, produzem uma microestrutura mais densa e com menor proporção de vazios que o concreto convencional (SILVA G., 2006). Para isso, é necessário maior rigor quanto à qualidade dos componentes utilizados para a produção desse tipo de concreto.

2.3.2 Propriedades/princípios básicos do CAD

O princípio básico da superioridade do CAD frente ao concreto convencional se deve à diminuição da porosidade do composto, através da alteração na estrutura dos poros (distribuição, tamanhos e tipos). Para isso, é necessário a redução da relação água/aglomerante e da quantidade total de água por m^3 , a otimização da granulometria dos agregados, para aumentar a compacidade (com o uso de agregados graúdos de menor diâmetro máximo e melhor composição granulométrica dos agregados finos), e o reforço das ligações químicas entre as partículas da mistura (através das adições minerais, que levam ao refinamento dos poros e dos grãos, sobretudo o silicato de cálcio hidratado (CSH) (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O resultado é um concreto com poros de menor tamanho, com diminuição da interconexão e menor passagem de fluidos entre esses, além de melhor fixação dos agentes

dissolvidos, devido aumento das forças de superfície. Como consequência, o concreto torna-se mais denso, resistente e durável. Tal densidade é devido uso de partículas finas, podendo ser menores que os grãos do cimento utilizado, como a sílica ativa e o metacaulim, aumentando a superfície de contato e, conseqüentemente, a coesão da mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O CAD comumente apresenta retardamento do processo de pega, devido uso de superplastificantes. Com isso, o processo de endurecimento pode se prolongar por mais tempo. Contudo, à idade avançada, pode atingir valores de resistência mecânica superiores a 250 MPa, a depender das matérias-primas utilizadas. É importante lembrar que, se os agregados graúdos não forem mais resistentes que a pasta de cimento hidratado, não haverá incremento dos valores de resistência à compressão com a redução da relação a/c. Por isso, a boa qualidade dos constituintes do CAD é fundamental (SALVADOR FILHO, 2001).

O CAD pode ser dividido em diferentes classes, a depender de sua resistência à compressão, conforme Tabela 1. Para classificação, são utilizados corpos de prova 100 x 200 mm aos 28 dias, curados sob condições específicas de norma, e seus limites propostos de classe podem apresentar pequenas variações, a depender do local onde se avalia.

Tabela 1 - Diferentes classes do Concreto de Alto Desempenho

Classe do concreto	Resistência à compressão (MPa)
Classe I	50 – 75
Classe II	75 – 100
Classe III	100 – 125
Classe IV	125 – 150
Classe V	Maior que 150

Fonte: AITCIN, 2000.

Devido sua menor permeabilidade, o CAD apresenta maior resistência ao ataque de agentes externos, como cloretos e sulfatos, reduzindo a corrosão das armaduras. Também apresenta menor taxa de ataque de agentes gasosos, como o gás carbônico (CO₂), além de impedir que a água penetre no concreto, o que limita a mobilidade de íons e, conseqüentemente, o risco de reação álcali-agregado. Um dos fatores contribuintes a essa propriedade se dá pela menor continuidade dos poros remanescentes, que se tornam mais segmentados e obstruídos (ALMEIDA, 1997). Por fim, o CAD apresenta maior resistência à abrasão, fruto da boa aderência entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, impedindo o desgaste diferencial da superfície (NEVILLE, 2016). Dessa forma, o CAD apresenta-se como um material procurado

não somente por sua maior resistência mecânica, mas também por apresentar maior durabilidade.

2.3.3 Materiais constituintes

O CAD é constituído não somente pelos quatro materiais básicos do concreto convencional (cimento, água, areia e agregado graúdo), mas também por aditivos, como superplastificantes, sílica ativa, nanossílica, fillers, cinzas volantes etc (CHOPIN, De LARRARD & CAZACLIU, 2004 *apud* CASTRO, 2007). Lima e Silva (2017) e Salvador Filho (2001) frisam que as propriedades do CAD dependem fundamentalmente da qualidade dos agregados e das características do cimento utilizado.

Segundo Lopes (2018), os aditivos melhoram as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Essas adições costumam ser adicionadas propriamente como adição ou, em algumas situações, como substituição parcial ao cimento Portland. A quantidade adicionada deve ser baseada por experimentos ou dados da literatura, pois quantidades exageradamente baixas ou altas de aditivos podem causar efeitos indesejáveis no desempenho da mistura. Ademais, segundo Neville (2016), os aditivos, apesar de muitas vezes não serem baratos, trazem benefícios gerais interessantes, como redução do custo do trabalho necessário para o adensamento e do teor de cimento empregado na mistura.

2.3.3.1 Cimento

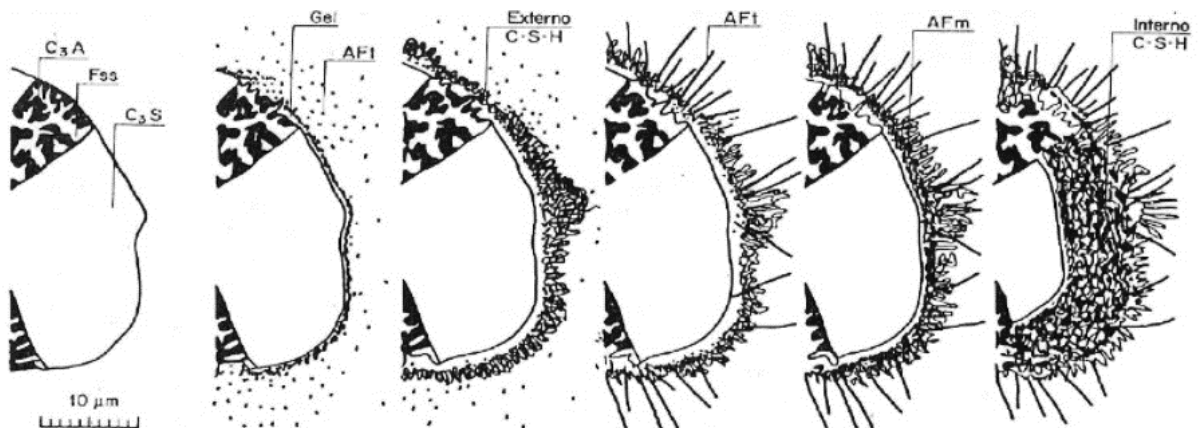
A correta escolha do cimento utilizado é de suma importância, pois influenciará na resistência da pasta e na aderência pasta-agregado (LIMA; SILVA, 2017). Nem todo cimento Portland apresenta as propriedades necessárias para atender as necessidades de um CAD. O uso de cimentos com maior teor de silicato tricálcico e/ou com adições de pozolana, cinza volante, filer, entre outros, são boas opções para a composição da mistura (SALVADOR FILHO, 2001). Além disso, é possível produzir cimentos específicos para um determinado uso, conforme a necessidade do projeto, visto que os cimentos tradicionalmente disponíveis no mercado podem ser insuficientes para determinados fins (CASTRO, 2007).

Além da necessidade de uma menor relação a/c, o tempo de cura do concreto deverá ser prolongado. Esse processo é necessário para hidratar o cimento da mistura e minimizar sua retração. Caso os poros estejam abertos durante o processo de cura, haverá evaporação da água livre e, conseqüentemente, redução ou mesmo interrupção da hidratação do cimento e demais

materiais, o que culminará em dessecações internas, com retrações e fissuração visível, comprometendo a resistência mecânica do produto. Assim, a correta cura do concreto é fundamental para que não haja perturbações na microestrutura do composto, cujo desenvolvimento pode ser observado na Figura 1 (CASTRO, 2007).

Para a seleção do cimento adequado ao CAD, Lima e Silva (2017) elenca características importantes a serem consideradas, que são: finura do componente, sua composição química e sua compatibilidade com aditivos, além de suas propriedades mecânicas. Quanto maior a finura, maior é a superfície de contato com a água e, conseqüentemente, maior será a velocidade de hidratação do cimento, o que contribui para maior resistência à compressão, sobretudo em idades iniciais. Porém, a maior finura do cimento exige maior porcentagem de aditivo redutor de água na mistura para obter uma mesma trabalhabilidade (AÏTCIN, 2000).

Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland



a) Seção de um grão polifásico (escala de fase intersticial exagerada).

b) 10 minutos C_3A inicia a sua reação com sulfato em solução. Forma-se um gel amorfo na superfície e bastões curtos iniciam a sua formação na interface gelsolução.

c) 10 horas Reação do C_3S com formação da camada externa de C-S-H (*outer shell*) sobre os bastões de AFt. Forma-se um vazio de $1,0 \mu m$ entre a superfície do grão e a camada externa.

d) 18 horas Hidratação secundária de C_3A produzindo bastões longos de AFt. O C-S-H interno (*inner shell*) começa a se formar internamente pela continuação da hidratação do C_3S .

e) 1 a 3 dias C_3A reage com AFt da camada interna formando placas hexagonais de AFm. A formação de produto interno reduz a separação entre o grão anidro e a camada externa.

f) 14 dias Formou-se C-S-H suficiente para preencher o espaço vazio ao redor do grão. A camada externa torna-se fibrosa.

Fonte: SCRIVENER, 1989.

É importante atentar-se à escolha de cimentos com maior grau de pureza, visto que, para o CAD, será adicionado uma quantidade grande de pozolanas, que caracteristicamente

apresentarão qualidade superior às incorporadas nos cimentos comerciais. Assim, a despeito do tamanho das partículas, os cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados para o uso, levando-se em conta sua pureza (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Devido à necessidade de utilização dos aditivos no CAD, problemas de compatibilidade cimento-aditivo são bem mais críticos comparados ao concreto convencional. Isso se deve ao fato de que é muito difícil, ou mesmo impossível, manter a trabalhabilidade da mistura nessas situações. Para averiguar essa compatibilidade, é necessário a realização de ensaios, como *mini-slump* ou cone de *Marsh*. Usualmente, o consumo de cimento no CAD varia entre 400 e 550 kg/m³, e valores acima de 530 kg/m³ podem reduzir a resistência mecânica, devido à perda de aderência entre pasta e agregado (resultado de fissuração por tensão de retração). A fim de contornar esse problema, utiliza-se materiais cimentícios suplementares como substituição parcial ao cimento, tais como sílica ativa, além de também poder utilizar superplastificantes, de modo a aumentar a eficiência do cimento na mistura (MENDES, 2002).

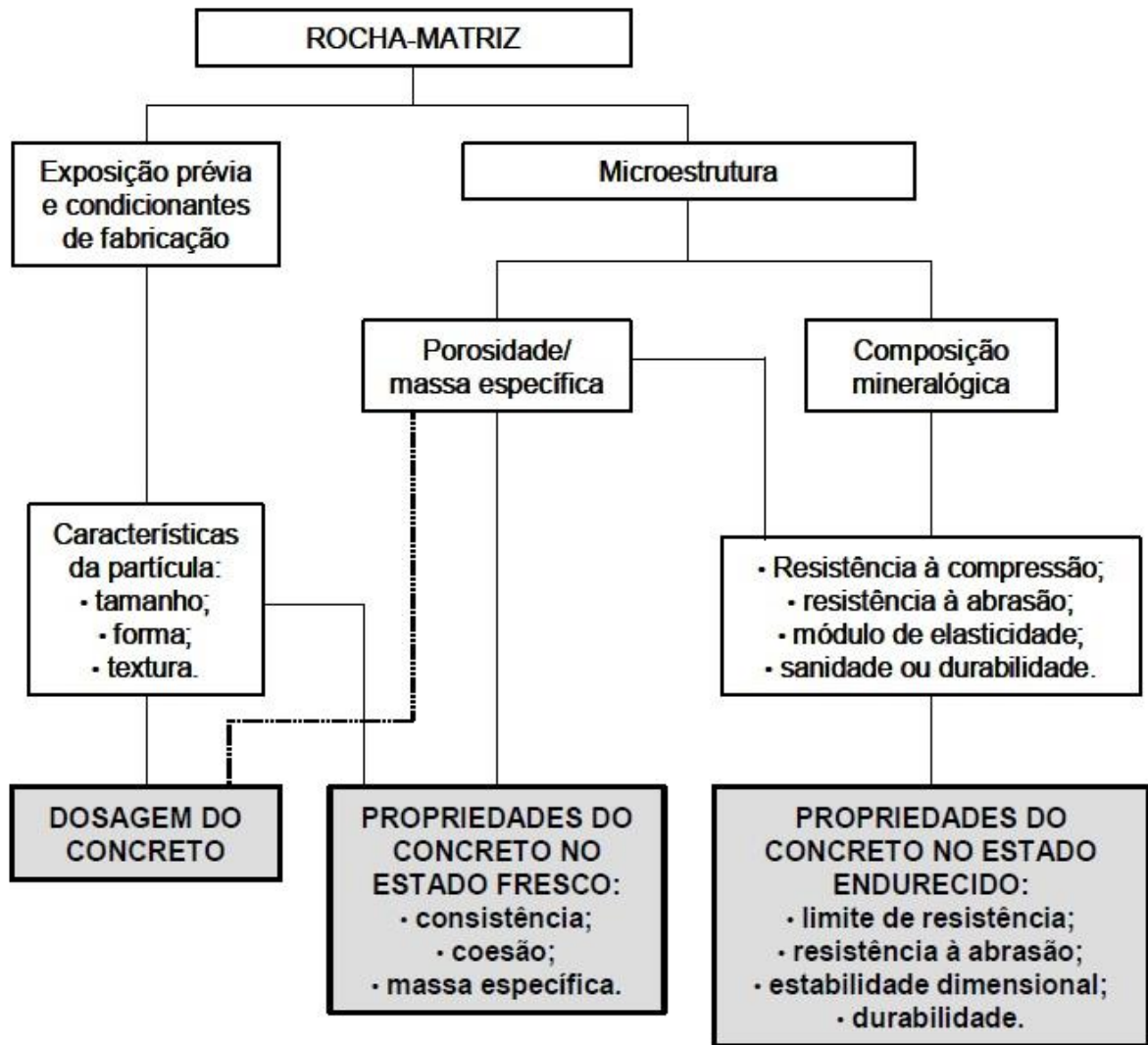
2.3.3.2 Agregados

Concretos convencionais sofrem pouca influência dos agregados em relação à resistência, contanto que esses sejam de boa qualidade. Já o CAD sofre interferência marcante a depender dos agregados utilizados (SILVA G., 2006). Enquanto no concreto convencional o agregado graúdo representa o elemento de maior resistência da mistura, no CAD, esse agregado pode ter resistência semelhante ou mesmo inferior ao da argamassa, tornando-o o componente mais frágil do composto (AÏTCIN 2000). Assim, Castro (2007) determina que a escolha adequada dos agregados é de fundamental importância, visto que no estado fresco, os agregados serão determinantes não só no custo, mas também na trabalhabilidade das misturas e, quando endurecido, influenciarão sobremaneira a resistência, a durabilidade e a estabilidade dimensional do concreto.

Silva G. (2006) elenca a massa específica, a textura, a granulometria e a resistência à abrasão como sendo as principais características a serem analisadas nos agregados, já que contribuem para a determinação da estabilidade dimensional, do módulo de elasticidade e da massa unitária do concreto. Cuidados na seleção dos agregados são importantes para evitar a ruptura precoce do CAD, e é especialmente importante que os agregados estejam limpos, pois isso aumenta a resistência da zona de transição pasta-agregado (SALVADOR FILHO, 2001). Mehta e Monteiro (1994) trazem um diagrama ilustrativo demonstrando a influência da

microestrutura e das condições prévias de exposição nas propriedades do concreto em estado fresco e endurecido, conforme Figura 2.

Figura 2 - Diagrama ilustrativo de como a microestrutura, as condições prévias de exposição e condicionantes do processo de fabricação do agregado determinam as suas características e como estas afetam o traço e as propriedades do concreto fresco e endurecido



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994; *apud* CASTRO, 2007.

Durante o processo de mistura, a granulometria, a textura e a forma dos agregados serão determinantes da compactação e do consumo de água para uma determinada trabalhabilidade. No decorrer do processo de hidratação, os agregados irão influenciar outras propriedades importantes, como permeabilidade, porosidade, resistência à tração, coeficiente de expansibilidade térmica, estrutura cristalina, dureza e composição química da mistura (CASTRO, 2007).

Castro (2007) ainda refere que, a despeito das recomendações de diversos autores sobre a preferência em se utilizar agregados com dimensões máximas de 12,5 mm, é possível obter CAD com resistência à compressão superiores a 100 MPa em corpos de prova utilizando-se agregados com dimensões de até 25 mm. Dessa forma, contando que o índice de forma esteja adequado, o diâmetro máximo dos agregados é discutível. Contudo, conforme aponta Neville (2016), desde que o concreto esteja corretamente adensado, com determinada relação *a/c* (ou água/aglomerante), a resistência do concreto será independente da granulometria utilizada para o agregado.

Os agregados não devem possuir alterações mineralógicas, visto que minerais parcialmente modificados enfraquecem o agregado, pois apresentam fissuras intra e intergranular, além de possuírem plano de laminação e clivagem. Além disso, a forma das partículas e a textura superficial do agregado determina a aderência desse com a matriz de cimento: quanto mais áspera a superfície do agregado, maior será o intertravamento mecânico entre o agregado e a matriz cimentícia. Partículas achatadas/alongadas apresentam maior tendência ao acúmulo de água (fenômeno de exsudação interna), deixando a zona de transição mais porosa e propensa à fissuração, e partículas angulosas exigem mais água de amassamento devido apresentarem maior área superficial para um mesmo volume, o que exige maior quantidade de água de molhagem (SILVA G., 2006).

Quanto ao agregado fino, sua seleção não interfere significativamente nas propriedades do CAD. Contudo, é interessante que o módulo de finura desse seja maior, pois reduz a quantidade de água necessária para a mistura (AÏTCIN, 2000).

2.3.3.3 Aditivos redutores de água

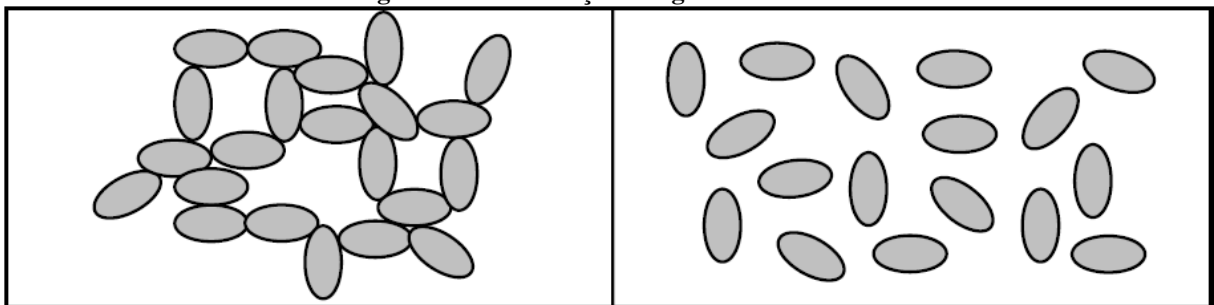
O uso dos aditivos redutores de água representa um dos maiores avanços da tecnologia do concreto, pois permite produzir concretos duráveis e resistentes. São polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos de maneira sintética, através de polimerização. Caracteristicamente, apresentam baixo teor de impurezas, não conferindo efeitos colaterais prejudiciais ao concreto, mesmo se utilizados em doses elevadas (SALVADOR FILHO, 2001).

Segundo a NBR 11768 (ABNT 2019), a primeira geração de superplastificantes, chamados tipo I, são capazes de reduzir a quantidade de água da mistura sem modificar a consistência do concreto, além de modificar a consistência do concreto sem alterar a quantidade de água, produzindo os dois efeitos simultaneamente. A segunda geração (tipo II), por sua vez, fornece maiores reduções de água no concreto, comparando com o redutor tipo I. Esses aditivos

mantêm adequada trabalhabilidade da mistura, sem comprometer a pega. O aditivo à base de policarboxilato se encaixa no tipo II, sendo conhecidos como aditivos redutores de água de alta eficiência, que aumentam a fluidez do concreto, além de reduzir a relação a/c (SILVA, 2006).

O aditivo redutor de água atua sobre as partículas de cimento. Naturalmente, o cimento Portland tende a flocular ao se misturar à água, devido forças eletrostáticas e de *Van de Walls* entre partículas. Como resultado, forma-se uma rede de canais entre as partículas, podendo aprisionar parte da água, que então fica indisponível para a hidratação da superfície das partículas, diminuindo sua fluidez (LEGRANDE; WIRQVIN, 1992). Quando adicionado à mistura, as moléculas de superplastificante enrolam-se em torno das partículas de cimento, carregando-as negativamente e promovendo sua defloculação, pela repulsão entre elas, aumentando sua trabalhabilidade, conforme a Figura 3 (SALVADOR FILHO, 2001).

Figura 3 - Defloculação dos grãos de cimento



Fonte: SILVA G., 2006.

2.3.3.4 Adições minerais

Adições minerais representam um grupo de materiais que, ao serem incorporados à mistura de concreto, conferem aumento de resistência mecânica ao mesmo. Enquanto algumas dessas adições apresentam propriedades cimentícias intrínsecas, outras apresentam-nas de forma latente ou não apresentam (por sua vez, aumentam a resistência mecânica devido seu comportamento físico). Geralmente, as adições minerais apresentam sílica reativa em sua composição (em maior ou menor grau), que reage com a cal na presença de água, formando CSH, o principal elemento do concreto em estado endurecido (SALVADOR FILHO, 2001).

São representantes desse grupo de adições substâncias como sílica ativa, pozolana, cinza volante, cinza de casca de arroz etc. Ao serem incorporadas à mistura, promovem a diminuição de sua porosidade, devido reações pozolânicas e efeito de microfíler, além de aumentar a resistência mecânica do concreto e reduzir sua permeabilidade (SALVADOR FILHO, 2001).

2.4 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um material pozolânico. Um material é considerado pozolânico quando o somatório de seus óxidos de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) representam pelo menos 50% de sua massa (ABNT, 2015a). Esses óxidos são os responsáveis pela conversão do hidróxido de cálcio em CSH. A reação pozolânica é uma reação ácido-base em que os óxidos (ácidos) da pozolana irão reagir com a cal (bases) presentes no hidróxido de cálcio. Para isso, os óxidos de sílica deverão estar em estado amorfo, ou seja, instáveis e, conseqüentemente, vulneráveis ao hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essa reação se desenvolve de maneira lenta, iniciando-se entre 7 a 15 dias após o início da hidratação do clínquer. Com isso, produz-se menor calor de hidratação na mistura e o concreto adquire resistência mecânica mais lentamente (MASSAZZA, 1998).

O dióxido de silício, também conhecido como sílica, é um composto formado a partir do oxigênio e do silício, dois elementos da tabela periódica. O silício é um semimetal da família “4A”, sólido e quebradiço, podendo ser encontrado na forma amorfa ou cristalina. É o segundo elemento mais abundante do planeta (compõe 27% da crosta terrestre), estando presente na natureza sob a forma de óxidos ou silicatos (MOREAS; LOPES, 2010).

A sílica ativa é um subproduto proveniente da fabricação de ferrosilício e silício metálico. Quando o quartzo é reduzido em silício, processo realizado a altas temperaturas, é gerado SiO (gás), que, após sair do forno, oxida-se, condensando-se em partículas muito finas de sílica amorfa (SiO_2). O uso da sílica ativa tornou-se mais popular na engenharia civil a partir da década de 70, quando leis ambientais estimularam a busca por um uso adequado aos subprodutos da fabricação de ferrosilício e silício metálico, prejudiciais ao meio ambiente (MOREAS; LOPES, 2010). A Tabela 2 apresenta a composição da sílica ativa, em porcentagens de peso das substâncias constituintes.

Suas partículas, esféricas e vítreas, geralmente possuem diâmetro menor que 1 micrômetro e superfície específica muito elevada (15 a 25 m^2/kg), com densidade aparente baixa, sendo mais finas que as partículas de cinza volante e de cimento. A sílica ativa apresenta alta reatividade pozolânica, aumentando a resistência e a durabilidade do concreto, quando utilizada como substituição parcial ao cimento (ANDRADE, 2017).

Tabela 2 - Composição da microssílica

Principais Componentes	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)
SiO ₂	87	96	93
Fe ₂ O ₃	0,04	0,26	0,09
Al ₂ O ₃	0,04	0,72	0,35
TiO ₂	0,001	0,025	0,007
MgO	0,1	0,9	0,65
Na ₂ O	0,1	1,8	0,94
MnO	0,01	0,07	0,03
CaO	0,1	0,5	0,3

Fonte: ALVES; CAMPOS; NETTO, 1994.

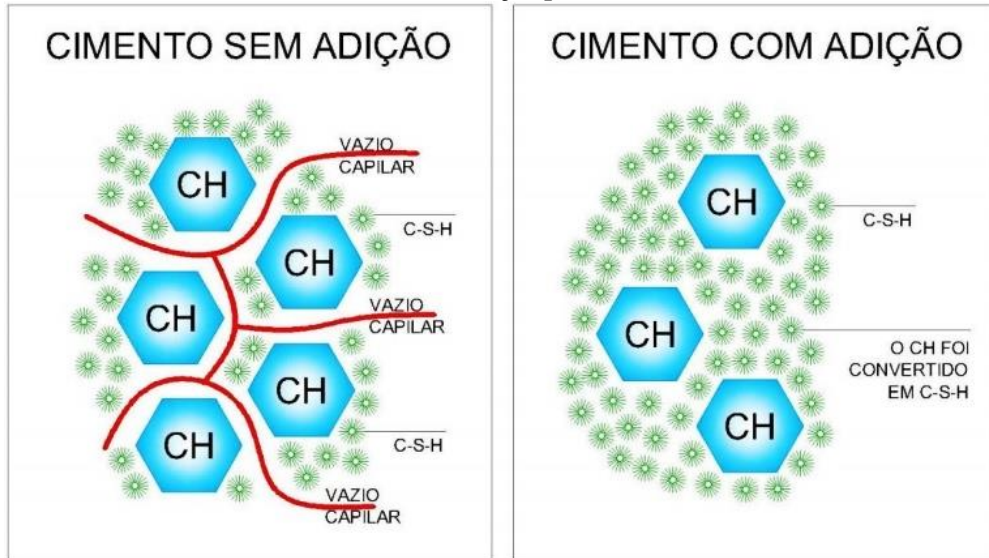
Ao ser utilizada como adição mineral, a sílica ativa age sobre a mistura de concreto através de reação pozolânica e efeito fíller. Na primeira, a sílica reagirá com o hidróxido de cálcio (Ca(OH₂)), produzindo quantidade adicional de CSH, um cristal bem mais resistente que o primeiro. Como consequência, aumenta-se as resistências tanto mecânica quanto ao ataque por agentes agressivos. Quanto ao efeito fíller, devido sua finura, a sílica ativa preenche os espaços vazios da mistura, acarretando menor índice de vazios no concreto (HERMANN *et al*, 2016). A Figura 4 representa a ação de substâncias pozolânicas na microestrutura do concreto, com preenchimento dos espaços capilares pelo efeito fíller.

A sílica ativa promove importantes modificações no comportamento reológico do concreto, aumentando a coesão e reduzindo a exsudação e a segregação. A redução da porosidade e do índice de vazios ocasiona maior impermeabilidade do concreto, reduzindo a penetração de agentes agressivos no material, aumentando a durabilidade (MOREAS; LOPES, 2010). De acordo com Alves, Campos e Netto (1994), é possível aumentar a impermeabilidade do concreto em pelo menos 100 vezes com a adição de 5% de sílica ativa à mistura.

A zona de transição consiste em uma camada fina situada entre a pasta de cimento hidratado e as partículas do agregado (e é o componente mais fraco e permeável do concreto estrutural) (MOREAS; LOPES, 2010). Sem a adição de materiais pozolânicos à mistura, essa zona pode acumular água livre rente ao agregado graúdo, havendo, conseqüentemente, o enfraquecimento dessa porção. Por isso, esse é o local em que geralmente ocorre a fratura do concreto (VASCONSELOS, 2013). Com a diminuição do hidróxido de cálcio nessa zona, observa-se maior aderência dos componentes da mistura, o que culmina em aumento de

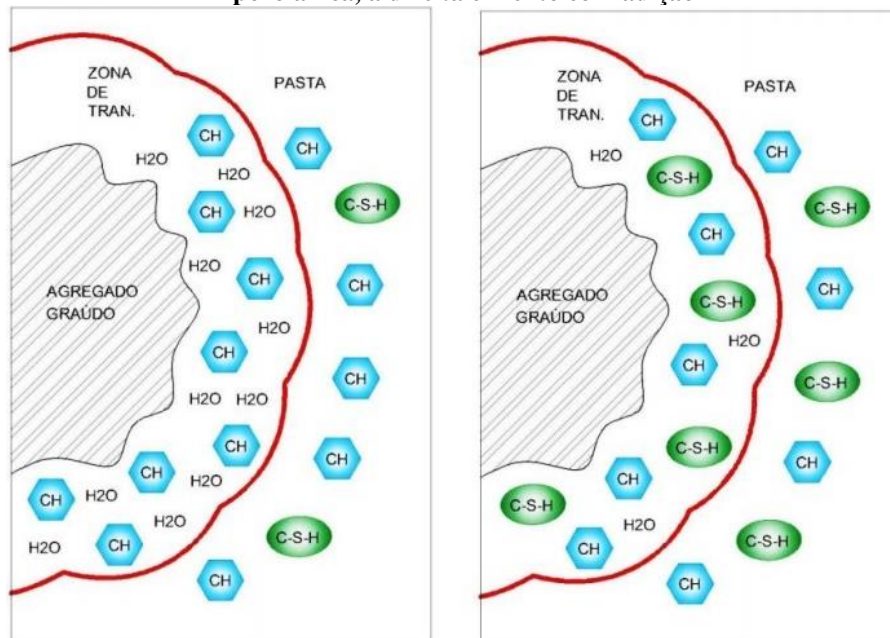
resistência e durabilidade (ANDRADE, 2017). A Figura 5 apresenta o efeito da adição de material pozzolânico na redução de água livre da zona de transição.

Figura 4 - Esquema gráfico que representa a microestrutura de uma pasta de cimento hidratada com e sem adição pozzolânica



Fonte: VASCONCELOS, 2013.

Figura 5 - Representação da zona de transição entre agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada. A esquerda cimento sem adição pozzolânica, a direita cimento com adição



Fonte: VASCONCELOS, 2013.

Em geral, o teor de sílica ativa adicionado às misturas de concreto varia entre 7 e 10%, considerados ótimos, segundo Malhotra e Mehta (1996). Por vezes a substituição da massa de cimento por sílica ativa pode alcançar até 15%. Contudo, esses valores ótimos de substituição

são conflitantes na literatura. Em geral, a adição de sílica ativa oferece um aumento de 10 a 40% na resistência à compressão do concreto (MOREAS; LOPES, 2010).

Conforme Dal Molin (2011), a sílica ativa exige maior adição de água para uma mesma trabalhabilidade devido sua superfície elevada, que tende a gerar aglomeração dos constituintes finos do concreto. Para isso, recomenda-se o uso de aditivos redutores de água, que podem reduzir em até 30% a necessidade de água para a mistura, melhorando a trabalhabilidade (MOREAS; LOPES, 2010).

2.5 NANOSSÍLICA

Nanotecnologia é, basicamente, a área de estudo das estruturas de diâmetro em escala atômica. Em geral, lidam com materiais de tamanho que variam entre 1 e 100 nanômetros. A título de comparação, enquanto um fio de cabelo apresenta diâmetro de 30.000 nanômetros, aproximadamente, um nanômetro abriga quatro átomos de silício lado a lado (GLEIZE, 2007).

Atualmente, a nanotecnologia pode ser encontrada em diversas especialidades de estudo, como física, química, medicina, ciência da computação, engenharia, eletrônica e biologia, e, apesar de muito promissora, esta apenas no início de seu desenvolvimento (CASTRO, 2009). Apesar do número cada vez maior de estudos científicos avaliando as nano partículas, o estudo desses componentes na construção civil ainda não é tão difundido.

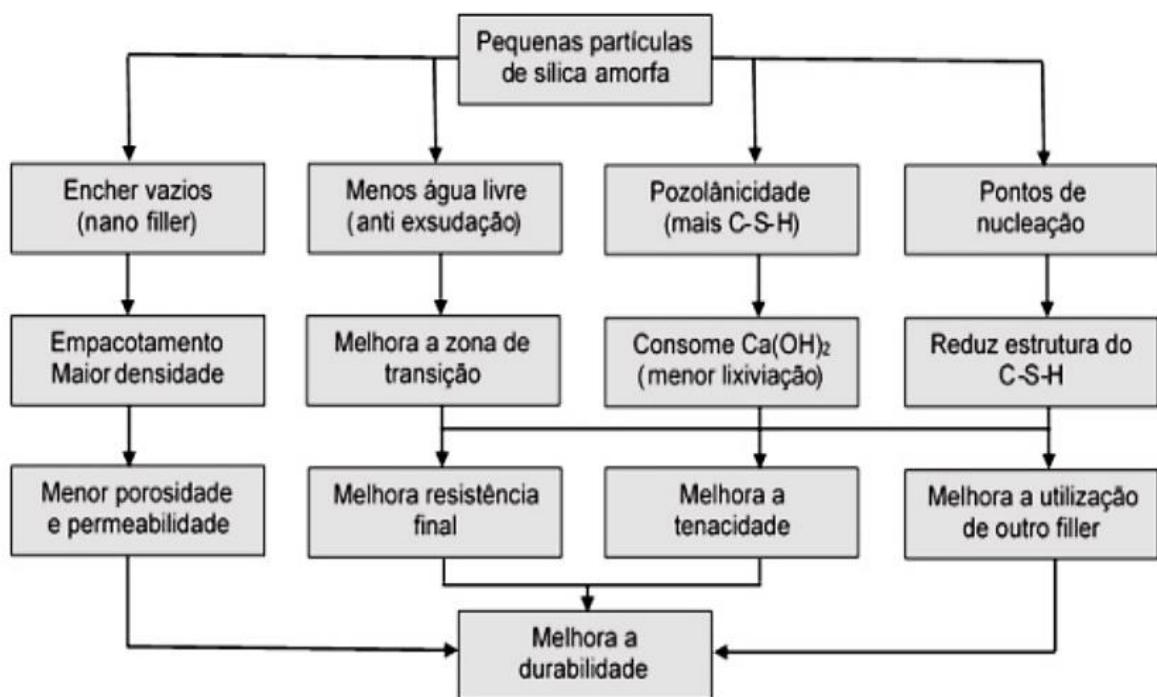
A nanossílica compreende um dos materiais nanotecnológicos e vem sendo cada vez mais estudado e incorporado à engenharia da construção civil. Constiste em nanopartículas de óxido de silício (SiO_2), podendo ter origem mineral, biogênica ou sintética (ANDRADE, 2017). Devido seu diâmetro diminuto (da ordem de 10^{-9} metros), apresenta elevada área de superfície de contato, tornando o composto mais reativo que a sílica ativa, por exemplo, que tem partículas de tamanho maior (JO *et al*, 2007). É obtida, basicamente, por dois mecanismos distintos: *topdown*, que consiste em dividir uma partícula maior até o menor tamanho possível, e *bottom-up*, que irá realizar a junção de átomos até obter-se a partícula de tamanho desejado (GLEIZE, 2007).

Devido à tendência natural de nanopartículas aglomerarem-se, a dispersão desse aditivo na mistura de concreto é uma tarefa complexa (SEEKKUARACHCHIA; TANAKA; KUMAZAWA, 2008). Khaloo *et al* (2016) relata que substituições de cimento por nanossílica maiores que 5% podem resultar em prejuízo das propriedades mecânicas e da durabilidade, pela alta probabilidade de aglomeração dos nanocomponentes na mistura, prejudicando a dispersão dessas nas matrizes à base de cimento. O mesmo efeito foi encontrado por Quercia *et al* (2011).

Para isso, utiliza-se a nanossílica dispersa em substância coloidal, a chamada nanossílica coloidal, que apresenta uma dispersão mais eficiente quando adicionada à mistura de concreto (BERGNA; ROBERTS 2006).

As nanopartículas de sílica, ao fornecerem grandes superfícies reativas, funcionam como pontos de nucleação, permitindo maior número de reações de hidratação (ANDRADE, 2017). Com a reação da nanossílica com o hidróxido de cálcio, produz-se CSH (silicato de cálcio hidratado) adicional, que é caracteristicamente diferente do CSH originado do cimento. O CSH advindo da nanossílica possui menor densidade de defeitos nos cristais, potencializando suas propriedades mecânicas (TECNOSIL, 2013). Além disso, Heikal *et al* (2015) observaram que o uso de aditivos redutores de água melhoram a dispersão de nanossílica na mistura, ocasionando melhor hidratação e maior compactação do concreto. A Figura 6 apresenta um esquema detalhando os efeitos da nanossílica no concreto e suas consequências para o material.

Figura 6 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas



Fonte: BIANCHI, 2014.

Nos estudos de Ibrahim *et al* (2014), observou-se que a adição de nanossílica ao concreto aumentou a resistência à compressão e à flexão de modo significativo, tanto sob temperatura ambiente quanto em exposições a temperaturas elevadas (400°C, durante duas horas), mimetizando situações de incêndio. Além disso, Bolhassani e Samani (2015) observaram que a resistência à compressão apresentou valor máximo quando a nanossílica

atingia área superficial específica de 90 m²/g. Valores de área maiores que esse, contudo, apresentaram diminuição dessa resistência.

Belkowitz *et al* (2015) observaram que nanossílica com partículas menores apresentou maior resistência à compressão quando comparada à nanossílica contendo partículas maiores (20% versus 14%). Contudo, a resistividade elétrica do concreto composto por partículas maiores de nanossílica foi muito superior ao que continha partículas menores (700% versus 30%, respectivamente).

Moraes e Lopes (2010) comentam que a aceleração do processo de hidratação do cimento promovido pela nanossílica representa um dos princípios mais importantes que justificam as melhorias encontradas nas propriedades de concretos contendo esse produto. A melhoria na microestrutura do concreto contendo nanossílica aprimora a tenacidade e as resistências ao cisalhamento, à tração e à flexão.

Um número cada vez maior de estudos avaliou a influência da nanossílica ao concreto, tanto convencional quanto de alto desempenho, com resultados variáveis. Gesoglu *et al.* (2016) observaram que adições de 5% de nanossílica apresenta benefícios sobre a resistência mecânica dos materiais cimentícios. Isso também foi observado por Singh *et al* (2015), principalmente em idades iniciais. Quercia e Browsers (2010) alertam, contudo, que a adição de nanossílica não deve exceder 5 a 10% de substituição ao cimento. Para Dinten (2000), esse valor deve situar-se entre 2 e 5%.

Nolli Filho (2015) e Zanon, Schmalz e Ferreira (2018) observaram que o uso concomitante de sílica ativa e nanossílica na mistura de concreto foi capaz de produzir concretos com resistência à compressão maior que o traço referência (livre de adições) e o traço com uso apenas de nanossílica. Nili *et al* (2010) também evidenciaram que o uso simultâneo de sílica ativa e nanossílica aumentou a resistência à compressão, a resistência elétrica e diminuiu sobremaneira a absorção capilar do concreto.

Apesar dos valores conflitantes de substituição de nanossílica, mesmo pequenas quantidades desse material são capazes de substituir uma parcela significativa do cimento da mistura, que representa o elemento mais caro do concreto, além de também ser o mais prejudicial ao meio ambiente. Dessa forma, o uso da nanossílica na construção civil, além de produzir concretos mais resistentes e duráveis, apresenta benefícios financeiros e ambientais importantes. Contudo, o uso desse elemento na construção civil ainda encontra-se limitado ao CAD, aos concretos autoadensáveis e aos “eco-concretos”, que apresentam baixos teores de cimento.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme apresentado, a utilização de nanossílica e sílica ativa em substituição parcial ao cimento para a elaboração de concretos são boas opções para uso no âmbito da construção civil moderna, visando um concreto mais resistente e duradouro. Porém, o tema ainda carece de estudos suficientes para definir o melhor uso dessas substâncias no concreto. Portanto, a fim de contribuir para o debate desse tema, este capítulo tem como objetivo expor a metodologia utilizada na execução do programa experimental de substituição parcial do cimento por sílica ativa e nanossílica ao concreto, apresentando os materiais utilizados na elaboração desse, além de suas propriedades no estado fresco e endurecido por meio de ensaios laboratoriais. Sendo assim, será realizado um comparativo das adições minerais e seus efeitos na produção de concretos.

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido no Centro Tecnológico do Centro Universitário – UniEvangélica, localizado em Anápolis – GO, onde foram disponibilizados os equipamentos necessários para a caracterização e execução.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esse item objetiva a caracterização dos materiais utilizados no programa experimental. Algumas características foram determinadas com ensaios laboratoriais e outras fornecidas pelos fabricantes e fornecedores. Os resultados da caracterização são de fundamental importância para o bom entendimento e realização da dosagem do concreto.

3.1.1 Cimento Portland

Para fins de elaboração dos traços do concreto, é essencial definir qual tipo de cimento será utilizado, devendo-se antes conhecer suas características. Nesse experimento, o cimento utilizado foi o CP II-Z-32, seguindo os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). O CP II-Z-32 é um Cimento Portland composto com material pozolânico, obtido por meio da moagem de clínquer Portland. Ademais, esse é determinado por siglas que são correspondentes a adições, propriedades e classes de resistência conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de composição do cimento Portland

Siglas	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático (%)
CP II-Z	32	71 - 94	0	6 – 14	0 - 15

Fonte: NBR 16697, adaptado (ABNT, 2018).

O cimento Portland deve seguir os requisitos químicos constados na Tabela 4 para poder ser utilizado na produção de concretos.

Tabela 4 - Requisitos químicos do cimento Portland

Determinações químicas	Limites (% da massa)
	CP II-Z
Resíduo insolúvel (RI)	$\leq 18,5$
Perda ao fogo (PF)	$\leq 8,5$
Óxido de magnésio (MgO)	-
Trióxido de enxofre (SO ₃)	$\leq 4,5$
Anidrido carbônico (CO ₂)	$\leq 7,5$

Fonte: NBR 16697, adaptado (ABNT, 2018).

Da mesma forma, o cimento Portland deve seguir, também, os requisitos físicos e mecânicos constados na Tabela 5.

Tabela 5 – Requisitos físicos e mecânicos

(continua)

Características e propriedades do cimento CP II-Z 32		Unidade	Valores mínimos ou máximos
Finura	Resíduo na peneira 75 μ m	%	$\leq 12,0$
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5

Tabela 5 - Requisitos físicos e mecânicos

(Conclusão)

Características e propriedades do cimento CP II-Z 32		Unidade	Valores mínimos ou máximos
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	$\geq 10,0$
	7 dias de idade	MPa	$\geq 20,0$
	28 dias de idade	MPa	$\geq 32,0$

Fonte: NBR 16697, adaptado (ABNT, 2018).

3.1.2 Agregado graúdo

Para a produção dos concretos, o agregado graúdo utilizado foi a brita 0, com dimensão máxima característica de 12,5 mm. O agregado foi caracterizado conforme as normas técnicas vigentes. Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado utilizado contendo suas principais características está exposto na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da caracterização do agregado graúdo

Dimensão máxima característica (NBR 7211, 2009)	12,5 mm
Massa específica (NBR NM 53/ABNT, 2009)	2663 kg/m ³
Massa unitária (NBR NM 45/ABNT, 2006)	1560 kg/m ³

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos para o presente experimento foi areia lavada do tipo média. Os resultados de caracterização do material estão ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7– Resultados da caracterização do agregado miúdo

Módulo de Finura (NBR NM 248, 2003)	2,80
Massa específica (NBR NM 52/ABNT, 2002)	2472 kg/m ³

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

3.1.4 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada para a produção dos concretos é um material comercialmente disponível em pó, de cor cinza e com partículas de diâmetro médio entre 0,1 e 0,4 μm , muito menor que o diâmetro médio de um grão de cimento. A adição da sílica ativa foi feita em substituição parcial ao cimento. As caracterizações da sílica são mostradas da Tabela 8.

Tabela 8 – Características da sílica ativa

Análise	Unidade	Especificação
Diâmetro médio de Partícula	μm	0,1 a 0,4
Estado físico	-	Sólido
Cor	-	Cinza
Odor	-	Sem odor
pH	pH	<10
Densidade	kg/m ³	150 - 700

Fonte: DOW CORNING, 2016; adaptado (PRÓPRIA AUTORA, 2021).

3.1.5 Nanossílica

A nanossílica utilizada consiste em um produto que apresenta-se em solução aquosa de sílica coloidal cujo produto ativo (nanossílica) representa 30% da massa dessa solução. A substância é um líquido translúcido com viscosidade maior que a da água e suas partículas têm diâmetro de 11,350 nm. A Tabela 9 apresenta as características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 9 – Características da nanossílica conforme fabricante

Análise	Unidade	Especificação	Resultado
Diâmetro de Partícula	nan.	8,000 a 16,000	11,350
pH	pH	9,800 a 10,400	9,980
Peso Específico	g/cm ³	1,202 a 1,220	1,210
Óxido de Silício – SiO ₂	%	29,200 a 31,300	30,190
Viscosidade	cP	MÁXIMO 15,000	7,750
Álcalis Total (Na ₂ O)	%	MÁXIMO 0,500	0,367
Teor de Sódio (Na)	ppm	MÁXIMO 5.000	2716,000

Fonte: UNAPROSIL, 2020.

3.1.6 Aditivo redutor de água

Para o experimento foi utilizado o aditivo redutor de água ADVA 585, com base de policarboxilatos, apresentando capacidade elevada de redução de água. O material é um líquido alaranjado que possui uma massa específica de 1,055 a 1,105 g/cm³. O aditivo acata as especificações da NBR 11768 (ABNT, 2019).

3.1.7 Água de adensamento

Para a produção dos concretos foi utilizado água potável proveniente do abastecimento local, fornecida pela rede de tratamento de água da cidade de Anápolis – GO.

3.2 DESENVOLVIMENTO DOS TRAÇOS

3.2.1 Determinação da relação a/c

Para a dosagem do concreto, foi adotado o método ABCP. Determinou-se a resistência da dosagem do concreto em função do desvio padrão aos 28 dias pela Equação 1.

$$F_{C28} = F_{ck} + 1,65 \times sd \quad (1)$$

Onde:

F_{ck} = resistência característica do concreto aos 28 dias (MPa)

sd = desvio padrão da dosagem (MPa)

Para a realização do cálculo foram necessárias algumas informações, como:

Resistência normal do cimento aos 28 dias = 32 MPa

Resistência requerida do concreto aos 28 dias = 25 MPa

Desvio padrão = 4 MPa (condição "A", segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015))

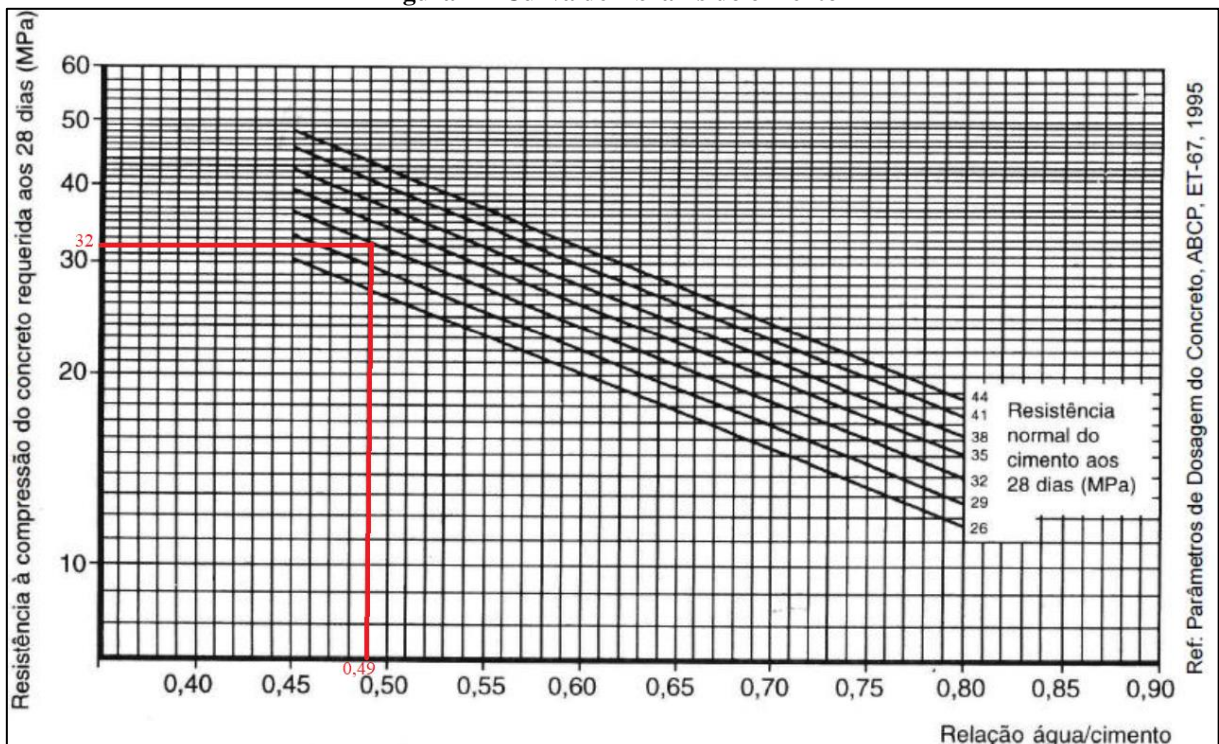
Portanto:

$$F_{C28} = 25 + 1,65 \times 4$$

$$F_{C28} = 31,6 \text{ MPa}$$

Com o valor de F_{C28} já estabelecido, foi realizado uma análise no gráfico das curvas de Abrams (Figura 7) para ser retirado o valor do fator a/c .

Figura 7 – Curva de Abrams do cimento



Fonte: RODRIGUES, 1998; adaptado (PRÓPRIA AUTORA, 2021).

Logo, conforme analisado na Figura 7, o valor da relação a/c a ser utilizado foi de 0,49.

3.2.2 Determinação do consumo de materiais

3.2.2.1 Determinação do consumo de água (C_{ag})

Para a determinação do consumo de água, primeiramente determina-se a brita e o abatimento. Logo, para este experimento, escolheu-se a brita 0 de diâmetro máximo de 12,5 mm e abatimento de 80 a 100 mm. Posteriormente à obtenção desses dados, analisou-se a Tabela 10 e observou-se que não há valores para diâmetro de 12,5 mm. Sendo assim, calculou-se o consumo de água por meio de interpolação conforme a Equação 2, permitindo, assim, alcançar o resultado.

Tabela 10 – Consumo de água aproximado					
Consumo de água aproximado (L/m³)					
Abatimento (mm)	D_{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: RODRIGUES, 1998.

$$\begin{aligned} &9,5 - 230 \\ &12,5 - C_{ag} \\ &19 - 205 \end{aligned} \tag{2}$$

O resultado do consumo de água obtido foi de $C_{ag} = 222$ L.

3.2.2.2 Determinação do consumo de cimento (C_C)

O consumo de cimento é a relação entre o consumo de água e a relação a/c, de acordo com a Equação 3.

$$C_C = \frac{C_{ag}}{a/c} \quad (3)$$

$$C_C = \frac{222}{0,49}$$

$$C_C = 453 \text{ kg/m}^3$$

Portanto, o consumo de cimento é de $C_C = 453 \text{ kg/m}^3$.

3.2.2.3 Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b)

Por meio da Tabela 11, foi feita a determinação do consumo de agregado graúdo (C_b), na qual apresenta os volumes compactados de agregado graúdo em m^3 , em que a determinação é feita em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo.

Tabela 11 – Teor de agregado graúdo (m^3)

Módulo de finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: RODRIGUES, 1998.

O valor do módulo de finura obtido na Tabela 7 foi de 2,8 e a dimensão máxima do agregado graúdo foi de 12,5 mm. Analisando a Tabela 11, notou-se que para esse módulo de finura, não há valor correspondente ao agregado graúdo de dimensão máxima 12,5 mm. Dessa

forma para se obter o volume de agregado graúdo (V_b) a ser utilizado, realizou-se cálculo por meio de interpolação pela Equação 4.

$$\frac{9,5 - 0,545}{12,5 - V_b} = \frac{19 - 0,670}{19 - 0,670} \quad (4)$$

O resultado obtido do cálculo foi de $V_b = 0,584$.

Com a obtenção do valor de V_b , realizou-se o cálculo seguinte com a Equação 5 para a obtenção do consumo de agregado graúdo (C_b).

$$C_b = V_b \times MU \quad (5)$$

Onde:

V_b = volume do agregado graúdo seco por m^3 de concreto;

MU = massa unitária compactada do agregado graúdo.

$$C_b = 0,584 \times 1560$$

$$C_b = 911 \text{ kg/m}^3$$

Sendo assim, o resultado do consumo de agregado graúdo foi de $C_b = 911 \text{ kg/m}^3$.

3.2.2.4 Determinação do consumo de agregado miúdo

Para a realização do cálculo do consumo de agregado miúdo, primeiro foi feito o cálculo do volume da areia (V_a), através da Equação 6.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_{ag}}{\gamma_a} \right) \quad (6)$$

Onde:

C_c = consumo de cimento;

C_b = consumo de brita;

C_a = consumo de água;

γ_c = massa específica do cimento;

γ_b = massa específica da brita;

γ_a = massa específica da água.

Portanto:

$$V_m = 1 - \left(\frac{453}{3100} + \frac{911}{2663} + \frac{222}{1000} \right) \quad (6)$$

$$V_m = 0,29 \text{ m}^3$$

Obtido o valor do volume de areia, foi feito o cálculo para o consumo de agregado miúdo (C_m), pela Equação 7.

$$C_m = \gamma_m \times V_m \quad (7)$$

Onde:

γ_m = massa específica da areia;

V_m = volume de areia.

$$C_m = 2472 \times 0,29$$

$$C_m = 716,88 \text{ kg/m}^3$$

Logo, o resultado do consumo de agregado miúdo foi de $C_m = 716,88 \text{ kg/m}^3$.

3.2.3 Apresentação do traço unitário

A apresentação do traço unitário é dada a partir da Equação 8.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (8)$$

Onde:

C_c = consumo do cimento;

C_m = consumo do agregado miúdo;

C_b = consumo do agregado graúdo;

C_a = consumo da água.

Logo:

$$\frac{453}{453} : \frac{716,88}{453} : \frac{911}{453} : \frac{222}{453} \quad (8)$$

$$1 : 1,58 : 2 : 0,49$$

Portanto, o traço unitário do concreto referência, em massa, encontra-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Traço unitário do concreto referência

Traço unitário (kg)			
Cimento	Areia	Brita	Água
1	1,58	2	0,49

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

3.2.4 Desenvolvimento dos traços

O trabalho busca uma análise comparativa entre concretos contendo nanossílica e sílica ativa, com duas porcentagens diferentes de substituição parcial ao cimento (1,5 e 2,5%), juntamente com aditivo redutor de água a base de policarboxilatos. A princípio, definiu-se o traço referência para o concreto convencional, sem adição mineral e sem aditivo redutor de água.

Para a sílica ativa, foram dosados dois traços de concreto: um contendo 1,5% e outro contendo 2,5% dessa substância em substituição ao cimento. Durante a produção, tomou-se um cuidado maior com a homogeneidade da mistura, essencial para o correto funcionamento da sílica ativa. Sabe-se que essa substância possui uma maior área de superfície, o que aumenta a necessidade de água para hidratação. Dessa forma, para o experimento foi utilizado um aditivo redutor de água, uma vez que o aumento de água não seria factível, visto que o objetivo é ter uma relação a/c menor. Desse modo, a quantidade de aditivo redutor de água para os concretos com adição de sílica ativa foi fixada em 0,3% sobre a massa do cimento.

As Tabela 13 e 14 constituem os resultados das dosagens experimentais dos traços contendo sílica ativa.

Tabela 13 – Dosagem experimental do traço contendo 1,5% de sílica ativa em substituição ao cimento
Traço unitário (kg)

Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica ativa	Aditivo redutor de água
0,985	1,58	2	0,42	0,015	0,003

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Tabela 14 – Dosagem experimental do traço contendo 2,5% de sílica ativa em substituição ao cimento
Traço unitário (kg)

Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica ativa	Aditivo redutor de água
0,975	1,58	2	0,43	0,025	0,003

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Para os concretos com a adição de nanossílica, seguiu-se a mesma porcentagem de substituição ao cimento utilizada no traço contendo sílica ativa, ou seja, 1,5% e 2,5%. Essas porcentagens foram escolhidas pelo fato de não serem valores geralmente testados em demais trabalhos sobre o tema. Além disso, a ideia de utilizar os mesmos valores de substituição para as duas adições minerais permite comparar mais fielmente os resultados entre essas duas substâncias.

Ademais, sabe-se que a nanossílica possui uma área de superfície maior do que a da sílica ativa. Dessa forma, novamente adicionou-se aditivo redutor de água à mistura. A quantidade de aditivo aplicado também foi de 0,3% em relação à massa de cimento. As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados das dosagens experimentais dos traços contendo nanossílica.

Tabela 15 - Dosagem experimental do traço contendo 1,5% de nanossílica em substituição ao cimento
Traço unitário (kg)

Cimento	Areia	Brita	Água	Nanossílica	Aditivo redutor de água
0,985	1,58	2	0,42	0,015	0,003

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Tabela 16 – Dosagem experimental do traço contendo 2,5% de nanossílica em substituição ao cimento
Traço unitário (kg)

Cimento	Areia	Brita	Água	Nanossílica	Aditivo reduto de água
0,975	1,58	2	0,43	0,025	0,003

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Para cada traço, foram produzidos corpos de prova conforme as exigências da NBR 5738 (ABNT, 2016). Esses corpos foram produzidos em moldes cilíndricos (10 x 20 cm) e adensados em duas camadas com a haste de adensamento. Posteriormente, os corpos de provas foram devidamente identificados com etiquetas para a diferenciação dos concretos executados. Para cada um dos cinco traços feitos foram moldados 11 corpos de prova, tratando-se de 9 para determinação da resistência a compressão (3 para cada idade – 7, 14 e 28 dias) e 2 para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Após a modelagem dos corpos de prova, foram posicionados sobre superfície horizontal até serem desmoldados, com 24 horas. Depois, foram transportados para a câmara úmida para realizar-se a cura do concreto até as idades de ensaio. As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, os corpos de prova moldados e os mesmos já na câmara úmida, desmoldados.

Figura 8 – Corpos de prova moldados



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 9 – Corpos de prova na câmara úmida



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

3.3.1 Trabalhabilidade

A consistência dos concretos foi analisada considerando os resultados do ensaio do abatimento do tronco de cone, que consiste em adicionar o concreto em um molde de formato de cone oco umedecido (juntamente com a placa base). O molde foi preenchido com 3 camadas de concreto, que foram compactadas para preencher um terço da altura do molde, cada. Para isso, realizou-se 25 golpes com a haste de socamento em cada camada. A superfície do concreto foi então rasada com uma desempenadeira e, em seguida, o molde foi retirado. O procedimento de retirada do molde foi realizado entre 5 e 10 segundos. Posteriormente, foi medido o abatimento, que consiste na diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova. Esse procedimento seguiu a norma NBR 16889 (ABNT, 2020). A Figura 10 apresenta esquematicamente a medida do concreto submetido ao ensaio de abatimento de tronco de cone.

3.3.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Nesse ensaio, os corpos de prova foram moldados seguindo a norma NBR 7215 (ABNT 2019). Os corpos de prova devem estar íntegros e isentos de qualquer impureza. Para a realização desse ensaio, seguiu-se os procedimentos apresentados na NBR 9778 (ABNT, 2009), que determina que devem ser produzidos pelo menos 2 corpos de prova para cada traço. Para esse ensaio, realizou-se os seguintes passos:

- Realizou-se a secagem do corpo de prova e estabeleceu-se sua massa em condição seca;
- Em seguida, colocou-se o corpo de prova na estufa com temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 72 h. Depois, registrou-se sua massa (m_s);
- Procedeu-se à imersão do corpo de prova em água à temperatura de (23 ± 2) °C, durante um período de 72 h;
- Após finalizada a etapa de saturação do corpo de prova, colocou-se a amostra em um recipiente cheio de água, que foi então levado progressivamente a ebulição. A ebulição foi mantida por 5 h, mantendo-se um volume aproximadamente constante;
- Após essa etapa, deixou-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de (23 ± 2) °C;
- Após, foi feito o registro da massa da amostra (m_i) com balança hidrostática;
- Posteriormente, a amostra foi retirada e enxugada com pano úmido;
- Por fim, realizou-se o registro de sua massa (m_{sat}) e, em seguida, os cálculos com as seguintes equações:

O cálculo da absorção de água é obtido através da Equação 9:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

m_{sat} = massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura;

m_s = massa do corpo de prova seca em estufa.

O cálculo de índice de vazios é obtido através da Equação 10:

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

m_{sat} = massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura;

m_s = massa do corpo de prova seca em estufa;

m_i = massa do corpo de prova saturado imerso em água após fervura.

O cálculo da massa específica seca é obtido através da Equação 11:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (11)$$

Onde:

m_{sat} = massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura;

m_s = massa do corpo de prova seca em estufa;

m_i = massa do corpo de prova saturado imerso em água após fervura.

O cálculo da massa específica saturada é obtido através da Equação 12:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (12)$$

Onde:

m_{sat} = massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura;

m_i = massa do corpo de prova saturado imerso em água após fervura.

O cálculo da massa específica real é obtido através da Equação 13:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (13)$$

Onde:

m_s = massa do corpo de prova seca em estufa;

m_i = massa do corpo de prova saturado imerso em água após fervura.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1.1 Resultados da Trabalhabilidade

Como mostrado anteriormente no item 3.3.1, foi demonstrado como foi feito o ensaio da trabalhabilidade, seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do abatimento dos concretos

Amostra	Abatimento (mm)
Referência	80
Sílica ativa 1,5 %	80
Sílica ativa 2,5 %	78
Nanossílica 1,5 %	22
Nanossílica 2,5%	25

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Abaixo estão os registros fotográficos dos resultados do ensaio de abatimento (Figura 11 a 15).

Figura 11- Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto referência



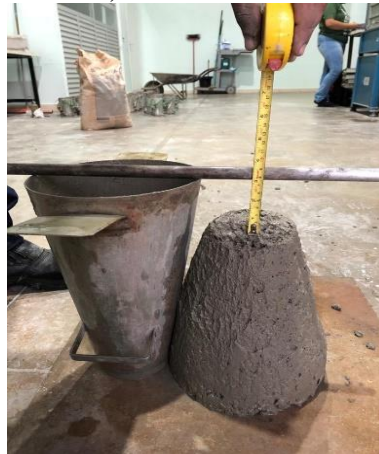
Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 12 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 1,5% de sílica ativa



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 13 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 2,5% de sílica ativa



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 14 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 1,5% de nanossílica



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 15 - Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto com 2,5% de nanossílica



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Portanto, por meio dos resultados obtidos que foram apresentados na Tabela 18, foi possível analisar e constatar que:

- O concreto referência atingiu o valor esperado de abatimento de tronco de cone (80mm);
- Os traços contendo sílica ativa obtiveram valores de abatimento de tronco de cone próximos ao do concreto referência;
- Os traços contendo nanossílica obtiveram valores de abatimento de tronco de cone abaixo do esperado. Dentre os motivos para esse resultado, pode-se citar o fato de a nanossílica utilizada não estar dispersa em aditivo redutor de água, como em outros estudos, o que exigiu a adição de um aditivo externo, podendo a dosagem desse aditivo não ter sido a ideal. Além disso, o concreto contendo nanossílica apresentou maior tempo de mistura, o que pode colaborar para a diminuição do abatimento de tronco de cone. Outro fator que pode ter influenciado o valor do abatimento é a redução da relação água/cimento desse traço.

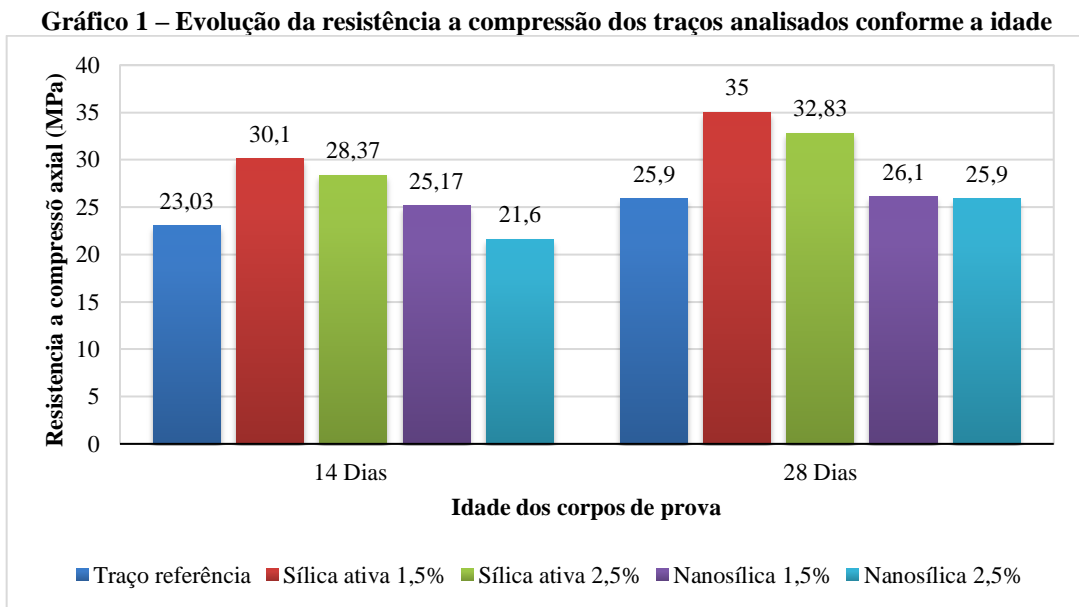
4.1.2 Resultados da resistência a compressão axial

Devido intercorrências ocasionadas pela pandemia de Coronavírus na cidade de Anápolis – GO, local onde foi realizado o estudo desse trabalho, não foi possível analisar os resultados de resistência a compressão axial dos concretos testados aos 7 dias de vida. Os resultados do ensaio de resistência a compressão axial foram realizados conforme o item 3.3.2

e estão expostos na Tabela 19 e no Gráfico 1. Para esses resultados, calculou-se a média aritmética de resistência dos corpos de prova (três para cada idade).

Tabela 19 - Resultados obtidos da resistência dos concretos (MPa)		
Amostra	14 dias	28 dias
Referência	23,03	25,90
Sílica ativa 1,5 %	30,10	35,00
Sílica ativa 2,5 %	28,37	32,83
Nanossílica 1,5 %	25,17	26,10
Nanossílica 2,5%	21,60	25,90

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Abaixo estão os registros fotográficos do ensaio de compressão axial dos concretos analisados (Figuras 16 a 20).

Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto referência



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 17 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 1,5% de sílica ativa



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 2,5% de sílica ativa



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 1,5% de nanossílica



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão axial do concreto com 2,5% de nanossílica



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Portanto, por meio dos resultados obtidos que foram apresentados na Tabela 19, foi possível analisar e constatar que:

- O concreto convencional atingiu o valor esperado de resistência à compressão (> 25MPa);
- Os traços contendo sílica ativa obtiveram os maiores valores de resistência à compressão, indicando que a sílica ativa é capaz de melhorar a resistência mecânica dos concretos convencionais;
- O traço contendo 1,5% de sílica ativa superou o traço contendo 2,5% desse, indicando que não há correlação direta entre maiores porcentagens de substituição de concreto por adição mineral e maiores valores de resistência à compressão. Resultados melhores se baseiam em uma conjuntura de fatores, envolvendo

porcentagem ideal adição mineral e de aditivo redutor de água, bem como matéria prima utilizada no concreto base.

- Os traços contendo nanossílica se aproximaram muito do traço referência, com leve superioridade no concreto contendo 1,5% de nanossílica (26,10 *versus* 25,90MPa), o que não representa um valor significativo.
- O concreto contendo nanossílica não foi capaz de superar o concreto contendo sílica ativa, em proporções de substituição iguais. Novamente, isso se deve a diversos fatores, como porcentagem de aditivo redutor de água utilizado, tempo de mistura diferente durante os testes desses traços em laboratório, além de propriedades intrínsecas desses minerais (SENA; MARTINS, 2017).

4.1.3 Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica são demonstrados nas Tabelas 20 e 21 e nos Gráficos 2 e 3.

Tabela 20 - Média das massas (g) de dois corpos de prova do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica

Traços	m_s	m_i	m_{sat}
Referência	3616	2133	3721,5
Sílica ativa 1,5%	3595	2112,5	3701,5
Sílica ativa 2,5%	3632,5	2139	3725,5
Nanossílica 1,5%	3550	2102,5	3693
Nanossílica 2,5%	3402,5	2036	3592

Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

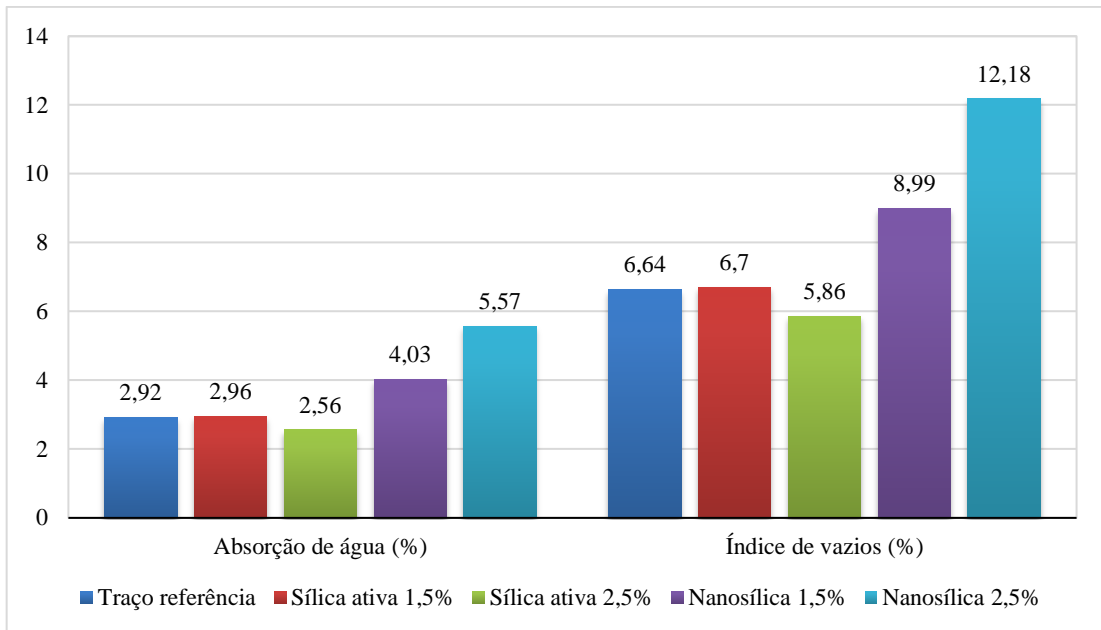
A Tabela 21 foi construída com base nos dados da Tabela 20 e nas Equações 9, 10, 11, 12 e 13.

Tabela 21 - Resultados obtidos do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Traços	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
Referência	2,92	6,64	2,28	2,34	2,44
Sílica ativa 1,5%	2,96	6,70	2,26	2,33	2,42
Sílica ativa 2,5%	2,56	5,86	2,29	2,35	2,43
Nanossílica 1,5%	4,03	8,99	2,23	2,32	2,45
Nanossílica 2,5%	5,57	12,18	2,19	2,31	2,49

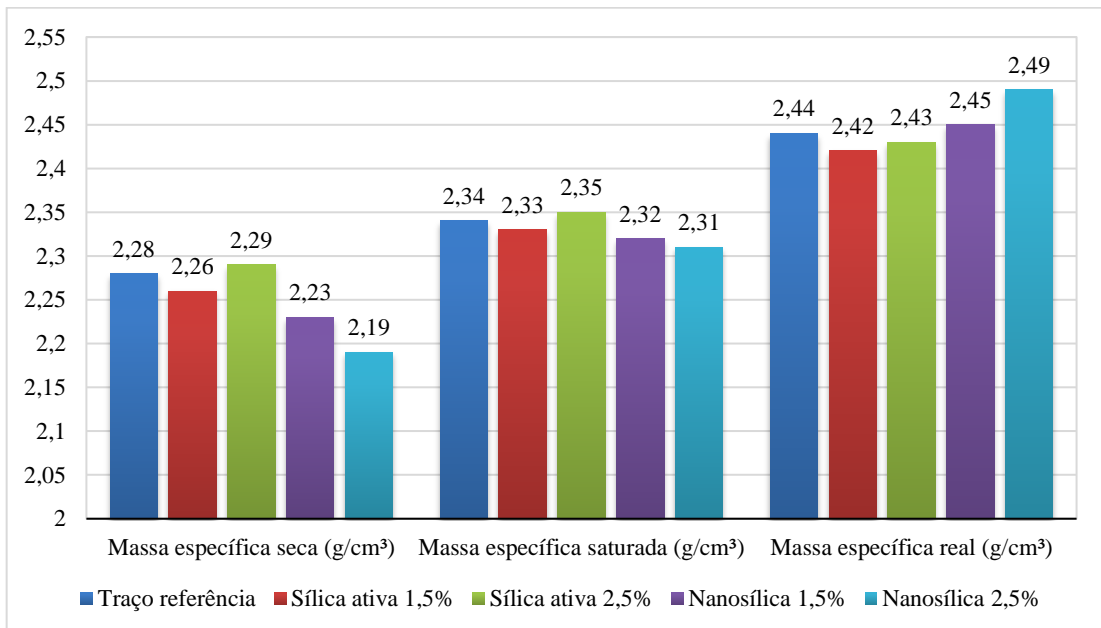
Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Gráfico 2 – Resultados obtidos do ensaio de absorção de água e índice de vazios



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

Gráfico 3 – Resultados obtidos do ensaio de massa específica



Fonte: PRÓPRIA AUTORA, 2021.

A partir dos resultados, pode-se inferir que:

- Todos os concretos, com exceção do concreto contendo sílica ativa a 2,5%, obtiveram um maior índice de absorção de água comparado ao concreto referência.

- O traço contendo sílica ativa a 2,5% obteve o menor índice de absorção de água. Já o traço contendo sílica ativa a 1,5% foi o que apresentou índice de absorção de água mais próximo do concreto referência.
- O traço com adição de nanossílica a 2,5% foi o que obteve maior absorção de água e, conseqüentemente, maior índice de vazios.
- Conforme observado por MARTINEZ *et al* (2015), quanto maior a absorção de água e, conseqüentemente, o índice de vazios, menor a resistência à compressão axial. Essa relação pôde ser observada ao analisar o Gráfico 1 e comparar com os resultados da Tabela 21, que evidencia melhor performance dos traços contendo nanossílica em comparação à sílica ativa. Contudo, propriedades intrínsecas desses minerais também exercem influência na resistência mecânica, visto que apesar de o concreto convencional apresentar menores índices de absorção de água e índice de vazios, quando comparado aos traços de nanossílica, ambos obtiveram resistências à compressão muito próximos.
- Um dos possíveis motivos que levaram a maiores índices de vazios dos concretos contendo nanossílica podem ter sido a pequenas brocas encontradas nos corpos de prova desses traços, possivelmente devido a falhas de adensamento desses.
- Apesar disso, conforme Neville (2016), os resultados de ensaios de absorção do concreto não são um parâmetro adequado para avaliar a qualidade do concreto. Contudo, índices de absorção de água maiores que 10% indicam que o concreto pode não apresentar boa qualidade. Dessa forma, apesar do maior índice de absorção dos traços contendo nanossílica, ainda é possível determinar que esses traços apresentam boa qualidade, visto que seus índices de absorção foram menores que 10%. Além disso, segundo o ACI 522 (2010), uma amostra é considerada porosa se o índice de vazios situa-se entre 15 e 35%, o que não foi observado em nenhum traço do experimento.
- A massa específica dos traços manteve valores muito próximos, o que já era esperado, visto que a quantidade de nanossílica e sílica ativa utilizadas não representam porcentagens muito altas, influenciando pouco nessa relação. Ainda, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que os concretos de massa específica normal apresentam valores situados entre 2,0 e 2,8g/cm³, e todos os traços avaliados apresentam massa específica situada dentro desse intervalo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo comparar a adição de nanossílica e sílica ativa no concreto por meio da substituição parcial ao cimento, com teores diferentes de adição de 1,5 e 2,5% para ambos os minerais. As análises focaram nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido desses traços, objetivando encontrar qual adição propiciava maior ganho de resistência mecânica, quando comparado ao concreto referência. Os concretos foram analisados quanto a trabalhabilidade, resistência a compressão axial, absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam que foi possível diminuir a relação a/c dos concretos contendo adições minerais (sílica ativa e nanossílica). A relação a/c, que no concreto referência era de 0,49, foi reduzida para 0,42 nos traços de nanossílica e sílica ativa a 1,5%, e 0,43 para os traços de nanossílica e sílica ativa a 2,5%. Isso se deve tanto ao uso de superplastificantes quanto às propriedades intrínsecas desses materiais minerais.

Além disso, o concreto contendo sílica ativa apresentou índice de vazios e de absorção de água semelhante ao concreto convencional. O mesmo não foi observado no concreto contendo nanossílica, que apresentou maior absorção de água e índice de vazios. Porém, esse resultado pode ter sofrido interferências durante o preparo do traço, não devendo essa informação ser considerada absoluta. Ainda, a massa específica dos traços pouco alterou, visto que a porcentagem de substituição mineral foi baixa.

Por fim, o concreto contendo sílica ativa obteve melhores resultados em relação à resistência à compressão quando comparado ao concreto convencional e concreto contendo nanossílica, conforme visto na Tabela 19 e no Gráfico 1. Dessa forma, nota-se aparente superioridade da sílica ativa sobre a nanossílica no uso no concreto. Porém, esses dados não devem ser interpretados de modo isolado, devendo-se levar em consideração possíveis intercorrências na produção dos traços, bem como interações entre os minerais e os componentes e aditivos utilizados no concreto base.

Devido o maior preço comercial da nanossílica em relação à sílica ativa, é interessante produzir análises que comparem esses dois minerais em adições idênticas, pois em situações de estudo ideais, é possível comparar com melhor fidedignidade quais desses materiais produzem melhores efeitos no concreto, levando-se em conta os custos associados à sua incorporação no concreto. Assim, sugere-se que novos estudos sejam produzidos comparando adições de nanossílica e sílica ativa em iguais proporções, tanto nos percentuais testados nesse estudo

quanto em porcentagens diferentes, visando identificar as melhores taxas de substituição ao cimento.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 522. **522R-10** Report on Pervious. 2010.

AITCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology).

AITCIN, P. C. **Concreto De alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini 2000. 667p.

ALMEIDA, I. R. **Concretos de alto desempenho: A evolução tecnológica dos concretos tradicionais**. IBRACON, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, 1997.

ALVES, C. H. N.; CAMPOS, F. G. V.; NETTO, P. A. **Concretos e argamassas com microssílica**. 1994. 185 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1994.

ANDRADE, D. S. (2017). **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, 0004/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 319p. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro. 2015a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

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 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2:2009.

BATTAGIN, A. F. CIMENTO PORTLAND. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 6.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Novos Materiais para Construção Civil**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 1 v.

BELKOWITZ, J. S.; BELKOWITZ, W. B.; NAWROCKI, K.; FISHER, F. T., Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties. *ACI Materials Journal*. v. 112, n. 3, p. 419-428, 2015.

BERGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. **Colloidal Silica: Fundamentals and Applications**. Ed. CRC Press, 2006.

BOLHASSANI, M.; SAMANI, M., Effect of type, size, and dosage of nanosilica and microsilica on properties of cement paste and mortar. *ACI Materials Journal*, March-April, 2015, v.112, n. 2, p. 259 -266, 2015.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação De Conceitos Reológicos Na Tecnologia Dos Concretos De Alto Desempenho**. 2007. 334 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos- Universidade de São Paulo, 2007. 302 f.

CASTRO, R. P. M. de. **Análise macroscópica do efeito da adição de nanocerâmica ao concreto**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais de Construção Civil, Ufmg, Belo Horizonte, 2009.

CARNEIRO, M. E. **Obtenção de nanossilica de Equisetum arvenses L. e a sua utilização na modificação de lâminas de madeira de Schizolobium amazonicum (Huber ex Ducke)**

Barneby Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba-PR, 2013.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011. v.1, p. 261-310.

DINTEN, C. A. M. *Contribuição da Adição de Sílicas nas Propriedades do Concreto*. 2000. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GESOGLU, M.; GUNEYISI, E.; ASAAD, D. S.; MUHYADDIN, G. F. **Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica**. Elsevier. *Construction and Building Materials* 102. 2016.

GLEIZE, P. J. P. *Nanotecnologia e materiais de construção*. In: G. C. ISAIA (Ed.) *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: Ibracon, 2007. V2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

HEIKAL, M.; AL DUAIJ, O. K.; IBRAHIM, N. S. **Microstructure of composite cements containing blast-furnace slag and silica nano-particles subjected to elevated thermally treatment temperature**. *Construction and Building Materials* 93. 2015.

HELENE, P.; ANDRADE, T. *Concreto de Cimento Portland*. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 29. p. 905-944.

HERMANN, A. *et al.* **Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico**. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 48-65, Feb. 2016.

IBRAHIM, R. K.; HAMID, R.; TAHA, M. R., **Strength and microstructure of mortar containing nanosilica at high temperature**. *ACI Materials Journal*, v.3. 2014.

JO, B. W. *et al.* **Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles**. *Construction and Building Materials*. v. 21. 2007.

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

LEGRAN, C.; WIRQVIN, E. **Effects of the initial structure of the cement paste in fresh concrete on the first development of strength. Influence of superplasticizer**. In: 9th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. New Delhi. v. 5, p. 95-101. 1992.

LIMA, C. I. V. *et al.* **CONCRETO E SUAS INOVAÇÕES. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT, Maceió**, v. 1, n. 1, p. 31-40, maio 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/1285>. Acesso em: 24 out. 2020.

LIMA, E. A.; SILVA, L. L. R. da. **Fundamentos para a produção e controle de concreto de alto desempenho em laboratório**. São Paulo, 2017.

LOPES, K. L. **Materiais de construção civil II**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018.

LOPES, L. de F. **Materiais de construção civil I**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017. 192 p.

MALHOTRA, V. M. MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials - advances in concrete technology**. vol.1, Gordon and Breach, Amsterdam, Holanda. 1996.

MARTINEZ, M. W. *et al.* Recycled concrete: a review. **Rev. Alconpat**, Mérida, v. 5, n. 3, p. 235-248, dez. 2015.

MASSAZZA, F. Pozzolana e cimentos pozolânicos. In: Hewlett, P.C. (ed.), **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4 th edition, Arnold Publishers londos. p. 485-500, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 684 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini. São Paulo, 1994.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

MORAES, M. Q.; LOPES, R. R. **Análise da contribuição de adições de microssílica e nanossílica na resistência à compressão de concretos convencionais**. 2010. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

NETO, T. F. C.; GEYER, A. L. B. **Efeitos do uso de aditivo com nanossílica em suspensão coloidal na consistência e resistência mecânica do concreto**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 13, n. 2, p. 162-172, 16 maio 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

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

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. **Influence of nano-SiO₂ and microsilica on concrete performance. Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Proceedings of Special Technical Sessions, 2010, Ancona, Anais: Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 67-73.

NOLLI FILHO, P. R. 96p **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**: Concreto: material construtivo mais consumido no mundo, São Paulo. 2009. Trimestral.

PINHEIRO, L. M. **Fundamento do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: EESC-USP, 2007. 380p.

QUERCIA, G.; BROWERS, H. J. H. **Application o nano-silica (nS) in concrete mixtures**. 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/George_Quercia_Bianchi/publication/257029738_Application_of_nano-silica_nS_in_concrete_mixtures/links/00b7d5243e5e804358000000.pdf
Acesso em: 23/09/2020

QUERCIA, G.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. **Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 2, p. 73-74. 2011.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland**. 3. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2011. 120 p. (Série Engenharia 7).

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Mecânicas Utilizando o Método da Maturidade**. Ilha Solteira. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 2001.

SEEKKUARACHCHIA, I. N. TANAKA, K., KUMAZAWA, H. **Dispersion mechanism of nano - particulate aggregates using a high pressure wet - type Jet Mill**. Chemical Engineering Science, n. 63, 2008.

SENA, A. S.; MARTINS, B. G. **Análise comparativa das propriedades mecânicas do concreto convencional e incorporado com sílica ativa e nanosílica**. Curso de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde - Unirv, Rio Verde, 2017.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese (Doutorado) em Ciência e Engenharia dos Materiais, USP, São Carlos - SP, 2006.

SILVA, D. R. da. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade**. 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SINGH, L. P.; BHATTACHARYYA, S. K.; SHAH, S.P.; SHARMA, U. **Studies on Hydration of tricalcium Silicate Incorporating Silica Nano-particles**. Springer International Publishing Switzerland. Nanotechnology in Construction, 2015.

TECNOSIL 2013 – **Sílica ativa**. Disponível em: www.tecnosilbr.com.br. Acesso em: 19 de Novembro de 2020.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 36.

VASCONCELOS, M. C. de A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de Cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. 33 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2013.

ZANON, T.; SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. S. **Evaluation of nanosilica effects on concrete submitted to chloride ions attack**. Rev. ALCONPAT [online]. 2018, vol.8, n.2, pp.138-149. ISSN 2007-6835. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>.

ZHU, W.; BARTOS, P. J.; PORRO, A. **Application of nanotechnology in construction**. **Materials and Structures**, v. 37, p. 649-658, 2004.