



Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Tecnologia - FT

Curso de Engenharia Civil

Projeto Final II

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA
PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO
DO CIMENTO PELA NANOSSÍLICA**

Autores: DIOGO CARDOSO LEÃO

RENATO RODRIGUES PEREIRA

Orientador: JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO

Brasília, DF

2019



DIOGO CARDOSO LEÃO
RENATO RODRIGUES PEREIRA

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM
SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA NANOSSÍLICA**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Civil da Universidade de
Brasília, como requisito para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: DSc. João Henrique Da Silva
Rêgo

Brasília, DF

2019

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

LEÃO, DIOGO CARDOSO; PEREIRA, RENATO RODRIGUES.

Título da Monografia: AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA NANOSSÍLICA / DIOGO CARDOSO LEÃO; RENATO RODRIGUES PEREIRA). Brasília: UnB, 2019. 78 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2019. Orientação: Dr. João Henrique da Silva Rêgo.

1. Nanossílica. 2. Nanotecnologia. 3. Concreto I. RÊGO, JOÃO HENRIQUE DA SILVA. II. AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA NANOSSÍLICA.

CDU Classificação

**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE
GRADUAÇÃO FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**

**DIOGO CARDOSO LEÃO
RENATO RODRIGUES PEREIRA**

Monografia submetida como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia - FT, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 28/11/2019) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. (DSc.): João Henrique da Silva Rêgo, UnB

Orientador

Prof. (DSc.): Rodrigo de Melo Lameiras, UnB

Examinador Interno

Eng. (MSc.): Sirley Tatiana Lopez Ordonez

Examinador Externo

Brasília, DF
2019

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. Objetivo Geral.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	4
2.2. ADIÇÕES AO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	4
2.3. EFEITO FÍSICO DA ADIÇÃO MINERAL	6
2.4. EFEITO QUÍMICO DA ADIÇÃO MINERAL	7
2.5. NANOTECNOLOGIA NA ENGENHARIA CIVIL	8
2.6. NANOSSÍLICA (nS).....	9
2.7. PRODUÇÃO DA nS	10
2.7.1. PRODUÇÃO DA nS COLOIDAL	10
2.7.2. PRODUÇÃO DE nS EM PÓ	11
2.8. UTILIZAÇÃO DA nS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	12
2.9. EFEITOS DA nS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	14
2.10. DURABILIDADE.....	23
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	25
3.1. VARIÁVEIS.....	25
3.1.1. Variáveis Dependentes.....	25
3.1.2. Variáveis Independentes	26
3.2. MATERIAIS	26
3.2.1. Cimento	27
3.2.2. Agregado Graúdo	29

3.2.3.	Agregado Miúdo	31
3.2.4.	Nanossílica	33
3.2.5.	Aditivos	33
3.2.6.	Água	34
3.3.	PRODUÇÃO DO CONCRETO	34
3.3.1.	MISTURA DOS COMPONENTES	36
3.3.2.	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	37
3.3.3.	CURA	39
3.4.	ENSAIOS	39
3.4.1.	Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone	40
3.4.2.	Ensaio de Resistência à Compressão	40
3.4.3.	Ensaio de Absorção de Água	42
3.5.	ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DA nS NO PROCESSO PRODUTIVO	42
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	45
4.1.	ESTADO FRESCO	45
4.2.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	47
4.2.1.	Concretos Convencionais	47
4.2.2.	Concreto de Alto Desempenho	52
4.3.	ABSORÇÃO D'ÁGUA	57
5.	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	60
6.	CONCLUSÕES	66
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Classificação dos MCS.	6
Tabela 2. 2 - Comparação da finura da nanossílica com outros materiais finos, por meio da área superficial BET.	9
Tabela 2. 3 - Resistência à compressão obtida para diferentes teores de nanossílica.	15
Tabela 2. 4 - Módulo de elasticidade obtidos para diferentes teores de nanossílica.	15
Tabela 2. 5 - Resistência à compressão para diferentes teores de micro e nanossílica.	16
Tabela 2. 6 - Resistência à tração para diferentes teores de micro e nanossílica.	17
Tabela 2. 7 - Traços ensaiados.	18
Tabela 2. 8 - Traços ensaiados.	19
Tabela 2. 9 - Porcentagem no ganho de resistência à tração e compressão para traços com adição de micro e nanossílica.	21
Tabela 2. 10 - Massa de cimento e nS.	22
Tabela 2. 11 - Resistências à compressão e ganho percentual para cada traço.	23
Tabela 3. 1 - Matriz experimental da pesquisa.	26
Tabela 3. 2 - Caracterização física e mecânica do cimento utilizado.	27
Tabela 3. 3 - Composição granulométrica dos agregados graúdos.	30
Tabela 3. 4 - Características dos agregados graúdos.	30
Tabela 3. 5 - Composição granulométrica dos agregados miúdos.	31
Tabela 3. 6 - Características dos agregados miúdos.	32
Tabela 3. 7 - Características da nanossílica.	33
Tabela 3. 8 - Características dos aditivos.	34
Tabela 3. 9 - Composição dos traços.	35
Tabela 3. 10 - Corpos de prova para cada ensaio.	38
Tabela 3. 11 - Ensaio físicos e mecânicos realizados.	39
Tabela 4. 1 - Aditivo incrementado em cada traço em relação a massa de aglomerante.	45
Tabela 4. 2 – Composição corrigidas dos traços para produção de 1 m ³ de concreto.	46
Tabela 4. 3 – Resistência média aos 28 dias dos concretos convencionais.	48
Tabela 4. 4 - Quantidade e percentual de aditivo polifuncional.	52
Tabela 4. 5 - Resultados resistência média aos 28 dias dos concretos de alto desempenho.	53
Tabela 4. 6 - Quantidade e percentuais de cada aditivo.	56

Tabela 5. 1 - Preços dos materiais na unidade comercial.	61
Tabela 5. 2 - Custos de produção dos concretos convencionais por metro cúbico.....	62
Tabela 5. 3 - Custos de produção dos concretos de alto desempenho por metro cúbico.....	63
Tabela 5. 4 – Custo comparativo por metro cúbico do concreto.	64
Tabela 5. 5 – Avaliação do (Custo/m ³)/MPa para cada traço.	64
Tabela 5. 6 - Comparativo das seções transversais, volume e custo do pilar fictício.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação da polaridade em uma partícula de nanossílica.	10
Figura 2.2 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas.	13
Figura 2.3 - Hidratação do cimento puro (A) e com adição de nanopartículas (B) em diferentes momentos após a mistura (1-3).	14
Figura 2.4 - Resultados para resistência à compressão.	18
Figura 2.5 - Resultados para resistência à compressão.	19
Figura 2.6 - Imagem do concreto em escala nanométrica sem e com nS, respectivamente. ...	20
Figura 2.7 - Resistência à compressão para argamassa.	22
Figura 3. 1 – Materiais utilizados na pesquisa.	27
Figura 3. 2 – Corpos de prova do ensaio de resistência à compressão da caracterização do cimento.	28
Figura 3. 3 - Ensaio de caracterização do cimento.	29
Figura 3. 4 - Peneiras para os ensaios de agregados.	30
Figura 3. 5 - Curva granulométrica dos agregados.	32
Figura 3. 6 - Mistura dos materiais.	37
Figura 3. 7 - Corpos de prova nas formas após moldagem.	38
Figura 3. 8 - Corpos de prova moldados.	38
Figura 3. 9 - Prensa para ruptura dos corpos de prova.	41
Figura 3. 10 - Corpos de prova rompidos após o ensaio.	41
Figura 3. 11 - Representação esquemática do pilar.	43
Figura 4. 1 – Execução do ensaio de abatimento.	47
Figura 4. 2 - Resistências à compressão dos concretos convencionais separando por traços.	48
Figura 4. 3 - Resistências à compressão dos concretos convencionais separando por idades.	49
Figura 4. 4 - Percentual de cada traço e idade em relação ao traço de referência de concreto convencional.	49
Figura 4. 5 - Resistências à compressão dos concretos alto desempenho separando por traços.	53

Figura 4. 6 - Resistências à compressão dos concretos alto desempenho separando por idades.	54
Figura 4. 7 - Percentual de cada traço e idade em relação ao traço de referência do concreto de alto desempenho.	54
Figura 4. 8 - Realização do ensaio de absorção d'água.....	57
Figura 4. 9 - Absorção d'água e índice de vazios de concretos convencionais.	58
Figura 4. 10 - Absorção d'água e índice de vazios de concretos alto desempenho.	58
Figura 5. 1 - Esquema ilustrativo de produção de concretos usinados.	60

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS CONVENCIONAIS.....	75
APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.....	76
APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CONVENCIONAIS E PERCENTUAL EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA..	77
APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO E PERCENTUAL EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	78

RESUMO

A utilização da nanotecnologia na engenharia civil, principalmente para a produção de concretos, tem crescido nos últimos anos. Devido ao relevante aumento da utilização destes componentes, este trabalho apresenta um estudo prático da utilização da nanossílica quando esta substitui parcialmente o cimento no traço de concreto. A nanossílica é uma superpozolana composta de partículas amorfas de dióxido de silício em escala nanométrica, o que tende a permitir um maior refinamento dos poros e uma maior produção de compostos resistentes nas primeiras idades. O estudo foi realizado em parceria com uma concreteira de Brasília, de modo a fornecer informações relativas à resistência mecânica e absorção de água do concreto quando submetido a substituição parcial da massa de cimento por nanossílica dispersa em meio aquoso, a nanossílica coloidal. Sendo assim, o principal enfoque da pesquisa é a verificação da influência dessa substituição na resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, com ênfase para os resultados obtidos nas primeiras idades, além de avaliação da viabilidade técnica e econômica envolvida no processo de produção do concreto com substituição de cimento por nanossílica. Para o estado fresco, os resultados indicaram que o aumento da substituição de nanossílica implicou num aumento da demanda de aditivo polifuncional ou superplastificante de modo a manter o mesmo abatimento. Para a resistência à compressão, os resultados encontrados apresentaram ganhos de resistências elevados nas primeiras idades. Para a absorção d'água, a utilização de nanossílica não implicou em significativas mudanças na absorção dos concretos. Já no que tange a viabilidade técnica, a inserção da nanossílica no processo produtivo da empresa parceira implicaria numa pequena mudança no processo, mudança essa que é simples e viável. Quanto a viabilidade econômica, a utilização de nanossílica aumentou os custos da produção do concreto, fazendo com que a sua utilização seja inviável do ponto de vista econômico.

Palavras-chaves: nanossílica; nanotecnologia; concreto.

ABSTRACT

The use of nanotechnology in civil engineering, mainly in the production of concretes, has grown in recent years. Due to the relevant increase in the use of these components, this paper presents a practical study of the use of nanosilica when it partially replace the cement in concrete. The nanosilica is a super pozzolanic material composed of amorphous silicon dioxide particles at nanoscale, which tends to allow greater pore refinement and greater production of resistant compounds in the early ages. The study was conducted in partnership with a concrete industry located in Brasília, in order to provide information about mechanical strength and water absorption of concrete when subjected to partial cement replacement by nanosilica dispersed in aqueous medium, the colloidal nanosilica. Thus, the main focus of the research is the verification of the influence of this replacement in compressive strength in the ages of 1, 3, 7, 28 and 91 days, with emphasis to the results obtained in the first ages, in addition to the evaluation of technical and economic feasibility involved in the process of production of concrete with cement replacement by nanosilica. For the fresh state, the results indicated that increased nanosilica substitution implied an increase in the amount of polyfunctional or superplasticizer additive to maintain the same slump. For compressive strength, the results showed high strength gains in the early ages. For water absorption, the use of nanosilica did not imply significant changes in the absorption of concretes. Regarding technical feasibility, the insertion of nanosilica in the production process of the partner company would imply in a small change in the process, a change that is simple and feasible. As for the economic viability, the use of nanosilica has increased the costs of concrete production, making its use economically unfeasible.

Keywords: nanosilica; nanotechnology; concrete.

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

O termo nanotecnologia foi definido por Drexler, Peterson e Pergamit (1991) como “o controle da estrutura da matéria com base no controle de molécula por molécula dos produtos e subprodutos”. A nanotecnologia possui grande potencial de mercado, impacto econômico tanto no âmbito nacional como internacional e aplicações em diversas áreas de atuação, inclusive na construção civil, fazendo com que o tema ganhe grande relevância na ciência e tecnologia.

Pode-se estimar que anualmente são consumidas cerca 11 bilhões de toneladas de concreto, segundo dados da *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado* (FIHP), fazendo do concreto o segundo produto mais consumido mundialmente, ficando atrás somente da água. Segundo Mehta e Monteiro (2014), apesar de diversos estudos científicos abordando as propriedades dos concretos, eles ainda guardam grande potencial para pesquisas e desenvolvimento, principalmente quando focado na micro e nanoestrutura.

O uso de nanotecnologia no estudo e na produção de concretos está em crescimento no Brasil e no mundo, mas seu uso ainda é relativamente pequeno. Uma utilização nesse campo está relacionada com a introdução de nanotubos de carbono em pastas, argamassas e no concreto. Esse material em escala nanométrica possibilita a criação de materiais de altíssima resistência.

Outro material em escala nanométrica que vem sendo cada vez mais inserido em pesquisas e na área comercial é a nanossílica. Pesquisadores e autores como Quercia e Brouwers (2010), Neville (2013), Saloma et al. (2013), Bianchi (2014), Hussain e Sastry (2014), Mehta e Monteiro (2014), Singh et al. (2015), Garg et al. (2016), Mendes (2016), Santos (2016), Andrade (2017), Silva Junior (2017), Nogueira et al. (2018), Campos Neto e Geyer (2019), entre outros, discorrem sobre o impacto do uso de nanossílica e outros materiais cimentícios suplementares (MCS) nas propriedades dos concretos e concluem que tais usos podem trazer benefícios como melhor comportamento de materiais em altas temperaturas, menor porosidade, maior resistência a agentes agressivos e, talvez como principal motivação de pesquisas, aumento da resistência mecânica de materiais cimentícios, principalmente nas primeiras idades, com efeito reduzido nas idades mais avançadas.

1.2. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Foram constatados em alguns estudos realizados anteriormente que a adição de nanossílica junto ao concreto resulta no aumento de resistência à compressão do concreto. Esse fato surge devido a uma melhor cobertura das nanopartículas em preencher os vazios presentes na estrutura do concreto. Um fator importante para o desenvolvimento do trabalho é que ainda não há um consenso de quais seriam os teores ótimos a serem utilizados para a melhoria de resistência à compressão e outras propriedades, tanto físicas quanto mecânicas.

Sendo assim, o trabalho tem como principal motivação a avaliação das propriedades físico-mecânicas do concreto com substituição de parte da massa de cimento por nanossílica, quando submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção d'água.

Dessa forma, é possível avaliar a aplicação dos concretos com substituição de nanossílica por cimento, abrindo possibilidade da criação de novos nichos de mercado, o que seria uma inovação no sistema produtivo brasileiro. Cabe ao estudo, uma avaliação de como o processo produtivo de concretos com uso de nanossílica poderá ser implementado, de modo a ser viável e economicamente atrativo para as empresas do ramo. Isso ocorre pois a introdução de uma nova etapa no processo produtivo, analisando o melhor modo em que ela poderá ser inserida no concreto.

Em suma, o presente trabalho busca contemplar os estudantes, pesquisadores e empresas, com informações relativas ao uso especificamente da substituição de nanossílica coloidal ao concreto, visto que, no Brasil, há poucos estudos específicos sobre esse tema e com esse enfoque.

O presente estudo conta com a parceria de uma empresa concreteira da região de Brasília. Essa colaboração permitiu o estudo mais específico para os modos de produção de concreto, visto que os materiais e ensaios são os mesmos utilizados pela empresa em seus processos produtivos.

1.3. OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos dessa pesquisa, tanto gerais quanto específicos.

1.3.1. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da substituição parcial de cimento pela sílica coloidal amorfa ultrafina, também conhecida como nanossílica, na trabalhabilidade de concretos no estado fresco, na resistência mecânica de concretos no estado endurecido e na capacidade de absorção de água.

1.3.2. Objetivos Específicos

O referente trabalho tem como objetivos específicos:

- Verificar a influência do uso de nanossílica no teor de aditivo para alcançar um abatimento pré-definido;
- Analisar a consequência da substituição parcial de cimento pela nanossílica na resistência à compressão, tanto nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias) quanto nas idades mais avançadas (28 e 91 dias);
- Analisar o impacto da nanossílica no grau de absorção de água do concreto;
- Avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da nanossílica levando em conta seu custo e impacto nas características do concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Caracterizar ou definir um tipo de concreto é, muitas vezes, uma tarefa difícil até mesmo dentro do meio acadêmico. A definição de concreto de alto desempenho (CAD) vem se estruturando e se reinventando desde os anos 1970, época em que se considerou legítima a utilização do termo concreto de alta resistência (CAR) para concretos com resistência à compressão maior que o habitual da época.

Com base na norma técnica em vigor no Brasil, os concretos de para fins estruturais podem ser divididos em dois grandes grupos segundo sua resistência característica. Concretos com resistência entre 20 MPa e 50 MPa e concretos com resistência entre 55 MPa e 100 MPa são considerados, respectivamente, tradicionais e de alto desempenho (ABNT, 2015).

O CAD, no entanto, não pode ser definido somente pela resistência à compressão do concreto (SILVA, 2000). Com o advento dos superplastificantes e a consequente possibilidade de reduzir a relação água/cimento, verificou-se que os concretos apresentavam melhores características como maior módulo de elasticidade, maior resistência a flexão, melhor resistência a abrasão, menor permeabilidade e, assim, maior durabilidade. Estas características acabam por definir o CAD. Entretanto, o termo ainda não é universalmente aceito devido à dificuldade de se definir e quantificar o desempenho de um material quanto a essas características (AITICIN, 2004).

Para se obter tais características, pode-se usar, ainda, aditivos minerais como a cinza volante, cinza da casca do arroz, sílica ativa, entre outros, e aditivos químicos. Tudo isso visando, com as reações pozolânicas e afins, reduzir a relação água/cimento, melhorar a chamada zona de transição agregado-pasta, reduzir a porosidade e, conseqüentemente, aumentar a durabilidade do concreto (SILVA, 2000).

2.2. ADIÇÕES AO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Algumas propriedades dos concretos e cimentos podem ser alteradas com a incorporação de uma adição a mistura. Existem basicamente dois tipos: os aditivos químicos e

os materiais cimentícios suplementares (MCS). Os aditivos químicos são, de maneira geral, incrementos com o intuito de reduzir a quantidade de água necessária para conseguir a trabalhabilidade desejada (plastificantes e superplastificantes), agentes incorporadores de ar para proteção contra ciclos gelo-degelo e retardadores e aceleradores de pega (NEVILLE, 2013).

Os MCS, que terão um foco maior nesse trabalho, são materiais finamente moídos e geralmente oriundos de processos industriais como subprodutos ou de fontes naturais (MEHTA; MONTEIRO, 2014) e entram na mistura para somar ou substituir parcialmente o cimento. De acordo com Dal Molin (2005), os MCS em cimentos e concretos podem ser classificadas em três grupos: material cimentante, material pozolânico e *filler*.

Segundo Dal Molin (2005), materiais cimentantes são aqueles que não necessitam de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes como o C-S-H, mas que, na presença hidróxido de cálcio e gipsita, possuem sua hidratação acelerada. Materiais pozolânicos são silicosos ou sílico-aluminosos que não possuem propriedades cimentícias, mas quando finamente divididos e com umidade, reagem com o hidróxido de cálcio e formam compostos cimentantes. *Fillers* são adições finamente divididas e sem atividade química que geram um efeito de empacotamento granulométrico são pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Exemplos de material cimentante, material pozolânico e *filler* são, respectivamente, a escória granulada de alto forno, cinza de casca de arroz e calcário. Na Tabela 2.1, serão apresentados a classificação dos MCS.

Tabela 2. 1 - Classificação dos MCS.

Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinzas de casca de arroz Nanossílica
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio Argilas calcinadas Materiais naturais de origem vulcânica
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto forno resfriada lentamente Cinzas de forno Escória de caldeira Palha de arroz queimada em campo
<i>Filler</i>	Calcário Pó de quartzo Pó de pedra

Fonte: (adaptado Mehta e Monteiro, 2008).

2.3. EFEITO FÍSICO DA ADIÇÃO MINERAL

Os CADs produzidos antigamente passaram a evitar a utilização de adições puramente de *filler* em sua composição, pois, em grandes quantidades, tendem a reduzir os valores das resistências mecânicas (BONAVETTI et al, 1999) uma vez que são materiais inertes quimicamente. Porém, em pequenas quantidades, a adição de *filler* pode não afetar ou até elevar as resistências mecânicas do concreto, levando a crer que o efeito físico do *filler* possui mesmo grau de importância que os efeitos químicos de reações pozolânicas.

Os *fillers* podem agir como pontos de nucleação para as reações de hidratação do material cimentício, ou seja, agem como catalisadores nas reações de hidratação reduzindo a

barreira energética. Devido a granulometria dos *fillers*, eles são capazes de preencher os vazios deixados entre os grãos de cimento maiores, aumentando a fluidez de concretos com uma relação água/cimento muito baixa. Assim, uma matriz cimentícia com adições de *fillers* acabam por se tornarem mais densas, antes mesmo dos efeitos químicos das reações se desenvolverem (AITCIN, 2004).

Para que os efeitos físicos benéficos dos MCS ocorram, se faz necessário que, segundo Laurence et al. (2003), tais materiais de adição tenham granulometria cada vez mais fina pois a finura das partículas favorece a nucleação, estejam presentes em quantidades otimizadas, uma vez que a probabilidade de os pontos de nucleação estarem próximos das partículas de cimento cresce com a quantidade de adição e tenham uma boa afinidade eletroquímica com a hidratação do cimento.

2.4. EFEITO QUÍMICO DA ADIÇÃO MINERAL

O efeito químico dos MCS é representado pelas chamadas reações pozolânicas. As pozolanas são materiais que possuem, principalmente, silício (Si) em sua composição e são capazes de reagir em presença de água e formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). A diferença entre a reação de hidratação do cimento e as reações pozolânicas é que a hidratação do cimento libera hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - como subproduto, ao passo que a reação pozolânica se utiliza desse subproduto para formar cristais mais resistentes (HOPPE FILHO, 2008).

Segundo AITCIN (2004), o hidróxido de cálcio contribui muito pouco para a resistência da matriz cimentícia e pode estar relacionado a problemas de durabilidade, uma vez que ele pode ser lixiviado facilmente pela água. Teoricamente, uma mistura de pozolanas em cimento na proporção de aproximadamente 25% poderia transformar todo o hidróxido de cálcio produzido em C-S-H.

O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ possui baixa resistência e granulometria elevada, tornando a zona de transição agregado-pasta a região mais fraca dos concretos usuais. Segundo Neville (2016), atividade pozolânica influencia muito na resistência final dos concretos, uma vez que tende a reduzir a concentração de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na matriz e na zona de transição. Isso aumenta a

concentração de produtos mais resistentes (C-S-H) e reduz a porosidade do concreto com o refinamento dos poros, auxiliando tanto na resistência como na durabilidade do concreto.

2.5. NANOTECNOLOGIA NA ENGENHARIA CIVIL

A nanotecnologia é uma ciência que estuda os materiais com dimensões muito menores que os trabalhados usualmente, sendo que dimensões entre 0,1 a 100 nm são mais comumente utilizadas na engenharia. Em comparação a outros materiais conhecidos, as nanopartículas são cerca de 1000 vezes menores em relação ao tamanho de células do corpo humano. Podemos dizer que a nanotecnologia na engenharia é aplicada aos materiais no controle das suas condições físicas de nível atômico (ROCO et al. 1999 apud FIROOZI; TAHA, 2014). Podemos também descrever a nanotecnologia como sendo a habilidade de manipular átomos e moléculas individualmente para produzir materiais nanoestruturados e micro objetos com aplicações no mundo real (MILLER,2005 apud BASTOS,2006). Dessa forma, a aplicação de nanopartículas faz com que o material adquira novas capacidades físicas e químicas, quando comparado aos materiais sem aplicação.

Nos primórdios do ano de 1905, Albert Einstein em sua tese de doutorado defendida na Universidade de Zurique “Uma nova determinação das dimensões moleculares”, onde nela foram realizados experimentos que envolviam açúcar na água, chegou-se à conclusão de que as moléculas de açúcar apresentavam raio de 0,62 nm, sendo assim, pela primeira vez foi possível quantificar o quão pequena uma partícula poderia ser. Já o termo nanopartículas foi utilizado pela primeira vez no ano de 1974, pelo professor japonês Norio Taniguchi, ao realizar seu experimento de processos semicondutores. A partir desse momento a utilização do termo e da tecnologia começou a ser disseminada. No campo da engenharia civil, segundo Firoozi e Taha (2014), podemos encontrar nas seguintes situações, por exemplo: utilização de nanopartículas, nanotubos de carbono e nanofibras para aumentar a resistência e a durabilidade do concreto, assim como reduzir a poluição; produção de aço resistente aos processos corrosivos; tendo como intuito principal a melhoria de capacidade físicas ou químicas dos materiais.

2.6. NANOSSÍLICA (nS)

Nanossílica são partículas amorfas de dióxido de silício (SiO_2), em escala nanométrica (geralmente entre 1 e 100nm), com uma estrutura não porosa e normalmente na forma esférica (BREGNA; ROBERTS, 2006). A nanossílica é um material que apresenta pequena dimensão, e quando aplicada em traços de concretos, tende a incrementá-lo no fechamento de poros, reduzindo assim a porosidade e aumentando a densidade.

Muitos são os estudos que realizaram o incremento da nS em traços de concreto de alto desempenho (CAD), sendo que estes apresentam baixa relação água/cimento e necessitam da adição de pozolana, que muitas vezes é realizada com a inserção de sílica ativa no traço. Esta é responsável por reagir e formar o C-S-H na interface, fazendo com que isso aumente a resistência do concreto. A sílica ativa, em termos granulométricos, apresenta diâmetros não superiores a 0,2 micrometros, o que, ainda, é muito maior do que as partículas da nS. Dessa forma, a utilização da sílica ativa no concreto faz com que ocorra o efeito *micro filler*, onde os pequenos vazios presentes nos concretos são preenchidos com as partículas desse material, aumentando a velocidade da reação e garantindo maior compacidade. Com a adição de nS, que possui granulometria ainda menor, esse efeito é intensificado, ocorrendo o efeito *nano filler*, que é similar ao *micro filler* só que em menor escala, e que garante maior fechamento dos poros do concreto. Na Tabela 2.2 são mostrados, a fim de comparação, dados de área superficial de todos os materiais que podem, eventualmente, estar presentes nos concretos.

Tabela 2. 2 - Comparação da finura da nanossílica com outros materiais finos, por meio da área superficial BET.

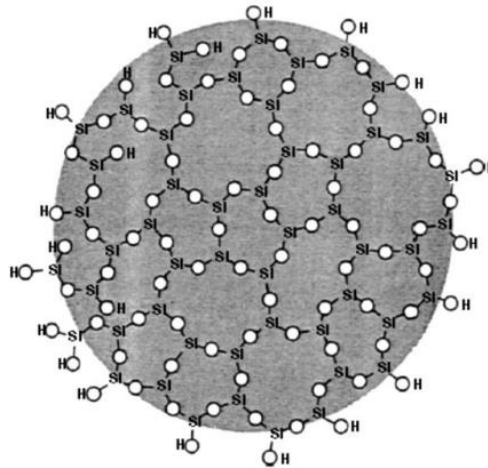
Material	Área superficial - BET (m^2/kg)	Fonte
Cimento Portland	300 a 400	(ACI 234-R 2006)
Cinzas volantes	280 a 700	
Escória de alto forno	350 a 600	
Sílica ativa	13.000 a 30.000	
Nanossílica	Até 130.000	BYUNG-WAN <i>et al.</i> , 2007

Fonte: (Silva Junior, 2017).

Segundo Silva Junior (2017), as partículas de nS apresentam uma característica peculiar, visto que nelas estão presentes hidroxilas, estas que acabam por garantir a presença

de polaridade de mesmo sinal e intensidade nas partículas, fazendo com que elas não fiquem aglomeradas, mas sim dispersas, aumentando sua eficiência, garantindo maior área de atuação dentro dos poros do concreto. Na Figura 2.1 é apresentada esquematicamente a polaridade em uma partícula de nS.

Figura 2.1 - Representação da polaridade em uma partícula de nanossílica.



Fonte: (Bregna e Roberts, 2006 apud Silva Junior, 2017).

2.7. PRODUÇÃO DA nS

O processo produtivo de obtenção da nanossílica pode ser aplicado de várias maneiras, sendo que o que vai diferir entre a realização de um ou outro será a finura das partículas e a reatividade que elas apresentarão no produto final, além de a substância final ser coloidal ou em pó.

2.7.1. PRODUÇÃO DA nS COLOIDAL

A nanossílica pode ser obtida através do processo de solução-gel em temperaturas ambientes. O processo é realizado pela adição dos materiais de partida (Na_2SiO_4 e elementos

organometálicos como TMOS¹/TEOS²) no solvente onde o pH da reação é alterado, tendo como resultado a precipitação de sílica gel. O gel produzido é envelhecido e filtrado onde seu o resultado é o *xerogel*³. Este *xerogel* é seco e queimado com o incremento de agentes estabilizadores (Na, K, NH_3 , etc.) de modo a produzir uma dispersão concentrada (20 a 40% de sólidos), material apropriado para a utilização em concretos (BIANCHI, 2014).

Existe também o método de produção por precipitação, onde a nS é produzida pela precipitação da solução a temperaturas entre 50 e 100°C, esse método é chamado de sílica precipitada. Esse método utiliza de diferentes materiais para a produção das nanopartículas como cinza de casca de arroz e silicato de magnésio (ILER, 1995; LIEFTINK, 1997; SAKKA e KOUSKO, 2000; ZAKY, 2008; THUADAIJ e NUNTIYA, 2008; apud BIANCHI, 2014).

Outro método que começou a ser desenvolvido, se dá pela combinação da olivina e de ácido sulfúrico, donde são precipitados sílica amorfa de elevada finura e pureza, sendo a forma aglomerada mais sustentável (menor consumo de CO_2) em comparação aos outros métodos contemporâneos para obtenção de micro e nanossílica. (LAZARO et al., 2012 apud BIANCHI, 2014).

A produção da nS a ser utilizada no trabalho tem como princípio mais geral a remoção de sódio do composto de silicato de sódio através de trocas iônicas, para que a sílica possa ser isolada. As partículas de sílica são estabilizadas em uma solução de sódio que evita o aglutinamento e a decantação, promovendo a ótima dispersão dessas partículas carregando-as de forma negativa na sua superfície. A aparência física final é de um líquido translúcido, ligeiramente mais viscoso que a água.

2.7.2. PRODUÇÃO DE nS EM PÓ

Baseado na vaporização da sílica, sendo ela submetida a temperaturas entre 1000 a 2000°C, atingindo essa temperatura através do arco elétrico, com o intuito de reduzir o quartzo (SiO_2). Nesse processo, a nanossílica surge como subproduto da produção de ligas de silício

¹ TMOS abreviatura de Tetrametoxisilano, também chamado de silicato de metilo, silicato de tetrametilo ou ortosilicato de tetrametilo. Fórmula molecular: $C_4H_{12}O_4Si$ (Silva Junior, 2017).

² TEOS abreviatura do Tetraetoxisilano, também chamado de silicato de etilo, silicato de tetraetilo, ortosilicato de tetraetilo ou tetraetil ortosilicato. Fórmula molécula: $C_8H_{20}O_4Si$ (Silva Junior, 2017).

³ Produto obtido da secagem de um gel por evaporação em condições normais resulta em um gel seco chamado *xerogel* (Bregna e Roberts, 2006 apud Silva Junior, 2017)

metálico e ferro-silício, onde as partículas são coletadas por condensação. A nanossílica produzida neste método é extremamente fina, de formato esférico e com diâmetros médios de 105 nm (BIANCHI, 2014).

Estevez et al. (2009, apud BIANCHI, 2014) desenvolveram um método biológico para produzir nanossílica através dos húmus digeridos de minhocas vermelhas da Califórnia, onde elas eram alimentadas com casca de arroz, material no qual há a presença de 22% de SiO₂. Resultando como subproduto desse processo nanopartículas de sílica de formato esférico e finura entre 55 a 245 nm. O processo apresenta eficiência de 88%.

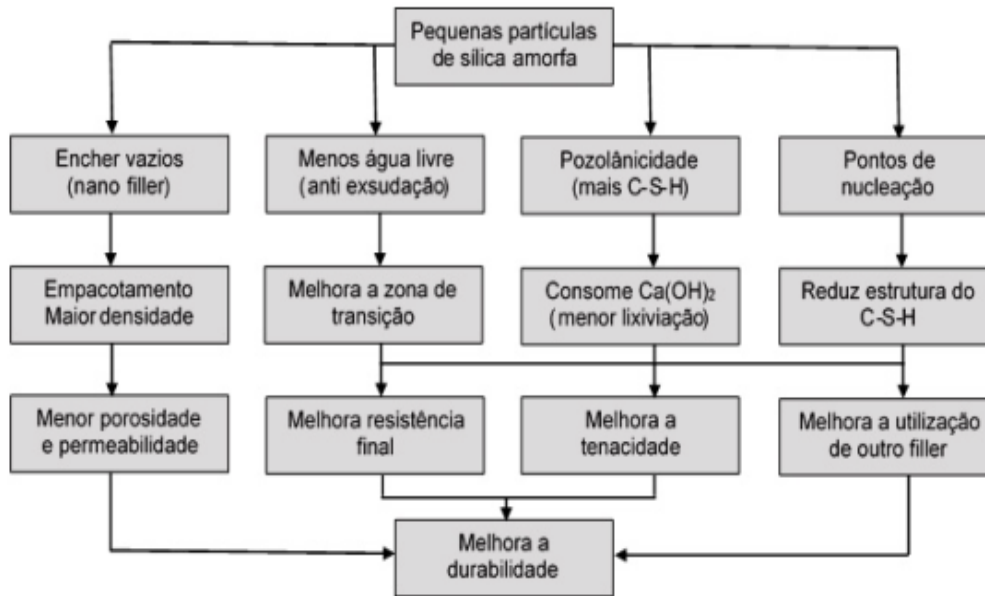
2.8. UTILIZAÇÃO DA nS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Segundo Dunster (2009), nos concretos, é comum a utilização de adições de sílica ativa amorfa juntamente com uma fração de nanopartículas. A microsílica trabalha de duas maneiras nas reações juntamente ao cimento, a primeira pelo efeito químico, onde a reação pozolânica da sílica com o hidróxido de cálcio forma mais gel de C-S-H nos estágios finais, a segunda trata do efeito físico, ocorrendo devido ao seu tamanho ser cerca de 100 vezes inferior ao do cimento.

Para Neville (2016), os efeitos benéficos da adição de sílica ativa não estão limitados a ação pozolânica, pois existe também o efeito físico decorrente da capacidade de as partículas extremamente finas da sílica ativa se acomodarem muito próximas às partículas de agregados, ou seja, na interface entre a pasta de cimento e o agregado. Já com a adição de nanossílica na composição do concreto, segundo Silva Junior (2017), ocorrem também os dois efeitos, sendo que o químico está associado à reação pozolânica, que é a capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Já os efeitos físicos são o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas nanopartículas de sílica, ocorrendo assim o efeito nano *filler*, e o refinamento do tamanho de poro e grão, causado pelas nanopartículas de sílica que podem agir como pontos de nucleação para a precipitação dos produtos da hidratação. Alguns outros pesquisadores também atribuem as melhorias das propriedades (resistência e durabilidade) dos concretos e argamassas ao efeito da aceleração da hidratação da pasta de cimento provocado pela nanossílica (SOBOLEV et al, 2006 apud SILVA JUNIOR,

2017). A Figura 2.2 apresenta uma representação esquemática dos efeitos da adição da nS, de modo a facilitar o entendimento de atuação do material nos concretos e argamassas.

Figura 2.2 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas.

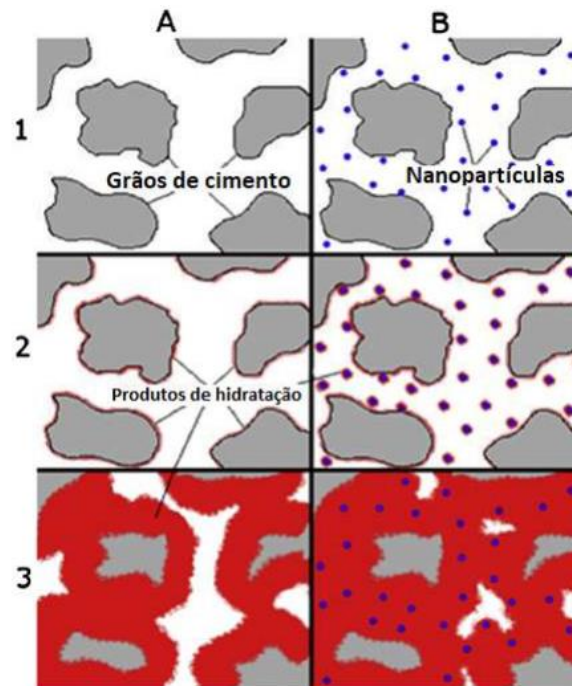


Fonte: (Bianchi, 2014).

Em sua tese, Santos (2016) observou outro aspecto importante no que diz respeito ao acréscimo de nanossílica no traço, onde, ao acrescentar teores de 2% e 3%, em substituição a massa de cimento, obteve-se uma redução no tempo zero de 45%, quando comparado ao traço utilizado de referência.

Já Singh et al. (2015) verificaram que a adição de nanossílica apresentou maior resistência nas idades iniciais, onde, segundo ele, o fenômeno químico que ocorreu ainda permanece não muito claro. Entretanto, a concentração de Ca^{2+} apresentou uma queda brusca dentro de poucos minutos de hidratação na presença de nanopartículas de sílica. A Figura 2.3 mostra a representação da microestrutura do concreto quando este está sem e com adição de nS.

Figura 2.3 - Hidratação do cimento puro (A) e com adição de nanopartículas (B) em diferentes momentos após a mistura (1-3).



Fonte: (Land e Stephan, 2015 apud Andrade, 2017).

2.9. EFEITOS DA nS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os avanços dos estudos de concretos em escala nanométrica fizeram com que fosse provado que a nS apresenta melhores resultados mecânicos do que a sílica ativa quando usada em concretos convencionais. A nS é naturalmente mais pozolânica, tendo capacidade de reagir com a cal livre durante o processo de hidratação do cimento formando mais gel de C-S-H, que aumenta a resistência, impermeabilidade e durabilidade do concreto (HUSSAIN; SASTRY, 2014).

Saloma et al. (2013) em seus estudos realizaram traços com teores de 0; 2,5; 5; 7,5 e 10% de nanossílica em substituição a massa de cimento, sem o incremento de sílica ativa. Foi possível observar que houve ganho substancial desde as idades iniciais (3 dias), até idades mais avançadas (28 dias) no ganho de resistência quando os corpos de provas eram submetidos a ensaios de compressão, chegando a valores quase 25% superiores na resistência, valor esse obtido para o teor de 10% de nanossílica. Já no ensaio para avaliação do módulo de elasticidade, foi constatado um acréscimo de quase 11%, valor esse obtido para teor de 10% de nanossílica.

As Tabelas 2.3 e 2.4 representam os resultados obtidos para os ensaios de compressão e módulo de elasticidade, respectivamente.

Tabela 2.3 - Resistência à compressão obtida para diferentes teores de nanossílica.

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Porcentagem de incremento na resistência à compressão (%)		
	3 Dias	7 Dias	28 Dias	3 Dias	7 Dias	28 Dias
NS = 0%	42,576	57,41	89,91	0	0	0
NS = 2,5%	44,202	59,63	94,34	3,82	3,87	4,93
NS = 5%	45,846	61,85	9,28	7,68	7,73	10,42
NS = 7,5%	47,441	65,12	108,59	11,43	13,43	20,78
NS = 10%	47,617	67,31	112,02	11,84	17,24	24,59

Fonte: (Saloma et al., 2013).

Tabela 2.4 - Módulo de elasticidade obtidos para diferentes teores de nanossílica.

Mistura	Módulo de Elasticidade (MPa)		Porcentagem de incremento no módulo de elasticidade (%)	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
NS = 0%	39701,48	39921,53	0,00	0,00
NS = 2,5%	40837,71	41382,74	2,86	3,66
NS = 5%	41315,98	42318,52	4,07	6,00
NS = 7,5%	42365,23	43612,29	6,71	9,25
NS = 10%	43110,41	44147,65	8,59	10,59

Fonte: (Saloma et al., 2013).

Em um trabalho semelhante ao citado anteriormente, Hussain e Sastry (2014) avaliaram o comportamento mecânico do concreto com sílica ativa e nanossílica, de forma separada, e, foi observado um acréscimo de resistência, quando submetidos à compressão. Nos corpos de prova testados com apenas microssílica foram alcançados incrementos de resistência de até 23,62% de resistência, contudo, foram obtidos valores os quais a resistência apresentava decréscimo quando comparada ao traço inicial. Do mesmo modo, para utilização de nanossílica sozinha foram obtidos valores de até 22,23%. Foi verificado também, que acima de determinados teores, o concreto apresentava uma queda em suas resistências, indicando assim um limiar entre o que convém ou não a ser acrescido ao traço. Dessa forma, segundo o que foi observado nesse estudo, os limiares para os teores de microssílica estão na ordem de

concentrações iguais ou maiores a 10%, e para a nanossílica, valores iguais a 2,5% apresentam queda na resistência à compressão dos corpos de prova. A Tabela 2.5 mostra a resistência à compressão obtida para cada traço estudado, bem como, o ganho percentual em relação ao traço de referência.

Tabela 2. 5 - Resistência à compressão para diferentes teores de micro e nanossílica.

Teor microsílica (%)	Teor nanossílica (%)	Resistência à Compressão (MPa)		% em relação ao traço de referência	% em relação ao traço de referência
		Traço 40 MPa	Traço 50 Mpa		
0	0	49,54	57,04	0,00	0,00
5	0	57,19	61	15,44	6,94
7,5	0	61,24	69,89	23,62	22,53
10	0	48,74	44,58	-1,61	-21,84
15	0	46,22	42,07	-6,70	-26,24
0	1	54,11	62,27	9,22	9,17
0	1,5	55,25	65,79	11,53	15,34
0	2	59,61	69,72	20,33	22,23
0	2,5	47	51,42	-5,13	-9,85
7,5	2	62,25	71,5	25,66	25,35

Fonte: (Hussain e Sastry, 2014).

Hussain e Sastry (2014) também realizaram seu ensaio para o estudo do comportamento do concreto com a adição de micro e nanossílica quando eles são submetidos a esforços de tração. Foi possível notar que existe ganho substancial nos valores obtidos com as adições em comparação ao valor de referência, sendo que, a melhor situação que foi obtida foi quando estavam presentes no traço tanto a micro quanto a nanossílica. Do mesmo modo que para o ensaio à compressão, foram encontrados valores limites, os quais os corpos de prova começaram a perder resistência quando comparado ao traço original, e, assim como na compressão, os valores encontrados foram iguais ou maiores a 10% para a microsílica, e iguais a 2,5% de nanossílica. Tabela 2.6 indica a resistência à tração para os dois traços ensaios, bem como o ganho percentual em relação ao traço de referência.

Tabela 2. 6 - Resistência à tração para diferentes teores de micro e nanossílica.

Teor microssílica (%)	Teor nanossílica (%)	Resistência à Tração (MPa)		% em relação ao traço de referência	% em relação ao traço de referência
		Traço 40 MPa	Traço 50 MPa		
0	0	3,26	3,503	0,00	0,00
5	0	3,84	4	17,79	14,19
7,5	0	3,96	4,12	21,47	17,61
10	0	3,01	3,21	-7,67	-8,36
15	0	3,27	3,38	0,31	-3,51
0	1	3,748	3,981	14,97	13,65
0	1,5	3,819	4	17,15	14,19
0	2	4	4,32	22,70	23,32
0	2,5	3,253	3,68	-0,21	5,05
7,5	2	4,1	4,38	25,77	25,04

Fonte: (Hussain e Sastry, 2014).

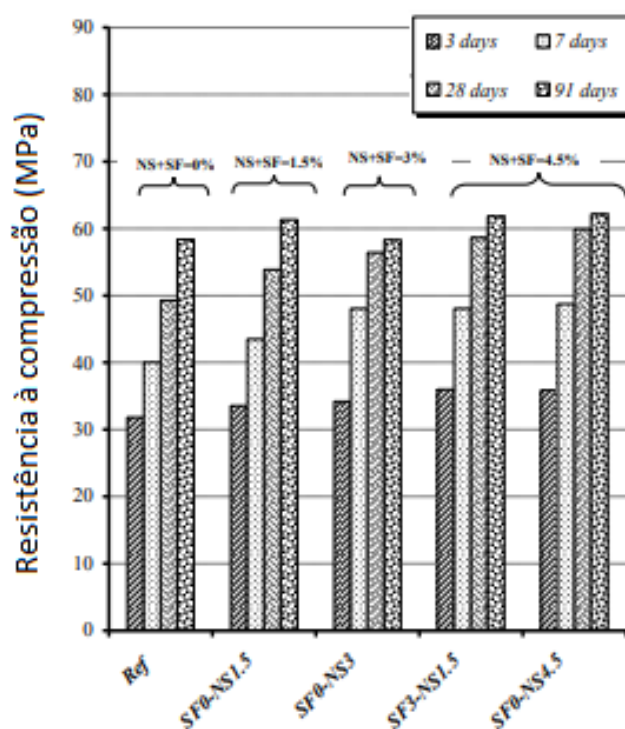
Nili et al. (2010) realizaram experimentos onde substituía parcialmente a massa de cimento pelas porcentagens de 1,5, 3 e 4,5% de nS. A relação água/cimento foi mantida constante no traço em 0,45. Para isso eles obtiveram nos ensaios de resistência à compressão que houve acréscimo na resistência principalmente nas primeiras idades, e também, foi possível notar que o maior ganho obtido foi quando a massa do concreto era substituída por 4,5%. A Tabela 2.7 apresenta os traços do concreto utilizados por Nili et al. (2010), e a Figura 2.4 representa os resultados obtidos no estudo da resistência mecânica.

Tabela 2. 7 - Traços ensaiados.

Número	Mistura	Sílica ativa (%)	nS (%)	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregados finos (kg/m ³)	Agregados graúdos (kg/m ³)	Sílica Ativa (kg/m ³)	nS (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)	Slump (cm)
1	REF	0	0	400	180	811	915	0	0	1,4	7,5
2	SF0-NS1.5	0	1,5	394	174	811	915	0	12	1,68	7,5
3	SF0-NS3	0	3	388	168	811	915	0	24	2,32	7
4	SF0-NS4.5	0	4,5	382	162	811	915	0	36	3	7,5
5	SF3-NS1.5	3	1,5	382	174	811	915	12	12	2,44	7

Fonte: (Nili et al., 2010).

Figura 2.4 - Resultados para resistência à compressão.



Fonte: (Adaptado de Nili et al., 2010).

Khazadi et al. (2010) nos seus estudos, realizaram experimentos com substituição de nS em relação a massa de cimento. Para isso, eles fizeram um único traço com substituição de 1,5% de nS, com relação de água/cimento fixa de 0,45 e *slump* de 30±5mm. Observou-se que

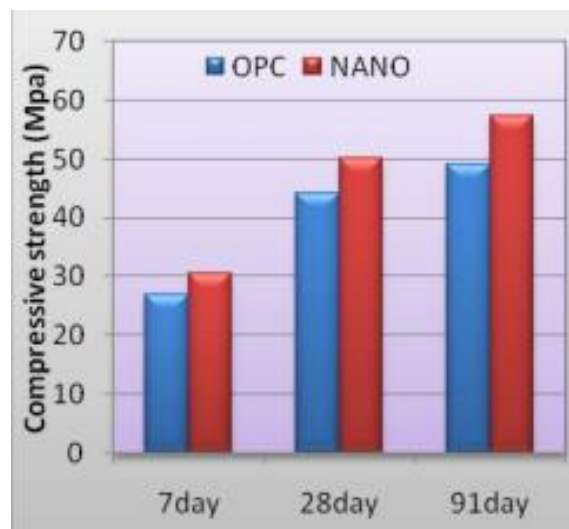
houve ganho na resistência do concreto com substituição, e atribuiu esse fato ao aumento da força de ligação da interface pasta-agregado de cimento por meio do efeito *filler* causado pelas nanopartículas. A Tabela 2.8 mostra os traços utilizados por Khanzadi et al. (2010) em sua pesquisa, e a Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de compressão dos corpos de prova.

Tabela 2. 8 - Traços ensaiados.

Mistura	Cimento(kg/m ³)	Água(kg/m ³)	Areia(kg/m ³)	Agregado graúdo(kg/m ³)	nS (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)	
Referência	OPC	350	187	1068	735	-	-
Nanossílica	NANO	345	148	1053	724	5,25	3,92

Fonte: (Khanzadi et al., 2010).

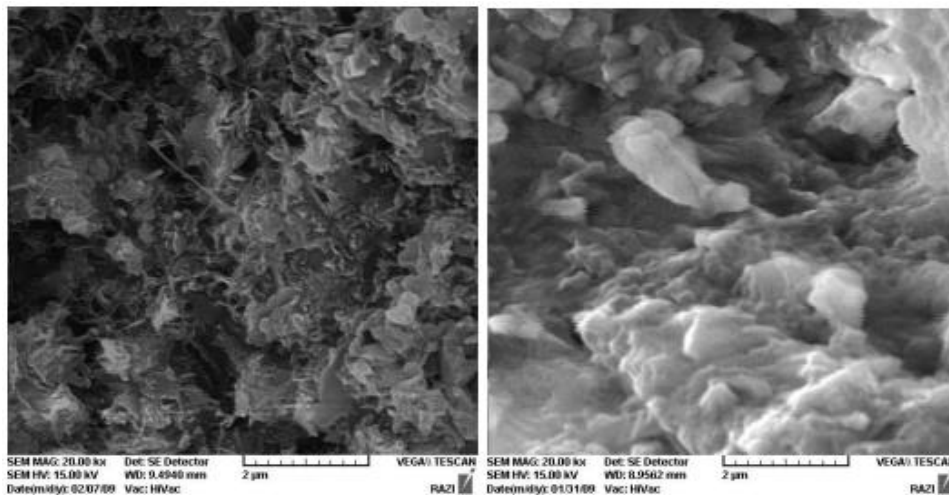
Figura 2.5 - Resultados para resistência à compressão.



Fonte: (Khanzadi et al., 2010).

A Figura 2.6 mostra a imagem do concreto de forma comparativa, em escala manométrica, para melhor entendimento de como a nS atua no concreto. Segundo Khanzadi et al. (2010) é possível notar que a microestrutura do concreto com nS é mais densa e homogênea que o concreto convencional, isso acontece devido a reação pozolânica e efeito nanofiller causado pelas nano partículas de sílica.

Figura 2.6 - Imagem do concreto em escala nanométrica sem e com nS, respectivamente.



Fonte: (Khanzadi et al., 2010).

Garg et al. (2016) realizaram seus estudos estudando a argamassa realizando incrementos de micro e nanossílica em substituição de massa de cimento no traço, onde em seus resultados é possível perceber que houve aumento na resistência à tração e compressão nos corpos de prova. É possível observar nos resultados, que a melhor condição se dá quando no traço está presente tanto a micro quanto a nanossílica, fato esse que pode ser explicado pelo efeito micro e nano *filler*. A Tabela 2.9 apresenta os resultados obtidos de resistência à tração e compressão para os traços ensaiados.

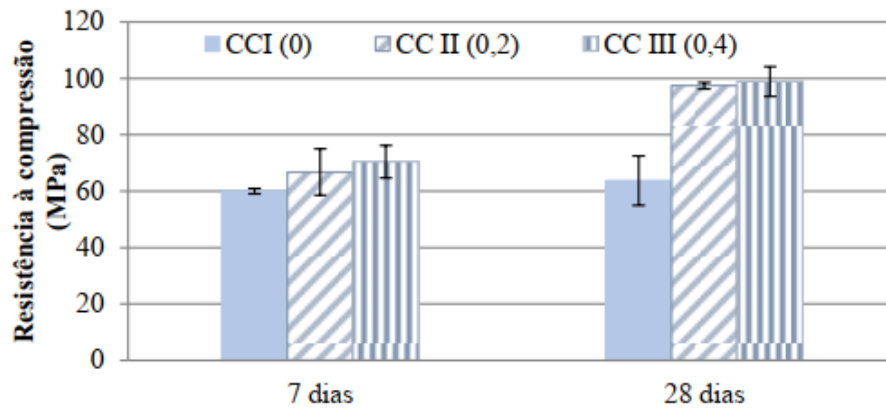
Tabela 2. 9 - Porcentagem no ganho de resistência à tração e compressão para traços com adição de micro e nanossílica.

	Teor microsílica (%)	Teor nanossílica (%)	Tração				Compressão			
			% em relação ao traço de referência				% em relação ao traço de referência			
			28 dias	56 dias	90 dias	180 dias	28 dias	56 dias	90 dias	180 dias
MM1	5	-	7	10	8	11	10	6	5	6
MM2	10	-	10	11	10	13	16	11	15	16
MM3	15	-	12	13	16	18	20	15	17	15
MM4	20	-	11	11	14	15	18	12	12	10
MN1	-	0,5	22	19	20	22	17	10	5	9
MN2	-	0,75	21	20	18	24	21	12	9	9
MN3	-	1	23	22	21	28	24	14	12	11
MN4	-	1,25	21	21	20	25	23	10	8	7
MNM1	5	1	26	30	30	31	36	29	26	29
MNM2	10	1	26	33	33	34	53	39	37	34
MNM3	15	1	27	31	31	33	46	36	38	39
MNM4	20	1	26	31	31	30	42	33	32	30

Fonte: (Garg et al, 2016).

Nogueira et al. (2018) realizaram também seus estudos com relação a argamassa. Foi realizado a substituição de 0,2 e 0,4% de nS dispersa em carboxilato, em substituição da massa de cimento, mantendo consistência de 260 ± 10 mm em todos os traços e relação água cimento variando de 0,27 a 0,38. Em seus resultados, aos 7 dias de cura foram obtidos acréscimo de 11,2% e 17% em relação ao traço de referência, valores para teores de 0,2% e 0,4% respectivamente. Já para o ensaio realizado a 28 dias obteve-se acréscimo de resistência de 52,8% e 55%. A Figura 2.7 apresenta os resultados obtidos no estudo Nogueira et al. (2018).

Figura 2.7 - Resistência à compressão para argamassa.



Fonte: (Nogueira et al., 2018).

Samia et al. (2018) realizaram o estudo analisando a pasta de cimento, onde realizaram substituição da massa de cimento por nS, com substituição de 2, 4, 6 e 8% e variação da relação água/cimento de 0,35 e 0,5. Foi possível observar que houve aumento da resistência para todas as substituições, destacando o aumento de 47,3% no ganho de resistência à compressão nos dois primeiros dias e para um baixo teor de nS e relação água/cimento. A Tabela 2.10 apresenta as quantidades em massa de cimento e nS realizada para cada traço, e a Tabela 2.11 apresenta as resistências obtidas no estudo e o incremento percentual que cada traço teve quando comparado ao de referência.

Tabela 2. 10 - Massa de cimento e nS.

Mistura	Cimento (g)	nS (g)
OPC	100	0
NS2	98	2
NS4	96	4
NS6	94	6
NS8	92	8

Fonte: (Adaptado de Samia et al., 2018).

Tabela 2. 11 - Resistências à compressão e ganho percentual para cada traço.

a/c	Mistura	2 Dias	7 Dias	28 Dias	% 2 Dias	% 7 Dias	% 28 Dias
0,5	OPC	20	37,1	39,6	0,0	0,0	0,0
	NS2	26,2	42,5	51,2	23,7	12,7	22,7
	NS4	25,9	40,4	52	22,8	8,2	23,8
	NS6	32	52,2	60,8	37,5	28,9	34,9
	NS8	35,3	53	62,4	43,3	30,0	36,5
0,35	OPC	24,2	37,1	47,2	0,0	0,0	0,0
	NS2	45,9	64,4	75,7	47,3	42,4	37,6
	NS4	37,3	63,4	75,1	35,1	41,5	37,2
	NS6	36,3	61,7	74,3	33,3	39,9	36,5
	NS8	32,2	56,4	70,9	24,8	34,2	33,4

Fonte: (Adaptado de Samia et al., 2018).

De maneira geral, é possível observar nas pesquisas citadas, que houve aumento nas propriedades mecânicas do concreto quando ele está sujeito ao acréscimo de sílica ativa e nanossílica junto ao seu traço. Vale ressaltar que em todos os estudos, a melhor situação se deu quando ambas adições eram utilizadas no traço, garantindo maior percentual no ganho de resistência.

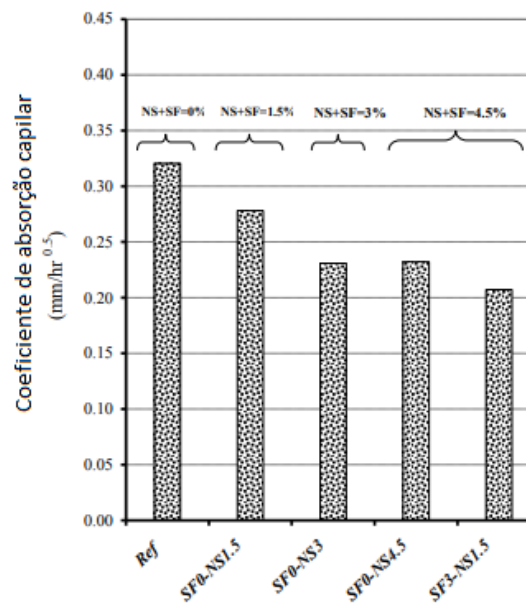
2.10. DURABILIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a durabilidade pode ser definida como a vida útil de um material sob determinadas condições ambientais. A pasta de cimento hidratada é alcalina, dessa forma, a exposição do concreto a ambientes com presença de águas ácidas pode ser prejudicial. Sob essas condições, impermeabilidade e estanqueidade tornam-se fatores determinantes para à durabilidade do concreto.

Khazadi et al. (2010), realizaram um estudo com a utilização de nS em solução aquosa e observou, ao realizar ensaios de absorção de água, absorção capilar e distribuição de testes de íon cloreto que os concretos com substituição de nS tem melhor resistência a permeabilidade do que os concretos normais, isso ocorrendo em pelo fato da microestrutura do concreto com nS ser mais uniforme e densa do que a do concreto de referência. De acordo com Nolli Filho (2015), com os estudos apresentados por Khazadi, ficou evidente que a nS se comporta como *filler* e material pozzolânico.

Nili et al. (2010), realizaram o ensaio para determinação do coeficiente de absorção capilar, utilizando traços com 1,5, 3 e 4,5% de nS em substituição a massa de cimento. Eles observaram que o menor coeficiente encontrado foi para a mistura com 1,5% de nS, o que indica que a incorporação da nS é uma maneira eficiente para a diminuição da permeabilidade no concreto. A Figura 2.4 mostra os resultados obtidos para o concreto de referência e concretos com adição de nS elaborados por Nili (2010).

Figura 2.4 – Resultados coeficiente de absorção capilar para concretos com adição de nS.



Fonte: (Adaptado de Nili, 2010).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem como intuito apresentar os materiais que foram utilizados na pesquisa bem como os ensaios de caracterização para esses materiais e ensaios de resistência à compressão e absorção dos corpos de prova de cada traço. Os ensaios de caracterização dos materiais e o ensaio de absorção de água foram realizados e analisados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (LEM/UnB). A moldagem e os ensaios de resistência foram realizados na central dosadora de concreto da empresa parceira, localizada na cidade de Ceilândia-DF.

3.1. VARIÁVEIS

As variáveis propostas para a produção deste trabalho serão descritas a seguir.

3.1.1. Variáveis Dependentes

As variáveis dependentes (ou de resposta), aquelas que possibilitam quantificar características e propriedades, relacionando-as com a qualidade do material final obtido, que foram adotadas para a produção deste trabalho são: quantidade de aditivo polifuncional e superplastificante para que determinado abatimento seja alcançado, resistência à compressão no estado endurecido, em MPa, para avaliar a variação de resistência em função do teor de substituição na mistura e a de absorção de água para avaliar o grau de refinamento dos poros proporcionado pelo efeito físico da adição mineral. Portanto, de maneira sintética, as variáveis dependentes serão:

- Teor de Aditivo Polifuncional para concretos convencionais e teor de Superplastificante para concretos de alto desempenho;
- Resistência à compressão a 1, 3, 7, 28 e 91 dias;
- Absorção de água aos 28 dias;

3.1.2. Variáveis Independentes

As variáveis independentes (ou fatores controláveis) são aquelas que podem exercer influências sobre as variáveis dependentes. Para os traços de concreto que foram estudados, o controle foi feito através das variáveis de teor de substituição e idade dos ensaios. A matriz experimental é mostrada na Tabela 3.1 para ajudar no entendimento.

Tabela 3. 1 - Matriz experimental da pesquisa.

TRAÇO	Variável Independente	Variáveis de Resposta			
	Teor de NS (%)	Teor de Aditivo	Absorção de água	Resistência à compressão	
CC	REF	0	Produção do Concreto	28 dias	1, 3,7, 28 e 91 dias
	NS1	1			
	NS1,5	1,5			
	NS2	2			
CAD	REF	0			
	NS1	1			
	NS1,5	1,5			
	NS2	2			

Fonte: Autoria Própria.

3.2. MATERIAIS

Os materiais foram selecionados para que o produto final tivesse a maior similaridade possível com o concreto comercialmente produzido e comercializado pela empresa parceira da pesquisa. Os materiais utilizados na pesquisa são apresentados a seguir:

Figura 3. 1 – Materiais utilizados na pesquisa.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.1. Cimento

A pesquisa utilizou-se de Cimento Portland composto com material carbonático, CPII-F-40, conforme designado pela NBR 16697:2018 Cimento Portland - Requisitos. O cimento utilizado foi disponibilizado pela própria parceira do projeto.

Os ensaios de caracterização física e mecânica do cimento foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (LEM/UnB). Os resultados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Caracterização física e mecânica do cimento utilizado.

Características e Propriedades	Unidade	Resultados	CP II F 40	Norma
			Limites NBR 16697: 2018	
Módulo de Finura	(%)	2,32	≤10,0	NBR 11579:2013
Tempo de início de pega	min	135	≥60	NBR NM 65:2002
Tempo de fim de pega	min	205	≤600	NBR NM 65:2002
Água de consistência - Pasta Normal	(%)	31,46	-	NBR NM 43:2002
Resistência à compressão	1 dia	MPa	26,65	NBR 7215:2019
	3 dias	MPa	33,34	
	7 dias	MPa	38,62	
	28 dias	MPa	50,83	
			≥15,0	
			≥25,0	
			≥40,0	

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos respectivos resultados, podemos afirmar que o cimento CII-F-40 está em acordo com os requisitos normativos brasileiros, atendendo, assim, os critérios mínimos necessários para utilização na pesquisa.

Figura 3. 2 – Corpos de prova do ensaio de resistência à compressão da caracterização do cimento.



Fonte: Autoria Própria

Figura 3.3 - Ensaio de caracterização do cimento.



Fonte: Autoria Própria

3.2.2. Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados na pesquisa são de origem calcária proveniente da região de Sobradinho – DF. Duas graduações de agregados foram utilizadas, a brita 0 e a brita 1. O intuito foi de conseguir uma distribuição granulométrica mais contínua. Os ensaios de composição granulométrica (NBR NM 248:2003) e massa específica (NBR NM 52:2009) foram realizados no laboratório da empresa parceira da pesquisa.

Nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.

Tabela 3. 3 - Composição granulométrica dos agregados graúdos.

Brita 0			
Peneira (mm)	% Passante	% Retida	% Retida Acumulada
37,50	100	0	0
31,50	100	0	0
25,00	100	0	0
19,00	100	0	0
12,50	100	0	0
9,50	97	3	3
6,30	60	37	40
4,75	31	29	69
2,36	3	28	97
1,18	0	3	100
0,60	0	0	100
0,30	0	0	100
0,15	0	0	100
Fundo	0	0	100

Brita 1			
Peneira (mm)	% Passante	% Retida	% Retida Acumulada
37,50	100	0	0
31,50	100	0	0
25,00	100	0	0
19,00	100	0	0
12,50	64	36	36
9,50	34	30	66
6,30	3	31	97
4,75	1	2	99
2,36	0	1	100
1,18	0	0	100
0,60	0	0	100
0,30	0	0	100
0,15	0	0	100
Fundo	0	0	100

Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 3. 4 - Características dos agregados graúdos.

Brita 0	
Módulo de finura	5,65
Dimensão máxima característica (mm)	9,5
Massa específica real (g/cm ³)	2,71

Brita 1	
Módulo de finura	6,64
Dimensão máxima característica (mm)	19
Massa específica real (g/cm ³)	2,76

Fonte: Aatoria Própria.

Figura 3. 4 - Peneiras para os ensaios de agregados.



Fonte: Aatoria Própria.

3.2.3. Agregado Miúdo

Para a realização da pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados miúdos, um artificial e um natural. O agregado artificial também foi fornecido pela empresa parceira e possui a mesma origem do agregado graúdo. Por sua vez, o agregado natural foi uma areia lavada rosa de origem quartzosa, extraída da região de Monte Alto no município de Padre Bernardo - GO.

Além dos ensaios de composição granulométrica e massa específica, foram realizados também os ensaios de teor de argila (NBR 7218), material pulverulento (NBR NM 46) e impurezas orgânicas (NBR NM 49). Assim como nos agregados graúdos, os ensaios foram realizados no laboratório da empresa parceira do projeto.

Nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos.

Tabela 3. 5 - Composição granulométrica dos agregados miúdos.

Areia de Quartzo			
Peneira (mm)	% Passante	% Retida	% Retida Acumulada
37,50	100	0	0
31,50	100	0	0
25,00	100	0	0
19,00	100	0	0
12,50	100	0	0
9,50	100	0	0
6,30	100	0	0
4,75	99	1	1
2,36	93	6	7
1,18	85	8	15
0,60	81	4	19
0,30	65	16	35
0,15	15	50	85
Fundo	0	15	100

Areia Artificial Mix			
Peneira (mm)	% Passante	% Retida	% Retida Acumulada
37,50	100	0	0
31,50	100	0	0
25,00	100	0	0
19,00	100	0	0
12,50	100	0	0
9,50	100	0	0
6,30	100	0	0
4,75	100	0	0
2,36	89	11	11
1,18	62	27	38
0,60	29	33	71
0,30	11	18	89
0,15	4	7	96
Fundo	1	3	99

Fonte: Autoria Própria.

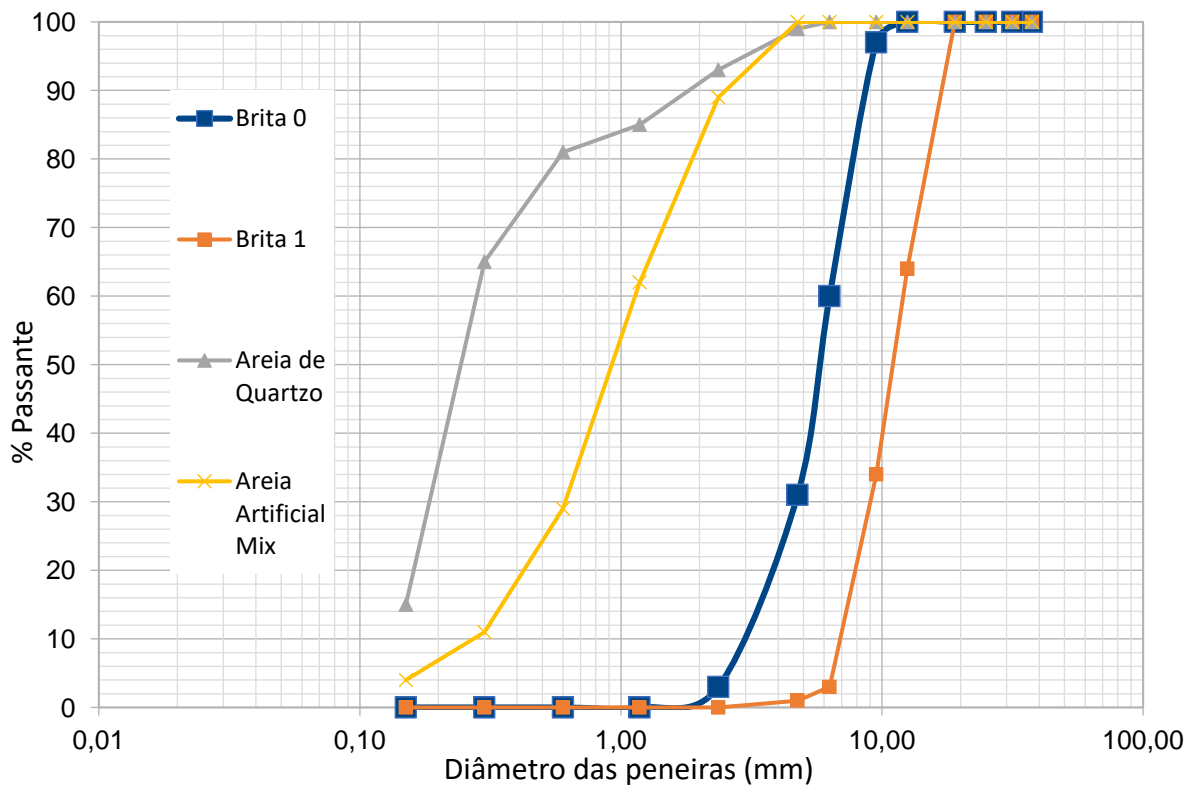
Tabela 3. 6 - Características dos agregados miúdos.

Areia de Quartzo		Areia Artificial Mix	
Módulo de finura	1,60	Módulo de finura	3,05
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Massa específica real (g/cm ³)	2,65	Massa específica real (g/cm ³)	2,70
Teor de argila (%)	0,03	Teor de argila (%)	0,00
Material pulverulento (%)	4,00	Material pulverulento (%)	0,80
Impurezas orgânicas (ppm)	0,00	Impurezas orgânicas (ppm)	< 200

Fonte: Autoria Própria.

A figura 3.1, apresenta as curvas granulométricas de todos os agregados. A utilização desses agregados de forma conjunta foi pensada para que se pudesse obter uma granulometria mais contínua e bem graduada, apresentando todas as frações na curva granulométrica.

Figura 3. 5 - Curva granulométrica dos agregados.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.4. Nanossílica

A adição mineral utilizada, foi a sílica coloidal amorfa ultrafina, ou simplesmente nanossílica disposta em solução aquosa. A nanossílica utilizada foi produzida na região do Rio de Janeiro, fabricada pela *AkzoNobel*, com nome comercial de Levasil CB30. De acordo com o fabricante, o Levasil CB30 é uma dispersão aquosa alcalina de sílica coloidal que é aproximadamente 30% de sólidos por peso.

Para a caracterização da nanossílica não foram realizados ensaios e as principais características do material são apresentadas na Tabela 3.7, elaborada a partir dos dados fornecidos pelo próprio fornecedor.

Tabela 3. 7 - Características da nanossílica.

Propriedades Típicas	Valor
Estado físico	Líquido (Solução Aquosa)
Cor	Pouco turvo
Tamanho das partículas	≈ 5nm
Teor de Sílica (%)	30
Área de Superfície Específica (m ² /g)	305
pH	≈ 10,5
Densidade (g/cm ³)	1,2
Teor de Na ₂ O (%)	0,55

Fonte: *AkzoNobel* (2019).

3.2.5. Aditivos

Dois aditivos foram utilizados nessa pesquisa, aditivo do tipo polifuncional e superplastificante. O aditivo polifuncional é o TEC-MULT 829 SPX e o superplastificante é o ADVA CAST 585, ambos produtos da empresa GCP Applied Technologies e em conformidade com o exposto na NBR 11768 Aditivos químicos para concretos - Requisitos.

Não foram executados ensaios para a caracterização dos aditivos. as principais características são apresentadas na Tabela 3.8 com os dados divulgados pelo fornecedor.

Tabela 3. 8 - Características dos aditivos.

Aditivo	Descrição	Aspecto/Cor	Dosagem Recomendada (% SPC)	Massa Específica g/cm³
TEC-MULT 829 SPX	Dispersante de alta eficácia que resulta em notável melhoria de resistência à compressão final. Prolongada manutenção do abatimento do concreto mesmo a altas temperaturas.	Líquido marrom escuro	0,5 a 1,2%	1,16
ADVA CAST 585	Proporciona ótima redução da demanda de água, ótimas resistências iniciais e excelente manutenção de abatimento.	Líquido alaranjado.	0,4 a 1,0%	1,06

Fonte: *GCP Applied Technologies* (2019).

3.2.6. Água

A água que utilizada para todos os procedimentos dessa pesquisa, foi proveniente da rede de abastecimento público, fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), sem a necessidade de realização de nenhum tratamento adicional.

3.3. PRODUÇÃO DO CONCRETO

A produção do concreto para a pesquisa seguiu dois traços fornecidos pela empresa parceira do projeto, de forma a ter traços de referência que estão presentes no mercado com facilidade de obtenção. Os traços com o detalhamento da quantidade de cada material utilizado na produção dos concretos são apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3. 9 - Composição dos traços.

	TRAÇO	Cimento (kg)	Areia Natural (kg)	Areia Artificial (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (L)	Nanossílica (kg)	Solução Levasil CB30 (kg)	Aditivo Polifuncional (L)	Aditivo Superplastificante (L)
CC	REF	280,0	431,0	431,0	199,0	795,0	192,0	-	-	1,9	-
	NS1	277,2	431,0	431,0	199,0	795,0	185,5	2,8	9,3	X	-
	NS1,5	275,8	431,0	431,0	199,0	795,0	182,2	4,2	14,0	X	-
	NS2	274,4	431,0	431,0	199,0	795,0	178,9	5,6	18,7	X	-
CAD	REF	350,0	417,0	417,0	291,0	678,0	188,0	-	-	1,8	1,3
	NS1	346,5	417,0	417,0	291,0	678,0	179,8	3,5	11,7	1,8	Y
	NS1,5	344,8	417,0	417,0	291,0	678,0	175,8	5,3	17,5	1,8	Y
	NS2	343,0	417,0	417,0	291,0	678,0	171,7	7,0	23,3	1,8	Y

X: Valor a ser obtido de Polifuncional para chegar ao mesmo abatimento do traço de referência ($10 \pm 2\text{cm}$)
Y: Valor a ser obtido de Superplastificante para chegar ao mesmo abatimento do traço de referência ($10 \pm 2\text{cm}$)

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 3.9 não traz valores do uso de aditivo para as composições de substituição com nanossílica, mas foi feito uso de aditivo polifuncional nos traços de concreto convencional com nanossílica e aditivo superplastificante nos traços de concreto de alta resistência (CAD) com nanossílica. Suas quantidades foram definidas por meio de ensaio de abatimento a ser descrito em uma seção futura deste trabalho, com o objetivo de se obter o mesmo abatimento do concreto de referência ($10 \pm 2\text{cm}$).

A quantidade de água total permanece a mesma em todos os traços, dessa forma foi necessário corrigir a água adicionada de modo a computar a água já presente na solução de Levasil CB30, uma vez que o Levasil é composto por 70% de água e 30% de nS (em massa). A densidade da nS presente no Levasil CB30 é $3,3 \text{ g/cm}^3$, já a do cimento que utilizado é $3,2 \text{ g/cm}^3$. Essa pequena diferença não resulta em uma variação significativa quanto ao volume

resultante do traço (aproximadamente 30mL em 1m³), não se fazendo necessária uma correção volumétrica dos traços.

3.3.1. MISTURA DOS COMPONENTES

A mistura dos componentes para a confecção dos concretos seguiu as etapas apresentadas a seguir, com o intuito de se obter um material mais perfeitamente homogeneizado e padronizado para que diferentes misturas não interfiram nos resultados obtidos dessa pesquisa.

- A primeira etapa foi de preparação da mistura de água de amassamento definida para aquele traço e a solução de nanossílica. Com essa mistura preparada, os agregados graúdos foram colocados na betoneira e misturados por 60 segundos com adição progressiva de um terço da mistura de água e nanossílica.
- A próxima etapa foi com a adição dos materiais secos (cimento, areia natural e areia artificial). Após essa adição, foi adicionado o restante (dois terços) da mistura de nanossílica e água aos materiais na betoneira ao longo de 60 segundos e continuou com a mistura até que foi possível identificar uma certa agregação dos componentes do concreto na forma de pelotas de material cimentício
- Na última etapa ocorreu a adição do aditivo polifuncional ao concreto e mistura para homogeneização por 90 segundos.
- No preparo dos traços de CAD, uma etapa adicional foi necessária. Após a homogeneização do concreto com o aditivo polifuncional e a verificação do abatimento inicial, foi adicionado o aditivo superplastificante e misturado também por 90 segundos.

Figura 3. 6 - Mistura dos materiais.



Fonte: Autoria Própria.

3.3.2. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova seguiu a norma ABNT NBR 5738: 2016 Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Foram 128 corpos de prova moldados ao longo de todo o projeto, sendo 120 para a realização do ensaio de compressão, e 8 para o ensaio de absorção de água. Os corpos de prova foram de formato cilíndricos, com dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura e desmoldados 24h após a moldagem.

Dos corpos de prova citados acima, foram três corpos de prova para cada idade de ensaio de resistência à compressão provenientes de cada um dos oito traços e dois corpos de prova de cada traço para o ensaio de absorção de água. A Tabela 3.10 a seguir ratifica essa distribuição.

Tabela 3. 10 - Corpos de prova para cada ensaio.

		Resistência à compressão					Absorção de água
		TRAÇO	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CC	REF	3	3	3	3	3	2
	NS1	3	3	3	3	3	2
	NS1,5	3	3	3	3	3	2
	NS2	3	3	3	3	3	2
CAD	REF	3	3	3	3	3	2
	NS1	3	3	3	3	3	2
	NS1,5	3	3	3	3	3	2
	NS2	3	3	3	3	3	2

Fonte: Autoria Própria.

Figura 3. 7 - Corpos de prova nas formas após moldagem.



Fonte: Autoria Própria

Figura 3. 8 - Corpos de prova moldados.



Fonte: Autoria Própria

3.3.3. CURA

A cura dos corpos de prova seguiu o que é estabelecido na norma ABNT NBR 5738: 2016 Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Nas primeiras 24h após a moldagem, os corpos de prova foram armazenados em local onde não havia vibrações. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados em tanques de cura até chegarem na idade estipulada para os ensaios.

O tanque de cura é uma estrutura com água potável não corrente saturada com cal onde os corpos de prova são dispostos de maneira a ficarem totalmente submersos na solução durante o período de cura.

3.4. ENSAIOS

Os ensaios para verificação do comportamento físico e mecânico dos concretos com adição de nanossílica, serão apresentados na Tabela 3.11:

Tabela 3. 11 - Ensaios físicos e mecânicos realizados.

Ensaios Físicos e Mecânicos	Normas
Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone	Norma MERCOSUL NM 67: 1996
Ensaio de Resistência à Compressão	NBR 5739: 2018
Ensaio de Absorção de Água	NBR 9778: 2005

Fonte: Aatoria Própria.

3.4.1. Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone

O ensaio de abatimento de tronco de cone seguiu a Norma Mercosul NM 67 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, de 1996. A amostragem do ensaio foi determinada pela NBR NM 33 Concreto – Amostragem de concreto fresco, onde ela indica que a amostra para os ensaios de concreto deverá ser obtida aleatoriamente, logo após terem sido completadas as adições e homogeneização do concreto. Após a retirada do molde, foi medido o abatimento do concreto, determinando a diferença de altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova, que corresponde à altura média do corpo de prova desmoldado. Esse ensaio foi realizado de forma iterativa para a determinação do teor de aditivo polifuncional, no caso do traço de concreto convencional, e aditivo superplastificante, no caso do traço de CAD, para a obtenção do abatimento igual ao encontrado para os traços de referência.

3.4.2. Ensaio de Resistência à Compressão

Para a realização desse ensaio, os corpos de prova que foram ensaiados utilizaram discos de neoprene de forma a se obter uma superfície uniforme e sem irregularidades para que não haja nenhum prejuízo quanto a consistência dos resultados apresentados na hora do rompimento na prensa. Para fins de cálculo, foram medidos, com o auxílio de um paquímetro, os tamanhos de todos os corpos de prova que foram ensaiados, de modo a serem obtidos os resultados de resistência de cada unidade.

O ensaio de resistência à compressão seguiu a NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, onde os corpos de provas foram colocados na prensa de classe 1, para ensaios em laboratórios. A prensa seguiu as obrigações impostas pela NBR ISO 7500-1 – Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial – Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração e verificação do sistema de medição de força. O corpo de prova cilíndrico foi colocado na prensa de forma centrada ao eixo, de modo que o carregamento esteja centralizado no corpo de prova. Como cada traço utilizado apresenta três corpos de prova, foi realizada a média aritmética, de modo a obtermos um único valor para cada traço, e, assim, realizarmos as comparações cabíveis.

Figura 3. 9 - Prensa para ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3. 10 - Corpos de prova rompidos após o ensaio.



Fonte: Autoria Própria.

3.4.3. Ensaio de Absorção de Água

O ensaio de absorção de água seguiu a NBR 9778:2005 - Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, de 2009. Para esse ensaio, foram utilizados dois corpos de prova para cada traço na idade de 28 dias.

3.5. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DA nS NO PROCESSO PRODUTIVO

Para a avaliação da viabilidade técnica e econômica, foi realizado o estudo do processo produtivo do concreto com substituição de parte do cimento por nanossílica, analisando as quantidades necessárias de adição de aditivo polifuncional (em concretos convencionais) e superplastificante (em CAD) para se obter o abatimento desejado. Desse modo, foram comparados os custos de produção de concreto de referência em relação aos concretos com nanossílica, avaliando assim, se o custo benefício na elaboração de traços com MCS é viável para o sistema produtivo da empresa parceira no projeto e, também, foi realizada a comparação com outras soluções.

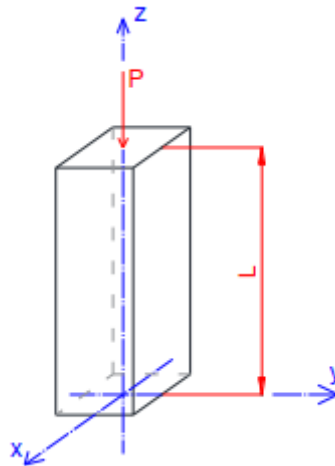
Outra parte dessa avaliação de viabilidade foi a análise do processo produtivo industrial da empresa parceira de modo a podermos indicar a melhor maneira que a nS pode ser inserida ao processo de fabricação de seus concretos. Essa análise buscou uma forma de implantação com a menor mudança possível no processo já executado pela empresa.

Para complementar a avaliação, foi elaborada uma comparação do impacto da substituição da nS na construção de um pilar, com carga centrada, com resistência aos 28 dias, processo semelhante ao utilizado por Nollli Filho (2015). Para as comparações foram utilizados os preços dos materiais para a confecção do concreto convencional e do concreto de alto desempenho cotados para a região de Brasília (DF) utilizando o SINAPI do mês de setembro de 2019. Vale ressaltar que para essa metodologia de pilar fictício utilizada, foram desconsideradas as armaduras do pilar.

Com o viés de uma análise mais voltada para a empresa parceira, foram realizados os cálculos para do custo de produção de concreto para cada MPa em relação a resistência média obtida para os corpos de prova aos 28 dias.

Para o cálculo do pilar padrão, foram fixados os valores de carregamento no pilar, este fixado no centro da seção, bem como a altura, de modo a termos como variável de comparação a seção transversal do pilar. A figura 3.2 representa o esquema do pilar adotado.

Figura 3. 11 - Representação esquemática do pilar.



Fonte: Nolli Filho (2015).

Para a obtenção da tensão de compressão foram aplicados fatores de correção da resistência de modo a minorar a resistência do concreto, indo a favor da segurança. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2016) esses fatores de correção ocorrem devido a três fatores:

- a) O ensaio de resistência é feito em corpos de prova cilíndricos e existe atrito entre os pratos da prensa e os corpos de prova. Esse atrito pode impedir os corpos de prova de se deformarem horizontalmente, aumentando artificialmente a resistência do concreto;
- b) O concreto tem uma resistência maior para as cargas aplicadas em um pequeno intervalo de tempo, o que ocorre no ensaio de resistência à compressão. Na realidade, à medida que o tempo da aplicação de carga aumenta a resistência do concreto diminui (Efeito Rüschi);
- c) A resistência do concreto aumenta com a idade;

Portanto, as equações consideradas, foram:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

$$\sigma_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \text{ (Para concretos Classe I)}$$

$$\sigma_{cd} = 0,90 \cdot f_{cd} \text{ (Para concretos Classe II)}$$

Onde: f_{cd} : Resistência de projeto do concreto (MPa)

f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão (MPa);

σ_{cd} : Tensão de compressão (MPa);

Para o cálculo das áreas da seção transversal, será considerada a equação:

$$\sigma_{cd} = \frac{P}{A}$$

Onde: P: Carga aplicada no pilar (kN);

A: Área da seção transversal do pilar (cm²);

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios descritos na seção anterior, bem como a discussão dos resultados. Desta forma, serão apresentados os dados obtidos para o concreto no estado fresco, ensaio de compressão dos corpos de prova e o ensaio de absorção de água.

4.1. ESTADO FRESCO

A obtenção dos resultados do estado fresco é baseada pela quantidade de aditivo que foi necessário adicionar para que o traço obtivesse o abatimento adotado como base. Dessa forma, foi necessário ir adicionando material enquanto o traço era rodado na betoneira. Para os traços de referência, foram apresentados no capítulo anterior cada teor de aditivo adicionado, de modo que fossem alcançados os abatimentos estabelecidos pela concreteira parceira.

Sendo assim, foi necessária uma adequação no incremento de uso de polifuncional e/ou superplastificante de modo que fossem obtidos os mesmos abatimentos utilizados pela concreteira parceira para a elaboração do traço de referência, sendo esse valor de 10 ± 2 cm. A Tabela 4.1 apresenta as percentagens incrementadas de polifuncional e superplastificante em relação a massa de aglomerante que foram necessários para cada traço atingir o abatimento desejado.

Tabela 4. 1 - Aditivo incrementado em cada traço em relação a massa de aglomerante.

		Abatimento Final (mm)	Polifuncional	Superplastificante
CC	Ref.	110	-	-
	NS1	110	0,10%	-
	NS1,5	100	0,20%	-
	NS2	100	0,30%	-
CAD	Ref.	120	-	-
	NS1	125	-	0,42%
	NS1,5	115	0,01%	0,50%
	NS2	115	0,09%	0,72%

Fonte: Autoria Própria.

Com os dados apresentados na Tabela 4.1, pode-se dizer que o aumento da nS no traço torna o concreto menos trabalhável tornando o abatimento menor. Dessa forma, tanto para os concretos convencionais, quanto para os concretos de alto desempenho, existiu uma maior demanda de ambos aditivos para que fossem alcançados os abatimentos desejados em relação ao que obtivemos para os traços de referência. Uma análise importante a ser realizada, é em relação a elevada demanda de superplastificante necessário para atingir o abatimento, aumentando seu volume no traço. Ratificando o que foi obtido no estudo, Nili et al. (2010) obteve resultados semelhantes ao necessitar uma quantidade maior de superplastificante à medida que era incrementada nS em seus traços.

De acordo com Moraes (2012), no momento em que a nS é colocada na mistura e incorporada, ela aumenta a demanda de água no sistema pois a nS aumenta o empacotamento das partículas. Desse modo, como a quantidade de água no traço foi mantida fixa, houve uma maior necessidade de aditivos para os concretos convencionais e de alto desempenho em função do aumento do teor de nS, para que obtivéssemos o abatimento desejado.

Dessa forma, com as modificações necessárias para se alcançar o abatimento desejado, foi possível elaborar uma nova tabela de composição dos traços. A Tabela 4.2 apresenta os valores em massa ou volume para cada componente utilizado para cada traço realizado no estudo.

Tabela 4. 2 – Composição corrigidas dos traços para produção de 1 m³ de concreto.

TRAÇO	Cimento (kg)	Areia Natural (kg)	Areia Artificial (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (L)	Nanossílica (kg)	Solução Levasil CB30 (kg)	Aditivo Polifuncional (L)	Aditivo Superplastificante (L)
CCREF	280	431	431	199	795	192	-	-	1,9	-
CCNS1	277,2	431	431	199	795	185,5	2,8	9,3	2,2	-
CCNS1,5	275,8	431	431	199	795	182,2	4,2	14	2,4	-
CCNS2	274,4	431	431	199	795	178,9	5,6	18,7	2,7	-
CADREF	350	417	417	291	678	188	-	-	1,8	0,6
CADNS1	346,5	417	417	291	678	179,8	3,5	11,7	1,8	2,0
CADNS1,5	344,8	417	417	291	678	175,8	5,3	17,5	1,8	2,3
CADNS2	343	417	417	291	678	171,7	7	23,3	2,1	3,1

Fonte: Autoria Própria.

Figura 4. 1 – Execução do ensaio de abatimento.



Fonte: Autoria Própria.

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para o estudo da resistência à compressão dos corpos de prova, foram ensaiados 120 corpos de prova, sendo esses rompidos nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias.

4.2.1. Concretos Convencionais

A tabela do Apêndice C apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão de cada corpo de prova individualmente, a média de cada idade e o percentual de cada traço e idade em relação ao traço de referência para os traços feitos com o concreto convencional.

A tabela 4.3 apresenta o resumo das resistências médias obtidas para os ensaios dos corpos de provas.

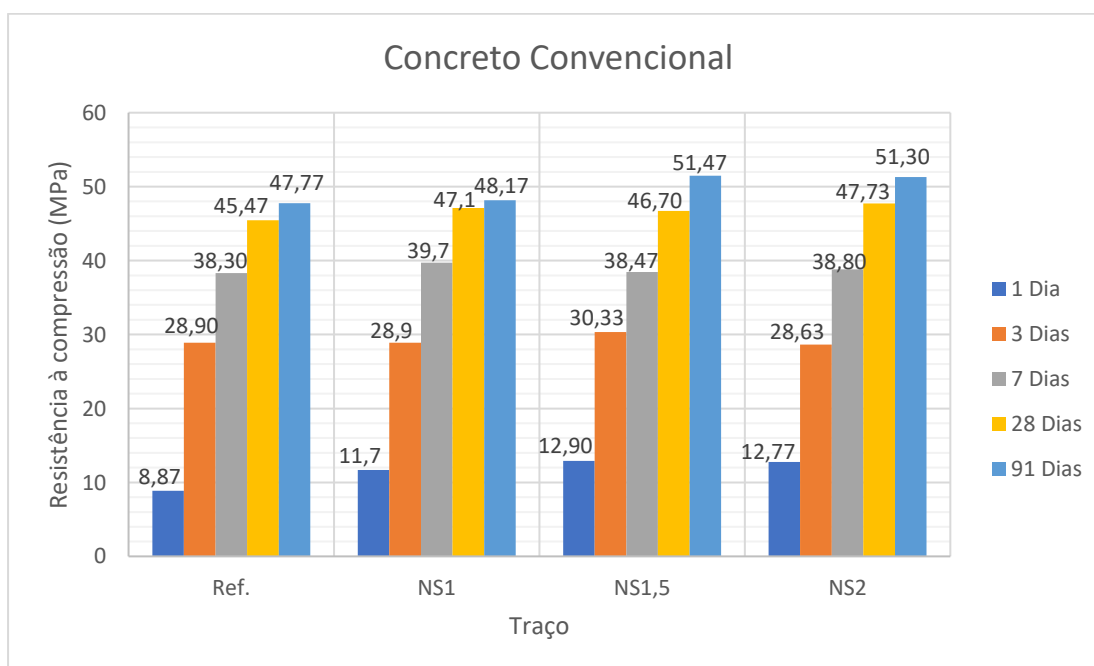
Tabela 4. 3 – Resistência média aos 28 dias dos concretos convencionais.

Concreto	Traço	Resistência Média (MPa)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Convencional	Ref	8,87	28,90	38,30	45,47	47,77
	NS1	11,70	28,90	39,70	47,10	48,17
	NS1,5	12,90	30,33	38,48	46,70	51,47
	NS2	12,77	28,63	38,80	48,73	51,30

Fonte: Autoria Própria

A seguir, a Figura 4.2 apresenta os resultados de resistência do concreto convencional para todas as quantidades de nS que foram acrescentadas aos traços.

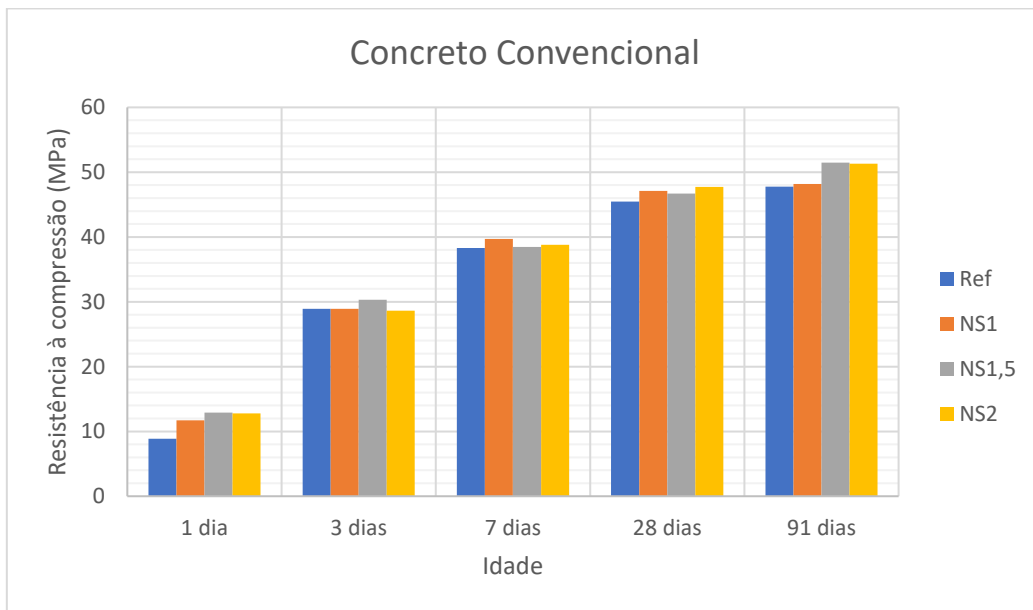
Figura 4. 2 - Resistências à compressão dos concretos convencionais separando por traços.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.3 apresenta os resultados em relação ao dia da ruptura, de modo a tornar mais visual e facilitar a comparação dos traços.

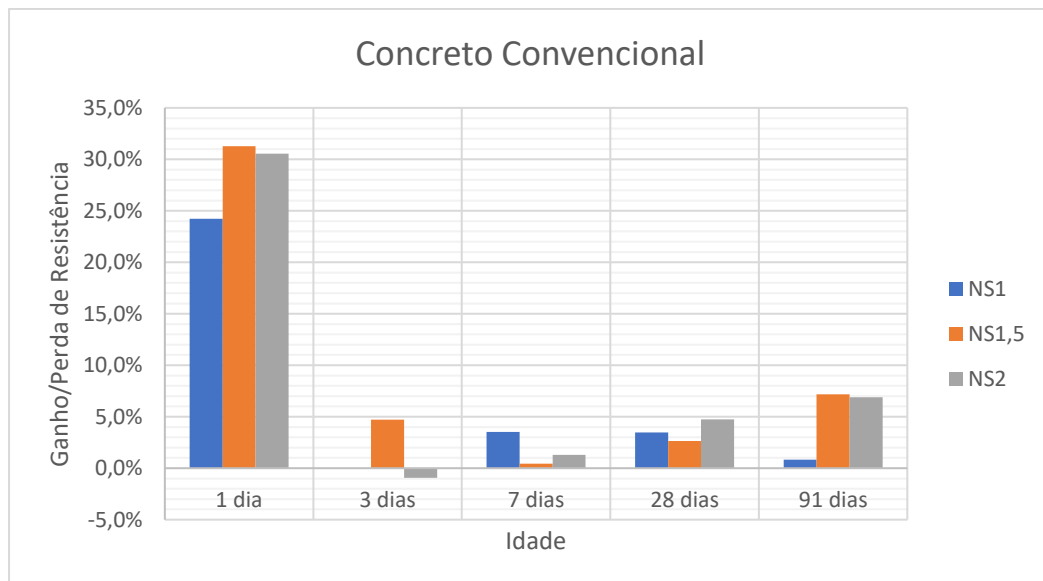
Figura 4. 3 - Resistências à compressão dos concretos convencionais separando por idades.



Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 4.4 apresenta para cada idade o percentual que se obteve em relação a média dos 3 corpos de prova de cada idade, comparando com os resultados obtidos no traço de referência.

Figura 4. 4 - Percentual de cada traço e idade em relação ao traço de referência de concreto convencional.



Fonte: Autoria Própria.

Avaliando os resultados obtidos, percebe-se, como já mostrados nos estudos citados no capítulo 2, que a adição de nS no concreto convencional apresenta aumento da resistência à compressão nos primeiros dias. Esse fato, do ganho de resistência à compressão nas idades iniciais da cura do concreto apareceu também em trabalhos de Nili et al. (2010) e Saloma et al.(2013).

Pela Figura 4.4 é possível perceber que houve uma tendência de existir um acréscimo da resistência para a idade de 1 dia, depois dessa idade os valores caíram e se estabilizaram próximos aos dos concretos de resistência, existindo assim uma nova tendência de acréscimo para as idades maiores.

Em seus estudos, Varghese et al. (2018) chegaram à conclusão de que os concretos com adição de nS atingem maiores resistências nas idades iniciais. Esse fato é justificado pela característica que a nS possui que, por ser um material pozzolânico, é capaz de reagir e consumir o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ resultante da hidratação do cimento. Segundo esse estudo, foi possível estimar que 5 g de adição de nS podem consumir 50% do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido por 100g de cimento. Outra justificativa dada nesse estudo se trata do efeito *filler*, onde ocorre o aumento da densidade de empacotamento por meio do preenchimento dos poros de menor tamanho, melhorando assim a microestrutura do concreto. Esse estudo comenta também que ocorre o efeito de nucleação por meio das partículas de nS. Dessa forma, em consonância com o que foi apresentado por Varghese et al. (2018), para a idade mínima ensaiada de 1 dia, obteve-se elevados valores no ganho de resistência à compressão.

A nS é uma adição mineral extremamente fina, o que gera uma alta superfície específica. Essa grande área superficial permite um maior contato entre as partículas de SiO_2 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, acelerando drasticamente a reação pozzolânica e aumentando a formação de C-S-H principalmente nas primeiras idades do concreto. Esse fato ratifica o entendimento do porquê todos os traços experimentados (nS1, nS1,5 e nS2) apresentaram aumento na resistência para a idade de 1 dia.

De acordo com Aleen, Heikal e Morsi (2014), em estudo realizado para pasta de cimento e argamassa, foi possível observar o aumento da resistência à compressão com o tempo de cura, devido à hidratação e formação contínua de silicato de cálcio (C-S-H) e aluminossilicatos. Esses dois componentes são os principais responsáveis pelo aumento da

resistência à compressão, pois os produtos da reação se acumulam nos vazios do concreto, fazendo com que a estrutura seja mais fechada.

Como era esperado, há uma grande redução no ganho percentual de resistência dos corpos de prova à medida que a idade do rompimento aumenta. Entretanto, para os dados coletados no rompimento de 28 dias, houve um acréscimo quando comparado a outros estudos. De acordo com Senff (2009) o concreto ganha resistência nas primeiras idades devido a hidratação do cimento, para as idades superiores esse ganho acontece devido as reações pozolânicas que ocorrem por conta da adição da nS. Onde ela reage com o hidróxido de cálcio favorecendo a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando numa matriz de cimento mais densa aumentando assim a resistência.

O teor de nS 1,5% obteve maior ganho em relação ao traço de referência, apresentando elevado ganho de resistência para 1 dia (31,27%) e ganho equivalente com os estudos de Nili et al. (2010) e Garg et al. (2016) para a idade de 3 dias (4,73%). Já era esperado pelos estudos anteriores um menor ganho de resistência a partir dos 7 dias, o que nesse traço foi observado.

Houve a utilização de aditivo polifuncional que, segundo o fabricante, é um dispersante de alta eficácia que aumenta a resistência à compressão final e da prolongada manutenção do abatimento do concreto em altas temperaturas. Entretanto, para o estudo elaborado até aqui, não avaliamos a influência que ele causa ao concreto ao atuar juntamente com a nS. Com isso, sua utilização pode ser uma explicação razoável para o contínuo ganho de resistência nas idades mais avançadas de cura. Outro aspecto importante no que tange a utilização do aditivo polifuncional TEC-MULT 829 SPX é quanto a dosagem recomendada pelo fabricante de 0,5 a 1,2% em relação à massa de aglomerante. A Tabela 4.4 mostra o percentual de polifuncional adicionado em cada traço do concreto, mostrando que para os concretos convencionais, não foi extrapolado o limite indicado pelo fabricante.

Tabela 4. 4 - Quantidade e percentual de aditivo polifuncional.

Concreto Convencional - Betoneira 32 L		
Traço	Materiais	Quantidade
Ref.	Cimento (kg)	8,96
	nS (kg)	0
	Polifuncional (L)	0,0608
	% Polifuncional	0,68%
nS 1%	Cimento (kg)	8,87
	nS (kg)	0,3
	Polifuncional (L)	0,0688
	% Polifuncional	0,75%
nS 1,5%	Cimento (kg)	8,83
	nS (kg)	0,45
	Polifuncional (L)	0,0768
	% Polifuncional	0,83%
nS 2%	Cimento (kg)	8,78
	nS (kg)	0,6
	Polifuncional (L)	0,0838
	% Polifuncional	0,89%

Fonte: Autoria Própria.

4.2.2. Concreto de Alto Desempenho

No Apêndice D serão apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto, a resistência média obtida para cada idade e o percentual em relação o traço de referência.

A tabela X apresenta o resumo das resistências médias obtidas para os ensaios dos corpos de provas.

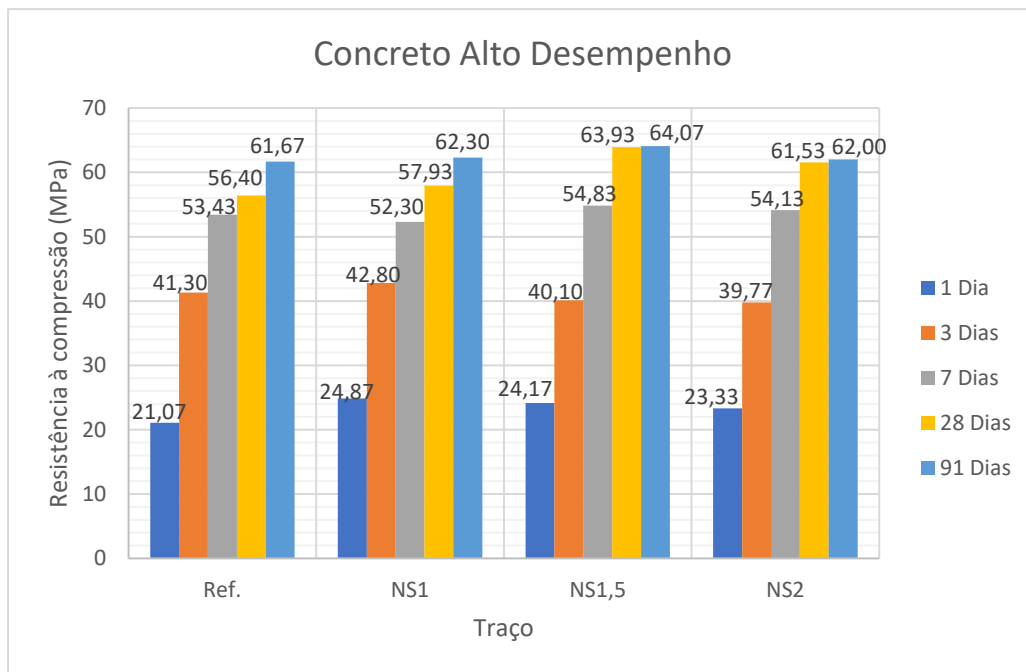
Tabela 4. 5 - Resultados resistência média aos 28 dias dos concretos de alto desempenho.

Concreto	Traço	Resistência Média (MPa)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Alto Desempenho	Ref	21,07	41,30	53,43	56,40	61,67
	NS1	24,87	42,80	52,30	57,93	62,30
	NS1,5	24,17	40,10	54,83	63,93	64,07
	NS2	23,33	39,77	54,13	61,53	62,00

Fonte: Autoria Própria

A Figura 4.5 apresenta a evolução da resistência para cada traço ao passar dos dias.

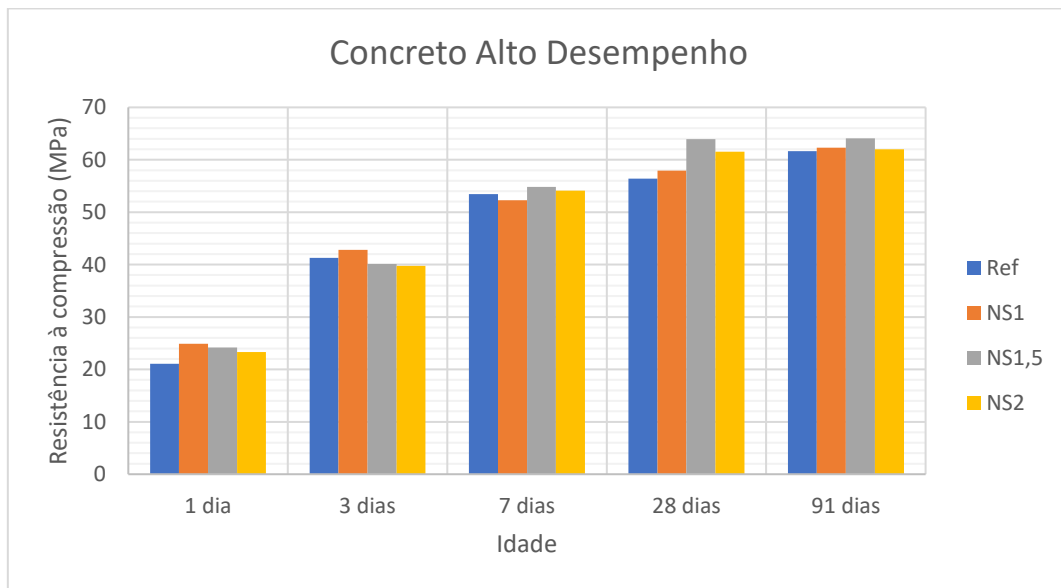
Figura 4. 5 - Resistências à compressão dos concretos alto desempenho separando por traços.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.6 apresenta os dados de resistência do concreto comparando por idades de ruptura dos corpos de prova.

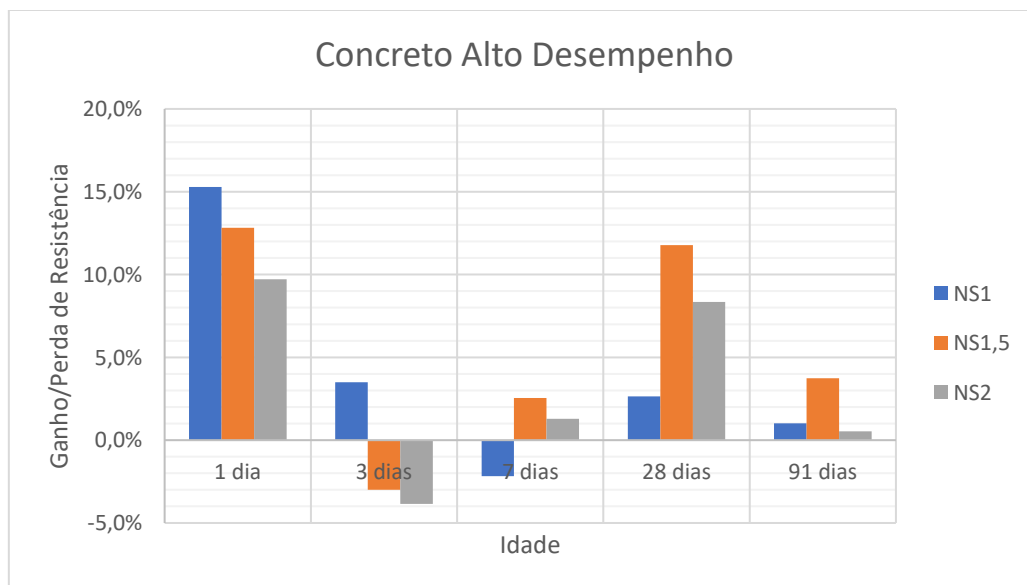
Figura 4. 6 - Resistências à compressão dos concretos alto desempenho separando por idades.



Fonte: Aatoria Própria.

A figura 4.7 apresenta os percentuais que cada idade dos traços obteve quando comparados aos traços de referência.

Figura 4. 7 - Percentual de cada traço e idade em relação ao traço de referência do concreto de alto desempenho.



Fonte: Aatoria Própria.

Do mesmo modo do que nos concretos convencionais, o teor de nS para os concretos de alto desempenho que obteve melhores resultados ao longo do tempo estudado é o de 1,5% quando comparado ao traço de referência, avaliando exclusivamente a resistência nos corpos de prova sujeito à compressão. O aumento de resistência para esse teor foi maior em relação aos outros que foram ensaiados em 7, 28 e 91 dias. O teor com maior ganho percentual de resistência a 1 dia foi o de 1%, mas não obteve melhores resultados aos 3, 7, 28 e 91 dias.

Pela Figura 4.7 é possível perceber que do mesmo modo que ocorreu para os concretos convencionais, houve uma tendência de existir um acréscimo da resistência para a idade de 1 dia, depois em 3 dias os valores caíram e se estabilizaram próximos aos dos concreto de resistência, a partir dos 7 dias apresentou a existência de uma nova tendência de acréscimo para as idade superior.

Saloma et al. (2013) ao ensaiar corpos de prova com substituição de cimento por nS para concretos de alto desempenho, observaram que o ganho percentual de resistência aumentava com o passar do tempo de cura e do teor de nS adicionado ao sistema, chegando a obter incrementos de 24,59% para o teor de 10% de nS em 28 dias. Para explicar tal fato, os autores citam que nas primeiras idades de cura ocorre principalmente as reações de hidratação do cimento, sendo que, após esse processo a nS começa a reagir com o óxido de cálcio livre, fornecendo assim o aumento na resistência dos corpos de prova à compressão.

Assim como os concretos convencionais, a motivação que os autores dão para o ganho de resistência nos concretos de alto desempenho se dá pelo efeito *filler* ocorrendo o empacotamento das partículas, as reações pozolânicas formando C-S-H e aluminossilicatos adicionais no sistema, e o efeito de nucleação causado pelas partículas de nS. Dessa forma, é esperado o ganho de resistência nas idades iniciais do concreto, bem como uma diminuição do ganho conforme avança o tempo de cura.

A elevada finura da nS, que resulta em grande superfície específica, acelera as reações pozolânicas fazendo com que o concreto apresente ganho de resistência mais rapidamente. Esse fato fica evidenciado pelo ganho de resistência nos três traços analisados na pesquisa para a idade de 1 dia.

Como o estudo previa a obtenção de abatimento igual para todos os corpos de prova, foi necessário utilizar aditivos polifuncional e superplastificante no concreto de alto desempenho. O primeiro foi adicionado com o intuito de gerar corte de água, dando

trabalhabilidade ao concreto e aumentando o tempo disponível para a entrega pela concreteira. O segundo se dá pela necessidade de recuperar trabalhabilidade melhorando a dispersão das partículas, de modo a permitir ainda mais trabalhabilidade visto que o concreto de alto desempenho é conhecido por ter uma baixa relação água/cimento. De acordo com o fabricante dos aditivos, o intervalo de teor de polifuncional a ser adicionado deve ser de 0,5 a 1,2%, e do superplastificante sendo de 0,4 a 1% em relação à massa de aglomerante. A Tabela 4.6 apresenta as quantidades e percentuais de cada aditivo utilizado para cada traço, sendo respeitados os limites estipulados pelo fabricante de modo a minimizar possíveis erros.

Tabela 4. 6 - Quantidade e percentuais de cada aditivo.

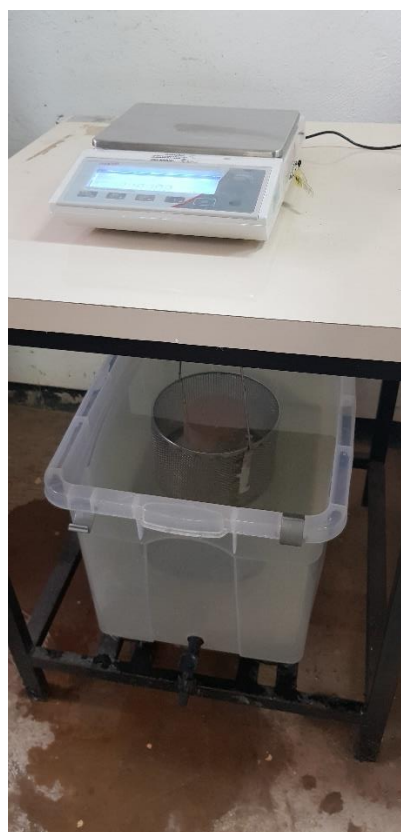
Concreto Alto Desempenho – Betoneira 32L		
Traço	Materiais	Quantidade
Ref.	Cimento (kg)	11,2
	nS (kg)	0
	Polifuncional (L)	0,0576
	Superplastificante (L)	0,02
	% Polifuncional	0,51%
	% Superplastificante	0,18%
nS 1%	Cimento (kg)	11,09
	nS (kg)	0,37
	Polifuncional (L)	0,0576
	Superplastificante (L)	0,065
	% Polifuncional	0,50%
	% Superplastificante	0,57%
nS 1,5%	Cimento (kg)	11,03
	nS (kg)	0,56
	Polifuncional (L)	0,0586
	Superplastificante (L)	0,075
	% Polifuncional	0,51%
	% Superplastificante	0,65%
nS 2%	Cimento (kg)	10,98
	nS (kg)	0,75
	Polifuncional (L)	0,0666
	Superplastificante (L)	0,1
	% Polifuncional	0,57%
	% Superplastificante	0,85%

Fonte: Autoria Própria.

4.3. ABSORÇÃO D'ÁGUA

Para o ensaio de absorção d'água foram ensaiados 16 corpos de provas, sendo 2 para cada traço dos concretos convencional e de alto desempenho. As tabelas no Apêndice A e B apresentam os resultados do ensaio de absorção de água para os traços de concreto convencional e de alto desempenho, respectivamente. Pela norma brasileira que rege esse ensaio, temos os pesos seco, saturado e submerso, sendo possível a realização do cálculo de absorção de água e de índice de vazios dos corpos de prova ensaiados para cada teor de nS utilizados no experimento. A figura 4.8 apresenta uma imagem do ensaio sendo realizado.

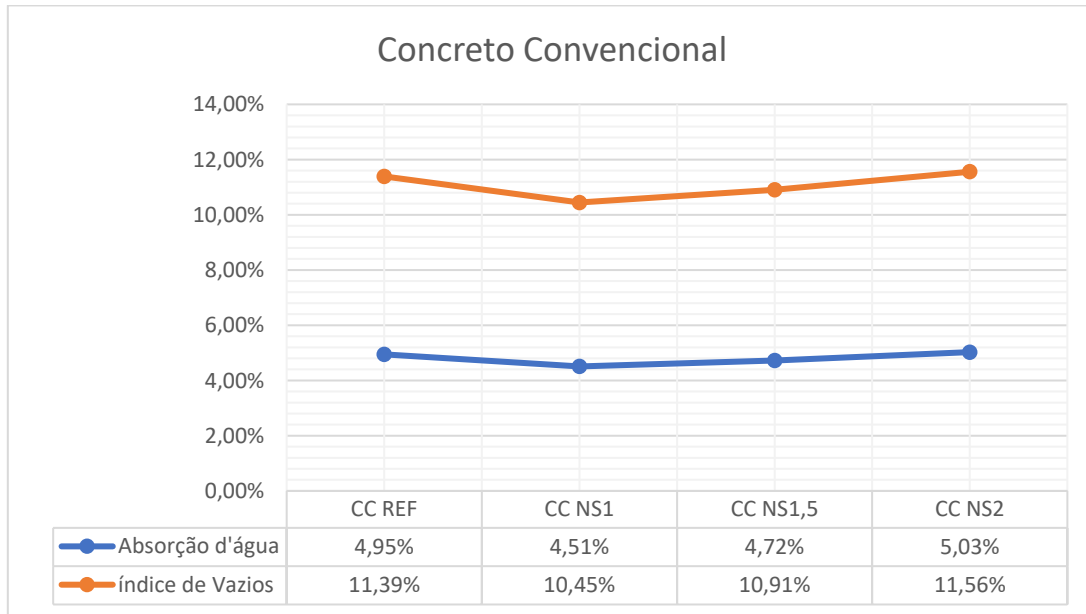
Figura 4. 8 - Realização do ensaio de absorção d'água.



Fonte: Autoria Própria.

Em sequência as Figuras 4.9 e 4.10, apresentam os resultados para a absorção d'água e índice de vazios para os concretos convencionais e de alto desempenho, respectivamente.

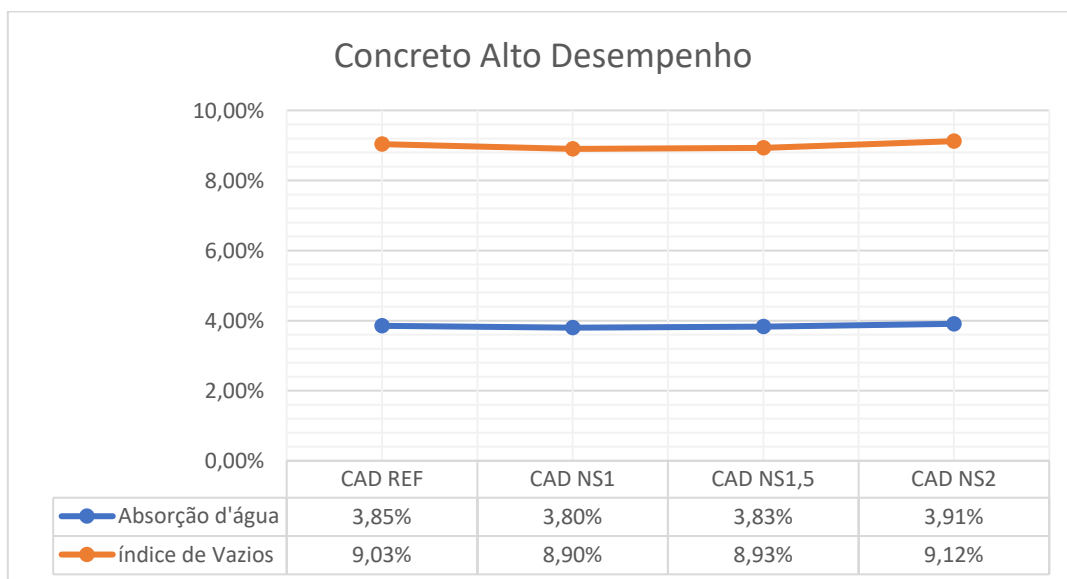
Figura 4. 9 - Absorção d'água e índice de vazios de concretos convencionais.



Fonte: Autoria Própria.

Para os corpos de prova de concreto convencional, foi constatado que a absorção d'água tende a reduzir até o teor de 1,0% de nS e depois tende a aumentar. Do mesmo modo, o índice de vazios apresentou uma redução nos seus valores até o teor de 1,0%, após isso ele volta a crescer ultrapassando o valor encontrado no concreto de referência.

Figura 4. 10 - Absorção d'água e índice de vazios de concretos alto desempenho.



Fonte: Autoria Própria.

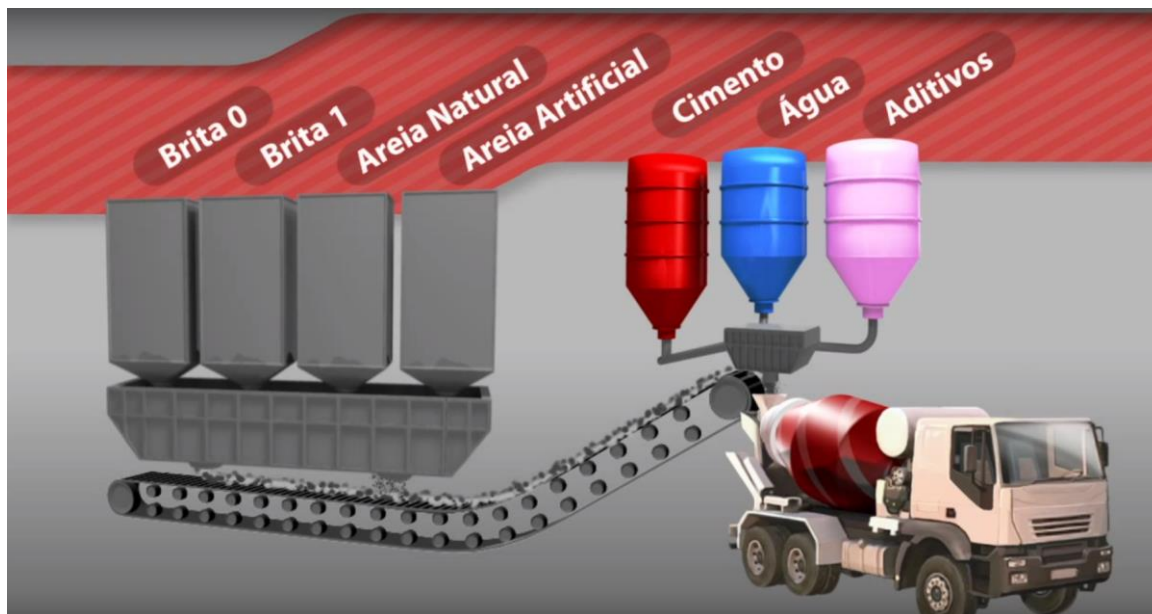
Para os concretos de alto desempenho ensaiados, a diferença entre os valores de absorção de água foi pequena, podendo dizer que a utilização de nS não implicou em alteração dessa propriedade. Para o índice de vazios houve redução da propriedade até o teor de 1,0% de nS e com teores maiores houve aumento da propriedade, semelhante ao que ocorreu para os concretos convencionais.

5. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Para uma análise de viabilidade quanto a implementação da nS no processo produtivo, além da parte referente a custos dos materiais constituintes e do produto final, é necessária uma análise do sistema produtivo. Isso visa que a inserção da nS na produção dos concretos não gere custos extras muito elevados, alterando o mínimo possível do processo de fabricação dos concretos na empresa parceira.

A fabricação de concreto se inicia com a alimentação de caixas de agregados com as respectivas areias e britas separadas, processo executado com auxílio de pá carregadeira. Há também silos para armazenamento de cimento e tanques para armazenamento de água e aditivos. Os materiais necessários para cada traço são dosados por pesagem e transportados para caminhões-betoneira. Nos caminhões são executadas as etapas de mistura e transporte do concreto para o destino final. A Figura 5.1 ilustra esquematicamente a dosagem de concreto em usinas.

Figura 5. 1 - Esquema ilustrativo de produção de concretos usinados.



Fonte: YouTube.

A nS poderia ser inserida nesse processo através da adição de um tanque de armazenamento exclusivo para a nanossílica coloidal. Vale ressaltar que a nS estudada nesse trabalho é comercializada dispersa em água, assim, ela poderia ser adicionada da mesma forma que a água de amassamento, ou seja, sendo pesada de acordo com a dosagem de cada traço.

Dessa forma, a nS seria inserida na cadeia produtiva do concreto gerando somente a necessidade de adição de um tanque de armazenamento, de um elemento a mais para pesagem e dosagem com cuidado especial para levar em consideração a água já presente na solução de nanossílica coloidal.

A Tabela 5.1 apresenta os preços comerciais admitidos para realizar os cálculos do pilar fictício, sendo que esses valores foram tomados como base os dados encontrados no SINAPI de setembro de 2019.

Tabela 5. 1 - Preços dos materiais na unidade comercial.

Material	Unidade	Quantidade	Preço (R\$)
Cimento CP II F40	kg	50	22,90
Areia Natural	m ³	1	89,17
Areia Artificial	m ³	1	89,17
Brita 0	m ³	1	106,40
Brita 1	m ³	1	83,33
Nanossílica coloidal	kg	1	15,40
Aditivo Polifuncional	L	1	5,60
Aditivo Superplastificante	kg	200	1991,80
Água	m ³	1	12,02

Fonte: Autoria Própria.

Para o estudo de viabilidade econômica por meio dos custos de produção por metro cúbico do concreto, a seção de Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os custos sem frete para a elaboração de cada traço dos concretos convencionais e de alto desempenho estudados, respectivamente. A Tabela 5.4 apresenta os valores e percentagens de variação do custo em relação ao concreto de referência.

Tabela 5. 2 - Custos de produção dos concretos convencionais por metro cúbico.

Concreto Convencional - REF		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	280	128,24
Areia Natural	431	14,50
Areia Artificial	431	14,23
Brita 0	199	7,81
Brita 1	795	24,00
Nanossílica coloidal	-	-
Aditivo Polifuncional	1,9	10,64
Aditivo Superplastificante	-	-
Água	192	2,38
Total		201,81

Concreto Convencional - NS1		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	277,2	126,96
Areia Natural	431	14,50
Areia Artificial	431	14,23
Brita 0	199	7,81
Brita 1	795	24,00
Nanossílica coloidal	9,3	143,22
Aditivo Polifuncional	2,2	12,32
Aditivo Superplastificante	-	-
Água	185,5	2,30
Total		345,35

Concreto Convencional - NS1,5		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	275,8	126,32
Areia Natural	431	14,50
Areia Artificial	431	14,23
Brita 0	199	7,81
Brita 1	795	24,00
Nanossílica coloidal	14	215,60
Aditivo Polifuncional	2,4	13,44
Aditivo Superplastificante	-	-
Água	182,2	2,26
Total		418,17

Concreto Convencional - NS2		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	274,4	125,68
Areia Natural	431	14,50
Areia Artificial	431	14,23
Brita 0	199	7,81
Brita 1	795	24,00
Nanossílica coloidal	18,7	287,98
Aditivo Polifuncional	2,7	15,12
Aditivo Superplastificante	-	-
Água	178,9	2,22
Total		491,54

Tabela 5.3 - Custos de produção dos concretos de alto desempenho por metro cúbico.

Concreto Alto Desempenho - REF		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	350	160,30
Areia Natural	417	14,03
Areia Artificial	417	13,77
Brita 0	291	11,43
Brita 1	678	20,47
Nanossílica coloidal	-	-
Aditivo Polifuncional	1,8	10,08
Aditivo Superplastificante	0,63	6,65
Água	188	2,33
Total		239,06

Concreto Alto Desempenho - NS1		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	346,5	158,70
Areia Natural	417	14,03
Areia Artificial	417	13,77
Brita 0	291	11,43
Brita 1	678	20,47
Nanossílica coloidal	11,7	180,18
Aditivo Polifuncional	1,8	10,08
Aditivo Superplastificante	2,00	21,12
Água	192	2,38
Total		432,16

Concreto Alto Desempenho - NS1,5		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	344,8	157,92
Areia Natural	417	14,03
Areia Artificial	417	13,77
Brita 0	291	11,43
Brita 1	678	20,47
Nanossílica coloidal	17,5	269,50
Aditivo Polifuncional	1,8	10,08
Aditivo Superplastificante	2,30	24,29
Água	175,8	2,18
Total		523,66

Concreto Alto Desempenho - NS2		
Material	Consumo (kg)	Custo (R\$)
Cimento CP II F40	343	157,09
Areia Natural	417	14,03
Areia Artificial	417	13,77
Brita 0	291	11,43
Brita 1	678	20,47
Nanossílica coloidal	23,3	358,82
Aditivo Polifuncional	2,10	11,76
Aditivo Superplastificante	3,10	32,74
Água	171,7	2,13
Total		622,24

Tabela 5. 4 – Custo comparativo por metro cúbico do concreto.

Concreto	Traço	Custo/m ³	%
Convencional	REF	201,81	-
	NS1	345,35	71%
	NS1,5	418,17	107%
	NS2	491,54	144%
Alto Desempenho	REF	239,06	-
	NS1	432,16	81%
	NS1,5	523,66	119%
	NS2	622,24	160%

Fonte: Aatoria Própria.

Com os dados apresentados na Tabela 5.4 é possível ver que ao inserir quantidades de nanossílica junto a mistura encarece o preço final. Isso acontece pois o valor do quilograma de nanossílica é cerca de 34 vezes superior ao preço do quilograma de cimento. Dessa forma, como o trabalho foi realizado com substituição de cimento por nS, esse aumento impacta diretamente no custo final do m³ de concreto produzido.

Outra análise possível de realizar é uma avaliação do custo do concreto em relação a resistência média aos 28 dias que ele atingiu. Dessa forma, a tabela 5.5 apresentará os resultados do custo do concreto para 1 MPa.

Tabela 5. 5 – Avaliação do (Custo/m³)/MPa para cada traço.

Concreto	Traço	Custo/m ³	Resistência Média - 28 dias (MPa)	(Custo/m ³)/MPa
Convencional	REF	201,81	45,47	4,44
	NS1	345,35	47,1	7,33
	NS1,5	418,17	46,7	8,95
	NS2	491,54	48,73	10,09
Alto Desempenho	REF	239,06	56,4	4,24
	NS1	432,16	57,93	7,46
	NS1,5	523,66	63,93	8,19
	NS2	622,24	61,53	10,11

Fonte: Aatoria Própria

Para o estudo de viabilidade econômica por meio do pilar fictício, utilizou-se a resistência média à compressão aos 28 dias, considerando os fatores de minoração para o

concreto. Para o estudo, foram considerados pilares de seção transversal quadrada, com carga centrada de valor igual a 10000 kN, e comprimento fixo de 3 m. Dessa forma, a Tabela 5.6 apresenta os valores da resistência considerada para o projeto do pilar fictício, a seção transversal do pilar, consumo de concreto, do custo e percentual de variação do custo em relação ao concreto de referência.

Tabela 5. 6 - Comparativo das seções transversais, volume e custo do pilar fictício.

Concreto	Traço	fck (MPa)	fcd (MPa)	σ_{cd} (MPa)	Área (cm ²)	Seção (cm)	Volume (m ³)	Custo (R\$)	%
Convencional	REF	45,47	32,48	27,61	3622,30	60,19	1,09	219,31	-
	NS1	47,1	33,64	28,60	3496,94	59,13	1,05	362,30	65%
	NS1,5	46,7	33,36	28,35	3526,89	59,39	1,06	442,45	102%
	NS2	47,73	34,09	28,98	3450,78	58,74	1,04	508,86	132%
Alto Desempenho	REF	56,4	40,29	36,26	2758,08	52,52	0,83	197,80	-
	NS1	57,93	41,38	37,24	2685,23	51,82	0,81	348,14	76%
	NS1,5	63,93	45,66	41,10	2433,22	49,33	0,73	382,25	93%
	NS2	61,53	43,95	39,56	2528,13	50,28	0,76	471,93	139%

Fonte: Autoria Própria

Com a Tabela 5.5 é possível observar que respeitando as minorações de carregamentos do concreto, as seções do pilar com substituição de nS não tem uma grande redução quando comparada a seção calculada para o concreto de referência. Devido a esse fato, os elevados custos atribuídos a produção de concretos com porcentagens de nS não justificam sua utilização.

6. CONCLUSÕES

Partindo dos objetivos propostos para este trabalho e através dos resultados apresentados no capítulo anterior, podemos concluir que:

- A nS influencia reduzindo o abatimento do concreto de forma progressiva, ou seja, quanto maior a substituição de nS, maior a perda de abatimento. Isso gerou uma maior demanda de aditivo, seja ele polifuncional ou superplastificante, para que o abatimento fosse mantido. Mesmo com o aumento necessário de aditivo, as quantidades ainda ficaram dentro da faixa limite recomendada pelo fabricante.

- A substituição parcial de cimento pela nS gerou aumento na resistência a compressão com 1 dia de idade. Isso pôde ser observado tanto nos traços de CC como de CAD. Já para 3 e 7 dias, a resistência dos corpos de prova com substituição não se alterou em relação aos de referência. Nas idades finais de análise (28 dias e 91 dias), os traços de CC obtiveram aumento de resistência em torno dos 5%, enquanto os traços de CAD obtiveram resultados maiores para a idade de 28 dia.

- Para os concretos convencionais, o melhor teor para a resistência à compressão foi o de 1,5% de nS, visto que apresentou resultados de resistência maiores que o de referência para todas as idades analisadas.

- Para os concretos de alto desempenho, o melhor teor para a resistência à compressão foi também o de 1,5%, sendo que obteve aumento expressivo na idade de 1 dia (12,8%) e na idade de 28 dias que é a referência para a indústria (11,8%).

- No que tange à absorção de água, os dois tipos de concreto não tiveram mudanças significativas com a variação do teor de nS no traço. Sendo que, tanto no concreto convencional, quanto no de alto desempenho, os traços com teor de substituição de 1,5% (os melhores no quesito resistência a compressão) apresentaram absorção menor do que os traços de referência, mas os traços com substituição de 2% já apresentaram absorção levemente maiores que os de referência.

- A produção do concreto com substituição de cimento pela nS é viável tecnicamente, uma vez que para introduzir a nS no processo produtivo não seriam necessárias grandes mudanças no processo já existente.

- A inserção da nS nos traços da empresa parceira aumentou o preço do concreto. Esse fato ficou evidenciado pelo intenso aumento do custo por metro cúbico dos traços com nS e ratificado pelos resultados de custos obtidos através do dimensionamento do pilar fictício, onde

a redução de seção devido ao incremento de resistência não foi suficiente para compensar o aumento dos custos por metro cúbico do concreto.

- A análise do custo da produção do concreto para cada MPa ratifica que os preços aumentam de maneira acentuada, chegando a ser maior que duas vezes o preço em relação ao traço de referência.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos a serem realizados posteriormente fica a sugestão de:

- Verificar teor de sólidos presentes na nanossílica para assim fazer a correta adequação da quantidade de água presente no traço.
- Verificar a reatividade da nS com a presença ou não de aditivos químicos.
- Verificar outras características como: módulo de elasticidade, tempo de pega, retração, entre outros.
- Com os resultados apresentados na referência bibliográfica, vale realizar estudos com a utilização de outros materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa e o matacaulim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7500-1**: Materiais metálicos – Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (no 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

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, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto — Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo — Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland — Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1996.

AITCIN, P. C. **High Performance Concrete**. Université de Sherbrooke, Québec, Canadá. 2004.

ALEEM, S.A.E.; HEIKAL, M.; MORSI, W.M. **Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica**. Construction and Building Materials, n.59, p.151-160, 2014.

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.

BASTOS, R. M. de P. **Nanotecnologia: Uma revolução no desenvolvimento de novos produtos**. Monografia de Graduação em Engenharia de Produção, Coordenação de Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2006.

BIANCHI, G. Q. **Application of nano-silica in concrete**. 327p. Tese de Pós-Doutorado, Technische Universiteit Eindhoven, Holanda, 2014.

BONAVETTI, V.; DONZA, H.; RAHHAL, V. and IRASSAR, E.F., **High-Strength Concrete with limestone filler cements**. In: Second CANMET/ACI International Conference of High-Performance Concrete, Proceedings. Gramado, Brasil, 1999.

BREGNA, H. E.; ROBERTS, O. R. **Colloidal Silica: Fundamentals and applications**. Miami, Florida: CRC Press, 2006.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B. **Efeitos do uso de aditivo com nanosilica na consistência e resistência mecânica do concreto**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 12, n. 2, p. 371-385, Abr 2019.

CAIXA. **SINAPI Distrito Federal de setembro de 2019**. Disponível em: http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_644. Acesso em: 19 nov. 2019.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo Detalhado de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118: 2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2016. p. 1-414.

DAL MOLIN, D. C. C. (2005), **Adições minerais para concreto estrutural**. In: Isaia, G. C. (ed), **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 1 ed., São Paulo: IBRACON, p. 345-379.

DREXLER, K. E.; PETERSON, C.; PERGAMIT, G. **Unbounding the future: the nanotechnology revolution**. New York: William Morrow, 1991.

DUNSTER, A. **Silica fume in concrete**. BRE Information Paper IP5/09, IHS/Building Research Establishment, Watford, Reino Unido. 2009.

FIROOZI A. A.; TAHA M. R. **Nanotechnology in civil engineering**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19, 2014, p. 4673-4682.

GARG R.; BANSAT M.; AGGARWAL Y. **Strength, rapid chloride penetration and microstructure study of cement mortar incorporating micro and nano silica**. International Journal of Electrochemical Science, v. 11, 2016, p. 3697-3713.

GUPTA, S. **Use of triangular membership function for prediction of compressive strength of concrete containing nanosilica**. Civil & Environmental Engineering, v. 02, Dez 2015.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto** – (Tese de doutorado) – Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HUSSAIN, S. T.; SASTRY, K.V.S.G.K. **Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica**. International Journal of Research in Engineering and Technology, v. 03, Out 2014.

KHANZADI, M.; TADAYON, M.; SEPEHRI, H.; SEPEHRI, M. **Influence of nanosilica particles on mechanical properties and permeability of concrete**. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Itália, Jun 2010.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration**. Cement and Concrete Research – v. 33, n. 12, p. 1939-1947, December, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**- 2ª Edição. Ed.: IBRACON. 2014.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P.J. **Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete**. Cerâmica, v. 63, p. 387-394, Set 2017.

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy A. Cremonimi. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. **Influence of nano-SiO₂ and microsilica on concrete performance**. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Itália, Jun 2010.

NOGUEIRA, G. S. F.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; SOUZA, I. C.; CAVVALEIRO, C. D.; PORTO, M. F. TORALLES, B. M. **Incorporação de nanossílica em compósitos cimentícios**. Revista Matéria, v.23, n.03, 2018.

NOLLI FILHO, P. R. **Propriedade mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanossílica estabilizada**. Belo Horizonte. 2015.

QUERCIA, G.; BROUWERS H. J. H. **Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures**. 8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Jun 2010.

SALOMA; NASUTION, A.; IMRAN, I.; ABDULLAH, M. **Experimental investigation on nanomaterial concrete**. International Journal of Civil & Environmental Engineering, v.13, n.03, p. 15-20, Jun 2013

SAMIA, B.; SAFI, B.; BENMOUNAH, A. **Influence of amorphous nano-silica addition on properties of fresh cement paste and hardened cement mortar**. International Journey Masonry Research and Innovation, v.03, n.04, 2018.

SANTOS, T. A. C. (2016). **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

SENFF, L.; **Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento** – (Tese de doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SILVA JUNIOR, Paulo Francinete (2017). **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 005A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 345 p.

SILVA, I. J. da (2000). **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 279 p.

SINGH, L.P.; GOEL, A.; BHATTACHARYYA, S. K.; AHALAWAT, S.; SHARMA, U.; MISHRA, G. **Effect of morphology and dispersability of silica nanoparticles on the mechanical behaviour of cement mortar**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v.09, n.02, p.207-217, Jun 2015.

VARGHESE, L.; KANTA RAO, V.V.L.; PARAMESWARAN, L. **Improvement of early-age strength of high-volume siliceous fly ash concrete with nanosilica**. Advances in Civil Engineering Materials, v.07, n.01, 2018.

YE, Q.; ZHANG, Z.; SHENG, L.; CHEN, R. **A comparative study on the pozzolanic activity between Nano-SiO₂ and Silica Fume**. Journal of Wuhan University of Technology, v. 21, n.03, Set 2006.

YOUTUBE. **Brasil - Processo produtivo do concreto**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gHzRzKQZkQw>. Acesso em: 17 nov. 2019.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. **Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount**. Construction and Building Materials, n.65, p.140-150, 2014.

YE, Q.; ZHANG, Z.; SHENG, L.; CHEN, R. **A comparative study on the pozzolanic activity between Nano-SiO₂ and Silica Fume.** Journal of Wuhan University of Technology, v. 21, n.03, Set 2006.

APÊNDICE A – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS CONVENCIONAIS.

	Corpo de Prova	Peso Seco 72h (g)	Média dos pesos secos (g)	Peso Saturado 72h (g)	Média dos pesos saturados (g)	Peso Submerso (g)	Média dos pesos submersos (g)	Absorção de água	Índice de vazios
CC REF	1	3529,77	3525,61	3706,77	3700,07	2171,66	2168,06	4,95%	11,39%
	2	3521,44		3693,36		2164,46			
CC NS1	1	3564,78	3595,22	3728,94	3757,33	2184,40	2205,67	4,51%	10,45%
	2	3625,66		3785,72		2226,94			
CC NS1,5	1	3530,61	3537,97	3693,51	3705,11	2165,09	2172,42	4,72%	10,91%
	2	3545,33		3716,71		2179,75			
CC NS2	1	3538,79	3540,52	3718,32	3718,51	2176,62	2178,77	5,03%	11,56%
	2	3542,24		3718,70		2180,92			

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.

	Corpo de Prova	Peso Seco 72h (g)	Média dos pesos secos (g)	Peso Saturado 72h (g)	Média dos pesos saturados (g)	Peso Submerso (g)	Média dos pesos submersos (g)	Absorção de água	Índice de vazios
CAD REF	1	3642,03	3622,56	3778,70	3762,11	2231,49	2217,41	3,85%	9,03%
	2	3603,08		3745,52		2203,33			
CAD NS1	1	3625,86	3616,40	3760,69	3753,78	2214,60	2210,22	3,80%	8,90%
	2	3606,93		3746,87		2205,84			
CAD NS1,5	1	3625,71	3625,79	3766,18	3764,54	2209,84	2211,05	3,83%	8,93%
	2	3625,87		3762,90		2212,25			
CAD NS2	1	3664,25	3630,52	3805,97	3772,42	2239,23	2216,78	3,91%	9,12%
	2	3596,79		3738,87		2194,33			

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CONVENCIONAIS E PERCENTUAL EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA.

Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%	Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%
Concreto Convencional: Referência	1	9,3	8,87	-	Concreto Convencional: NS 1%	1	11,5	11,7	24,2%
	1	8,3		-		1	11,1		
	1	9		-		1	12,5		
	3	29,8	28,90	-		3	29,7	28,9	0,0%
	3	28,9		-		3	29		
	3	28		-		3	28		
	7	39	38,30	-		7	41,1	39,7	3,5%
	7	39,5		-		7	37,9		
	7	36,4		-		7	40,1		
	28	45,9	45,47	-		28	47,7	47,1	3,5%
	28	45,8		-		28	46,4		
	28	44,7		-		28	47,2		
	91	47,3	47,77	-		91	47	48,17	0,8%
91	47,8	-		91	48,5				
91	48,2	-		91	49				
Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%	Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%
Concreto Convencional: NS 1,5%	1	12,4	12,90	31,3%	Concreto Convencional: NS 2%	1	12,5	12,77	30,5%
	1	13,6				1	12,4		
	1	12,7				1	13,4		
	3	31,2	30,33	4,7%		3	28,6	28,63	-0,9%
	3	31,2				3	29,5		
	3	28,6				3	27,8		
	7	37,2	38,47	0,4%		7	40,1	38,80	1,3%
	7	41				7	37,8		
	7	37,2				7	38,5		
	28	46,1	46,70	2,6%		28	48,5	47,73	4,7%
	28	46,7				28	47,7		
	28	47,3				28	47		
	91	50,6	51,47	7,2%		91	51,7	51,30	6,9%
91	52,1	91			52				
91	51,7	91			50,2				

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO E PERCENTUAL EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA.

Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%	Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%
Concreto Alto Desempenho: Referência	1	20,4	21,07	-	Concreto Alto Desempenho: NS 1%	1	24,6	24,87	15,3%
	1	21		-		1	25		
	1	21,8		-		1	25		
	3	42,3	41,30	-		3	44,4	42,80	3,5%
	3	41,5		-		3	41,5		
	3	40,1		-		3	42,5		
	7	53,1	53,43	-		7	52,1	52,30	-2,2%
	7	54		-		7	53,2		
	7	53,2		-		7	51,6		
	28	56,1	56,40	-		28	57	57,93	2,6%
	28	56,1		-		28	58,3		
	28	57		-		28	58,5		
	91	61	61,67	-		91	61	62,30	1,0%
	91	61,6		-		91	62,4		
91	62,4	-		91	63,5				
Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%	Traço	Dia	Resistência	Resistencia Média	%
Concreto Alto Desempenho: NS 1,5%	1	23,9	24,17	12,8%	Concreto Alto Desempenho: NS 2%	1	23,4	23,33	9,7%
	1	24,4				1	23,7		
	1	24,2				1	22,9		
	3	40,4	40,10	-3,0%		3	40,6	39,77	-3,9%
	3	37,6				3	39,2		
	3	42,3				3	39,5		
	7	54,7	54,83	2,6%		7	52,6	54,13	1,3%
	7	55,3				7	55,6		
	7	54,5				7	54,2		
	28	64	63,93	11,8%		28	61,7	61,53	8,3%
	28	64,3				28	60,8		
	28	63,5				28	62,1		
	91	63,0	64,07	3,7%		91	61,0	62,00	0,5%
	91	65,0				91	63,0		
91	64,2	91			62,0				

Fonte: Autoria Própria.