

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
***DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL***

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA NANOSÍLICA NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DE CONCRETOS: UMA REVISÃO**

**Henrique Thiago Roque Pedroso**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de São Carlos como parte dos  
requisitos para a conclusão da  
graduação em Engenharia Civil

**Orientadora:** Profa. Dra. Fernanda  
Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos  
2021

Aos meus pais, Iraci e Iranir,  
por todo o amor, suporte e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

---

A trajetória na Universidade é um caminho com muitos aprendizados, oportunidades e também desafios.

Primeiramente, quero agradecer meus pais, Iraci e Iranir, que desde o início de meu ciclo escolar sempre me apoiaram e estiveram comigo em todos meus momentos importantes. Além de terem me auxiliado na realização de meu sonho de cursar a graduação.

Ao meu irmão Gabriel e demais familiares que também me incentivaram ao longo desses anos.

À Universidade Federal de São Carlos por ter me proporcionado inúmeros aprendizados e oportunidades para toda a minha vida, além de todo conhecimento adquirido devido à graduação, pesquisa e extensão.

À Professora Orientadora Doutora Fernanda Giannotti, que me orientou desde minha pesquisa de iniciação científica e me auxiliou e apoiou durante toda a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor André Luís Christoforo, que auxiliou na interpretação e conceitos das análises estatísticas presentes neste trabalho.

Aos meus amigos, Alan, Ana Luiza, Gabriela, Isabela, Izabel, Jinqiang, Júlia, Leonardo, Matheus e Vinícius que em diversas fases de minha vida, seja na Universidade ou não, estiveram ao meu lado, sempre me motivando a seguir em frente.

Ao colega de turma, Tawan, que me auxiliou no desenvolvimento da metodologia do presente trabalho.

## RESUMO

Atualmente, o concreto é o material mais utilizado pela construção civil para os mais diversos tipos de obras. Devido à sua importância para a área, cada vez mais há pesquisas que estudam as propriedades físicas e mecânicas do material e buscam por melhorias nas mesmas. Recentemente, intensificou-se a utilização de adições minerais em concretos justamente buscando melhorar tais características. Entre essas melhorias buscadas, cita-se uma maior durabilidade das estruturas. Desse modo, concomitante ao avanço da utilização da nanotecnologia em diversas áreas, a adição da nanosílica em concretos busca proporcionar ganho na resistência à compressão e durabilidade do material. O presente trabalho teve o intuito de avaliar o efeito da adição da nanosílica em concretos, reunindo dados de trabalhos científicos e desenvolvendo um banco de dados, o qual coletou informações como o teor da nanosílica e valores da resistência à compressão de materiais cimentícios. Inicialmente, selecionou-se 39 trabalhos, sendo 30 estudos sobre concreto, 6 de pasta cimentícia e 3 de argamassa, optando-se devido ao maior número, seguir com a análise apenas para aqueles que trabalharam com concreto. Devido à heterogeneidade entre as amostras e ao grande número de diferentes teores de nanosílica observados, 24 no total, optou-se por restringir a análise para os teores de 1%, 1,5%, 2%, 3% e 5% de adição de nanosílica para as idades de 7 e 28 dias, uma vez que os mesmos apresentaram um número maior de amostras. Foram realizadas análises gráficas por meio do gráfico de barras, box-plot e de regressão linear e também se utilizou a Análise de Variância – ANOVA, Teste de Tukey e Teste de Normalidade de Anderson-Darling para realizar análises estatísticas, comparando-se os valores da resistência à compressão de concretos com nanosílica com as amostras referências. A partir dos resultados, concluiu-se que não há diferença significativa no valor da resistência à compressão de concretos com nanosílica em relação aqueles sem adição. Entretanto, esse resultado pode ter sido influenciado devido à variabilidade das características entre as amostras, por exemplo, na relação água/aglomerante.

*Palavras-chave:* Adições minerais, argamassa, concreto, nanosílica, pasta cimentícia.

## ABSTRACT

Currently, concrete is the most used material in civil construction for the most diverse types of constructions. Due to its importance for the area, more researches study about the physical and mechanical properties of the material and seek to improve them. Lately, the use of mineral additions in concretes has intensified in order to improve these characteristics. Among these improvements sought, there is greater durability of the structures. Thus, concomitant with the advancement of nanotechnology use in several areas, the addition of nanosilica in concrete seeks to provide a gain in the compressive strength and durability of the material. The present work had the intention to evaluate the effect of adding nanosilica to concrete, gathering data from scientific works and developing a database, which collected information such as nanosilica percentage and compressive strength values of cementitious materials. Firstly, 39 works were selected, 30 studies on concrete, 6 on cementitious paste and 3 on mortar, due to the higher number, it was chosen to continue with the analysis only for those which worked with concrete. Because of the heterogeneity between the samples and the large number of different nanosilica percentage observed, 24 in total, it was decided to restrict the analysis to 1%, 1.5%, 2%, 3% and 5% of addition of nanosilica for the ages of 7 and 28 days, since they had a larger number of samples. Graphical analyzes were performed using bar graphs, box-plot and linear regression, and Analysis of Variance - ANOVA, Tukey's Test and Anderson-Darling Test for Normality were also used to perform statistical analyses, comparing the values of the compressive strength of the nanosilica traces with the reference. From the results, the conclusion was that there is no significant difference in the compressive strength value of concretes with nanosilica compared to those without addition. However, this result could have been influenced due to the variability of characteristics between samples in the water/binder ratio for instance.

*Key-words:* Cement paste, concrete, mineral additions, mortar, nanosilica.

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1 Justificativa .....	8
1.2 Objetivos .....	9
1.3 Organização e Desenvolvimento do Trabalho .....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
2.1 Concreto .....	11
2.2 Adições Minerais em Concreto .....	13
2.2.1 Sílica ativa .....	14
2.2.2 Nanosílica.....	15
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
3.1 Análise Gráfica.....	26
3.2 Análise Estatística.....	28
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>30</b>
4.1 Banco de Dados.....	30
4.2 Análise Gráfica .....	34
4.3 Análise Estatística.....	48
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>54</b>
5.1 Conclusões .....	54
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	55
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>62</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>72</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais amplamente utilizado para a construção, geralmente composto de cimento Portland, agregados (grãos e miúdos), água, aditivos químicos e adições minerais. Este material é utilizado nas mais diversas obras da engenharia como barragens e elevados edifícios, por apresentar características como resistência e durabilidade adequadas, além de exigir menos energia para ser produzido comparando-se com outros materiais como cerâmicas, metais e materiais poliméricos (FONSECA, 2010).

Com o crescimento da construção civil, a demanda pelo concreto é cada vez maior e como, consequência, suas matérias-primas. Devido a isso, cresce a preocupação em aplicar de maneira mais eficiente o fator da sustentabilidade no setor. Uma das formas de atenuar os impactos ambientais é a construção de edificações com maior durabilidade, visto que com construções mais resistentes e duráveis, a demanda por materiais para manutenções e novas construções irá reduzir.

De acordo com a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013), durabilidade consiste na capacidade do edifício ou de seus sistemas em desempenhar suas funções ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até atingir um estado-limite de utilização. Há ainda definição da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) de que a durabilidade é a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Assim, devido à sua importância para a construção civil, faz-se necessário o estudo da incorporação de adições minerais que possam influenciar positivamente em propriedades físicas e mecânicas do concreto, além de estudar formas de mitigar a ocorrência de manifestações patológicas que possam surgir nas estruturas e afetar seu desempenho.

Mehta e Monteiro (2014) caracterizam as adições minerais como materiais silicosos finamente divididos e apresentam os seguintes benefícios quando elas são incorporadas ao concreto: melhor resistência à fissuração térmica, devido a um calor de hidratação menor; melhorias significativas na resistência final e estanqueidade do concreto, devido ao fato da redução na porosidade e da zona de transição interfacial.

As adições minerais podem ser classificadas em três grupos, de acordo com sua ação físico-química, segundo Schmalz (2018): materiais pozolânicos (sílica ativa, por exemplo), materiais cimentantes (tais como a escória granulada de alto-forno) e o fíler (como o pó de quartzo). Ainda que as pozolanas naturais sejam utilizadas em vários países, a utilização de subprodutos industriais como fonte primária de adições minerais para concreto tem se tornado comum atualmente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A nanosílica é caracterizada por ser constituída de nanopartículas de sílica (óxido de silício –  $\text{SiO}_2$ ), que pode ser de origem mineral, biogênica ou ainda, sintética. De acordo com Santos (2018), a nanosílica é um material mais fino que a sílica, apresentando, portanto, maior área superficial e como consequência, maior atividade pozolânica, que torna a microestrutura dos materiais cimentícios mais densa.

Devido à sua ação pozolânica elevada, que quando associada ao hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o transforma em C-S-H, a nanosílica facilita a hidratação do cimento, o que, como observa P. P. *et al.* (2021), melhora as propriedades mecânicas do concreto. Além disso, a adição da nanosílica em concretos, também ocasiona o efeito fíler, que é o refinamento dos poros, ou seja, suas partículas preenchem os vazios existentes no concreto.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de adições minerais cresce cada vez mais, juntamente com os estudos na área que buscam avaliar sua influência nas propriedades dos concretos como o aumento da durabilidade. Neste aspecto, a nanosílica configura-se como uma das adições já utilizadas, cuja incorporação promove efeitos como o aumento da resistência à compressão (FONSECA, 2010; SANTOS, 2018).

Uma outra finalidade buscada pelas pesquisas já realizadas e em andamento é a redução dos impactos da indústria da construção civil no meio ambiente, de forma que a utilização dos recursos naturais seja mais sustentável. Borges *et al.* (2014) pontuam que uma das formas de se reduzir o consumo de energia e as emissões durante o processo produtivo do cimento é a utilização de adições minerais na produção de cimentos compostos, que posteriormente poderão ser utilizados para fabricação de concreto. Mehta e Monteiro (2014) constataram que pode haver uma grande economia em materiais, se, futuramente, forem construídas estruturas que tenham uma maior durabilidade. A produtividade dos recursos naturais como o cimento da indústria do concreto pode aumentar em cinco vezes, por exemplo, se as estruturas fossem projetadas e executadas para uma vida útil mínima de 250 anos ao invés dos 50 anos, conforme recomendação da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

P. P. *et al.* (2021) destacam que o cimento Portland, um dos principais componentes do concreto, é responsável por aproximadamente 80% das emissões de CO<sub>2</sub> do material, o que representa de 5 a 7% do total global de emissões desse gás. E a demanda pelo concreto tende a crescer em 200% até 2050, comparando com as taxas de 2010. No trabalho de Rana *et al.* (2018), uma das conclusões foi de que a nanosílica pode manter as mesmas características no que diz respeito à resistência, quando substitui parcialmente o cimento Portland. Mukharjee e Barai (2015) foram além na questão de estudo da sustentabilidade nos materiais da construção civil e verificaram a sinergia entre a utilização de concretos contendo agregados graúdos reciclados e nanossílica.

Os resultados mostraram que os traços contendo os agregados graúdos reciclados sem incorporação de nanosílica apresentaram ligeira queda na resistência à compressão comparando-se aos traços de referência. Entretanto, a resistência aumenta conforme a porcentagem de adição de nanosílica também aumenta. Aos 90 dias, a resistência do traço contendo adição de 3% de nanosílica e agregados graúdos reciclados é equivalente ao concreto de referência, que contem agregados naturais e não possui adição de nanosílica.

Buscando maior sustentabilidade e em formas de mitigar os danos ao meio-ambiente, a nanosílica, quando incorporada ao concreto e substituindo parcialmente o cimento Portland, se apresenta como uma forma de diminuir a pegada de carbono no setor da construção civil.

Desse modo, esse trabalho buscará associar a utilização da nanosílica, que foi estudada anteriormente em diversos trabalhos, aos benefícios de melhoria em propriedades físicas e mecânicas de argamassas, concretos e pastas. A análise dessa sinergia tem o intuito de proporcionar à sociedade e ao meio acadêmico considerações sobre como a incorporação da nanosílica pode impactar em uma maior eficiência no uso dos recursos naturais por parte da construção civil, possibilitando maior sustentabilidade no setor. Uma vez comprovado o aumento significativo da resistência mecânica e, conseqüentemente, da durabilidade das estruturas, menos recursos naturais serão demandados para novas construções ou obras de reparos.

## 1.2 OBJETIVOS

Com a realização desse trabalho tem-se como objetivo avaliar o efeito da incorporação da nanosílica na resistência à compressão de concretos. Desse modo, os objetivos específicos são:

- Desenvolver um banco de dados com as seguintes informações, obtidas a partir de 39 trabalhos científicos: material estudado na pesquisa (concreto, argamassa ou pasta), tipo e teores da nanosílica utilizados e valores de resistência à compressão verificados;
- Avaliar os efeitos da incorporação da nanosílica em concretos por meio da análise estatística;
- Determinar, a partir da análise estatística, qual o tipo e o teor de nanosílica que produzem um melhor desempenho mecânico de compósitos cimentícios.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

O presente trabalho abordará primeiramente a revisão bibliográfica, na qual serão apresentados conceitos do concreto, a contextualização da utilização de adições minerais em concretos e posteriormente, focará especificamente na adição da nanosílica. A metodologia irá expor os procedimentos estabelecidos no desenvolvimento da pesquisa, as análises gráficas e os métodos estatísticos utilizados para a realização da análise. Em sequência, serão apresentados os resultados, discussões, considerações finais e por fim, as referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Primeiramente, a revisão bibliográfica contextualizará sobre o material concreto, seguido pela utilização de adições minerais em concretos de maneira geral e posteriormente focando na nanosílica, abordando suas principais propriedades, além dos benefícios para o concreto.

### 2.1 CONCRETO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, alcançando uma produção estimada em 2015 de 27,3 bilhões de toneladas (P. P. *et al.*, 2021). É composto por aglomerante, água e agregados (materiais granulares, como areia e brita). Pode-se somar a esses materiais, aditivos, produtos químicos que podem ser adicionados tanto à argamassa quanto ao concreto e que modificam características físicas e químicas, por exemplo, aditivos redutores de água podem plastificar misturas de concreto fresco, o que reduz a tensão superficial da água. Além disso, há a possibilidade de adição de materiais, como a nanosílica e a sílica ativa, com o objetivo de se obter alguma característica desejada (MEHTA e MONTEIRO, 2014; SANTOS, 2018).

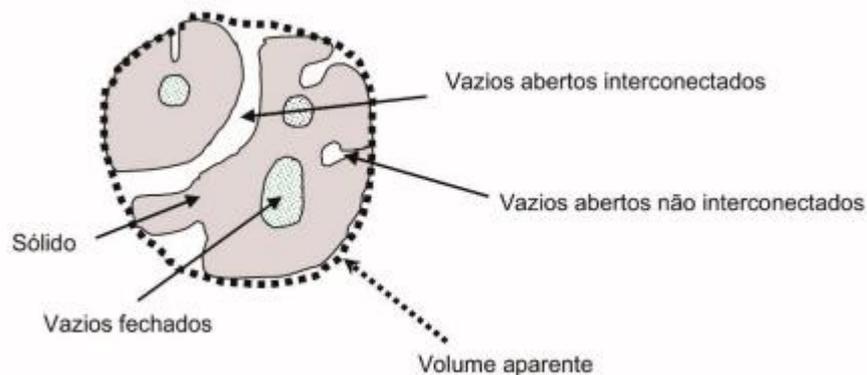
De acordo com Mehta e Monteiro (2014), essa taxa de utilização é muito maior do que era há 40 anos e os autores apontam três principais fatores para esse crescimento:

- Excelente resistência à ação da água, o que se torna extremamente útil para a construção de estruturas de controle, armazenamento e transporte de água como barragens e revestimento de canais. Elementos estruturais de fundações, por exemplo, e que são expostos à umidade, também são frequentemente construídos com concreto armado;
- Facilidade que o concreto possui em ser moldado em diversas formas e tamanhos, o que ocorre devido à consistência plástica do material. A partir do momento que o concreto se solidificou e endureceu, a fôrma pode ser retirada para reutilização;
- Disponibilidade e preço no mercado, uma vez que os principais componentes do concreto (cimento Portland, água e agregados) são relativamente fáceis de serem encontrados e estão disponíveis a um custo baixo.

Além disso, comparativamente à utilização do aço, o concreto possui algumas considerações que favorecem seu uso, como manutenção, uma vez que o material em si não sofre corrosão e não precisa de tratamento de superfície, resistência ao fogo, que é um importante aspecto em relação à segurança, e possui resistência ao carregamento cíclico, ou seja, a resistência à fadiga não é uma restrição para as estruturas de concreto.

Espera-se que em seu estado endurecido, o concreto apresente, principalmente, resistência à compressão e durabilidade satisfatórias e adequadas. A durabilidade do concreto, cujas definições pelas normas NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e NBR 6118 (ABNT, 2014) já foram apresentadas previamente no texto, pode ser atribuída à dificuldade de penetração de agentes agressivos em seus poros, ou seja, sua interação com o meio externo está diretamente conectada às características de sua estrutura porosa. A Figura 2.1 abaixo ilustra esquematicamente a estrutura do concreto.

**Figura 2.1: Esquema ilustrativo da estrutura do concreto**



Fonte: Ollivier; Torrenti *apud* Almeida (2016)

O tipo, a quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases presentes em um sólido constituem sua microestrutura, conforme apontam Mehta e Monteiro (2014). É importante ressaltar que, devido às pesquisas na área, as propriedades de um material se originam em sua microestrutura, ou seja, as modificações nas propriedades podem ser realizadas a partir dessa. O termo macroestrutura se refere à parte da microestrutura que é visível ao olho humano, ou seja, acima de 200 micrômetros.

No que diz respeito ao concreto, sua microestrutura heterogênea é altamente complexa. A macroestrutura é constituída por duas fases, pasta de cimento e os agregados, enquanto a microestrutura é composta por três, uma fase sólida (de agregados, compostos

hidratados e fases anidras do cimento), fase líquida (solução intersticial) e fase gasosa (mistura de ar e vapor de água) (ALMEIDA, 2016; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

## 2.2 ADIÇÕES MINERAIS EM CONCRETO

Configurando-se como recursos utilizados pela humanidade desde outrora, as adições minerais se caracterizam por qualquer material que não seja água, agregados, cimento ou aditivos utilizados como constituinte do concreto e adicionado anteriormente ou durante a mistura, com o intuito de substituir de forma parcial ou somar ao cimento. Nas últimas décadas, a utilização destes materiais vem sendo estudadas e analisadas por diversos pesquisadores com o objetivo de entender melhor suas propriedades específicas, quando incorporadas ao concreto. Isso porque elas podem interferir na resistência e trabalhabilidade do concreto, redução de custos de produção e até mesmo na destinação adequada de certos resíduos industriais (FONSECA, 2010; RAISDORFER, 2015; SENA *et al.*, 2018).

As adições minerais podem ser classificadas em três categorias: materiais pozolânicos, material cimentante e fíler.

No que diz respeito às adições com características pozolânicas, a norma NBR 12.653 (ABNT, 2015) define como “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes”. Podem ser classificados ainda em relação à sua origem em pozolanas naturais (de origem vulcânica e sedimentar) e pozolanas artificiais (provenientes de tratamento térmico ou subproduto industrial com atividade pozolânicas).

Os materiais cimentantes são aqueles que não necessitam da presença do hidróxido de cálcio para formar compostos cimentantes. Já o fíler caracteriza-se como um material finalmente dividido sem atividade química, cuja atuação pode ser definida como um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (SANTOS, 2018).

As principais fontes de subprodutos são as usinas de energia elétrica, que utilizam carvão como combustível, e os altos fornos metalúrgicos, que produzem, por exemplo, silício metálico e ligas de ferro silício. Com o devido controle de qualidade, esses materiais podem ser incorporados ao concreto de duas maneiras: como cimento Portland composto ou adição mineral. Quando isso ocorre, há uma considerável economia de custos e energia, além do fato de se evitar que esses subprodutos sejam lançados inadequadamente em aterros e córregos, ocasionando danos graves ao meio ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Entre as adições minerais, tem-se a cinza volante que tem sua origem na combustão de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados e as impurezas minerais, como argilas, fundem-se na alta temperatura. Tal matéria fundida é transportada para zonas de temperatura baixa, solidificando em partículas esféricas de vidro. A maior parte desses minerais é carregada pela corrente de exaustão do gás, passando a ser chamadas cinzas volantes, que é removida do gás por separação ciclônica, precipitação eletrostática e filtragem. A trabalhabilidade do concreto fresco e a velocidade de resistência no concreto endurecido são afetadas a depender da distribuição de dimensão da partícula, morfologia e superfície da cinza volante selecionada para uso como adição mineral.

Outra adição mineral é o metacaulim, que é uma pozolana cuja origem se dá através da calcinação de argila constituída por caulim, principalmente. A argila passa por um tratamento térmico, tendendo a romper a ordem de longo alcance da camada de alumina e sílica, formando assim um silicato de aluminato amorfo para produzir o metacaulim. Trata-se de um pozolana de alta reatividade que possui a capacidade de reação com cal com a disponibilidade de água, o que apresenta uma tendência de aglutinar materiais soltos (ALMEIDA, 2016; RAHEEM *et al.*, 2021).

Almeida (2016) apresenta que a adição do metacaulim aumenta a resistência à compressão, sobretudo em concretos de idades mais avançadas. Entretanto, como se trata de um material muito fino, adições maiores desse, demanda um aumento significativo na quantidade de água e/ou de aditivo para que a consistência seja mantida.

A seguir, o texto abordará separadamente a sílica ativa e por fim, a nanosílica.

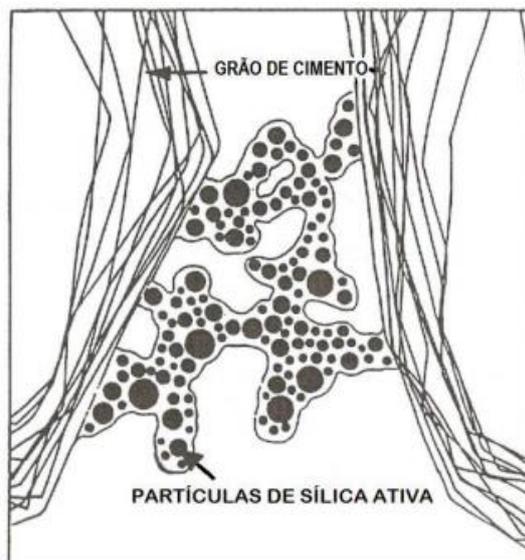
### **2.2.1 SÍLICA ATIVA**

Uma adição mineral classificada como pozolânica artificial é a sílica ativa. Trata-se de um subproduto da produção do silício metálico, que é utilizado por exemplo na fabricação de eletrônicos, das ligas de ferrosilício e de outras ligas de silício. A sílica ativa possui diversos tipos que se diferem em relação à composição química, cor, distribuição granulométrica dentre outras características que variam devido ao tipo de liga produzida, forno, composição química e dosagem de matérias-primas. De acordo com Fonseca (2010), devido ao fato de suas partículas serem extremamente pequenas, visto que seu diâmetro é cem vezes menor que o do cimento, a sílica ativa é uma das adições minerais de maior reatividade e é muito utilizada em concretos de alto desempenho. As partículas da sílica ativa também possuem uma área específica elevada e granulometria mais fina que os

cimentos, o que gera uma microestrutura mais densa e homogênea. Além do efeito fíler, quando adicionada ao concreto, a sílica ativa reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, ocasionando resistência ao concreto devido ao composto gerado, o silicato de cálcio hidratado (SANTOS, 2018). Por tais reações e efeitos, a sílica ativa vem sendo bastante utilizada, visando aumentar a compacidade e a resistência mecânica de concretos.

A adição da sílica ativa, no estado fresco do concreto, colabora para a diminuição da exsudação e da segregação, sendo recomendável a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes, de modo a permitir a trabalhabilidade da mistura. A Figura 2.2 demonstra o efeito físico do empacotamento da sílica ativa, reduzindo espaços vazios. Já no estado endurecido, a introdução desta adição mineral proporciona o aumento da resistência à compressão, uma vez que a permeabilidade e a porosidade são diminuídas e a resistência ao ingresso de agentes agressivos também aumenta (FONSECA, 2010).

**Figura 2.2: Efeito físico do empacotamento da sílica ativa**



Fonte: Fonseca (2010)

### **2.2.2 NANOSÍLICA**

Com seu surgimento datado em 1959 (SANCHEZ e SOBOLEV, 2010), a nanotecnologia configura-se como a engenharia dos materiais que variam de tamanho de 1 a 100 nanômetros e assim, explora propriedades e fenômenos que ocorrem nas suas escalas. A nanotecnologia começa a ser utilizada em compósitos cimentícios a partir do final da década de 1980. Os nano materiais possuem excelentes propriedades que podem impactar no desenvolvimento de materiais de alto desempenho para construção civil.

Há diversos nanomateriais que estão sendo utilizados no setor, os nanotubos de carbono (NTCs) são um exemplo. Formados somente por elementos de carbono em arranjo hexagonal, se enrolando em formato cilíndrico, no concreto, agem como pontes através de pequenos poros e fissuras. Os NTCs são “empacotados” com o C-S-H, proporcionando alta resistência de aderência entre esse material e a matriz cimento. Além dos nanotubos de carbono, outras nanopartículas estudadas como adição ao concreto são o óxido de titânio nanométrico (nano-TiO<sub>2</sub>), a nanoalumina (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a nano-magnetita (nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e a nanosílica (nano-SiO<sub>2</sub>) (ORELLANA, 2020).

E como foi apontado por Santos (2018), a nanosílica, mostrada na Figura 2.3 em sua forma em suspensão coloidal, vêm sendo utilizada como adição às matrizes cimentícias devido ao avanço das pesquisas experimentais sobre a nanotecnologia, embora em menor escala do que a utilização da sílica ativa.

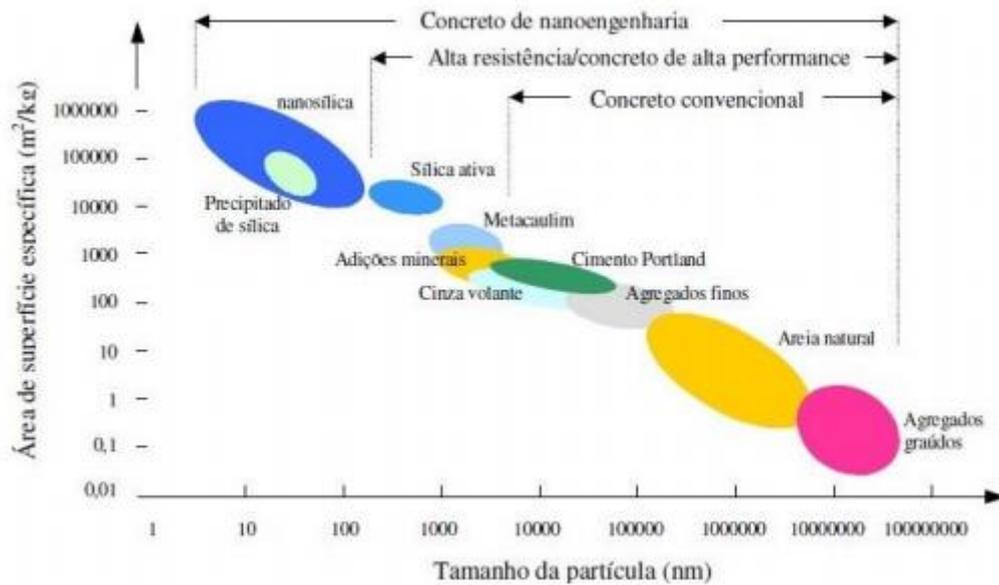
**Figura 2.3: Nanosílica em suspensão coloidal**



Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2019)

As nanopartículas de sílica compõem o que é denominado de nanosílica, que é composta de sílica amorfa e partículas esféricas menores que a sílica ativa, possuindo, portanto, maior área superficial. Devido a isso, apresenta maior atividade pozolânica e maior necessidade de água de molhagem, ocasionando uma redução na consistência da mistura em situações onde a relação água/aglomerante é fixada. Já que o material é mais fino, a nanosílica apresenta-se como um material mais eficaz no preenchimento de vazios entre os grãos de cimento e também no aumento da densidade de empacotamento de materiais cimentícios, além de outros benefícios como aceleração na hidratação do cimento, aumento da tenacidade, resistência à compressão, cisalhamento, tração e flexão (HONGJIAN *et al.*, 2014; SANTOS, 2018; SENA, 2018). A Figura 2.4 demonstra a relação entre o tamanho das partículas e a área de superfície específica de diversos materiais, incluindo a nanosílica.

**Figura 2.4: Relação entre o tamanho das partículas e a área de superfície específica de alguns materiais**



Fonte: Sanchez; Sobolev *apud* Schmalz (2018)

A nanosílica pode se apresentar de duas formas (SENA, 2018):

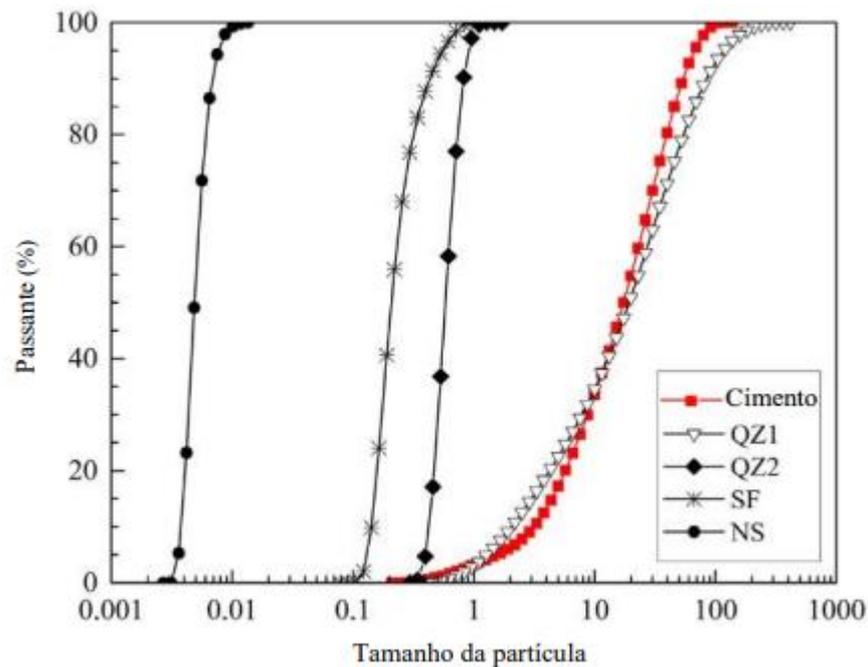
- Grãos secos compactados: a nanosílica é submetida a um procedimento de preparação especial antes de ser incorporada ao concreto, de forma a garantir a dispersão completa na água de amassamento ou de qualquer outro aditivo;
- Suspensão coloidal: é uma forma da nanosílica preparada já para a utilização e é produzida como uma suspensão estabilizada por um agente dispersor. Esta forma apresenta-se como a mais eficiente.

A nanosílica em suspensão coloidal é obtida pela precipitação de soluções de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) por meio de uma resina de troca iônica. Esse processo envolve água, hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Posteriormente à troca iônica, os íons passam por um reator com temperatura e pressão definidos, o que forma grupos silanóis e siloxanos ( $\text{Si-OH}$  e  $\text{Si-O-Si}$ ) e isso origina as partículas de nanosílica. Durante o processo de obtenção da nanosílica, alguns fatores como temperatura e adição de produtos especiais definem o tamanho das partículas, que passam por uma posterior filtragem de forma a estabelecer o teor de sólido desejado no material fabricado (OLIVEIRA, 2019).

As partículas coloidais da nanosílica interagem com o hidróxido de cálcio, que é formado durante a fase de hidratação do cimento, e em consequência, proporciona a

formação de silicato de cálcio hidratado. Isso aumenta a densidade da pasta de cimento, reforçando a estrutura entre os grãos de cimento e eliminando a água livre (SOUZA, 2021). E conforme ilustra a Figura 2.5, a nanosílica (NS) possui partículas de menor tamanho, comparando-se com outros materiais, como o cimento, quartzo (QZ1 e QZ2) e a sílica ativa (SF), justificando sua maior reatividade e maior superfície específica.

**Figura 2.5: Distribuição granulométrica comparativa entre quatro materiais**

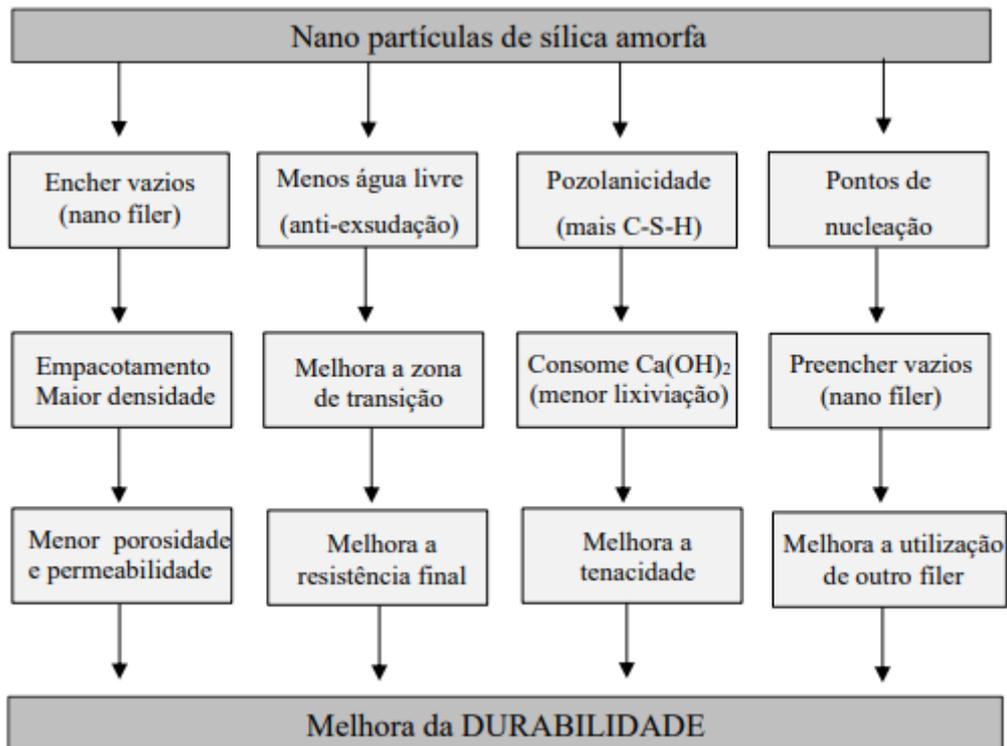


Fonte: Flores *apud* Souza (2021)

Devido ao fato de que as partículas da nanosílica possuem grande área superficial, assim como a sílica ativa, elas adsorvem uma quantidade maior de água e isso ocasiona redução na consistência da mistura. Para compensar a diminuição na trabalhabilidade, pode-se utilizar, por exemplo, aditivos redutores de água, que conferem carga negativa às partículas de cimento, ao envolvê-las, gerando repulsão entre as partículas, diminuição da tensão superficial da água circundante e aumentando a fluidez da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014; SANTOS, 2018; SOUZA, 2021).

O quadro esquemático apresentado na Figura 2.6 resume quais são os efeitos da adição da nanosílica em argamassas e concretos.

Figura 2.6: Efeitos da adição de nanosilica em argamassas e concretos



Fonte: Quercia *apud* Souza (2021)

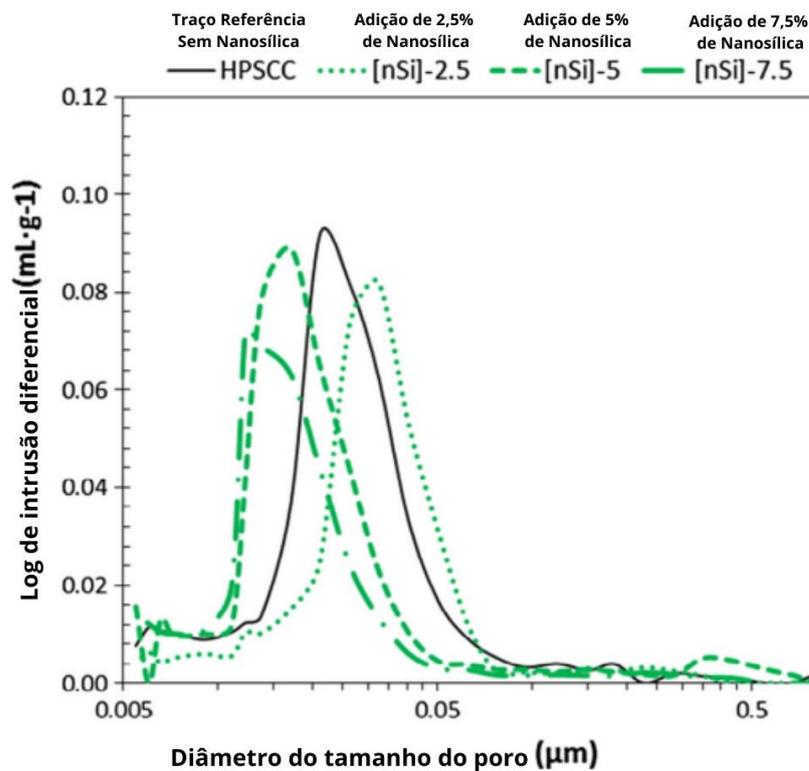
O aumento na resistência à compressão foi comprovado em diversos estudos. Aos 28 dias, comparando-se com o traço de referência, o traço com adição de 1,5% de nanosilica apresentou aumento em 30% na propriedade mecânica, como apresentam Orellana *et al.* (2019). Um aumento similar foi verificado por Pereira (2019), com 10% de adição de nanosilica, a resistência à compressão aumentou em 27% em relação ao concreto sem adições aos 63 dias, o que segundo o autor, se deve ao fato dos efeitos da nanosilica que auxiliam no refinamento da microestrutura.

Kumar *et al.* (2020) apresentam um aumento de 30% na resistência à compressão em traço de concreto com adição de 1% de nanosilica para a idade de 28 dias, atribuindo isso ao refinamento aprimorado dos poros. Outra consideração feita pelos autores é que a adição da nanosilica melhora a estrutura hidratada do concreto e que as nanopartículas atuam no preenchimento dos vazios, melhorando a densidade do concreto e reduzindo a porosidade do material.

Em seu trabalho, Massana *et al.* (2017) também concluem que a adição da nanosilica em concreto provoca um aumento na resistência à compressão e ilustram por meio de gráficos, a frequência de distribuição dos poros das misturas com adição do

material, mostrando o efeito positivo que isso ocasiona na modificação dos poros internos em relação ao concreto de referência, conforme ilustra a Figura 2.7. Tal efeito ocorre devido à uma potencialização do processo da hidratação em decorrência da alta atividade pozolânica da adição da nanosílica. Isso pode levar à formação de uma maior quantidade de gel C-S-H e poros de gel, reduzindo, assim, o diâmetro do poro.

**Figura 2.7: Distribuição de frequência dos poros em misturas contendo nanosílica na idade de 28 dias**

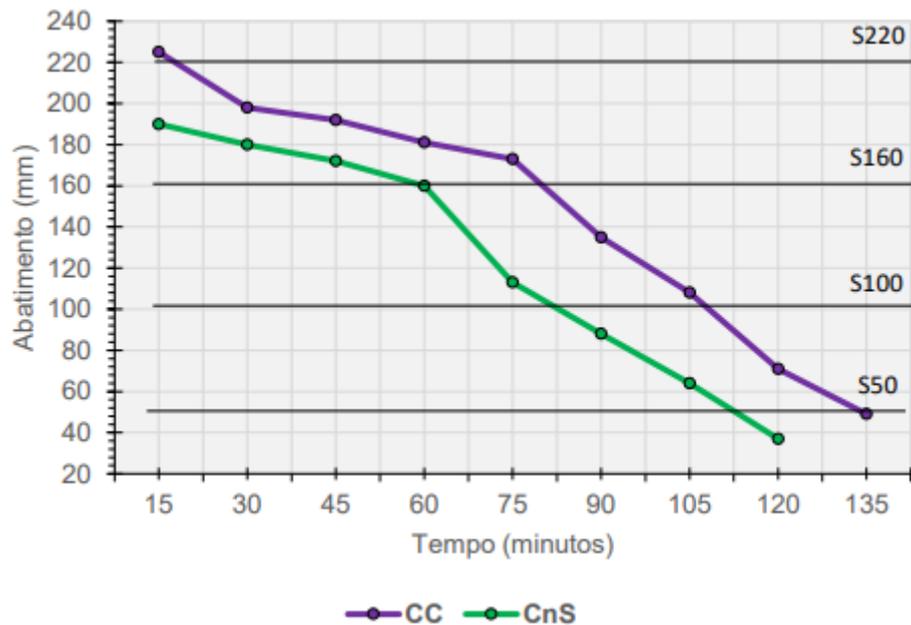


Fonte: Massana *et al.* (2017)

No trabalho de Campos Neto e Geyer (2017), o traço de concreto analisado contendo nanosílica apresentou um tempo de trabalhabilidade menor do que aquele sem adição. A redução foi de quinze minutos, sendo essa diferença um reflexo dos abatimentos iniciais atingidos pelos concretos. El-Baky, Yehia e Khallil *apud* Campos Neto e Geyer (2017) apuraram que grande parte da água de amassamento é utilizada na ativação das partículas de nanosílica, devido ao fato de sua elevada superfície específica, o que reduz a fluidez inicial da mistura. A Figura 2.8 ilustra a evolução da consistência das misturas e também apresenta as linhas limitantes das classes de consistência dos concretos de acordo com a classificação da norma NBR 7212 (ABNT, 2012), conforme ilustra a Tabela 2.1. O concreto

com adição de nanosílica (CnS) apresentou-se na classe S160, devido ao menor abatimento inicial e o concreto referência (CC) se enquadrava em S220.

**Figura 2.8: Evolução da consistência das misturas**



Fonte: Campos Neto e Geyer (2017)

**Tabela 2.1: Classes de consistência**

Classe	Abatimento (A) (mm)
S10	$10 \leq A < 50$
S50	$50 \leq A < 100$
S100	$100 \leq A < 160$
S160	$160 \leq A < 220$
S220	$A \geq 220$

Fonte: Adaptado de ABNT (2012)

No trabalho apresentado por Nollí Filho (2015), foi realizada uma análise de viabilidade econômica, comparando o traço de concreto referência sem adições com os traços contendo a adição de nanosílica estabilizada e outro combinando nanosílica estabilizada e sílica ativa. O autor compilou os valores em reais por quilo (R\$/kg) de cada material utilizado para compor os traços, além do consumo total em quilos, para chegar ao valor total de cada traço por metro cúbico. A Tabela 2.2 mostra o comparativo entre os

traços de concretos por custo por metro cúbico e a variação do custo em relação ao traço referência.

**Tabela 2.2: Comparativo entre os traços de concreto**

Traço	R\$/m <sup>3</sup>	Economia
Referência (sem adições)	334,34	-
Nanosílica estabilizada	315,26	5,7%
Nanosílica estabilizada e sílica ativa	345,01	-3,2%

Fonte: Adaptado de Nolli Filho (2015)

A partir dos dados expostos por Nolli Filho (2015), pode-se verificar que o concreto contendo apenas a nanosílica mostrou-se economicamente vantajoso, uma vez que apresentou redução de 5,7% nos custos para produção do metro cúbico do material. O autor realizou uma outra comparação econômica, projetando a seção transversal (em cm) e estimando o volume necessário de concreto (em m<sup>3</sup>) utilizando como parâmetros uma carga concentrada  $P = 7500$  kN, comprimento  $L = 3,00$  m e a resistência à compressão encontrada em seu trabalho para cada um dos três traços para a idade de 28 dias, sendo 62,0 MPa (Referência), 69,3 MPa (Com nanosílica estabilizada) e 73,9 MPa (Com nanosílica estabilizada e sílica ativa). O comparativo realizado pelo autor encontra-se na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3: Comparativo dos resultados do trabalho de Nolli Filho (2015)**

Traço	Seção Transversal (cm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Custo (R\$)	Economia (%)
Referência	38 x 38	0,433	144,84	-
Nanosílica estabilizada	36 x 36	0,388	122,57	15,4
Nanosílica estabilizada e sílica ativa	35 x 35	0,368	126,79	12,5

Fonte: Adaptado de Nolli Filho (2015)

Nolli Filho (2015) conclui que devido ao fato de que é possível projetar estruturas mais esbeltas com os traços contendo adições minerais, graças ao ganho na resistência mecânica, como observado anteriormente na Tabela 2.3, a utilização da nanosílica como adição ao concreto é economicamente vantajosa, apresentando uma economia de 15,4% no cálculo dos custos do volume total de concreto. E embora, o traço de concreto que contém a sílica ativa combinada à nanosílica estabilizada apresentou um custo por metro cúbico 3,2%

maior em relação ao referênciã, também se apresenta como vantajoso, uma vez que no cálculo do volume total de concreto, a economia foi de 12,5%.

A sinergia entre a sílica ativa e a nanosílica vem recebendo especial destaque por parte dos pesquisadores. Schiavon (2019) analisou o comportamento de concretos com adição das mesmas, associadas e isoladamente, e concluiu que os ganhos em relação à resistência à compressão foram maiores naqueles traços utilizando sílica ativa do que apenas a nanosílica. Moraes (2012) também considera que a utilização em conjunto das duas substâncias, apresenta maiores acréscimos na resistência mecânica de concretos.

Entretanto, isso não é consenso, visto que Santos (2018) não encontrou melhorias significativas na resistência à compressão com a utilização combinada de nanosílica coloidal e sílica ativa. É interessante apontar as conclusões de Dinten (2000), ou seja, um trabalho realizado há mais tempo. No referido estudo, foi observado um aumento na resistência à compressão de apenas 4,5% no traço com adição de nanosílica em relação ao referênciã, sem adições. O aumento foi significativo, entretanto, menor quando comparado com o traço com sílica ativa, que elevou a resistência em aproximadamente 33%.

Já nos estudos de Shafiq *et al.* (2019), foram analisados os efeitos da combinação de metacaulim modificado com a nanosílica e naquele traço contendo 10% de adição do metacaulim e 1% de nanosílica, o aumento na resistência à compressão foi de 88,3 MPa (valor referênciã) para 103,6 MPa, configurando-se como a melhor combinação do trabalho.

Em seus estudos, Almeida (2016) discorre que além das adições minerais, fatores como a relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) e a idade dos concretos também influenciam na resistência à compressão. Em seu traço de concreto contendo nanosílica e sílica ativa, aos 91 dias o resultado obtido foi de 68,3 MPa para uma relação  $a/agl$  de 0,4 enquanto que para uma relação de 0,6 e na mesma idade, o valor encontrado foi de 46,4 MPa. Segundo a autora, essa influência positiva na resistência à compressão se deve ao fato que quanto mais baixa a relação  $a/agl$ , uma quantidade menor de água é demandada, resultando em um índice de vazios reduzido no concreto no estado endurecido. De maneira geral, os traços com relação  $a/agl$  de 0,4 apresentaram resistência à compressão 57% maior do que aqueles com  $a/agl$  igual a 0,6, mas isso considerando todas as adições minerais analisadas pelo trabalho (nanosílica, sílica ativa e metacaulim).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho caracteriza-se em apresentar uma revisão sistemática da literatura sobre a incorporação de nanosílica em concretos.

Primeiramente, definiu-se que seria necessário desenvolver um banco de dados com as informações que seriam coletadas a fim de se obter uma melhor organização e visualização das mesmas, alinhando aos objetivos específicos do trabalho. Escolheu-se elaborar o banco de dados no software Microsoft Excel, comumente utilizado para tais finalidades devido à sua eficiência e praticidade.

A pesquisa foi realizada em sites de pesquisa de artigos acadêmicos, sendo eles o Google Acadêmico e Science Direct, utilizando-se da plataforma do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), vinculada ao Ministério da Educação, para ter acesso a alguns dos trabalhos científicos encontrados nos dois sites anteriormente citados.

Para realizar as buscas nesses portais, elencou-se palavras-chave em português e inglês de modo a encontrar os artigos que estivessem mais alinhados aos objetivos específicos deste trabalho. As palavras escolhidas foram: “nanosílica”, “concreto”, “argamassa”, “matriz cimentícia”, “pasta”, “resistência à compressão” e “adições minerais”. Sempre combinando a primeira com as três subsequentes, adicionando as demais ocasionalmente para refinar os resultados. Em inglês as palavras-chave foram “*nanosilica*”, “*concrete*”, “*mortar*”, “*cement matrix*”, “*paste*”, “*compressive strength*” e “*mineral additions*”.

Desse modo, definiu-se que os critérios para a seleção dos trabalhos científicos fossem:

- Estudo da nanosílica como adição mineral, isolada ou associada, por exemplo, com a sílica ativa;
- Trabalhos publicados nos últimos 10 anos;
- Pesquisas em que foi analisada, pelo menos, a resistência à compressão de pastas, argamassas ou concretos com a incorporação da nanosílica.

Vale ressaltar que se optou por não restringir o banco de dados com o tipo da nanosílica (em pó ou em solução coloidal, por exemplo), visto que a variabilidade é grande e

que, caso escolhesse apenas um tipo, a quantidade amostral poderia ser insuficiente para desenvolvimento do trabalho. Essa variabilidade pode ser explicada, pois embora a utilização da nanosílica esteja sendo estudada como adição mineral a materiais cimentícios, são trabalhos relativamente recentes no meio científico.

Em um primeiro momento, priorizou-se artigos publicados no Brasil, devido ao fato de que, além dos materiais utilizados, os fatores ambientais podem interferir nas propriedades analisadas, alinhando com o objetivo deste trabalho contribuir para a engenharia brasileira. Entretanto, para alcançar uma maior quantidade de trabalhos e assim, construir um banco de dados mais robusto, expandiu-se a seleção para artigos de autores internacionais também.

A seleção dos trabalhos chegou em 39 artigos acadêmicos ao todo, alcançando a meta definida inicialmente. Com os trabalhos selecionados, o próximo passo foi um refinamento do banco de dados, a fim de agrupar aqueles com mais características semelhantes entre si, de modo que a análise comparativa fosse mais adequada.

O próximo passo da metodologia, portanto, foi realizar esse refinamento das informações coletadas, no qual chegou-se aos seguintes números em relação ao material que é o objeto de estudo dos trabalhos:

- 6 trabalhos envolvendo pasta cimentícia;
- 3 trabalhos envolvendo argamassa;
- 30 trabalhos envolvendo concreto.

Devido a esses números, optou-se que o presente trabalho se restringiria à análise apenas das pesquisas realizadas em concreto, pois a quantidade é satisfatória e possibilita melhores análises e resultados. Dentre esse total, foram selecionados 24 trabalhos, sendo artigos científicos, teses e dissertações de autores nacionais e 15 de pesquisadores internacionais.

Com o refinamento dos dados, uma nova planilha foi feita contendo apenas informações consideradas fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho: nome do(s) autor(es), ano de publicação do trabalho, teor da nanosílica, teor de sílica ativa (se houver), valor da resistência à compressão do traço de referência utilizado no trabalho e valor da resistência à compressão no traço contendo a adição da nanosílica. Além disso, foram adicionadas duas colunas para auxiliar na análise dos dados, uma contendo a diferença entre o valor da resistência à compressão no traço de referência e o traço com nanosílica.

Entretanto, constatou-se que seria necessário selecionar determinados teores de nanosílica e idades de concreto para poder realizar uma melhor análise, visto que no banco de dados foi identificado uma grande variedade de teores, sendo eles: 0,05%, 0,10%, 0,20%, 0,39%, 0,40%, 0,50%, 0,60%, 0,75%, 0,80%, 0,85%, 1,00%, 1,10%, 1,50%, 1,70%, 2,00%, 2,50%, 3,00%, 3,20%, 3,50%, 4,00%, 5,00%, 6,40%, 7,50% e 10,00%.

Dessa forma, as variáveis selecionadas foram:

- Teores de nanosílica: 1%; 1,5%; 2%, 3% e 5%;
- Idades das amostras de concretos: 7 e 28 dias.

Essa decisão pode ser explicada por dois principais motivos. O primeiro é que foram verificados 24 teores de nanosílica diferentes entre os trabalhos selecionados, sendo que em muitos casos, haveria apenas uma única amostra de traço de concreto. Assim, optou-se por restringir aos teores com a maior quantidade de amostras. Em relação às idades, observou-se que devido à alta atividade pozolânica, os concretos que contêm a adição de nanosílica já apresentam efeito na resistência à compressão em menores idades, como 7 e 28 dias, conforme foi comprovado por Shahrokhinasab *et al.* (2021).

A última etapa da metodologia do presente trabalho foi analisar as informações obtidas por meio das análises estatísticas e gráficas das amostras selecionadas de traços de concreto contendo nanosílica.

Essa forma de análise de dados foi utilizada anteriormente no trabalho de Oliveira (2021), o qual também auxiliou no desenvolvimento deste trabalho, colaborando e orientando o desenvolvimento do banco de dados no Microsoft Excel.

No que diz respeito às limitações e dificuldades encontradas nessa etapa do método do trabalho, pode-se citar principalmente o número relativamente reduzido de artigos científicos, comparando-se a outros temas de estudo como concretos com adições minerais em geral, devido à especificidade da presença da nanosílica.

### **3.1 ANÁLISE GRÁFICA**

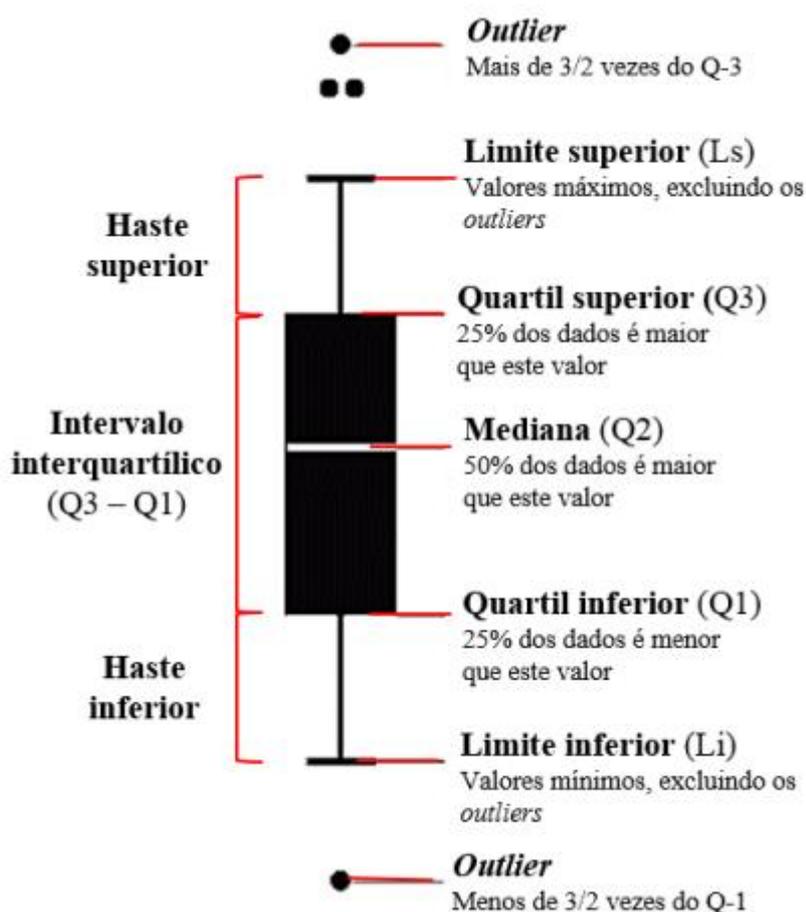
Quanto à análise gráfica, foram construídos gráficos nos modelos “Box-plot”, de “Colunas combinado com linhas” e de “Regressão Linear” para realizar a comparação entre os concretos selecionados. Os gráficos do modelo box-plot foram construídos no software OriginLab, enquanto os demais foram desenvolvidos com o auxílio do Microsoft Excel.

O gráfico de barras é uma forma de representação de dados estatísticos, na qual as barras podem estar representadas horizontalmente ou verticalmente, como foi adotado no

presente trabalho. Tal construção gráfica permite que se realize uma análise por meio de uma comparação entre as quantidades expressas por barras retangulares uniformes em sua largura, mas com a altura proporcional à quantidade representada (PONTES e GUIMARÃES, 2021).

Segundo Valladares Neto *et al.* (2017), o box-plot é um recurso gráfico usado principalmente para sumarizar e analisar dados quantitativos e sua estrutura básica pode ser configurado em orientação horizontal ou vertical, ambas seguindo o formato de “caixa e haste”. A caixa (box) assume geralmente o formato retangular e a haste se assemelha à letra T, representando os valores compreendidos entre a caixa e os valores limites superior e inferior dos dados. Além disso, a estrutura básica ainda apresenta o desenho da mediana em forma de uma linha dentro da caixa. A Figura 3.1 apresenta a estrutura básica dessa representação gráfica no formato vertical, com as informações contidas nela.

Figura 3.1: Informações contidas no box-plot



Fonte: Valladares *et al.* (2017)

A regressão linear consiste em tentar relacionar um conjunto de observações de determinadas variáveis designadas genericamente por  $X_k$  ( $k = 1 \dots p$ ) com as leituras de uma grandeza  $Y$  (MATOS, 1995). Dessa forma, a relação se dá pela Equação 3.1:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , ...,  $b_p$  são os parâmetros da relação linear procurada.

Com o auxílio do Microsoft Excel, é possível plotar um gráfico a partir dos dados das variáveis escolhidas como  $X$  e  $Y$  e assim obter as informações desejadas para a análise da regressão linear. No caso deste trabalho, no eixo horizontal ( $X$ ) foram dispostos os valores da resistência à compressão dos traços referência e no eixo vertical ( $Y$ ), os valores de resistência das amostras de concreto contendo adição de nanosílica. Visando uma melhor análise e organização, optou-se por construir um gráfico de regressão linear para cada um dos 5 teores selecionados (1%, 1,5%, 2%, 3% e 5%) para cada idade do concreto (7 e 28 dias).

### 3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Realizou-se a análise estatística pelos métodos Análise de Variância – ANOVA, Teste de Tukey e Teste de Anderson-Darling, utilizando três softwares, de modo a comparar os valores obtidos em cada um e validar as análises: o próprio Microsoft Excel, Past e o OriginLab.

A análise de variância (ANOVA) é utilizada em diversas áreas da ciência, como por exemplo, na medicina e agricultura, conforme apontado por Andrade (2015). Trata-se de uma ferramenta estatística que realiza uma comparação de vários grupos ou estratos de interesse. A hipótese testada na ANOVA é a de que as médias populacionais dos tratamentos não possuem diferença entre si a um determinado nível de significância. O teste básico utilizado para comparar as médias dos tratamentos na ANOVA foi proposto por Ronald Aylmer Fischer, entretanto, o teste  $F$  substituiu o anterior (PAESE *et al.*, 2001; PAGOTTO *et al.*, 2021).

O teste de Tukey pode ser agregado como um complemento ao teste  $F$  da análise de variância e baseia-se na diferença mínima significativa ( $dms$ ), representada por  $\Delta$  e dada pela Equação 3.2:

$$\Delta = q \times s \times \sqrt{r} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

q = valor da amplitude total estudentizada, obtida em tabelas disponibilizadas na rede, em função do número de médias a serem comparadas ( $n_1$ ) e do número de graus de liberdade do resíduo ( $n_2$ ), geralmente ao nível de 5% de probabilidade;

s = desvio padrão, obtido por  $s = \sqrt{QM_{Res}}$

r = número de repetições com que foram calculadas as médias dos tratamentos

O procedimento para o cálculo do Teste de Tukey consiste em primeiramente calcular o valor de  $\Delta$ . O próximo passo é o cálculo de todas as estimativas de contrastes entre duas médias, tal como indica a Equação 3.3:

$$\hat{Y} = \hat{m}_i - \hat{m}_j \quad (\text{Equação 3.3})$$

Com,

$$i = 1, 2, \dots, I - 1 \text{ e } j = i + 1, i + 2, \dots, I$$

Sendo I = número de tratamentos do experimento.

Posteriormente, compara-se o valor em módulo de  $\hat{Y}$  com  $\Delta$ , se o primeiro for maior que o segundo ao nível determinado de significância no estudo, indica que há diferença significativa entre as médias (PERTICARRARI, [s. d.]). No Teste de Tukey, utilizam-se as letras do alfabeto para indicar as médias que possuem similaridade entre si, por exemplo, se duas médias não apresentarem a diferença significativa, recebem a notação da letra "A" para indicar essa semelhança.

Já o Teste de Normalidade de Anderson-Darling, como apontado por Lanini (2021), é utilizado para avaliar a normalidade na distribuição de resíduos da análise de variância – ANOVA (validação da ANOVA). Se o valor P indicado pelo teste apresentar valor igual ou superior ao nível de significância determinado, conclui-se que há normalidade na distribuição, sendo essa a hipótese inicial ( $H_0$ ). Caso não, ou seja, o valor P for menor que a significância, a hipótese ( $H_1$ ) é de que os resíduos não seguem uma distribuição normal. Assim, uma estratégia para se trabalhar com a não normalidade é a utilização de métodos estatísticos que dispensem a suposição de uma distribuição de probabilidade específica, conforme aponta Pino (2014).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados nos formatos de gráficos e por meio de uma análise estatística, além do próprio banco de dados utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

### 4.1 BANCO DE DADOS

A seguir, apresenta-se a Tabela 4.1 contendo os trabalhos selecionados inicialmente para o desenvolvimento do banco de dados.

**Tabela 4.1: Informações dos trabalhos selecionados para compor o banco de dados**

Autor (es)	Título do Trabalho	Teores de Nanosílica
Almeida (2017)	Contribuição ao Estudo da Durabilidade e do Transporte de Fluidos em Concretos contendo Adições Minerais	1%
Andrade (2017)	Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições mineraiis altamente reativas	3%
Campos Neto e Geyer (2017)	Efeitos do uso de aditivo com nanossílica na consistência e resistência mecânica do concreto	-
Cauduro (2015)	Estudo da incorporação de nanotubos de carbono e nanossílica em pasta de cimento Portland	1% e 2%
Dantas (2013)	Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland	0,25%, 0,50% e 1%
Dinten (2000)	Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto	5%
Elrahman <i>et al.</i> (2019)	Influence of nanosilica on mechanical properties, sorptivity, and microstructure of lightweight concrete	1%; 2% e 4%

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.1: Informações dos trabalhos selecionados para compor o banco de dados  
(continuação)**

Autor (es)	Título do Trabalho	Teores de Nanosílica
Fraga <i>et al.</i> (2018)	Estado da Arte dos Métodos e Efeitos da Dispersão da Sílica Ativa e da Nanossílica em Pastas e Argamassas	-
Gopinath <i>et al.</i> (2012)	Effect of Nano silica on Mechanical Properties and Durability of Normal Strength Concrete	1,5% e 3%
Gurgel (2020)	Efeito da incorporação da nanossílica em pastas de cimento com alto teor de fíler calcário	2%
Jittabut (2015)	Effect of Nanosilica on Mechanical and Thermal Properties of Cement Composites for Thermal Energy Storage Materials	1%, 2%, 3%, 4% e 5%
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Performance evaluation of nano-silica concrete	0,5%, 1% e 1,5%
Li <i>et al.</i> (2006)	Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement	1% e 3%
Massana <i>et al.</i> (2018)	Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete	2,5%, 5% e 7,5%
Mendes (2016)	Efeito da Nanosílica em Matrizes Cimentícias de Ultra Alta Resistência	0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,4%, 0,8%, 1,7% 3,2% e 6,4%
Moraes (2012)	Contribuição aos estudos da influência da nanossílica nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade de concretos para produção em centrais e para fabricação de pré-moldados	1%
Mukharjee e Bara (2015)	Characteristics of sustainable concrete incorporating recycled coarse aggregates and colloidal nano-silica	0,75%, 1% e 3%
Nogueira <i>et al.</i> (2018)	Incorporação de nanossílica em compósitos cimentícios	0,2% e 0,4%
Nolli Filho (2015)	Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada	0,39%
Oliveira (2019)	Estudo de Matrizes Cimentícias Ternárias Contendo Sílica Ativa e Nanossílica	3%

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.1: Informações dos trabalhos selecionados para compor o banco de dados  
(continuação)**

Autor (es)	Título do Trabalho	Teores de Nanosílica
Orellana <i>et al.</i> (2019)	Desempenho mecânica e físico de concretos com adição de nanosílica e nanoalumina coloidais	1,5%
Orellana (2020)	Análise da adição de micro e nanomateriais na durabilidade de concretos submersos do tipo recifes artificiais fluviais	1,5%
P. P. <i>et al.</i> (2021)	Effect of nano-silica in concrete; a review	-
Pereira (2019)	Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanosílica	1%, 5% e 10%
Rana <i>et al.</i> (2018)	Experimental Study of Strength Property of Concrete Using Nanosilica	0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%
Raheem <i>et al.</i> (2021)	Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete	-
Sakthivel e Balasundaram (2016)	Experimental Investigation on Behaviour of Nano Concrete	2,5%, 3% e 3,5%
Santos (2016)	Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para as Melhorar Propriedades de Concretos de Alto Desempenho	1% e 2%
Santos (2019)	Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO <sub>2</sub>	1%, 5% e 10%
Schiavon (2019)	Análise da microestrutura de concretos de alto desempenho contendo nanosílica e sílica ativa	1,5% e 3%
Schmalz (2018)	Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica	1%, 5% e 10%
Schwartz e Cassol (2018)	Estudo comparativo entre o concreto com adição de nanosílica e o concreto com adição de sílica ativa em suspensão	0,45% e 1%

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.1: Informações dos trabalhos selecionados para compor o banco de dados  
(continuação)**

Autor (es)	Título do Trabalho	Teores de Nanosílica
Serag <i>et al.</i> (2017)	Effect of Nano Silica on Concrete Bond Strength Modes of Failure	1,5%, 3% e 4,5%
Siqueira (2015)	Influência da nanosílica estabilizada pelo superplastificante no desempenho do concreto	0,60%; 0,85% e 1,10%
Shafiq <i>et al.</i> (2019)	Effects of Modified Metakaolin Using Nano-Silica on the Mechanical Properties and Durability of Concrete	1% e 2%
Shahrokhinasab <i>et al.</i> (2020)	Improvement of concrete characterization using nanosilica	2,5%, 4,5% e 6,5%
Sikora <i>et al.</i> (2017)	Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica	1% e 3%
Siqueira (2015)	Influência da nanosílica estabilizada pelo superplastificante no desempenho do concreto	0,60%; 0,85% e 1,10%
Souza (2021)	Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto	2%

Fonte: Autor (2021)

A seguir serão apresentadas as justificativas para a exclusão de alguns trabalhos selecionados para as etapas seguintes da análise dos dados:

- Em Siqueira (2015), o autor não realizou uma comparação dos traços contendo adição de nanosílica com um traço de concreto sem qualquer tipo de adição do material, o que impossibilitaria uma análise com os demais trabalhos, que realizaram a comparação com um traço referência;
- O trabalho de Campos Neto e Geyer (2017) não especifica o teor específico de nanosílica utilizado em seus estudos, apresentando apenas o traço unitário do aditivo que contém a nanosílica em sua composição, o que inviabilizou seu uso para este trabalho;
- Santos (2019) e Pereira (2019) utilizaram dos mesmos dados experimentais para a realização de seus trabalhos, dessa forma, optou-se pela utilização de apenas um dos trabalhos para realizar a análise, no caso, os dados do último;

- P. P. *et al.* (2021) não realizam ensaios em seu trabalho, configurando-se em um trabalho de revisão bibliográfica de outros autores;
- Raheem *et al.* (2021) também é um trabalho de revisão bibliográfica sobre outros trabalhos;
- Os trabalhos de Andrade (2017), Cauduro (2015), Dantas (2012), Fraga *et al.* (2018), Gurgel (2020) e Jittabut (2015) avaliaram os efeitos da adição da nanosílica em pastas de cimento, e com a opção pela utilização apenas dos trabalhos sobre concreto, não foram utilizados para as etapas seguintes da análise de dados;
- Nogueira *et al.* (2018), Schmalz (2018) e Sikora *et al.* (2017) avaliaram o efeito da adição da nanosílica em argamassas e esses trabalhos deixaram de ser utilizados devido ao mesmo argumento do tópico anterior.

Além disso, vale ressaltar que se optou por utilizar os trabalhos de Dinten (2000) e Li *et al.* (2006) mesmo ambos tendo sido publicados há mais de 10 anos, em função dos teores de nanosílica utilizados nas pesquisas. Outro ponto de atenção a ser explanado é que devido à apresentação dos dados da resistência à compressão na forma gráfica, os dados foram extraídos realizando regra de três simples nos trabalhos de Schiavon (2019), Elrahman *et al.* (2019), Shafiq *et al.* (2019) e Mukharjee e Barai (2015).

As amostras de traços de concreto que continham sílica ativa em sua composição foram eliminadas no banco de dados, devido ao fato de que a incorporação do material poderia interferir nos resultados de resistência à compressão dos concretos.

O Apêndice A desse trabalho apresenta outras informações referentes às amostras de concreto como o valor da resistência à compressão e o fator água/cimento (Tabela A1).

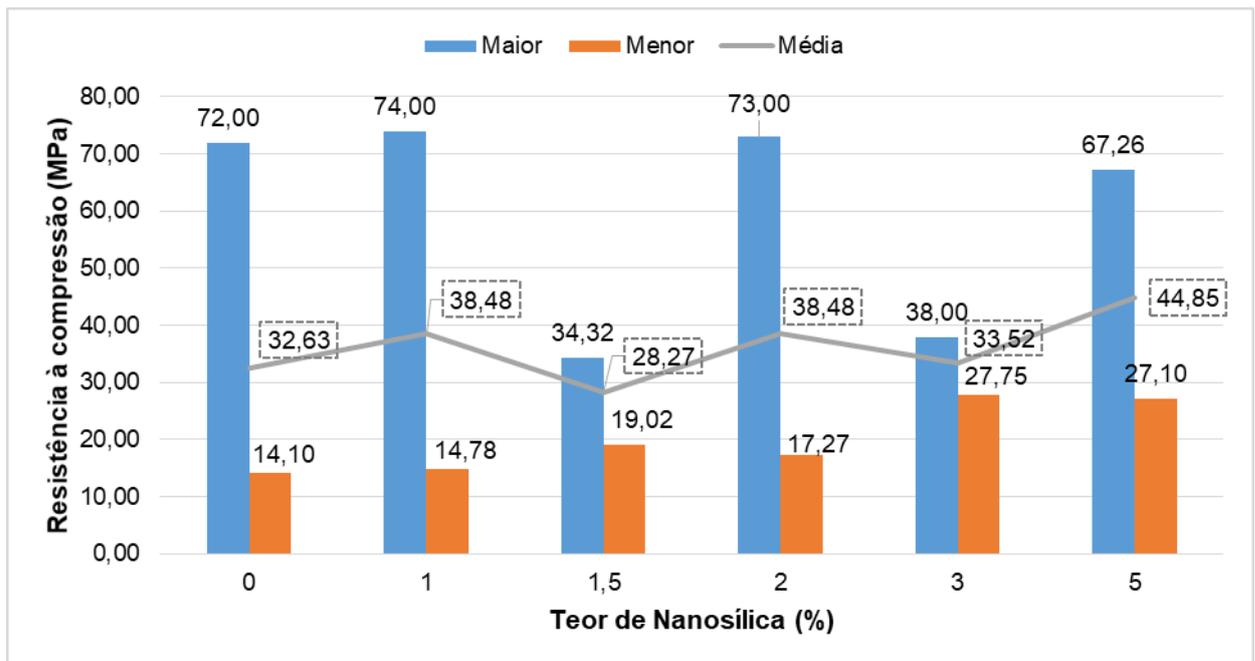
## 4.2 ANÁLISE GRÁFICA

Nessa seção serão apresentados os gráficos desenvolvidos durante o trabalho para se realizar a análise do comportamento da incorporação da nanosílica frente à resistência à compressão dos concretos dos trabalhos selecionados no banco de dados.

Primeiramente, o Gráfico 4.1 ilustra os maiores e menores valores da resistência à compressão, aos 7 dias, das amostras de concreto contendo nanosílica e referência, ou seja, sem a presença do material, além de suas médias. Observa-se que as médias alternaram entre 28,27 MPa e 44,85 MPa. À exceção do grupo de amostras com 1,5% de nanosílica, as médias dos demais grupos foram superiores ao grupo de referência. Os

grupos dos teores de 1% e 2% de nanosílica apresentaram seus maiores valores de resistência à compressão similares ao grupo referência. Em relação aos menores valores, 14,78 MPa e 17,27 MPa, estes se deram no trabalho de Elrahman *et al.* (2019), que estudaram a influência da nanosílica em concretos leves e como os próprios autores afirmam, o desempenho mecânico desse tipo de concreto é inferior aos concretos de peso normal.

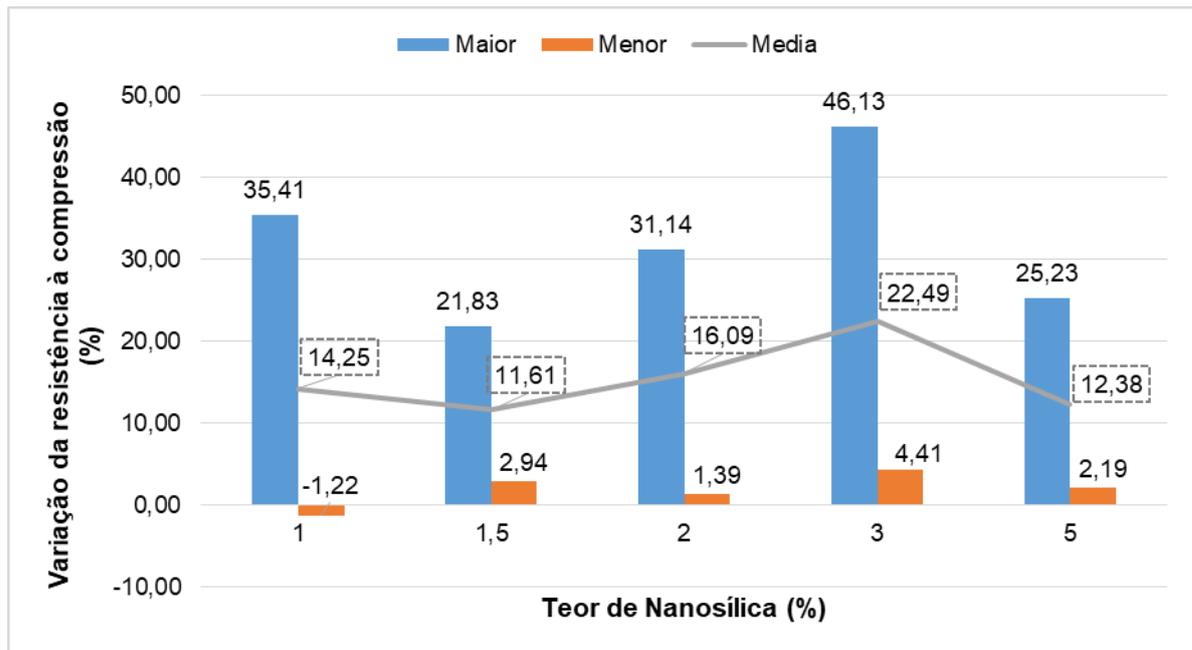
**Gráfico 4.1: Valor da resistência à compressão aos 7 dias em relação ao teor de nanosílica**



Fonte: Autor (2021)

Já o Gráfico 4.2, apresenta os valores da variação da resistência à compressão das amostras contendo nanosílica bem como dos traços de referência. Entre as 27 amostras selecionadas com idade de 7 dias, para a análise, apenas uma apresentou uma pequena redução na resistência, de 1,22%, em um traço de concreto contendo 1% de nanosílica. Em contraste, a maior variação, 46,13%, foi notada para uma amostra com teor de 3% de nanosílica, proveniente do trabalho de Sakhivel e Balasundaram (2016). Analisando-se pelas médias das variações, o grupo do teor de 3% de nanosílica foi o que apresentou a maior porcentagem de variação na resistência à compressão em relação ao traço referência, enquanto o grupo que engloba as amostras com 1,5% é o que possui a menor média dessa variação.

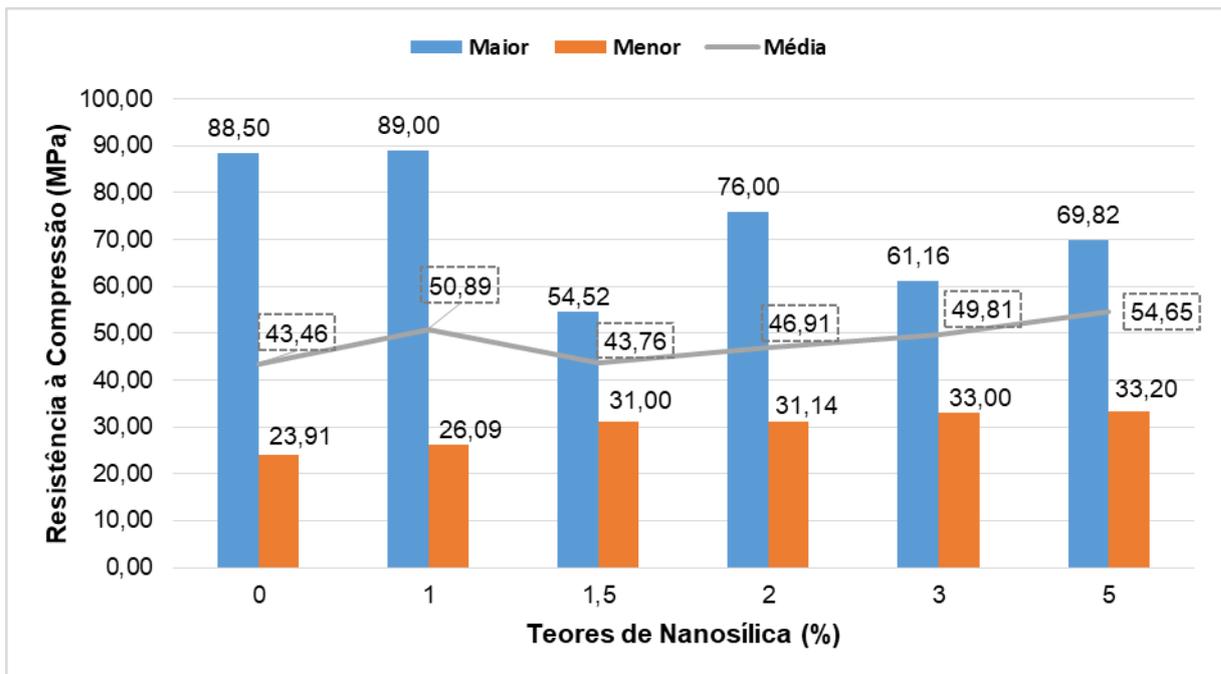
Gráfico 4.2: Variação da resistência à compressão aos 7 dias em relação ao teor de nanosílica



Fonte: Autor (2021)

Em relação às análises gráficas de barras para a idade de 28 dias, observou-se por meio do Gráfico 4.3, os valores de resistência à compressão médios daqueles grupos contendo nanosílica na composição do concreto, ficaram entre 43,76 MPa e 54,65 MPa, enquanto o grupo referência possui um valor médio de 43,46 MPa. Analisando, portanto, via essa métrica, pode-se dizer que os traços com nanosílica possuem valores de resistência próximos ou ligeiramente superiores ao traço referência. O maior valor identificado de resistência à compressão foi de 89,00 MPa, do trabalho de Shafiq *et al.* (2019), para um traço de concreto contendo 1% de nanosílica. O segundo maior valor notado é proveniente do grupo referência, sem adição de nanosílica, 88,50 MPa. Em sequência, tem-se o valor de uma amostra que contém nanosílica, 76,00 MPa, do mesmo trabalho, para um teor com 2% nanosílica.

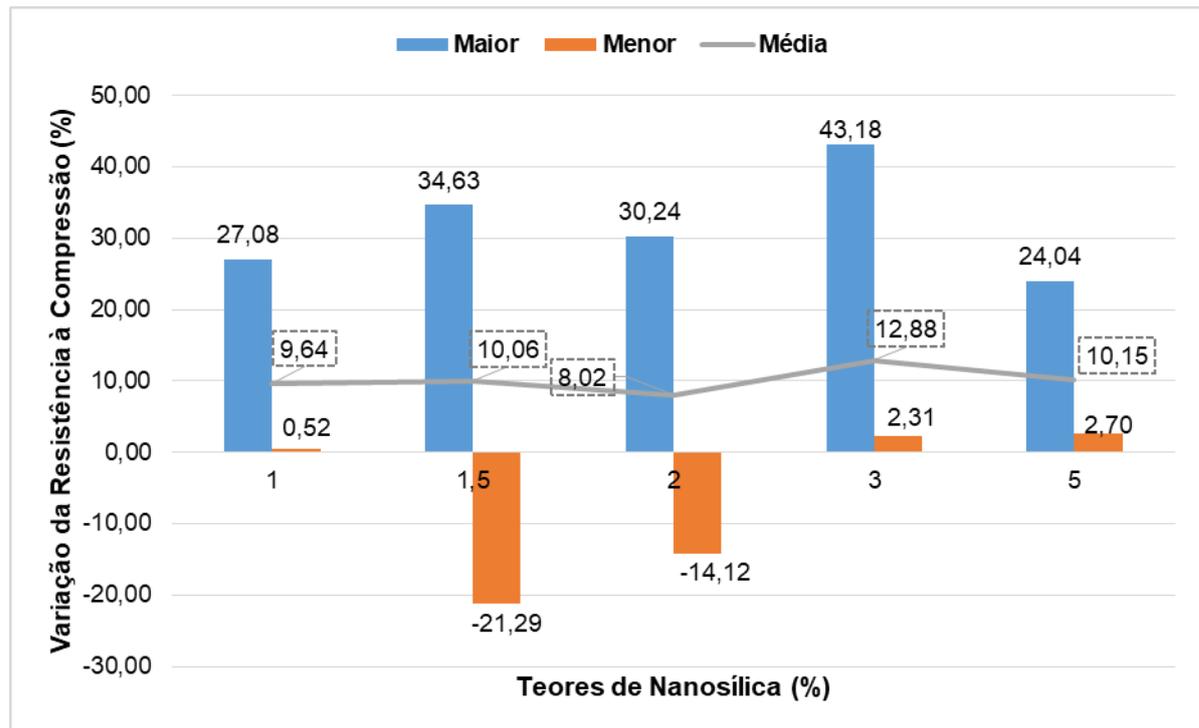
Gráfico 4.3: Valor da resistência à compressão aos 28 dias em relação ao teor de nanosílica



Fonte: Autor (2021)

Para a análise da variação da resistência à compressão aos 28 dias dos traços com nanosílica em relação aos valores de referência, sem adição do material, tem-se o Gráfico 4.4. Para essa idade, observou-se uma quantidade de 3 variações negativas, sendo as reduções de 21,29% e 14,12% para amostras contendo 1,5% e 2% de nanosílica respectivamente. A maior variação, 43,18%, foi encontrada para um concreto com teor de 3% de nanosílica, assim como aos 7 dias, tratando-se do trabalho de Serag *et al.* (2017).

Gráfico 4.4: Variação da resistência à compressão aos 28 dias em relação ao teor de nanosílica

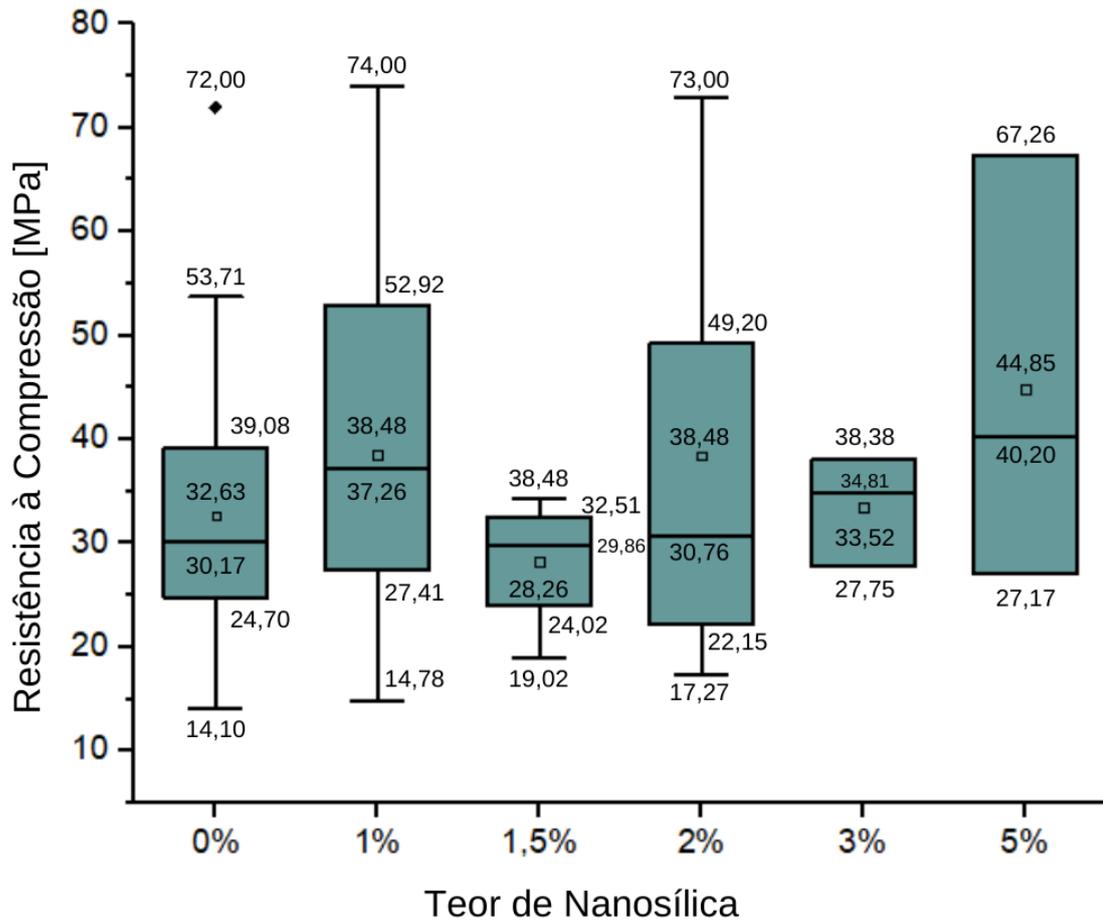


Fonte: Autor (2021)

Na sequência às análises gráficas, utilizando o gráfico de barras, foram desenvolvidos gráficos de dispersão ou box-plot.

O Gráfico 4.5 apresenta o box-plot para a resistência à compressão aos 7 dias, comparando as amostras contendo nanosílica com o grupo sem a incorporação desse material. Para os grupos de teores de 1% e 2%, verifica-se que há uma maior dispersão dos valores em relação à média. No caso dos grupos de 3% e 5%, vale ressaltar que o limite superior coincide com o quartil superior e o único outlier ou valor atípico, encontrado nesse banco de dados, é decorrente do grupo referência ou 0% de nanosílica, sendo um valor de 72,00 MPa. Trata-se do trabalho de Shafiq *et al.* (2019).

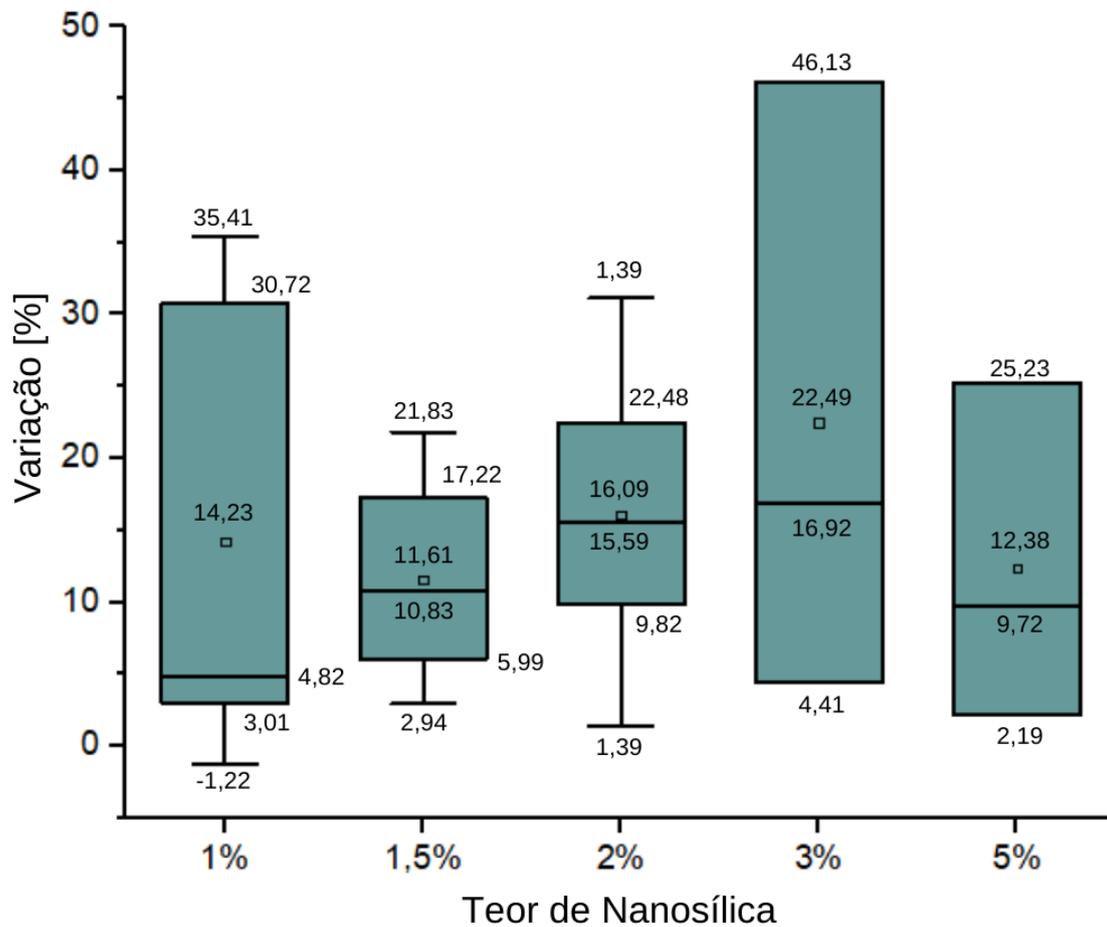
**Gráfico 4.5: Box-plot para a resistência à compressão aos 7 dias em função do teor de nanosílica**



Fonte: Autor (2021)

Para o gráfico box-plot da variação da resistência à compressão dos traços contendo algum teor de nanosílica em relação ao referencial, Gráfico 4.6, houve uma coincidência de os valores do limite superior coincidirem com o quartil superior assim como no gráfico anterior. Em ambos casos, isso pode ser explicado pela menor quantidade de amostras selecionadas para esses teores (3 amostras cada).

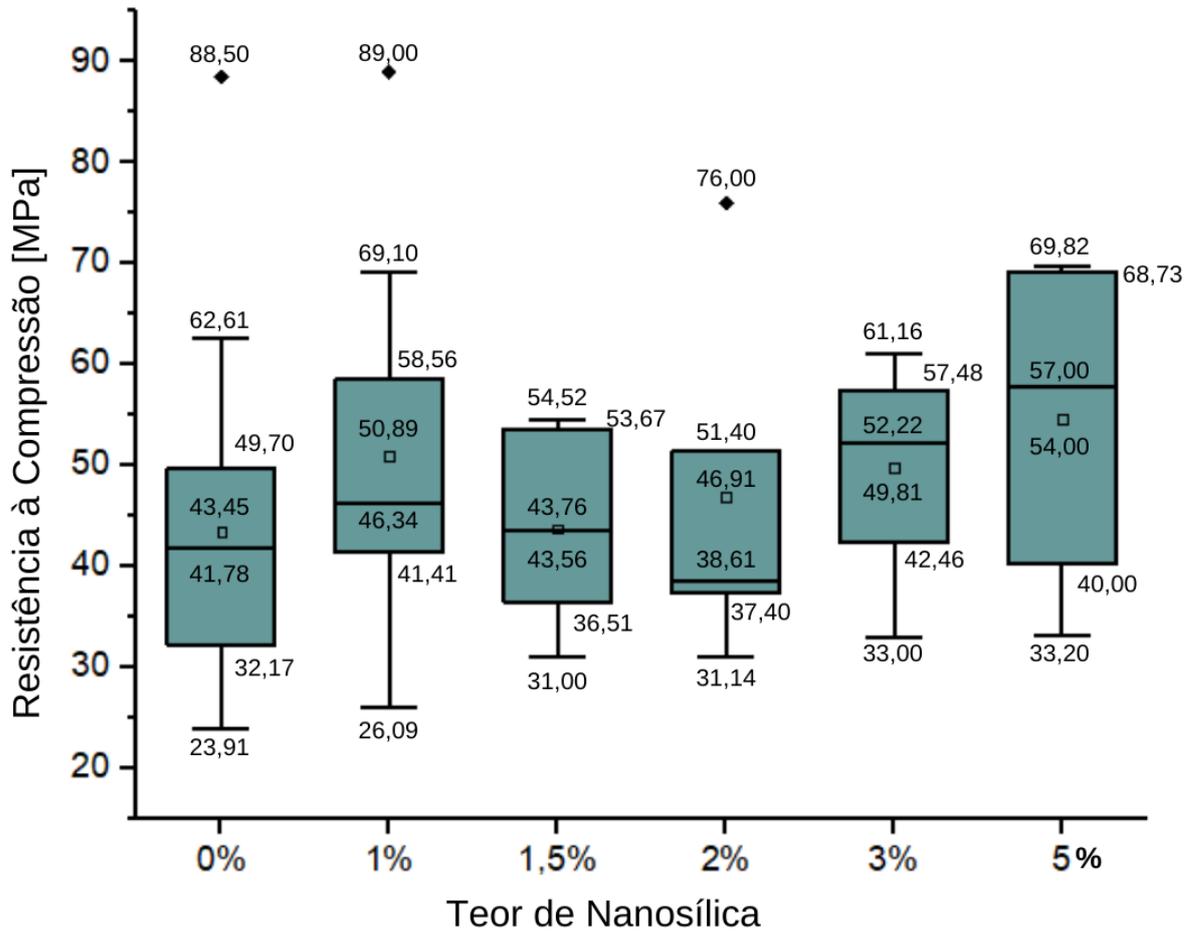
**Gráfico 4.6: Box-plot para a variação da resistência à compressão aos 7 dias em função do teor de nanosílica**



Fonte: Autor (2021)

No caso do Gráfico 4.7, que apresenta a análise por meio do box-plot para a resistência à compressão de amostras analisadas aos 28 dias, nota-se uma maior quantidade de outliers em relação ao gráfico para a idade de 7 dias. Esses valores atípicos foram encontrados nos grupos referência e com teores de 1% e 2% de nanosílica, proveniente do mesmo estudo, de Shafiq *et al.* (2019).

**Gráfico 4.7: Box-plot para a resistência à compressão aos 28 dias em função do teor de nanosílica**

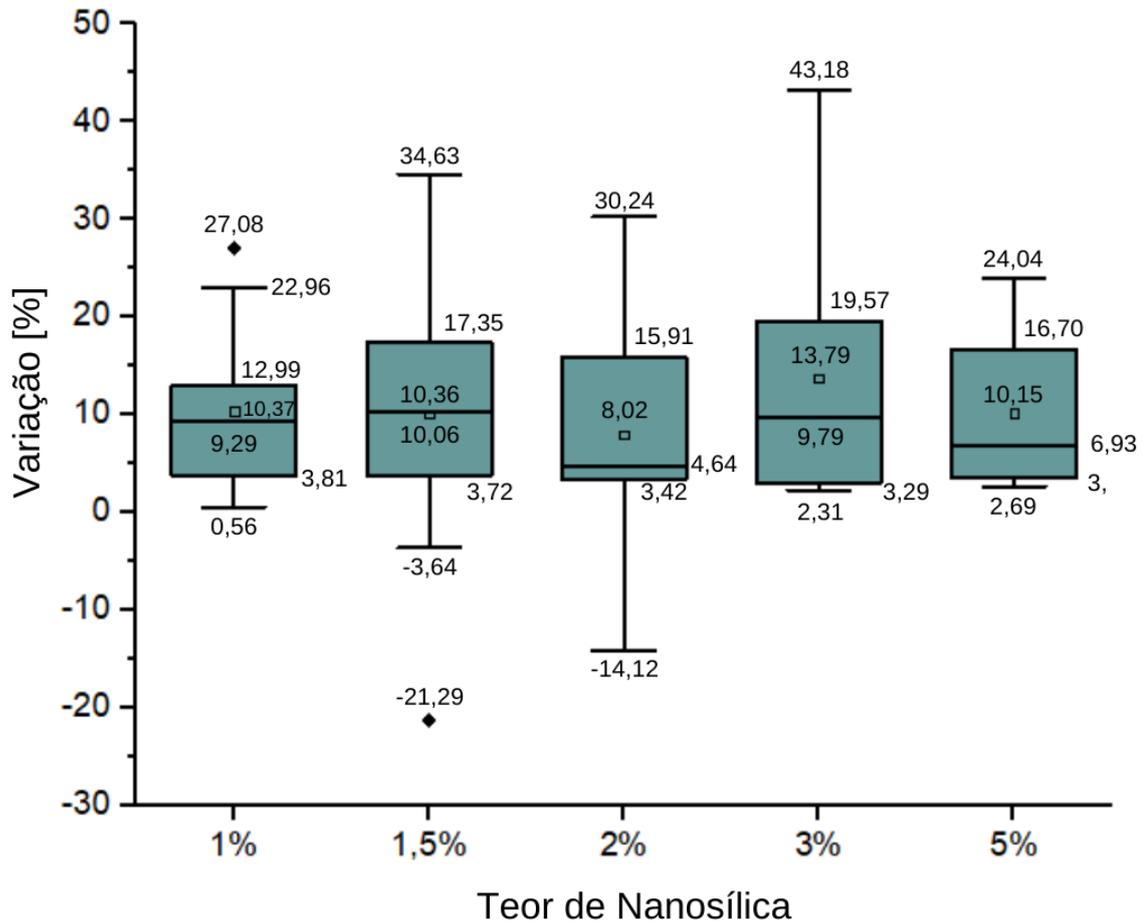


Fonte: Autor (2021)

Em relação à análise para a variação da resistência à compressão para essa idade, conforme o Gráfico 4.8 ilustra, tem-se dois valores que chamam a atenção por se comportarem como outliers, ou seja, a variação dessas amostras na resistência em relação ao seu respectivo traço de referência, sem qualquer teor de nanosílica presente na composição, é atípica em relação às demais amostras de cada grupo.

Para o grupo que engloba as amostras com teor de 1% de nanosílica, o trabalho de Moraes (2012) apresentou um corpo de prova que elevou a resistência à compressão em 27,08% em relação ao valor de referência. Já nos estudos de Kumar *et al.* (2020), para uma amostra contendo 1,5% de nanosílica em sua composição, houve uma redução de 21,29% na resistência à compressão.

**Gráfico 4.8: Box-plot para a variação da resistência à compressão aos 28 dias em função do teor de nanosílica**



Fonte: Autor (2021)

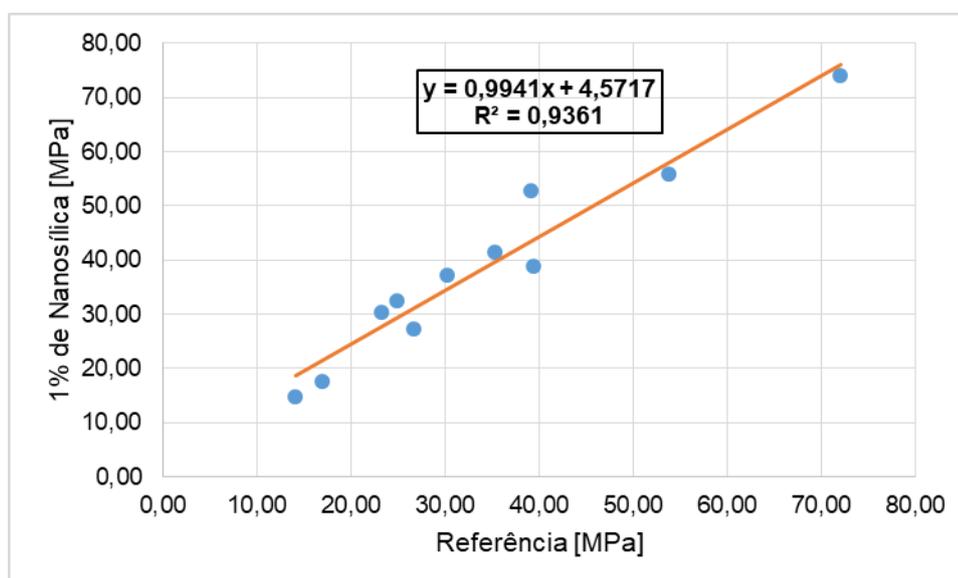
A terceira análise gráfica realizada se deu através da construção de gráficos para se obter as retas médias e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) por meio do método de regressão linear. Nessa análise é preciso entender que quanto maior o valor do coeficiente angular, mais as amostras de concreto contendo algum teor de nanosílica se assemelham, no que diz respeito à resistência à compressão, do traço sem incorporação de nanosílica (referência).

Devido ao número de amostras desigual entre os grupos, visto que há 11 amostras com teor de 1% de nanosílica e apenas 3 amostras para os grupos de 3% e 5%, não é possível realizar uma comparação entre eles. Entretanto, é possível analisá-los separadamente e verificar a partir do Gráfico 4.12, que para o coeficiente angular da reta média das amostras com 3% de nanosílica é relativamente baixo, o que indica que a resistência à compressão das mesmas se distancia em relação à referência.

Os maiores valores de coeficiente angular, 0,9941 e 1,3828, foram encontrados respectivamente nos Gráficos 4.9 e 4.13 para os teores 1% e 5% de nanosílica, respectivamente. Do primeiro valor, é possível extrair que é o grupo que mais se aproxima dos valores referência, resultado proporcionado possivelmente pelo fato da maior quantidade de amostras selecionadas no banco de dados deste trabalho. Já para o segundo valor, infere-se que o valor da resistência à compressão no grupo supera o grupo que contém todos os valores referências do banco de dados. Entretanto, é preciso analisar com cuidado e verificar que para o agrupamento contendo as amostras com teor de 5% de nanosílica, só há 3 valores, que são muito discrepantes entre si, uma vez que o maior valor é de 67,26 MPa e o menor apresentou uma resistência à compressão de 27,10 MPa.

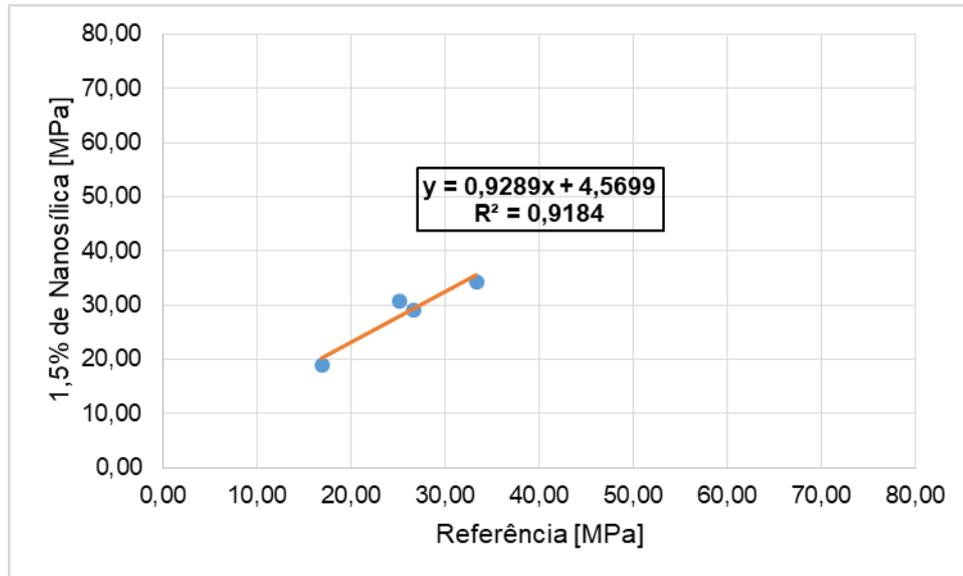
A análise dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) parte do princípio de que é uma medida estatística que possui o objetivo de indicar o quão próximos os dados estão da reta média. Na prática, quanto maior for o seu valor, melhor o modelo está ajustado aos dados disponíveis. Para o teor de 3% de nanosílica, o valor de  $R^2$  de 0,8751 se distanciou dos demais grupos analisados, que não apresentaram grande diferença entre si, estando sempre acima de 0,9.

**Gráfico 4.9: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 1% de nanosílica aos 7 dias**



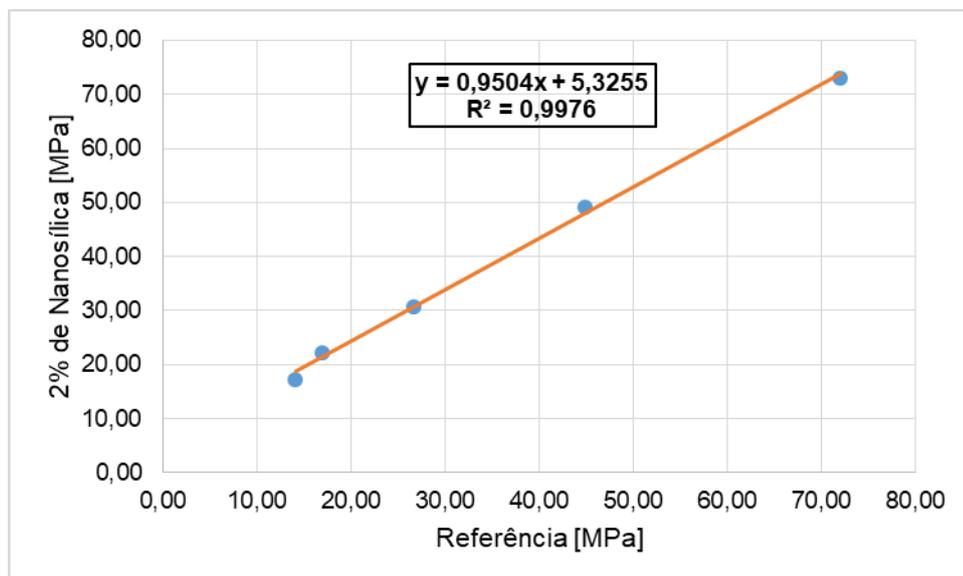
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.10: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 1,5% de nanosílica aos 7 dias**



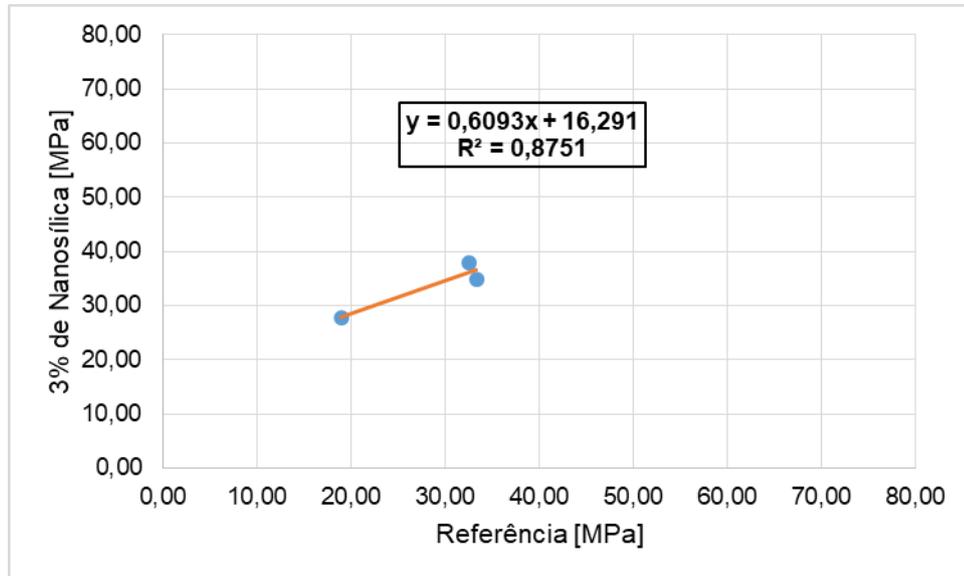
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.11: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 2% de nanosílica aos 7 dias**



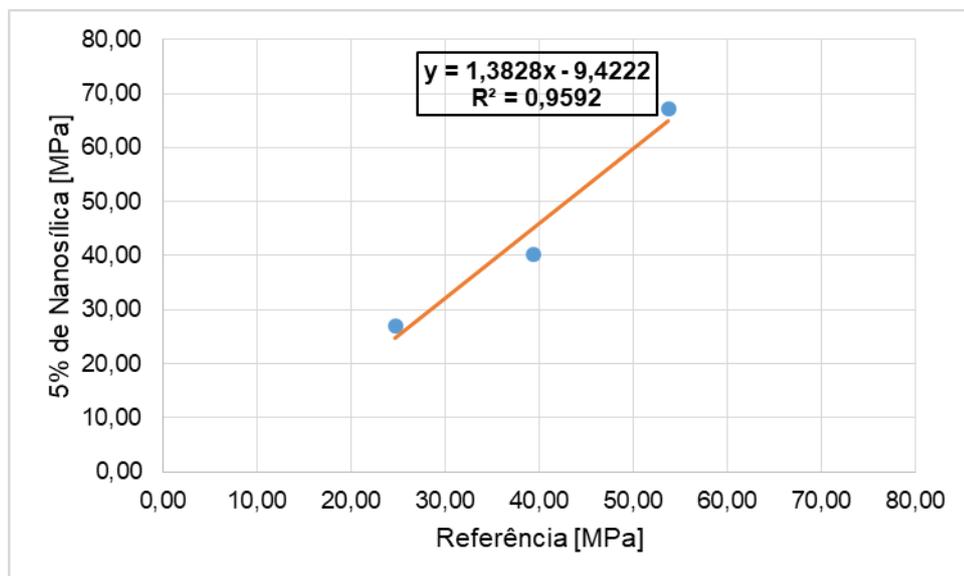
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.12: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 3% de nanosílica aos 7 dias**



Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.13: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 5% de nanosílica aos 7 dias**

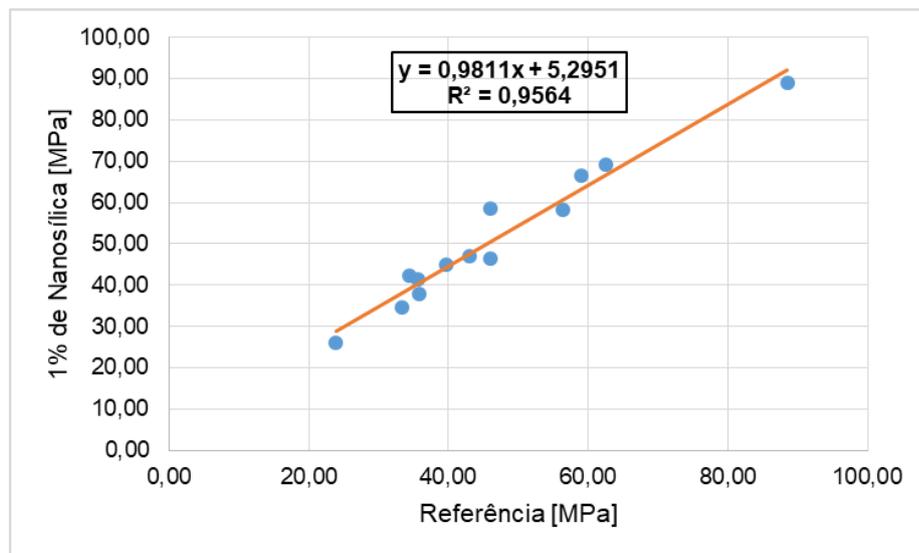


Fonte: Autor (2021)

A partir dos resultados presentes nos Gráficos 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, realizou-se a análise para a resistência à compressão das amostras na idade de 28 dias. Para essa idade, observa-se que os grupos de teores de 1,5%, 2% e 3% de nanosílica apresentaram coeficiente angular relativamente mais baixos que os demais grupos, conforme ilustra os Gráficos 4.15, 4.16 e 4.17. Já a melhor correlação entre os dados e a equação da reta foi

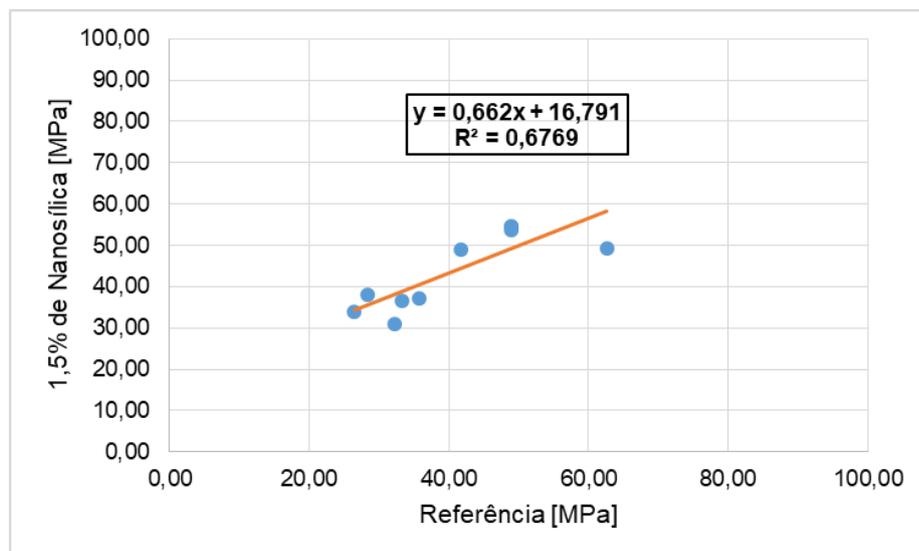
observada para o grupo do teor de 2% de nanosílica, com  $R^2 = 0,9923$ . É preciso, entretanto, ressaltar que por possuir uma maior quantidade de amostras, o grupo das amostras com 1% de nanosílica apresentou coeficientes maiores, uma vez que, vide Gráfico 4.14, esses valores foram superiores a 0,9.

**Gráfico 4.14: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 1% de nanosílica aos 28 dias**



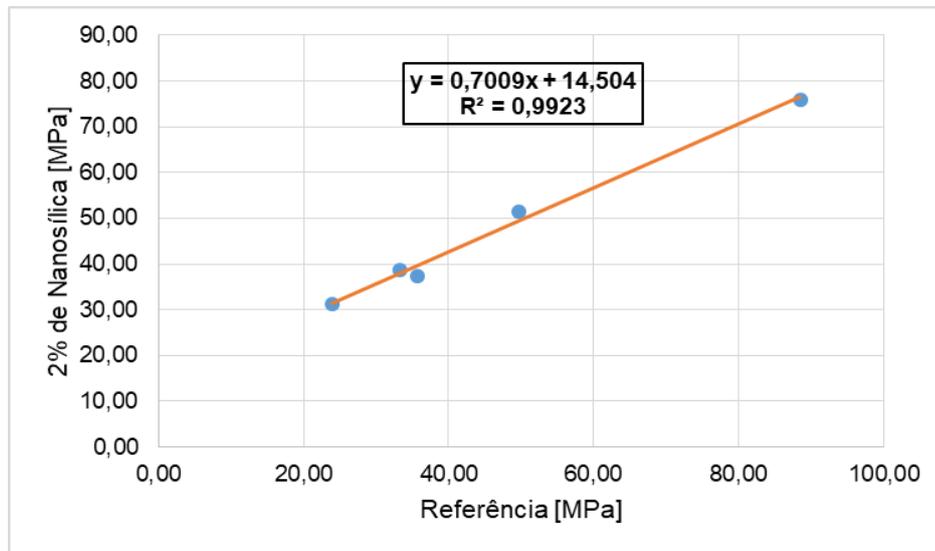
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.15: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 1,5% de nanosílica aos 28 dias**



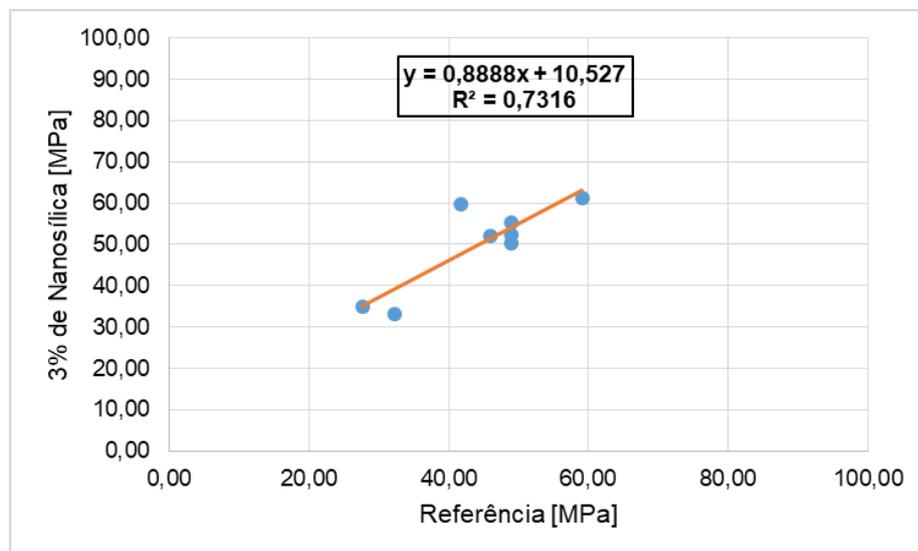
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.15: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 2% de nanosílica aos 28 dias**



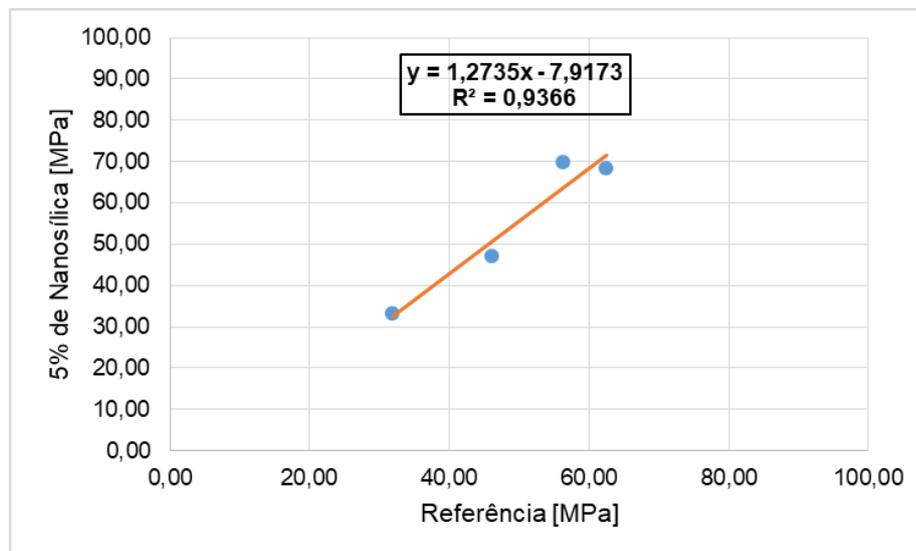
Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.15: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 3% de nanosílica aos 28 dias**



Fonte: Autor (2021)

**Gráfico 4.15: Regressão linear da resistência à compressão para as amostras com 5% de nanosílica aos 28 dias**



Fonte: Autor (2021)

### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A partir dessa seção serão apresentados os resultados obtidos por meio das análises estatísticas ANOVA, Teste de Tukey e Teste de normalidade de Anderson-Darling, seguindo essa sequência. Como os resultados obtidos nos softwares OriginLab, Microsoft Excel e Past foram os mesmos, por uma definição de padronização, optou-se por utilizar apenas os resultados provenientes do OriginLab. Os valores da variação em porcentagem da resistência à compressão dos traços com nanosílica em relação aos valores referência foram utilizados em módulo.

A análise de variância – ANOVA, foi realizada para as variações em percentual da resistência à compressão das amostras contendo nanosílica em relação à resistência do traço referência e também para os valores de resistência à compressão desses grupos, ambas para as duas idades, 7 e 28 dias.

Partindo da hipótese inicial  $H_0$  de que todas as médias da variação e da resistência à compressão possuem similaridades entre si e tal hipótese é validada quando o valor P é maior que o nível de significância, aqui definido em 5%, ou seja, 0,05. Quando o valor P for menor que o nível de significância, rejeita-se  $H_0$  e tem-se que ao menos uma média difere-se das demais.

A partir da Tabela 4.2 tem-se que o valor P de 0,845 é maior que o nível de significância de 5% para a variação da resistência à compressão das amostras contendo algum teor de nanosílica. Isso significa que a hipótese  $H_0$  pode ser aceita, assim, não há

diferenças estatisticamente significativas entre as médias analisadas. Analisando o valor de  $R^2$ , que representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, tem-se um valor muito baixo, de 0,062. Geralmente, quanto maior o seu valor, melhor o modelo se ajusta aos dados. Entretanto, o  $R^2$  não indica se um modelo de regressão é adequado ou não. Além disso, devido ao fato de o banco de dados envolver variáveis preditoras como o tipo da nanosilica e relação água/cimento, as mesmas possivelmente interferem na resposta, contribuindo para um  $R^2$  baixo (MINITAB, 2019c).

Na Tabela 4.3, tem-se os resultados da ANOVA para a resistência à compressão. Como o valor P de 0,701 é superior ao nível de significância de 5%, conclui-se que as médias não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si.

**Tabela 4.2: ANOVA de um fator desbalanceada para variação da resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Contagem	Média [%]	Desvio Padrão [%]	Erro Padrão [%]
1%	11	14,47	13,45	4,06
1,5%	4	11,61	7,89	3,95
2%	5	16,09	11,44	5,11
3%	3	22,49	21,41	12,36
5%	3	12,38	11,75	6,78

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Valor F	Valor P
Modelo	243,82	4	60,96	0,345	0,845
Erro	3714,24	21	176,87		
Total	3958,07	25			

$R^2$
0,062

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.3: ANOVA de um fator desbalanceada para resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Contagem	Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Erro Padrão [MPa]
0%	17	32,63	14,41	3,49
1%	11	38,48	17,33	5,23
1,5%	4	28,27	6,55	3,27
2%	5	38,48	22,82	10,20
3%	3	33,52	5,25	3,03
5%	3	44,85	20,48	11,82

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Valor F	Valor P
Modelo	764,03	5	152,81	0,599	0,701
Erro	9433,42	37	254,96		
Total	10197,45	42			

R <sup>2</sup>
0,075

Fonte: Autor (2021)

Em seguida, realizou-se o Teste de Tukey e os resultados estão apresentados no Apêndice B.

Na sequência tem-se as duas análises de variância – ANOVA para a idade de 28 dias. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados para a variação da resistência à compressão e o que pode-se inferir a partir desses valores é que ao passo que o valor P, de 0,828, é maior do que o nível de significância de 0,05, não há diferença estatística significativa entre as médias em porcentagem da variação da resistência à compressão das amostras de concreto com nanosílica em relação aos seus valores de referência.

A análise de variância para a resistência à compressão, como pode ser observada na Tabela 4.4, também aponta que ao nível de significância de 0,05, as médias não são significativamente diferentes.

**Tabela 4.4: ANOVA de um fator desbalanceada para variação da resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Contagem	Média [%]	Desvio Padrão [%]	Erro Padrão [%]
1%	13	10,37	8,09	2,24
1,5%	10	15,05	10,28	3,25
2%	5	13,67	10,79	4,83
3%	8	13,79	14,27	5,05
5%	4	10,15	9,69	4,85

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	Valor F	Valor P
Modelo	165,47	4	41,37	0,370	0,828
Erro	3911,31	35	111,75		
Total	4076,78	39			

R <sup>2</sup>
0,041

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.5: ANOVA de um fator desbalanceada para resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Contagem	Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Erro Padrão [MPa]
0%	23	43,46	15,06	3,14
1%	13	50,89	16,89	4,68
1,5%	10	43,76	9,27	2,93
2%	5	46,91	17,85	7,98
3%	8	49,81	10,54	3,73
5%	4	54,65	17,64	8,82

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	Valor F	Valor P
Entre grupos	886,08	5	177,22	0,829	0,534
Dentro dos grupos	12175,98	57	213,61		
Total	13062,06	62			

R <sup>2</sup>
0,068

Fonte: Autor (2021)

Por fim, de forma a avaliar a normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA e complementar as análises estatísticas, realizou-se o Teste de Normalidade de Anderson-Darling. A partir desse teste, quando o valor P for maior ou igual ao nível de significância, no caso desse trabalho estabelecido em 5%, indica que há normalidade na distribuição dos resíduos. Quando for menor, indica a não normalidade (LANINI, 2021).

Realizou-se essa análise para a variação da resistência à compressão e para o valor da resistência à compressão em si para as duas idades, 7 e 28 dias, conforme Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

Pode-se destacar que para o grupo contendo amostras com 1% de nanosílica, deve-se rejeitar a normalidade ao nível de significância de 5%, ou seja, os dados não seguem uma distribuição específica (MINITAB, 2019a).

**Tabela 4.6: Teste de Normalidade de Anderson-Darling para variação da resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Estatística	Valor P	Decisão ao nível de significância de 5%
1%	0,894	0,014	Rejeitar a normalidade
1,5%	0,185	0,759	Não se pode rejeitar a normalidade
2%	0,133	0,942	Não se pode rejeitar a normalidade
3%	0,247	0,426	Não se pode rejeitar a normalidade
5%	0,233	0,475	Não se pode rejeitar a normalidade

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.7: Teste de Normalidade de Anderson-Darling para resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Estatística	Valor P	Decisão ao nível de significância de 5%
0%	0,552	0,131	Não se pode rejeitar a normalidade
1%	0,229	0,746	Não se pode rejeitar a normalidade
1,5%	0,318	0,320	Não se pode rejeitar a normalidade
2%	0,289	0,454	Não se pode rejeitar a normalidade
3%	0,241	0,446	Não se pode rejeitar a normalidade
5%	0,233	0,474	Não se pode rejeitar a normalidade

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.8: Teste de Normalidade de Anderson-Darling para variação da resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Estatística	Valor P	Decisão ao nível de significância de 5%
1%	0,338	0,442	Não se pode rejeitar a normalidade
1,5%	0,432	0,241	Não se pode rejeitar a normalidade
2%	0,306	0,404	Não se pode rejeitar a normalidade
3%	0,635	0,062	Não se pode rejeitar a normalidade
5%	0,383	0,198	Não se pode rejeitar a normalidade

Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.9: Teste de Normalidade de Anderson-Darling para resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Estatística	Valor P	Decisão ao nível de significância de 5%
0%	0,551	0,139	Não se pode rejeitar a normalidade
1%	0,352	0,411	Não se pode rejeitar a normalidade
1,5%	0,610	0,080	Não se pode rejeitar a normalidade
2%	0,409	0,201	Não se pode rejeitar a normalidade
3%	0,535	0,117	Não se pode rejeitar a normalidade
5%	0,322	0,312	Não se pode rejeitar a normalidade

Fonte: Autor (2021)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

A utilização da nanosílica como constituinte de concretos é relativamente recente, comparado com a utilização da sílica ativa, por exemplo, conforme já foi relatado anteriormente. No decorrer do desenvolvimento do trabalho, esse fato pode ser comprovado com as limitações encontradas para se construir o banco de dados a partir de bibliografia disponível, ou seja, trabalhos que estudaram os efeitos da nanosílica na resistência mecânica e, mais especificamente na resistência à compressão de concretos.

Conseguiu-se 39 trabalhos científicos, sendo 30 sobre concretos, 6 sobre pastas cimentícias e 3 sobre argamassas, optou-se por trabalhar apenas com os estudos em concreto. Constatou-se uma heterogeneidade considerável a respeito das variáveis entre os estudos como, por exemplo, o tipo da nanosílica utilizada no preparo das amostras de concreto e o teor utilizado do material. Além disso, embora seja possível reunir uma quantidade de amostras superior a 200, foi necessário estabelecer alguns critérios a fim de limitar o estudo e realizar uma análise comparativa mais adequada entre as amostras.

Mesmo assim, foi possível desenvolver o banco de dados contendo informações como o teor de nanosílica presente no traço de concreto, a relação água/cimento, bem como os valores de resistência à compressão. Com a realização das análises gráfica e estatística, foi possível inferir alguns pontos sobre esses resultados e assim, concluir que:

- A adição da nanosílica em concretos possibilitou um aumento da resistência à compressão de quase todas amostras, variando a porcentagem. Entretanto, por meio da análise estatística, observa-se que as variações não foram significativas em relação aos valores de referência, ou seja, os traços sem adição de nanosílica;
- Embora a adição da nanosílica não altere significativamente a resistência à compressão dos concretos, pode-se utilizá-la como substituta parcial do cimento Portland. E, embora esperava-se que analisando diversas amostras de uma forma geral, o aumento fosse significativo, a manutenção dos resultados na resistência mecânica é um fator positivo na questão da sustentabilidade, uma vez que permite a redução do uso do cimento Portland, reduzindo seu impacto na natureza;

- Ainda que no banco de dados tenha sido observada uma quantidade maior de amostras com a presença de 1% de nanosílica na composição de concreto, não foi possível indicar o teor e o tipo ideais de nanosílica a serem utilizados. Isso devido ao fato dos grupos de teores de nanosílica não apresentarem diferença significativa na resistência à compressão comparando-se os traços referências.

Por fim, com a realização do presente trabalho, o autor pôde absorver diversos aprendizados importantes para sua formação acadêmica e profissional. A respeito de conhecimentos técnicos da área de Tecnologia dos Materiais da Construção Civil, houve aprofundamento nos conceitos relacionados ao material concreto e suas propriedades físicas, adições minerais, principalmente a nanosílica, e durabilidade do concreto. Também foi possível entender temas relacionados à sustentabilidade, uma vez que para o desenvolvimento do estudo, foi necessário verificar os impactos da indústria do concreto no meio ambiente.

Além disso, devido à utilização de modelos gráficos e estatísticos, obteve-se aprendizados teórico e prático sobre aqueles utilizados, uma vez que foi necessário compreender o funcionamento dos mesmos e desenvolvê-los com o auxílio dos softwares Microsoft Excel, OriginLab e Past. O uso de tais programas possibilitou novos conhecimentos acerca de suas ferramentas e que poderão ser aproveitados futuramente pelo autor em diversas aplicações.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Embora o presente trabalho não seja o primeiro a se realizar uma revisão sobre os efeitos da nanosílica ao ser incorporada ao concreto, ainda há a necessidade de uma análise ampla contendo diversos estudos. Dessa forma, é uma área com potencial para desenvolvimento de pesquisas científicas, utilizando análises estatísticas, gráficas etc. Neste contexto, recomendam-se algumas sugestões para futuros trabalhos:

- Em casos de trabalhos com maior tempo para realização, pode-se buscar o maior número de amostras possível, recorrendo aos autores, se for necessário, para se ter acesso às informações que não estão claramente disponíveis nos artigos;
- Adicionar um novo filtro no banco de dados, a distinção do tipo da nanosílica utilizada, além do teor da mesma, caso tenha uma quantidade maior de amostras;

- Ampliar a análise gráfica e estatística para pastas e argamassas, a fim de verificar o efeito da adição da nanosílica nesses materiais.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. Goiânia, 2016. 174 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. Brasília, 2017. 319 p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.

ANDRADE, G. C. C. **Análise de Variância com Amostras de Dimensão Aleatória e suas Aplicações**. Covilhã, 2015. 128 p. Tese de Doutorado, Universidade da Beira Interior.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1**: Edifícios Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

BORGES, P.; LOURENÇO, A.; FOUREAUX, L.; PACHECO, L. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, Porto Alegre v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/xVQkySsxyBRGR8BZZS4zYyq/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30.08.2021.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B. **Efeitos do uso de aditivo com nanossílica em suspensão coloidal na consistência e resistência mecânica do concreto**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 2, p. 162-172, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/45802>. Acesso em: 01.09.2021.

CAUDURO, F. **Estudo da incorporação de nanotubos de carbono e nanossílica em pastas de cimento Portland**. Florianópolis, 2015. 119 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

DANTAS, M. H. O. **Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland**. Caruaru, 2013. 101f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco.

DINTEN, C. A. M. **Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto**. Campinas, 2000. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

ELRAHMAN, M. A.; CHUNG, S-Y.; SIKORA, P.; RUCINSKA, T. STEPHAN, D. Influence of Nanosilica on Mechanical Properties, Sorptivity and Microstructure of Lightweight Concrete. **Materials**, v. 12, 2019.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica**. Belo Horizonte, 2010. 105f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.

FRAGA, Y. S. B.; VASQUES, L. P.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S. Estado da arte dos métodos e efeitos da dispersão da sílica ativa e da nanossílica em pastas e argamassas. In: **60º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2018.

GONÇALVES, G. M. PEDROSO, H. T. R. FERREIRA, F. G. S. Desenvolvimento de concretos com a incorporação de nanossílica e pó de vidro. In: **4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, p. 470-481, 2019.

GOPINATH, S.; MOULI, P. C. H.; MURTHY, A. R.; IYER, N. R.; MAHESWARAN, S. Effect of Nano Silica on Mechanical Properties and Durability of Normal Strength Concrete. **Archives of Civil Engineering**, v. 58, p. 433-444, 2012.

GURGEL, G. H. M. **Efeito da incorporação da nanossílica em pastas de cimento com alto teor de filer calcário**. Brasília, 2020. 129 p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

HONGJIAN, D.; SUHUAN, D.; XUEMEI, L. Durability performances of concrete with nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 705-712, 2014.

JITTABUT, P. Effect of Nanosilica on Mechanical and Thermal Properties of Cement Composites for Thermal Energy Storage Materials. **Energy Procedia**, v. 79, p. 10-17, 2015.

KUMAR, K. S. J.; RAO, M. V. S.; REDDY, V. S.; SHRIHARI, S. **Performance evaluation of nano-silica concrete**. 2<sup>nd</sup> International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy, E3S Web Conf., v. 184, 2020. Disponível em: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/44/e3sconf\\_icmed2020\\_01076/e3sconf\\_icmed2020\\_01076.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/44/e3sconf_icmed2020_01076/e3sconf_icmed2020_01076.html). Acesso em: 01.09.2021.

LANINI, T. L. S. **Estimativa de força de ruptura à punção em ligações laje-pilar interno sem armadura de cisalhamento de estruturas de concreto armado via modelos de regressão múltipla**. São Carlos, 2021. 154 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.

LI, H.; ZHANG, M.; OU, J. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. **Wear**, v. 260, p. 1262-1266, 2006.

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

MATOS, M. A. Manual Operacional para a Regressão Linear. 1995, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDES, T. M. **Efeito da nanossílica em matrizes cimentícias de ultra alta resistência**. Florianópolis, 2016. 113 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MINITAB. **A Estatística de Anderson-Darling – Suporte ao Minitab 18**, 2019a. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>>. Acesso em: 20.10.21.

MINITAB. **Análise de regressão: como interpretar o R-quadrado e avaliar a qualidade de ajuste?** 2019b. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/analise-de-regressao-como-interpretar-o-r-quadrado-e-avaliar-a-qualidade-de-ajuste>>. Acesso em: 20.10.21.

MINITAB. **Entendendo Análise de Variância (ANOVA) e o teste F**, 2019c. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/entendendo-analise-de-variancia-anova-e-o-teste-f>>. Acesso em: 18.10.21.

MORAES, M. Q. **Contribuição aos estudos da influência da nanossílica nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade de concretos para produção em centrais e para fabricação de pré-moldados**. Goiânia, 2012. 144 f. Dissertação de Mestrado – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

MUKHARJEE, B. B.; BARAI S. V. Characteristics of sustainable concrete incorporating recycled coarse aggregates and colloidal nano-silica. **Advances in Concrete Construction**, v. 3, p. 187-202, 2015.

NOGUEIRA, G. S. F.; SCHWARTES-CEZARIO, N.; SOUZA, I. C.; CAVALEIRO, C. D.; PORTO, M. F.; TORALLES, B. M. Incorporação de nanossílica em compósitos cimentícios. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

NOLLI FILHO, P. R. **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanossílica estabilizada**. Belo Horizonte, 2015. 94 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.

OLIVEIRA, A. P. **Estudo de matrizes cimentícias ternárias contendo sílica ativa e nanossílica**. Goiânia, 2019. 144 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

OLIVEIRA, T. M. **Influência do uso de agregados de resíduos de concreto na resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto**. São Carlos, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São Carlos.

ORELLANA, J. P. L.; BRAGANÇA, M. D. G. P.; PORTELLA, K. F.; ALBERTI, E. L. Desempenho mecânico e físico de concretos com adição de nanossílica e nanoalumina coloidais. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 2019.

P. P., A.; NAYAK, D. K.; SANGOJU, B.; KUMAR, R. Effect of nano-silica in concrete; a review. **Construction and Building Materials**, v. 278, 2021.

PAGOTTO, L. G.; RODRIGUES, J.; HENRIQUE, F. H. JUNIOR, J. P.; BLUMER, S. Análise de variância e testes de médias: um estudo aplicado em experimentos com variedades de algodoeiro e seleções de citrumelo. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, p. 1287-1296, 2021.

PEREIRA, F. C. **Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanosílica**. São Carlos, 2019. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.

PERTICARRARI, A. L. P. M. **Aula 7 – Testes de Comparação de Médias (continuação)**. 27 slides. Disponível em: <<https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/cienciasexatas/AMANDALIZPACIFICOMA/NFRIM/aula-7.pdf>>. Acesso em: 13.10.21.

PINO, F. A. A Questão da Não-Normalidade: Uma Revisão. **Revista de Economia Agrícola**, v. 61, p. 17-33, 2014.

PONTES, M. E. N.; GUIMARÃES, G. L. Construção de gráficos de barras a partir de diferentes recursos: lápis e papel e software Excel. **ReviSeM**, v. 6, p. 43-64, 2021.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao Cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Curitiba, 2015. 151f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

RAHEEM, A. A.; ABDULWAHAB, R.; KAREEM, M. A. Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, 2021.

RANA, D.; KHARE, G. P.; SAHU, D. K. Experimental study of strength property of concrete using nanosilica. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 5, 2018.

SAKTHIVEL, R.; BALASUNDARAM, N. Experimental investigation on behaviour of nano concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 7, p. 315-320, 2016.

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

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de íons cloreto e CO<sub>2</sub>**. São Carlos, 2018. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos.

SANTOS, T. A. C. **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhoras as Propriedades de Concretos de Alta Resistência**. Brasília, 2016. 145 p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

SCHIAVON, J. Z. **Análise da microestrutura de concretos de alto desempenho contendo nanosílica e sílica ativa**. Porto Alegre, 2019. 88 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

SCHWARTZ, M. M.; CASSOL, G. Estudo comparativo entre o concreto com adição de nanosílica e o concreto com adição de sílica ativa em suspensão. **Ignis**, v. 7, p. 80-94, 2018.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica**. São Carlos, 2018. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos.

SENA, A. S.; MARTINS, B. G. Análise Comparativa das Propriedades Mecânicas de Concretos Incorporados com Sílica Ativa e Nanosílica. **GTS - Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade**, [S.l.], v. 1, n. 1, jun. 2018. ISSN 2595-5632. Disponível em: <<http://www.faengrv.com.br/gts/index.php/revistagts/article/view/49>>. Acesso em: 21.09.21.

SERAG, M. I.; YASIEN, A. M.; EL-FEKY M. S.; ELKADY, H. Effect of Nano Silica on Concrete Bond Strength Modes of Failure. **International Journal of GEOMATE**, v. 12, p. 73-80, 2017.

SHAFIQ, N.; KUMAR, R.; ZAHID, M.; TUFAIL, R. F. Effects of modified metakaolin using nano-silica on mechanical properties and durability of concrete. **Materials**, v. 12, 2019.

SHAHROKHINASAB, E.; CHITTY, F. D.; VAHEDI, M.; ZOLFAGHARYSARAVI, S. Improvement of Concrete Characterization Using Nanosilica. **Computational Engineering and Physical Modeling**, v. 4, p. 39-52, 2021.

SIKORA, P.; HORSZCZARUK, E.; SKOCZYLAS, K.; RUCINSKA, T. Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 159-166, 2017.

SIQUEIRA, J. M. **Influência da nanosílica estabilizada pelo superplastificante no desempenho do concreto**. Belo Horizonte, 2015. Monografia – Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

SOUZA, A. L. R. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanosílica na durabilidade do concreto**. Brasília, 2021. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.

VALLADARES NETO, J.; SANTOS, C. B.; TORRES, E. M.; ESTRELA, C. **Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos**. ROBRAC, v. 26, p. 1-6, 2017.

## APÊNDICE A

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Almeida	2016	1,00*	0,45	39,60	44,80	3
		1,00*	0,67	26,00	22,40	3
		1,00*	0,45	46,00	48,30	7
		1,00*	0,67	29,90	27,40	7
		1,00*	0,45	49,90	61,90	28
		1,00*	0,67	34,90	40,20	28
		1,00*	0,45	68,30	68,30	91
		1,00*	0,67	41,10	46,40	91
Dinten	2000	5,00	0,55	20,20	23,45	3
		5,00*	0,55	20,20	25,85	3
		7,50	0,55	20,20	24,50	3
		5,00	0,55	24,70	27,10	7
		5,00*	0,55	24,70	32,20	7
		7,50	0,55	24,70	31,30	7
		5,00	0,55	31,80	33,20	28
		5,00*	0,55	31,80	37,40	28
		7,50	0,55	31,80	42,30	28

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Elrahman <i>et al.</i>	2019	1,00	0,40	14,10	14,78	7
		2,00	0,40	14,10	17,27	7
		4,00	0,40	14,10	17,95	7
		1,00	0,40	23,91	26,09	28
		2,00	0,40	23,91	31,14	28
		4,00	0,40	23,91	31,30	28
		1,00	0,40	25,08	27,01	90
		2,00	0,40	25,08	30,80	90
Gopinath <i>et al.</i>	2012	1,50	0,41	34,01	33,61	3
		3,00	0,37	34,01	38,10	3
		1,50	0,44	34,01	31,87	3
		3,00	0,42	34,01	34,88	3
		1,50	0,44	34,01	36,49	3
		3,00	0,43	34,01	37,03	3
		1,50	0,41	44,61	46,98	14
		3,00	0,37	44,61	50,34	14
		1,50	0,44	44,61	45,49	14
		3,00	0,42	44,61	48,29	14
		1,50	0,44	44,61	49,13	14
		3,00	0,43	44,61	49,47	14
		1,50	0,41	49,00	54,45	28
		3,00	0,37	49,00	52,45	28
		1,50	0,44	49,00	53,67	28
		3,00	0,42	49,00	50,13	28
1,50	0,44	49,00	54,52	28		

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Gopinath <i>et al.</i>	2012	3,00	0,43	49,00	55,15	28
		1,50	0,41	53,50	58,80	56
		3,00	0,37	53,50	59,40	56
		1,50	0,44	53,50	56,70	56
		3,00	0,42	53,50	56,40	56
		1,50	0,44	53,50	58,50	56
		3,00	0,43	53,50	58,90	56
Kumar <i>et al.</i>	2020	0,50	0,96	62,61	63,25	28
		1,00	1,10	62,61	69,10	28
		1,50	1,29	62,61	49,28	28
Li <i>et al.</i>	2006	1,00	0,42	59,08	66,36	28
		3,00	0,43	59,08	61,16	28
Massana <i>et al.</i>	2017	2,50	0,36	62,46	65,73	28
		5,00	0,36	62,46	68,37	28
		7,50	0,36	62,46	70,35	28
		2,50*	0,36	62,46	82,17	28
		5,00*	0,36	62,46	69,26	28
		2,50*	0,36	62,46	71,15	28
Mendes	2016	0,05*	-	121,00	122,00	0,75
		0,10*	-	121,00	132,00	0,75
		0,20*	-	121,00	135,00	0,75
		0,40*	-	121,00	128,00	0,75
		0,80*	-	121,00	123,00	0,75
		1,70*	-	121,00	110,00	0,75
		3,20*	-	121,00	107,00	0,75

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Mendes	2016	0,05*	-	103,00	113,00	0,75
		0,10*	-	103,00	104,00	0,75
		0,20*	-	103,00	120,00	0,75
		0,40*	-	103,00	103,00	0,75
		0,80*	-	103,00	100,00	0,75
		1,70*	-	103,00	104,00	0,75
		3,20*	-	103,00	89,00	0,75
		6,40*	-	103,00	71,00	0,75
Moraes	2012	1,00	0,35	33,23	45,83	3
		1,00	0,40	29,28	34,43	3
		1,00	0,46	26,10	31,37	3
		1,00	0,50	21,00	27,25	3
		1,00	0,35	39,08	52,92	7
		1,00	0,40	35,26	41,44	7
		1,00	0,46	30,17	37,26	7
		1,00	0,50	24,82	32,57	7
		1,00	0,35	46,08	58,56	28
		1,00	0,40	43,03	47,03	28
		1,00	0,46	39,72	44,88	28
		1,00	0,50	34,37	42,26	28

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Moraes	2012	1,00*	0,37	33,23	43,14	3
		1,00*	0,43	29,28	35,54	3
		1,00*	0,48	26,10	27,50	3
		1,00*	0,53	21,00	23,00	3
		1,00*	0,37	39,08	49,46	7
		1,00*	0,43	35,26	42,43	7
		1,00*	0,48	30,17	32,04	7
		1,00*	0,53	24,82	27,08	7
		1,00*	0,37	46,08	64,92	28
		1,00*	0,43	43,03	54,61	28
		1,00*	0,48	39,72	46,39	28
Mukharjee e Barai	2015	0,75	0,40	32,17	30,00	28
		1,50	0,41	32,17	31,00	28
		3,00	0,41	32,17	33,00	28
Nolli Filho	2015	0,39	0,41	54,80	61,80	7
		0,39*	0,43	54,80	66,70	7
		0,39	0,41	58,30	66,00	14
		0,39*	0,43	58,30	69,80	14
		0,39	0,41	62,00	69,30	28
		0,39*	0,43	62,00	73,90	28
Oliveira	2019	3,00*	0,40	46,70	47,50	3
		3,00*	0,60	23,60	25,90	3
		3,00*	0,40	56,90	62,60	7
		3,00*	0,60	29,80	38,00	7

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Oliveira	2019	3,00*	0,40	67,10	75,50	28
		3,00*	0,60	35,70	50,90	28
		3,00*	0,40	74,50	83,00	91
		3,00*	0,60	35,20	52,70	91
Orellana	2019	1,50	0,56	25,20	30,70	7
		1,50	0,56	26,50	34,00	28
Orellana	2020	1,50	0,55	25,20	30,70	7
		1,50	0,55	28,30	38,10	28
		1,50	0,55	30,90	42,50	91
Pereira	2019	1,00	0,40	53,71	56,00	7
		5,00	0,40	53,71	67,26	7
		10,00	0,40	53,71	69,90	7
		1,00*	0,40	53,71	56,20	7
		1,00	0,56	39,34	38,86	7
		5,00	0,56	39,34	40,20	7
		10,00	0,56	39,34	42,13	7
		1,00*	0,56	39,34	37,84	7
		1,00	0,40	56,29	58,20	28
		5,00	0,40	56,29	69,82	28
		10,00	0,40	56,29	73,45	28
		1,00*	0,40	56,29	61,52	28
		1,00	0,56	45,96	46,34	28
		5,00	0,56	45,96	47,20	28
		10,00	0,56	45,96	47,77	28
		1,00*	0,56	45,96	46,20	28
		1,00	0,40	65,69	65,03	63

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Pereira	2019	5,00	0,40	65,69	71,05	63
		10,00	0,40	65,69	83,70	63
		1,00*	0,40	65,69	74,73	63
		1,00	0,56	46,78	49,15	63
		5,00	0,56	46,78	53,30	63
		10,00	0,56	46,78	52,44	63
		1,00*	0,56	46,78	49,24	63
Rana <i>et al.</i>	2018	0,50	0,48	16,89	14,91	7
		1,00	0,48	16,89	17,68	7
		1,50	0,48	16,89	19,02	7
		2,00	0,48	16,89	22,15	7
		2,50	0,48	16,89	20,90	7
		0,50	0,48	33,31	32,30	28
		1,00	0,48	33,31	34,58	28
		1,50	0,48	33,31	36,51	28
		2,00	0,48	33,31	38,61	28
		2,50	0,48	33,31	36,10	28
		0,50	0,40	26,61	25,01	7
		1,00	0,40	26,61	27,41	7
		1,50	0,40	26,61	29,02	7
		2,00	0,40	26,61	30,76	7
		2,50	0,40	26,61	28,67	7
		0,50	0,40	35,74	37,55	28
		1,00	0,40	35,74	37,81	28

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Rana <i>et al.</i>	2018	1,50	0,40	35,74	37,07	28
		2,00	0,40	35,74	37,40	28
		2,50	0,40	35,74	39,93	28
Sakthivel e Balasundaram	2016	2,50	0,45	18,99	25,95	7
		3,00	0,45	18,99	27,75	7
		3,50	0,45	18,99	26,66	7
		2,50	0,45	27,60	29,15	28
		3,00	0,45	27,60	34,80	28
		3,50	0,45	27,60	32,50	28
Santos	2016	1,00	0,30	80,90	84,50	7
		2,00	0,30	80,90	94,50	7
		1,00	0,30	80,90	73,80	7
		2,00	0,30	80,90	73,60	7
		1,00	0,30	80,90	66,00	7
		2,00	0,30	80,90	68,60	7
		1,00	0,30	100,50	108,30	28
		2,00	0,30	100,50	112,10	28
		1,00	0,30	100,50	85,30	28
		2,00	0,30	100,50	90,10	28
		1,00	0,30	100,50	84,00	28
		2,00	0,30	100,50	84,70	28
Schiavon	2019	3,00	0,25	66,00	72,73	7
		3,00*	0,28	66,00	75,00	7
		1,50*	0,33	49,00	70,54	7
		3,00*	0,32	49,00	63,00	7
		3,00	0,35	32,50	38,00	7

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Schiavon	2019	3,00*	0,39	32,50	68,00	7
		3,00	0,25	80,50	85,00	28
		3,00*	0,28	80,50	89,00	28
		1,50*	0,33	64,00	85,00	28
		3,00*	0,32	64,00	77,50	28
		3,00	0,35	46,00	52,00	28
		3,00*	0,39	46,00	81,00	28
Schwartz e Cassol	2018	0,45	0,46	23,24	27,57	7
		1,00	0,46	23,24	30,38	7
		0,45	0,46	31,14	32,42	14
		1,00	0,46	31,14	36,12	14
		0,45	0,46	35,61	38,50	28
		1,00	0,46	35,61	41,41	28
Serag <i>et al.</i>	2017	1,50	0,43	33,34	34,32	7
		3,00	0,44	33,34	34,81	7
		4,50	0,45	33,34	37,76	7
		1,00	0,43	41,78	49,03	28
		3,00	0,44	41,78	59,82	28
		4,50	0,45	41,78	53,94	28
Shafiq <i>et al.</i>	2019	1,00	0,35	61,40	69,00	3
		2,00	0,35	61,40	68,00	3
		1,00	0,35	72,00	74,00	7
		2,00	0,35	72,00	73,00	7
		1,00	0,35	88,50	89,00	28
		2,00	0,35	88,50	76,00	28
		1,00	0,35	94,00	94,00	90

Fonte: Autor (2021)

Tabela A1: Banco de dados elaborada no Microsoft Excel (Continuação)

Autor (a)	Ano	Teor de nanosilica (%)	Relação a/c	Traço REF [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Idade (dias)
Shafiq <i>et al.</i>	2019	2,00	0,35	94,00	87,00	90
Souza	2021	2,00	0,41	27,25	39,35	1
		2,00*	0,40	27,25	28,84	1
		2,00	0,41	39,56	47,14	3
		2,00*	0,40	39,56	39,52	3
		2,00	0,41	44,80	49,20	7
		2,00*	0,40	44,80	44,60	7
		2,00	0,41	49,70	51,40	28
		2,00*	0,40	49,70	57,80	28
		2,00	0,41	54,10	51,60	63
		2,00*	0,40	54,10	59,60	63

Fonte: Autor (2021)

Observação: amostras que contém sílica ativa em sua composição estão indicadas com (\*).

## APÊNDICE B

Realizou-se o Teste de Tukey mesmo sendo redundante no caso da Análise de Variância – ANOVA apontar que não há diferenças significativas entre as médias.

Assim, o Teste de Tukey apontou que existe uma semelhança entre as médias de variação entre todos os teores de nanosílica e pode-se interpretar por meio desse resultado, que a resistência à compressão de amostras de concreto contendo qualquer teor de nanosílica, entre os selecionados, não varia em relação ao traço referência em porcentagem semelhante. Para a resistência à compressão dos concretos em si, tem-se um resultado similar, como mostra a Tabela B3, visto que o teste estatístico demonstrou que as médias da resistência são análogas. Assim, verifica-se que não há diferença significativa entre concretos sem adição de nanosílica e aqueles com a presença do material.

**Tabela B1: Resultado do Teste de Tukey para variação da resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Média [%]	Igualdade
1%	14,47	A
1,5%	11,61	A
2%	16,09	A
3%	22,49	A
5%	12,38	A

Fonte: Autor (2021)

**Tabela B2: Resultados complementares do Teste de Tukey obtidos no OriginLab para variação da resistência à compressão aos 7 dias**

Par de Teores	Diferença da Média [%]	Significância
1,5% - 1%	-2,86	0
2% - 1%	1,62	0
2% - 1,5%	4,48	0
3% - 1%	8,02	0
3% - 1,5%	10,88	0
3% - 2%	6,40	0
5% - 1%	-2,09	0
5% - 1,5%	0,77	0
5% - 2%	-3,71	0
5% - 3%	-10,11	0

Fonte: Autor (2021)

**Tabela B3: Resultado Teste de Tukey para a resistência à compressão aos 7 dias**

Teor	Média [MPa]	Igualdade
0%	32,63	A
1%	28,27	A
1,5%	38,48	A
2%	38,48	A
3%	33,52	A
5%	44,85	A

Fonte: Autor (2021)

**Tabela B4: Resultados complementares do Teste de Tukey obtidos no OriginLab para resistência à compressão aos 7 dias**

Par de Teores	Diferença da Média [MPa]	Significância
1% - 0%	5,85	0
1,5% - 0%	-4,37	0
1,5% - 1%	-10,22	0
2% - 0%	5,84	0
2% - 1%	-0,01	0
2% - 1,5%	10,21	0
3% - 0%	0,89	0
3% - 1%	-4,96	0
3% - 1,5%	5,26	0
3% - 2%	-4,96	0
5% - 0%	12,22	0
5% - 1%	6,37	0
5% - 1,5%	16,59	0
5% - 2%	6,38	0
5% - 3%	11,33	0

Fonte: Autor (2021)

Na sequência, com a realização do Teste de Tukey para os dois conjuntos de dados aos 28 dias, constatou-se que existe uma semelhança entre os valores das médias tanto para a variação (Tabela B5) quanto para a resistência à compressão (Tabela B7). Analisando os dados envolvidos nas análises, um fator importante a ser ressaltado é a diferença entre a quantidade de amostras para cada teor de nanosílica, o que pode interferir nos resultados ocasionados pelo teste de Tukey. Por exemplo, há 13 amostras de concreto contendo 1% de nanosílica, enquanto há apenas 4 amostras do grupo do teor de 5% de nanosílica.

**Tabela B5: Resultado do Teste de Tukey para variação da resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Média [%]	Igualdade
1%	14,47	A
1,5%	11,61	A
2%	16,09	A
3%	22,49	A
5%	12,38	A

Fonte: Autor (2021)

**Tabela B6: Resultados complementares do Teste de Tukey obtidos no OriginLab para variação da resistência à compressão aos 28 dias**

Par de Teores	Diferença da Média [%]	Significância
1,5% - 1%	4,68	0
2% - 1%	3,29	0
2% - 1,5%	-1,38	0
3% - 1%	3,42	0
3% - 1,5%	-1,26	0
3% - 2%	0,12	0
5% - 1%	-0,22	0
5% - 1,5%	-4,89	0
5% - 2%	-3,52	0
5% - 3%	-64	0

Fonte: OriginLab (2021)

**Tabela B7: Resultado Teste de Tukey para a resistência à compressão aos 28 dias**

Teor	Média [MPa]	Igualdade
0%	43,46	A
1%	50,89	A
1,5%	43,76	A
2%	46,91	A
3%	49,81	A
5%	54,65	A

Fonte: Autor (2021)

**Tabela B8: Resultados complementares do Teste de Tukey obtidos no OriginLab para resistência à compressão aos 28 dias**

<b>Par de Teores</b>	<b>Diferença da Média [%]</b>	<b>Significância</b>
1% - 0%	7,44	0
1,5% - 0%	0,31	0
1,5% - 1%	-7,13	0
2% - 0%	3,45	0
2% - 1%	-3,98	0
2% - 1,5%	3,15	0
3% - 0%	6,36	0
3% - 1%	-1,08	0
3% - 1,5%	6,05	0
3% - 2%	2,90	0
5% - 0%	11,19	0
5% - 1%	3,75	0
5% - 1,5%	10,88	0
5% - 2%	7,74	0
5% - 3%	4,83	0

Fonte: Autor (2021)

Na coluna “Significância” das tabelas apresentadas pelas Tabelas B2, B4, B6 e B8, obtidas pelo software OriginLab, quando o valor é 0 significa que ao nível de significância de 0,05, não há diferença significativa.