

**INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE DIFERENTES TEORES DE
MICROSSÍLICA E NANOSSÍLICA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**INFLUENCE OF THE COMBINED USE OF DIFFERENT CONTENTS OF MICROSILICA
AND NANOSILICA IN CEMENTITIOUS COMPOSITES**

**INFLUENCIA DEL USO CONJUNTO DE DIFERENTES CONTENIDOS DE
MICROSÍLICE Y NANOSÍLICE EN COMPUESTOS CEMENTICIOS**

 <https://doi.org/10.56238/arev8n3-121>

Data de submissão: 25/02/2026

Data de publicação: 25/03/2026

Lucas Dionizio Lino Alves

Graduado em Engenharia Civil

Instituição: Unieuro Centro Universitário

E-mail: lucaseng397@gmail.com

Yuri Sotero Bomfim Fraga

Doutor em Estruturas e Construção Civil

Instituição: Universidade de Brasília

E-mail: yuri.fraga@unb.br

Vitória Régia Araújo Ribeiro

Doutoranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Instituição: Universidade de Brasília

E-mail: vitoria.rib@hotmail.com

Pedro Filipe de Luna Cunha

Doutor em Estruturas

Instituição: Instituto Federal Goiano

E-mail: pedro.cunha@ifgoiano.edu.br

Pollyanna Laurindo de Oliveira

Doutora em Química

Instituição: Instituto Federal Goiano

E-mail: pollyanna.oliveira@ifgoiano.edu.br

RESUMO

Conforme as diferentes necessidades construtivas, adaptações e modificações são necessárias para atender às mais variadas demandas existentes, o que explica o estudo de materiais com emprego de alta tecnologia, almejando desempenho e durabilidade cada vez maiores. A utilização de nanomateriais, como a nanossílica (NS), incorporados ao cimento Portland é crescente devido à melhoria de desempenho mecânico e de durabilidade. Além dos nanomateriais, a utilização de micromateriais como a microssílica (MS) é consolidada pela indústria do concreto. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da utilização conjunta de diferentes teores de MS e NS no desempenho mecânico e na durabilidade de microconcretos. Para isso, foram investigados sete traços, sendo uma referência (REF), somente com cimento Portland, e seis substituindo 10% do cimento Portland por diferentes proporções de MS e NS (10MS, 8MS2NS, 6MS4NS, 4MS6NS,

2MS8NS e 10NS). No estado fresco, foi verificada a fluidez dos microconcretos através do ensaio da mesa de consistência. No estado endurecido, foram avaliadas a resistência à compressão aos 1, 3 e 7 dias e a absorção por capilaridade com 12 horas e 24 horas. Foi observado que a utilização conjunta de MS e NS resultou na redução da fluidez dos microconcretos em comparação com o traço referência, sendo o traço 8MS2NS de menor fluidez. Ao analisar o desempenho mecânico, o traço 4MS6NS demonstrou maior resistência comparado aos demais e o REF um baixo desempenho, principalmente quando ensaiado no sétimo dia. O traço 2MS8NS apresentou maior impermeabilização em ensaio de absorção de água por capilaridade, ao contrário do traço REF, que apresentou alta absorção quando comparado com os demais. Sendo assim, foi observado que a utilização conjunta de MS e NS é benéfica para o aumento do desempenho mecânico e da durabilidade dos microconcretos, porém prejudica a fluidez devido à elevada superfície específica das partículas. No geral, o traço 4MS6NS resultou nas melhores propriedades avaliadas.

Palavras-chave: Cimento Portland. Nanotecnologia. Microsílica. Nanossílica. Desempenho Mecânico. Durabilidade.

ABSTRACT

According to different construction needs, adaptations and modifications are necessary to meet the wide variety of existing demands, which explains the study of materials using high technology, aiming for increasingly higher performance and durability. The use of nanomaterials, such as nanosilica (NS), incorporated into Portland cement has been increasing due to improvements in mechanical performance and durability. In addition to nanomaterials, the use of micromaterials such as microsilica (MS) is well established in the concrete industry. Thus, this research aims to verify the influence of the combined use of different contents of MS and NS on the mechanical performance and durability of microconcretes. For this purpose, seven mixtures were investigated, including a reference (REF), containing only Portland cement, and six replacing 10% of the Portland cement with different proportions of MS and NS (10MS, 8MS2NS, 6MS4NS, 4MS6NS, 2MS8NS and 10NS). In the fresh state, the fluidity of the microconcretes was verified through the flow table test. In the hardened state, compressive strength at 1, 3 and 7 days and capillary water absorption at 12 and 24 hours were evaluated. It was observed that the combined use of MS and NS resulted in a reduction in the fluidity of the microconcretes compared with the reference mixture, with the 8MS2NS mixture presenting the lowest fluidity. When analyzing the mechanical performance, the 4MS6NS mixture demonstrated higher strength compared to the others, while REF showed low performance, especially when tested on the seventh day. The 2MS8NS mixture presented greater waterproofing in the capillary water absorption test, unlike the REF mixture, which showed high absorption when compared with the others. Therefore, it was observed that the combined use of MS and NS is beneficial for increasing the mechanical performance and durability of microconcretes; however, it impairs fluidity due to the high specific surface area of the particles. Overall, the 4MS6NS mixture resulted in the best evaluated properties.

Keywords: Portland Cement. Nanotechnology. Microsilica. Nanosilica. Mechanical Performance. Durability.

RESUMEN

De acuerdo con las diferentes necesidades constructivas, son necesarias adaptaciones y modificaciones para atender las más variadas demandas existentes, lo que explica el estudio de materiales con el empleo de alta tecnología, con el objetivo de alcanzar un desempeño y una durabilidad cada vez mayores. El uso de nanomateriales, como la nanosílice (NS), incorporados al cemento Portland ha ido en aumento debido a la mejora del desempeño mecánico y de la durabilidad.

Además de los nanomateriales, el uso de micromateriales como la microsílice (MS) está consolidado en la industria del concreto. De esta manera, esta investigación tiene como objetivo verificar la influencia del uso conjunto de diferentes contenidos de MS y NS en el desempeño mecánico y en la durabilidad de los microconcretos. Para ello, se investigaron siete mezclas, siendo una de referencia (REF), compuesta únicamente por cemento Portland, y seis sustituyendo el 10% del cemento Portland por diferentes proporciones de MS y NS (10MS, 8MS2NS, 6MS4NS, 4MS6NS, 2MS8NS y 10NS). En estado fresco, se verificó la fluidez de los microconcretos mediante el ensayo de la mesa de consistencia. En estado endurecido, se evaluaron la resistencia a la compresión a 1, 3 y 7 días y la absorción por capilaridad a las 12 y 24 horas. Se observó que el uso conjunto de MS y NS resultó en una reducción de la fluidez de los microconcretos en comparación con la mezcla de referencia, siendo la mezcla 8MS2NS la de menor fluidez. Al analizar el desempeño mecánico, la mezcla 4MS6NS demostró mayor resistencia en comparación con las demás, mientras que la REF presentó un bajo desempeño, principalmente cuando fue ensayada al séptimo día. La mezcla 2MS8NS presentó mayor impermeabilización en el ensayo de absorción de agua por capilaridad, a diferencia de la mezcla REF, que mostró una alta absorción en comparación con las demás. Por lo tanto, se observó que el uso conjunto de MS y NS es beneficioso para aumentar el desempeño mecánico y la durabilidad de los microconcretos; sin embargo, perjudica la fluidez debido a la elevada superficie específica de las partículas. En general, la mezcla 4MS6NS presentó las mejores propiedades evaluadas.

Palabras clave: Cemento Portland. Nanotecnología. Microsílice. Nanosílice. Desempeño Mecânico. Durabilidad.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, devido à modernização de equipamentos e aprofundamento de pesquisas para o beneficiamento do concreto e microconcreto, grandes conquistas e resultados foram alcançados, como o desenvolvimento de concretos e microconcretos especiais. Tais produtos da construção civil são utilizados para finalidades específicas, que demandam propriedades que não poderiam ser alcançadas com a mistura convencional. São exemplos desse tipo de concreto: o concreto leve, autoadensável, compactado a rolo e o concreto de alto desempenho (CAD) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A indústria da construção civil necessita de materiais que se adequem e acompanhem o desenvolvimento dos centros urbanos e regiões habitadas em geral, sendo assim, são exigidos materiais que suportem a crescente esbeltez dos empreendimentos imobiliários e verticalização de tais projetos, além de estruturas que estão cada vez mais expostas a agentes agressivos. Portanto, para atender tais situações citadas anteriormente, são necessárias pesquisas que avaliem aditivos para potencializar as propriedades dos materiais e possivelmente diminuir a utilização de compostos altamente agressivos ao meio ambiente. É o caso da adição de microssílica (MS) e nanossílica (NS), Materiais Cimentícios Suplementares (MC's), que em substituição de diferentes teores de cimento, além de diminuir a proliferação de materiais provenientes de processos químicos, potencializam seu desempenho e durabilidade (ANDRADE et al., 2019; FENG et al., 2018; FLORES et al., 2017; FRAGA et al., 2020a; GARCIA et al., 2017; RÊGO et al., 2019).

A MS é um coproduto da indústria de silício metálico e ligas de ferro silício. Normalmente, a MS contém alto teor de SiO_2 ($> 90\%$), distribuídos em um diâmetro médio de $0,1 \mu\text{m}$ e área superficial na ordem de 20.000 a $25.000 \text{ m}^2/\text{kg}$. A MS atua quimicamente através da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio (CH) oriundo das reações de hidratação do cimento, resultando em uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e agindo fisicamente preenchendo os vazios entre os grãos de cimento, proporcionando aumento da resistência mecânica do concreto e acréscimo na resistência ao ataque de agentes agressivos (HERMANN et al., 2016; ROMANO et al., 2008; VASKE; CAMPAGNOLO; DAL MOLIN, 2010).

Devido à necessidade de melhorar as propriedades do CAD, o número de pesquisas com a utilização de partículas nanométricas adicionadas ao cimento Portland está aumentando em grande escala. Nos últimos anos, o uso de NS tem se destacado pela melhoria na durabilidade e aumento da resistência à flexão e à compressão do CAD, o que é creditado à alta reatividade e ao efeito de empacotamento da NS (CAI et al., 2017; FRAGA et al., 2020b).

Diversas pesquisas enfatizam a necessidade de aprimorar o conhecimento sobre MC's

altamente reativos e nanomateriais no concreto, em especial a MS e a NS (BHATTACHARYA; HARISH, 2018; CHEN; DENG; LI, 2016; FERNÁNDEZ et al., 2013; HOU et al., 2013; RÊGO et al., 2019). Pesquisas recentes enfatizaram o efeito sinérgico ao usar MS e NS como adições em misturas ternárias com cimento Portland (ANDRADE et al., 2019; FRAGA et al., 2020a; GHAFoori et al., 2018; GHODDOUSI et al., 2018; LI et al., 2017). Vale ressaltar que o efeito sinérgico melhora as propriedades do concreto quando comparado às propriedades do concreto com MS ou NS utilizados individualmente (ANDRADE et al., 2019; FRAGA et al., 2020a).

Alguns trabalhos de conclusão de curso em engenharia civil do UNIEURO evidenciaram o potencial da utilização da MS no concreto, que contribuiu para o aumento do desempenho mecânico do concreto (DAVI; SOUZA, 2020; MACEDO; SANTOS, 2020). Apesar disso, nas pesquisas desenvolvidas por Caldeira e Franco (2020) e Macedo e Santos (2020), constatou-se que a utilização de 2% de NS não foi eficaz para promover o aumento do desempenho mecânico do concreto. Esse comportamento foi justificado na pesquisa realizada por Araújo e Viana (2020), que concluíram que pequenos teores de NS (até 2%) podem não ser eficazes para o aumento do desempenho mecânico, porém teores intermediários (4%-6%) resultaram no aumento significativo de desempenho mecânico. Macedo e Santos (2020) estudaram misturas ternárias de cimento Portland, contendo MS e NS, e evidenciaram o efeito sinérgico na utilização desses dois materiais, porém os teores de MS e NS foram fixados em 8% e 2%, respectivamente. Dessa forma, observa-se que a utilização conjunta de MS e NS com diferentes teores podem influenciar nas propriedades do CAD.

Diante do exposto, a investigação da adição conjunta de MS e NS em diferentes teores no desempenho mecânico e na durabilidade do CAD é uma importante lacuna na literatura. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo investigar o efeito de diferentes teores de MS e NS utilizadas em conjunto no desempenho mecânico e na durabilidade de compósitos cimentícios de alto desempenho nas idades iniciais. Para isso, serão avaliadas a consistência, a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade em microconcretos com adição de MS e NS.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados os principais conceitos que fundamentam esta pesquisa. Inicialmente, são abordados aspectos relacionados ao concreto de alto desempenho e, em seguida, as características e mecanismos de atuação da microssílica e da nanossílica em materiais cimentícios. Por fim, são discutidos estudos da literatura sobre os efeitos dessas adições no desempenho mecânico e na durabilidade de compósitos cimentícios.

2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) apresenta características potencializadas para a finalidade a qual é empregado, atingindo como esperado alta resistência inicial. Historicamente em 1987 na Noruega, ocorreu a primeira reunião para discutir questões relacionadas ao desempenho do concreto (BAUER, 2019).

Por volta dos anos 1970 o máximo de resistência obtida era por volta de 40 MPa, atualmente é possível obter concretos que atingem níveis de resistência acima de 150 MPa (BAUER, 2019). Tais valores são possíveis devido métodos de dosagem cada vez mais precisos, juntamente com a utilização de aditivos que potencializam as propriedades químicas da pasta de cimento. Como já afirmado anteriormente, com o aumento da resistência é possível a projeção de empreendimentos cada vez mais esbeltos, tendo em vista a maior capacidade de suportar as cargas impostas, isso devido alta resistência e durabilidade das estruturas obtidas através da composição da mistura do concreto. Além de outros fatores, os Materiais Cimentícios Suplementares (MC's), como: escória de alto forno, metacaulim, resíduo de tijolo cerâmico, cinza de casca de arroz, fibra de vidro, entre outros, permitiram que concretos especiais integrassem o mercado da construção civil.

Além dos materiais já apresentados, a microsílica e a nanossílica, tratados nesse estudo, são matéria de grande importância devido a sua reação com a pasta de cimento, tais materiais são empregados em sua maioria com a utilização de técnicas de dispersão, com o objetivo de evitar a tendência de aglomeração por parte desses materiais utilizados como aditivos.

2.2 MICROSSÍLICA E NANOSSÍLICA

A microsílica (MS), também conhecida como Sílica Ativa (SA), é um material cimentício suplementar amplamente utilizado como aditivo do cimento, além de ser importante instrumento redutor dos poros e têm por consequência a diminuição da permeabilidade da superfície específica da pasta de cimento, ainda com influência em sua durabilidade, a qual será averiguada através de ensaios. Bauer (2019) aponta que tais aditivos de origem mineral diminuem a porosidade, obstruindo assim a percolação de água através dos poros ou possíveis fissuras, devido ao aumento do volume que esse material apresenta conforme ocorre o processo de hidratação do mesmo. Além disso, Bauer (2019) destaca o processo de obtenção da sílica ativa, podendo ser obtida entre outros meios pela filtragem do gás advindo da escória do filtro de manga, além de ser possível obter o mesmo através de ligas de ferrosilício ou silício metálicas, os quais passam por processos em altos fornos com temperaturas em média de 2000° C, ocorrendo assim a redução de quartzo a silício. Após esse processo é obtido um material extremamente fino com diâmetro aproximado entre 0,1 e 0,2 μm , de 50 a 100 vezes menor

que as partículas do cimento. Ademais, a microssílica possui em sua composição menor proporção de ferro, carbono, cálcio, alumina. Já em grandes proporções é composta por principalmente SiO_2 (dióxido de silício).

Um dos produtos resultantes da hidratação do concreto é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Tal produto pode ser alterado quando na composição da pasta cimentícia é incorporado a nanossílica, a qual é um nanomaterial que pode atuar na zona de transição do agregado para a pasta de cimento, região mais frágil do composto cimentício, tendo como principal objetivo a melhor coesão dos agregados e preenchimento das zonas vazias (BASTAMI; BAGHBADRANI; ASLANI, 2014). Como resultado dessa adição ocorre a aceleração no processo de hidratação do cimento, sendo tal processo oriundo da alta reatividade pozolânica, gerada pela dissolução e acréscimo da superfície específica (BJORNSTROM et al., 2004).

2.3 DESEMPENHO MECÂNICO

Em pesquisa realizada Santos; Macedo e Fraga (2021) analisaram o desempenho com 1 dia de hidratação para o concreto com 8% de Sílica Ativa e 2% de Nanossílica. Foi observado que o mesmo apresentou a maior resistência média à compressão, com valor de 20,6 MPa, quando em comparação com outros teores de sílica ativa e nanossílica. Tal resultado é justificado pela maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que fortaleceu as ligações químicas exercidas pelos componentes do concreto, sendo possível o ganho de resistência.

Outro fator que pode ocorrer é a estabilização da resistência a compressão por parte dos microconcretos com diferentes substituições de sílica ativa e nanossílica. Araújo, Viana e Fraga (2021) observaram em pesquisa realizada com 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de nanossílica que o teor de 6% de NS em resistência à compressão apresentou valores equivalentes aos que contem maiores teores de adição, caracterizando assim estabilização da composição. Tal fator pode ser evidenciado pela retração do cimento, ocasionando possíveis problemas patológicos futuros.

Já com o objetivo de evitar a tendência que tais MC's possuem, se aglomerarem, e consequente perda do desempenho mecânico, pode ser realizado o procedimento de ultrassonicação. Em estudo realizado Fraga et al., (2020), ao ultrassonicar a sílica ativa e nanossílica coloidal obtiveram resultados satisfatórios no desempenho mecânico, atribuindo tais resultados ao efeito da atividade pozolânica juntamente com o efeito filer, que foram devidamente melhorados com a maior dispersão. Destaca-se os resultados aos 7 dias, onde a pasta com 10% sílica ativa ultrassonicada apresentou desempenho melhorado em comparação com a não ultrassonicada. Isso justifica e salienta tal procedimento, que possivelmente pode ser implementado nas pesquisas com os MC's em questão.

2.4 DURABILIDADE

Em pesquisa realizada por ROMANO et al. (2008), com a adição de microsilica foi verificado ganho na durabilidade do concreto, isso devido a diminuição da permeabilidade, causada pela maior coesão das partículas e diminuição da porosidade da superfície, o que impediu a penetração de agentes agressivos e consequentemente maior durabilidade.

Os MC's analisados no presente estudo, microsilica e nanossilica, são materiais que por sua dimensão microscópica e nanométrica aumentam a diversidade do tamanho das partículas, preenchendo assim os espaços que possivelmente estariam vazios (volume de vazios). Conforme Kim et al. (2013) com a hidratação do cimento, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a zona agregado-pasta de cimento hidratada é o ponto mais frágil do concreto, porém ao reduzir esta zona, através de materiais manométricos é possível gerar uma zona mais fortalecida. Destaca ainda, que a sílica ativa é fator retardador da reação de liberação de calor por parte do cimento, reação exotérmica, diminuindo assim o fluxo de calor e possível estresse contínuo na pasta de cimento, fatores que geram possíveis fissuras e trincas, afetando diretamente a durabilidade do concreto.

3 METODOLOGIA

A realização da presente pesquisa aplicada é fundamentada através de ensaios e observação sistemática dos resultados. Para tal, é necessária uma linha de pesquisa sólida e com alto índice de precisão, sendo avaliado ainda os materiais que serão submetidos aos ensaios, bem como a preparação para realização dos mesmos. Os ensaios permitem a determinação da influência da utilização conjunta de diferentes teores de microsilica e nanossilica no desempenho mecânico e na durabilidade de Concretos de Alto Desempenho, tema central da pesquisa. Para isso, a metodologia experimental foi executada no Laboratório de Tecnologia e Materiais de Construção do Centro Universitário Euro-Americano (UNIEURO).

3.1 MATERIAIS

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), microsilica (MS), nanossilica (NS) coloidal, aditivo superplastificante (SP), agregado miúdo natural, além de água proveniente da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Os quais, foram caracterizados em laboratório com resultados apresentados mais adiante. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados nessa pesquisa.

Tabela 1. Caracterização do cimento Portland, da nanossílica e do aditivo superplastificante.

Material	Propriedade	Valores
Cimento Portland	Tempo de início e fim de pega (min)	≥ 1
		≤ 10
	Índice de finura na peneira 75 μm (%)	$\leq 6,0$
	Massa específica (g/cm^3)	3,14
Nanossílica	Massa específica (g/cm^3)	1,2
	pH	10,5
	Teor de sólidos (%)	30
	Diâmetro médio (nm)	22,75
Aditivo superplastificante	Cor	Líquido alaranjado
	Massa específica (g/cm^3)	1,095 em relação à massa específica da água
	pH	3,9

Fonte: NBR NM 65 (2003); NBR 11579 (2012)

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) é um dos materiais fundamentais na construção civil, tal material em dissonância de outros tipos de cimento, não possui em sua composição escória ou pozolona, composto praticamente em sua totalidade apenas por clínquer e gesso, além de pequena fração de filer calcário. Sua principal característica que o torna fundamental e atrativo é sua alta resistência mecânica já nas idades iniciais, justificada devido baixa relação água/cimento (a/c). Com a utilização em conjunto de materiais cimentícios suplementares, os quais podem potencializar ainda mais determinadas características que a ele são esperadas (alta resistência e durabilidade), materiais esses como a microssílica e nanossílica.

O emprego de aditivo superplastificante nas misturas cimentícias alteram propriedades do material a qual é aplicado. Conforme a NBR 11768 (ABNT, 2011), esse tipo de adição aplicado em quantidades pouco expressivas geram alterações significativas seja na quantidade de água na relação água/cimento (a/c). Sendo assim, foi utilizado o superplastificante Tecflow 50N da marca Grace, entre os benefícios a fabricante garante alta redução de água de amassamento, possibilitando consistência homogênea para a pasta, elevada resistência mecânica e isenção de cloretos, fatores de extrema importância para o desempenho e durabilidade. O agregado miúdo utilizado foi peneirado em quatro frações granulométricas estabelecidas na NBR 7215 (ABNT, 2019), conforme Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição granulométrica da areia normal (ABNT, 2019).

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras (mm)	Porcentagem retida em massa de material nas peneiras (%)
Grossa	2,4 e 1,2	25 $\pm$ 5
Média grossa	1,2 e 0,6	50 $\pm$ 5
Média fina	0,6 e 0,3	75 $\pm$ 5
Fina	0,3 e 0,15	97 $\pm$ 3

Fonte: NBR 7215 (2019).

Os agregados foram dispostos separadamente em recipientes conforme a sua granulometria,

apresentados na Figura 1.

Figura 1. Agregado miúdo, após peneiramento.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.2 PREPARAÇÃO DOS MICROCONCRETOS

Serão estudados sete diferentes microconcretos, sendo um convencional, sem adições, e os demais contendo diferentes teores de MS e/ou NS, totalizando 10% de adição em relação à massa de cimento. Os teores foram escolhidos com base na literatura (ANDRADE *et al.*, 2019; ARAÚJO; VIANA, 2020; FRAGA *et al.*, 2020a; FRAGA *et al.*, 2020b; RÊGO *et al.*, 2019). A nomenclatura dos traços adotados nessa pesquisa é apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Nomenclatura e descrição dos concretos.

Nomenclatura	Descrição dos concretos
REF	Concreto convencional sem adições (referência).
10MS	Concreto com adição de 10% de MS.
8MS2NS	Concreto com adição de 8% de MS e 2% de NS.
6MS4NS	Concreto com adição de 6% de MS e 4% de NS.
4MS6NS	Concreto com adição de 4% de MS e 6% de NS.
2MS8NS	Concreto com adição de 2% de MS e 8% de NS.
10NS	Concreto com adição de 10% de NS.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A quantidade de materiais utilizados para a moldagem dos sete corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura pode ser observada na tabela 4. Ao total, foram moldados doze corpos de prova por traço. Para todos os microconcretos resultarem na mesma relação água/aglomerante, foi descontada a quantidade de água da NS coloidal.

Tabela 4. Quantitativo de materiais utilizados para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos 50x100 mm de microconcreto.

MICRO- CON- CRETO	MATERIAL									
	CP V- ARI (g)	Sílica ativa	Nanos- sílica (g) *	Areia (g)				Aditivo superplastificante		Água (g)
				Fina	Média fina	Média grossa	Grossa	(g)	(%)	
REF	624,0	0,00	0,00	468	468	468	468	12,48	2	300
10MS	561,6	62,40	0,00	468	468	468	468	12,48	2	300
8MS2NS	561,6	49,92	41,60	468	468	468	468	12,48	2	270,88
6MS4NS	561,6	37,44	83,20	468	468	468	468	12,48	2	241,76
4MS6NS	561,6	24,96	124,8	468	468	468	468	12,48	2	212,64
2MS8NS	561,6	12,48	166,40	468	468	468	468	12,48	2	183,52
10NS	561,6	0,00	208,00	468	468	468	468	12,48	2	154,4
* A quantidade de NS adicionada à mistura refere-se a NS coloidal (70% líquido e 30% NS), resultando no teor efetivo de NS desejado após descontar a quantidade de água na suspensão aquosa.										

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O procedimento de mistura dos microconcretos seguiu a metodologia descrita na NBR 7215 (ABNT, 2019). Primeiro, foi realizada a adição de água, MS, NS e aditivo superplastificante em uma cuba de aço inox. Depois, foi acrescentado o cimento Portland. A mistura desses materiais foi feita na velocidade pelo período de 30s. Logo após esse tempo, sem desligar o misturador planetário, foi adicionada a areia (quatro frações de 468g previamente misturadas), que foi adicionada aos poucos durante os 30s. Em seguida, foi aumentado a velocidade (do misturador) para alta e o manteve ligado por mais 30s. Posteriormente, o misturador foi desligado por 90s, sendo que nos primeiros 30s foi retirado o microconcreto que ficou aderido às paredes da cuba, com o auxílio de uma espátula. Nos 60s restantes a mistura foi deixada em repouso e logo após esse intervalo o misturador foi ligado novamente, em velocidade alta por 60s.

Após o preparo dos microconcretos, foi realizada a moldagem dos corpos de prova. O microconcreto foi colocado nas formas com ajuda da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, e com cada camada recebendo 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com o soquete normal. Logo após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com uma lona plástica por 24 horas para evitar a evaporação de água e posteriormente colocados em cura submersa de água saturada de cal até a idade de ensaio. Os corpos de prova após moldagem estão demonstrados conforme a Figura 2.

Figura 2. Corpos de prova após a moldagem.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.3 CONSISTÊNCIA DOS MICROCONCRETOS

A consistência dos microconcretos será avaliada através do ensaio de mesa de consistência descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio deve ser realizado com o microconcreto em seu estado fresco, logo após a preparação no misturador planetário, e após o preparo o molde de tronco cônico, localizado ao centro da mesa de consistência, o molde deve ter seu volume totalmente preenchido com o microconcreto, sendo o preenchimento disposto em 3 camadas e cada uma recebendo aplicação de golpes, mediante soquete, com 15, 10 e 5 golpes para cada camada. Quando o molde é preenchido o arrasamento é realizado, para que a superfície se mantenha uniforme. O molde tronco cônico possui a seguinte dimensão: diâmetro interno de 79 cm. O qual foi avaliado como referência para o espraçamento dos traços ensaiados. O corpo de prova pós moldagem em tronco cônico, está apresentado conforme Figura 3.

Figura 3. Ensaio de mesa de consistência.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Em seguida, é retirado o molde tronco cônico e 30 golpes devem ser aplicados através do giro da manivela. Após isso, deve ser medido com a utilização do paquímetro o espraçamento em pontos diametrais do corpo de prova ensaiado. Com tal ensaio, é possível verificar a coesão e a fluidez das partículas constituintes. O ensaio comumente é utilizado para escolha pertinente da relação água/cimento, porém para tal estudo a relação já é preestabelecida e fixa, o que não invalida a possibilidade de verificação da consistência do material estudado.

3.4 DESEMPENHO MECÂNICO DOS MICROCONCRETOS

No concreto endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019) aos 1, 3 e 7 dias. Foram feitos três corpos de prova por traço para cada idade. A partir dos resultados obtidos na realização dos dois ensaios, será realizada uma análise estatística com o *software* STATÍSTICA v10, através do mesmo cada traço será testado a um nível de significância (α) de 0,05 por idade pesquisada. Será realizada uma análise de variância *one-way* ANOVA dos dados dos ensaios de resistência à compressão, com o intuito de identificar se as resistências dos traços diferem de maneira significativa. Essa influência é indicada por meio da probabilidade significativa (p-valor), na qual para que os resultados sejam significativos o p-valor

não deve ser maior que o nível de significância (α). Caso o p-valor seja igual ou superior a 0,05, o resultado é considerado não significativo, ou seja, as resistências são estatisticamente iguais.

Em seguida, com o auxílio do mesmo *software*, será realizado o teste de Duncan, onde os dados gerados serão submetidos à uma comparação múltipla entre si, separando-os por classes homogêneas de resistências, levando em consideração a média e o desvio padrão das duas resistências para cada ensaio, com intervalo de confiança de 95%.

O ensaio de resistência a compressão em prensa elétrica, está demonstrado conforme Figura 4.

Figura 4. Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

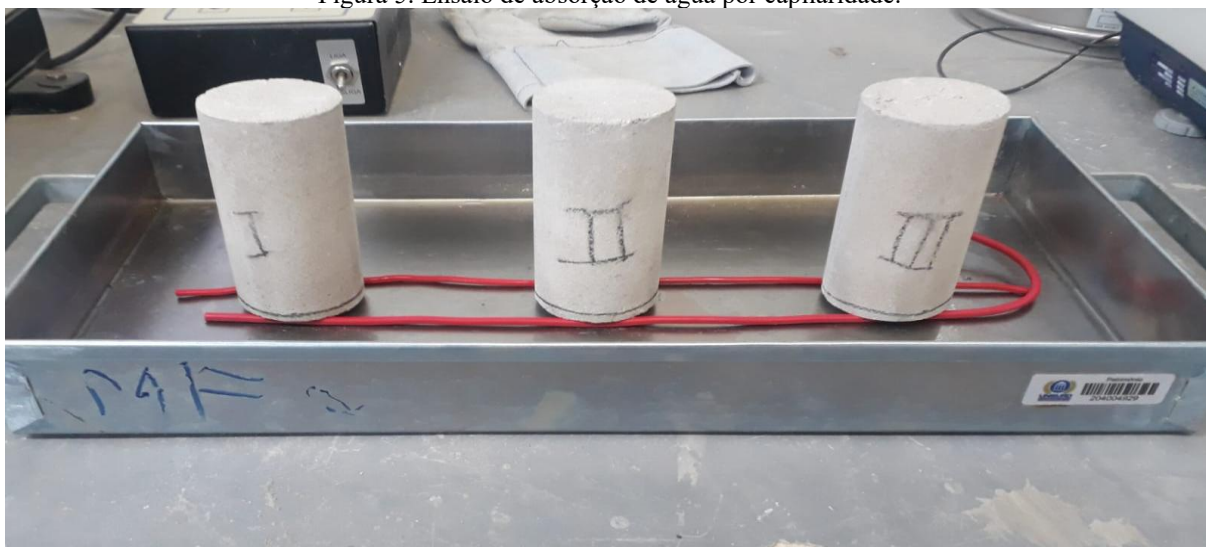
3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Será realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade de acordo com a NBR 9779:2012 (Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade) para determinação da ascensão capilar. Para cada traço 3 corpos de prova foram devidamente ensaiados, totalizando assim 21 corpos de prova estudados.

Todos os CP's devem atender as exigências normativas, como: 195 cm³, no caso de argamassas, sem a presença de óleos ou qualquer outro material aderido à moldagem. A princípio deve ser determinado a massa ao ar e logo em seguida secá-los em estufa à temperatura de (105±5) °C, até que a constância de massa seja obtida. Para pré-imersão os CP's devem ser retirados da estufa e resfriados à temperatura de (23 ± 2) °C, em seguida determinar a massa seca (m_s).

Após os procedimentos anteriores, os CP's devem ser imersos sobre suportes em recipiente contendo água de forma que o nível de água permaneça constante (5 ± 1) mm, estando acima de sua face inferior, e evitando a molhagem de outras faces. Para tal ensaio, os corpos de prova foram retirados do recipiente com 12h e 24h, contadas a partir do contato com a água, pesados em balança digital com resolução mínima de 0,025% da massa do corpo de prova, e logo em seguida retornaram imediatamente ao recipiente de ensaio. Os corpos de prova submersos através de recipiente de ensaio, estão demonstrados conforme a Figura 5.

Figura 5. Ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Por fim, todos os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, permitindo assim a leitura da ascensão da água interna. Para a leitura foi utilizado instrumento de precisão, paquímetro, com resolução de 0,05mm. Posterior ao ensaio foi determinado tanto a ascensão capilar (cm), quanto a absorção de água por capilaridade (g/cm^2) sendo calculada pela seguinte fórmula:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (1)$$

Onde:

C é a absorção de água por capilaridade;

m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período especificado, expressa em gramas (g);

m_s é a massa do corpo de prova seco, assim que atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$, expressa em gramas(g);

S é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2);

A é a leitura da ascensão capilar, está demonstrada conforme a Figura 6.

Figura 6. Leitura da ascensão capilar com a utilização de paquímetro.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente item tem por objetivo apresentar os resultados dos ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos e determinação da absorção de água por capilaridade, conforme NBR 7215 e NBR 9779, respectivamente. Tendo ainda em consideração os diferentes teores de microsilica e nanossilica em substituição do cimento Portland.

4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os espalhamentos para os 7 traços apresentaram resultados coerentes, tendo em vista a maior coesão das partículas constituintes da mistura quando da presença de microsilica e/ou nanossilica. Para tal, a argamassa como anteriormente mencionado estava em seu estado fresco, fator de ensaio para todos os CP's. A leitura foi realizada em dois pontos do diâmetro dos corpos de prova após a aplicação dos 30 golpes.

Foi possível observar que quando utilizada MS e/ou NS, o espalhamento reduziu. Isso ocorre devido à alta área superficial das micropartículas e nanopartículas de sílica, que aumentam a demanda de água para um mesmo espalhamento. Nas misturas contendo NS, foi observado um espalhamento semelhante. Os resultados estão demonstrados conforme Tabela 5.

Tabela 5. Resultados do ensaio de índice de consistência.

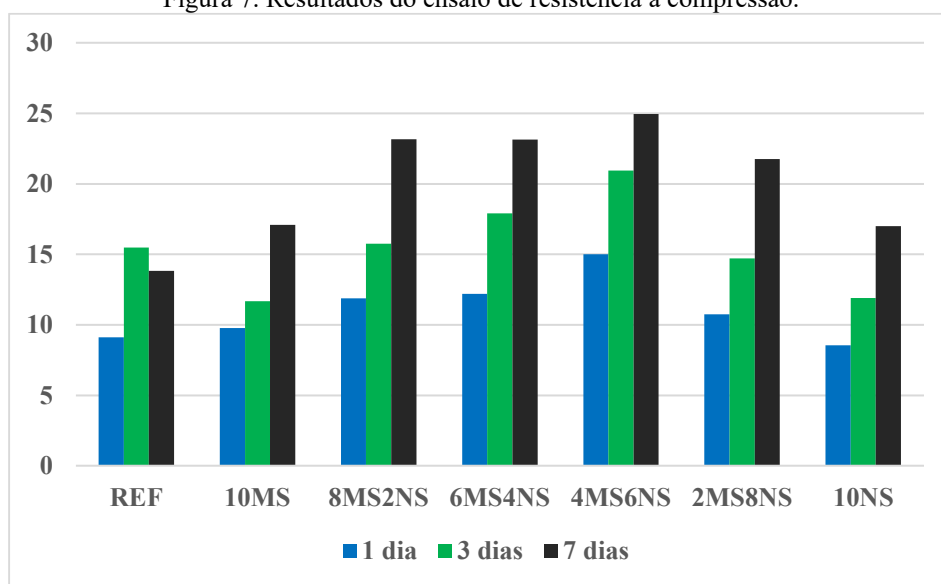
Traço	Diâmetro (mm)
REF	94,3
10MS	92,0
8MS2NS	87,0
6MS4NS	88,2
4MS6NS	90,2
2MS8NS	89,4
10NS	89,3

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS CILÍNDRICOS

Os corpos de prova foram ensaiados em prensa elétrica em ambiente laboratorial da instituição. O ensaio foi realizado para as idades de 1, 3 e 7 dias com os devidos resultados apresentados na Figura 7.

Figura 7. Resultados do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Através do gráfico apresentado anteriormente é possível comparar os desempenhos dos corpos de prova ensaiados em suas diferentes idades. O microconcreto com teores de 4% de microsilica e 6% de nanossilica (4MS6NS) apresentou maior resistência em MPa quando ensaiado com 1 dia após sua moldagem, com 15MPa em média (ensaio realizado com três corpos de prova). Ainda com resultados com duas dezenas os microconcretos com 6% de microsilica e 4% de nanossilica (6MS4NS); 8% de Microsilica e 2% de Nanossilica (8MS2NS) e 2% de microsilica e 8% de nanossilica (2MS8NS), obtiveram resistência de 12,2 MPa, 11,9MPa e 10,7MPa em média, resultados consideráveis quando comparados até mesmo com os demais traços que atingiram entre 8MPa e 9MPa, sendo o menor desempenho com 10% de microsilica (10NS), ou seja, tirando essa exceção

todos os demais traços apresentaram melhor desempenho que o concreto convencional, REF, o que atesta o uso de tais materiais cimentícios suplementares, microssílica e nanossílica, quando analisado o desempenho de 1 dia após sua moldagem.

Aos 3 dias de moldagem, o melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão foi observado no traço com 4% de microssílica e 6% de nanossílica (4MS6NS), que atingiu resistência média de 20,9 MPa. O traço de Referência (REF) apresentou resistência semelhante aos traços 8MS2NS e 2MS8NS, com valores em torno de 15 MPa. Já os traços 10MS e 10NS apresentaram resistências próximas de 12 MPa. Dessa forma, o REF apresentou desempenho intermediário aos 3 dias; contudo, a maioria dos microconcretos com adição de materiais cimentícios apresentou resultados superiores ao traço de referência.

Em idade mais avançada, aos 7 dias, após os ensaios de compressão, o traço REF apresentou o menor desempenho, com 13,8 MPa, evidenciando uma diferença significativa quando comparado ao maior valor obtido, de 27,93 MPa, registrado pelo traço 4MS6NS. Na sequência, os traços 10MS e 10NS apresentaram desempenho semelhante, com resistências próximas de 17 MPa. O traço 2MS8NS atingiu aproximadamente 21 MPa, enquanto os traços 8MS2NS e 6MS4NS apresentaram resultados próximos entre si, com cerca de 23 MPa.

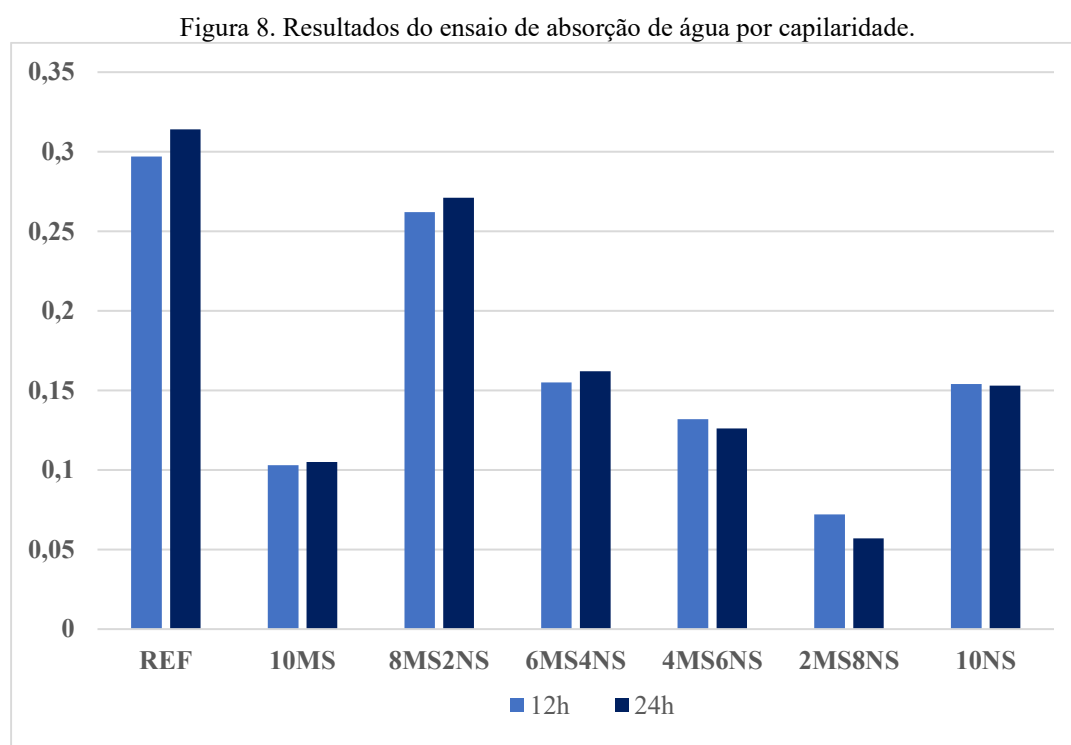
Portanto, em todas as idades analisadas, o traço 4MS6NS apresentou resultados superiores e mais expressivos em comparação aos demais. Entretanto, com 1 dia de moldagem, o traço REF apresentou, em média, resultados superiores quando comparado aos microconcretos com adição apenas de microssílica. Aos 3 dias, o REF apresentou resistência semelhante à de dois traços com adições, porém ainda com desempenho intermediário. Já aos 7 dias, essa tendência não se manteve, sendo observado o pior desempenho entre os traços analisados.

O ganho de desempenho observado na maioria dos traços pode ser explicado pela modificação da estrutura de poros do material. De acordo com Ribeiro (2020, p. 80), a sílica ativa é um material altamente pozzolânico, característica atribuída à sua extraordinária finura e ao elevado teor de sílica amorfa. Esses fatores favorecem a reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) gerado durante o processo de hidratação do cimento, resultando na formação adicional de silicatos de cálcio hidratados, o que contribui diretamente para o aumento da resistência mecânica.

Dessa forma, é possível afirmar que o uso de materiais cimentícios suplementares (MC's), especialmente microssílica e/ou nanossílica, atua como potencializador das propriedades dos microconcretos, promovendo ganhos significativos de desempenho. Esse fator é particularmente relevante diante da crescente necessidade de aprimoramento contínuo das propriedades dos materiais utilizados na construção civil.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os corpos de prova foram ensaiados analisando a ascensão capilar em ambiente laboratorial da instituição, com determinação da massa saturada (m_{sat}) com 12 h e 24 h e leitura da ascensão com 24h. Resultados apresentados na Figura 8.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

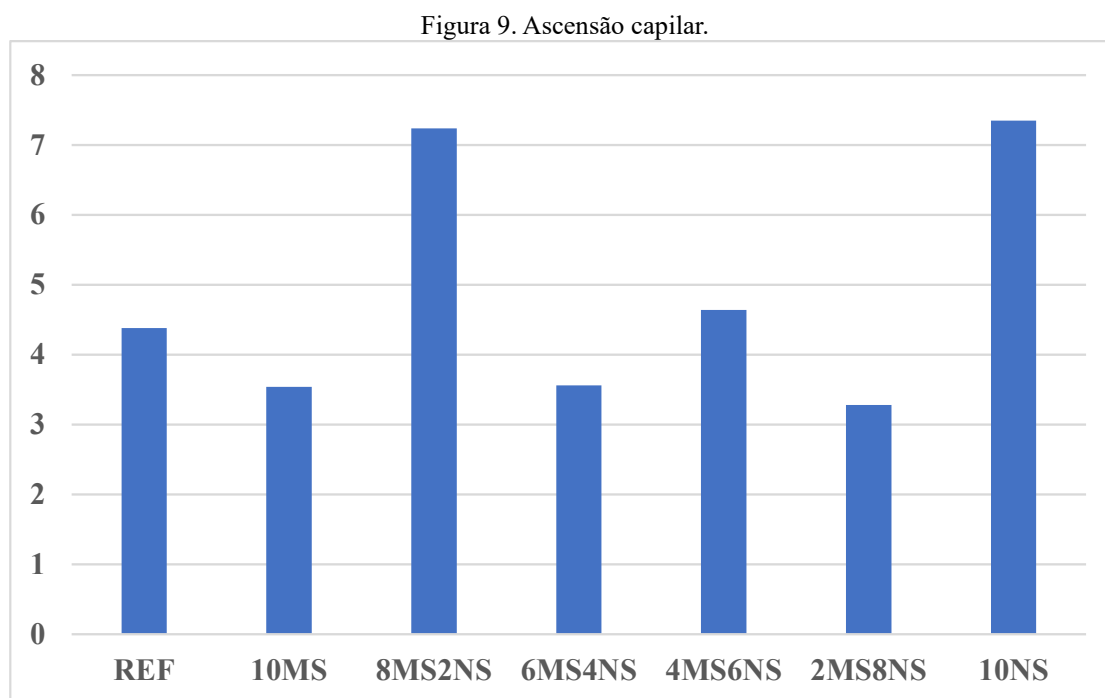
Quanto a absorção de água por capilaridade, conforme equação previamente apresentada, o traço que apresentou menor impermeabilidade foi justamente o microconcreto de referência (REF), o qual absorveu por capilaridade após permanência de 12h sobre suportes em recipiente de ensaio em contato com água, por volta de 0,297 (g/cm²) de água, para 24h houve absorção de 0,314 (g/cm²). Em contraste com o de referência o traço 2MS8NS apresentou a menor absorção, com alto índice de impermeabilidade, para 12h a absorção foi de 0,072 (g/cm²) e com 24h 0,056 (g/cm²) demonstrando que o grau de saturação foi atingido e grande evaporação por parte do mesmo após às 12h.

Os traços 6MS4NS e 10NS apresentaram resultados semelhantes, por volta de 0,155 (g/cm²) para 12h, 0,162 (g/cm²) e 0,153 (g/cm²), respectivamente para 24h. Os traços 10MS e 4MS6NS apresentaram absorção intermediária com 0,103 (g/cm²) e 0,132 (g/cm²), respectivamente para 12h, já com 24h resultados de 0,105 (g/cm²) e 0,125 (g/cm²), respectivamente.

Já o traço 8MS2NS obteve resultados abaixo dos demais, porém próximos ao REF, o mesmo com 0,262 (g/cm²) para 12h e 0,271 (g/cm²) para 24h. Sendo assim, todos os traços com a presença

de MC's, apresentaram maior impermeabilidade quando comparados com o traço de referência, fator que caracteriza a maior coesão e diminuição expressiva do índice de vazios, o que diminui a tendência de condução da água através dos poros permeáveis presente no corpo de prova.

Além disso, foi realizado a leitura da ascensão capilar, com resultados apresentados na Figura 9.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Apesar de possuir maior absorção de água, o traço REF apresentou menor ascensão capilar quando comparado aos traços 8MS2NS; 4MS6NS e 10NS, o que é justificado pela diminuição do diâmetro dos vazios capilares, que devido à presença de sílica ativa e nanossílica na maioria dos traços os tornam mais comprimidos devido a menor incidência de índice de vazios, ocasionado também pelo preenchimento por partículas menores como é o caso de tais MC's.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por diferentes teores de microsílica (MS) e nanossílica (NS), esta pesquisa permitiu analisar os efeitos dessas adições no desempenho mecânico e na durabilidade de microconcretos de alto desempenho em idades iniciais.

De modo geral, os resultados experimentais demonstraram que a utilização conjunta de microsílica e nanossílica promoveu melhorias significativas nas propriedades dos microconcretos

analisados. Em relação à resistência à compressão, observou-se que todos os traços contendo materiais cimentícios suplementares apresentaram desempenho superior ao traço de referência em idades mais avançadas. Destaca-se o traço composto por 4% de microssílica e 6% de nanossílica (4MS6NS), que apresentou os maiores valores de resistência em todas as idades analisadas, evidenciando um efeito sinérgico positivo entre esses materiais.

No que se refere ao índice de consistência, verificou-se que a incorporação de microssílica e nanossílica resultou em redução do espalhamento dos microconcretos quando comparados ao traço de referência. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada área superficial específica dessas partículas, que aumenta a demanda de água da mistura. Apesar dessa redução na fluidez, os microconcretos mantiveram adequada trabalhabilidade para moldagem e execução dos ensaios.

Quanto à durabilidade, avaliada por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade, observou-se que todos os microconcretos com adição de MS e/ou NS apresentaram menores valores de absorção quando comparados ao traço de referência, indicando uma matriz cimentícia mais densa e com menor volume de vazios capilares. O traço 2MS8NS destacou-se por apresentar os menores índices de absorção, demonstrando elevada impermeabilidade e maior resistência à penetração de água.

De maneira geral, os resultados indicam que a utilização combinada de microssílica e nanossílica contribui para o refinamento da microestrutura do material cimentício, promovendo o preenchimento de vazios, maior formação de produtos de hidratação e consequente melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade. Esses efeitos tornam tais materiais alternativas promissoras para o desenvolvimento de concretos de alto desempenho mais eficientes e duráveis.

Por fim, considerando os resultados obtidos e as limitações do presente estudo, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Investigar o comportamento de microconcretos com adições de microssílica e nanossílica em idades mais avançadas, avaliando o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo;
- Analisar o desempenho frente a elevadas temperaturas, visando compreender possíveis alterações microestruturais;
- Avaliar a influência dessas adições na corrosão de armaduras em concretos armados;
- Estudar os efeitos da retração autógena e da retração por secagem em microconcretos com diferentes proporções de microssílica e nanossílica.

Essas investigações poderão contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre o uso de materiais cimentícios suplementares em concretos de alto desempenho, ampliando suas aplicações na engenharia civil.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67: Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone — Requisitos. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11768-3: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S.; MORAIS, P. C.; LOPES, A. N. M.; ROJAS, M. F. Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 445-455. 2019.
- ARAÚJO, R. L. R.; VIANA, K. H. L. Efeito do teor de nanossílica no desempenho mecânico do microconcreto. 2020. 20 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Euro-Americano, Brasília, 2020.

ASTM, American Society for Testing and Materials. C876: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Pennsylvania, 2015.

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

CAI, Y.; HOU, P.; CHENG, X.; DU, P.; YE, Z. The effects of nanoSiO₂ on the properties of fresh and hardened cement-based materials through its dispersion with silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 770–780. 2017.

CALDEIRA, F. M. M.; FRANCO, H. S. Análise das propriedades mecânicas do concreto com adição de nanossílica e fibras de aço. 2020. 23 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Euro-Americano, Brasília, 2020.

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

DAVI, A. S.; SOUZA, M. C. Efeito da incorporação de sílica ativa nas propriedades do concreto leve com diferentes teores de argila expandida. 2020. 24 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Euro-Americano, Brasília, 2020.

DIETRICH, Y. P.; TELES, C. R.; VIEIRA, G. L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. *Revista Materia*, v. 22, n. 4, p.1-15, 2017.

FENG, L.; ZHAO, P.; WANG, Z.; GAO, J.; SU, X.; LI, H. Improvement of mechanical properties and chloride ion penetration resistance of cement pastes with the addition of pre-dispersed silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 182, p. 483-492. 2018.

FERNÁNDEZ, J. M.; DURAN, A.; NAVARRO-BLASCO, I.; LANAS, J.; SIRERA, R.; ALVAREZ, J. I. Influence of nanosilica and polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 43, p. 12-24. 2013.

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

FRAGA, Y. S. B.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S.; ANDRADE, D. S.; MORAIS, P. C. Ultrasonication and synergistic effects of silica fume and colloidal nanosilica on the C-S-H microstructure. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 1-13, 2020a.

FRAGA, Y. S. B.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S.; ANDRADE, D. S. Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. *Revista Matéria*, v. 25, n.4, p. 1-16, 2020b.

GARCIA, D. C. S.; SOARES, M. M. N. S.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; FIGUEIREDO, R. B. Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture. *Revista Matéria*, v. 22, p. 1-10. 2017.

GHAFOORI, N.; BATILOV, I.; NAJIMI, M. Influence of dispersion methods on sulfate resistance of nanosilica-contained mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, p. 1-13. 2017.

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

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

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.

HOU, P.; KAWASHIMA, S.; KONG, D.; CORR, D. J.; QIAN, J.; SHAH, S. P. Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property. *Composites: Part B*, v. 45, p. 440-448. 2013.

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

MACEDO, I. D. M.; SANTOS, J. P. F. Desempenho mecânico do concreto com misturas binárias e ternárias de cimento Portland, sílica ativa e nanossílica. 2020. 21 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Euro-Americano, Brasília, 2020.

MEDEIROS, M. H. F.; ROCHA, F. C.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; HELENE, P. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 864-885, 2017.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª Edição, São Paulo, IBRACON, 2014.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; JERÔNIMO, V. L.; CARNEIRO, A. M. P. Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 33-52, 2014.

RÊGO, J. H. S.; ROJAS, M. F.; TERRADES, A. M.; FERNANDEZ-CARRASCO, L.; MORALES, E. R.; ROJAS, M. I. S. Effect of Partial Substitution of Highly Reactive Mineral Additions by Nanosilica in Cement Pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, p. 040183601-0401836011, 2019.

RIBEIRO, D. V. Corrosão e Degradação em estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção. 2ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2020.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades da sílica ativa. *Cerâmica*, v. 54, p. 456-461. 2008.

VASKE, N. R.; CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Relationship between the compressive strength of silica fume mortar applied to the substratum and the one obtained in standardized cylindrical test specimens. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 3, n. 3, p. 322–345, 2010.