

Efeito da sílica ativa e da nanossílica em materiais cimentícios - uma revisão da literatura para futuras pesquisas

EFFECT OF SILICA FUME AND NANOSILICA ON CEMENTITIOUS MATERIALS - A LITERATURE REVIEW FOR FUTURE RESEARCH

EFFECTO DEL HUMO DE SÍLICE Y NANOSÍLICE EN MATERIALES CEMENTOSOS: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Me. Ana Paula de Oliveira

Universidade Federal de Goiás

oliveira.ape@gmail.com

Dra. Andrielli Morais de Oliveira

Universidade Federal de Goiás

andriellimorais@ufg.br

Dr. Oswaldo Cascudo

Universidade Federal de Goiás

ocascudo@ufg.br

Resumo

Pesquisas vêm sendo realizadas destacando que a sílica ativa e nanossílica contribuem com efeito positivo no desempenho e na durabilidade de estruturas de concreto, especialmente quando situadas em ambientes agressivos. Entretanto, o uso combinado dessas duas adições minerais em misturas ternárias é menos estudado. Neste sentido, o presente artigo realizou uma extensa revisão da literatura, baseada principalmente em resultados dos anos de 2015 a 2020, de pesquisas em concretos, pastas e argamassas que utilizaram simultaneamente sílica ativa e nanossílica. Para tanto, foi realizada uma revisão da literatura com *string* específica de busca nas bases de dados *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science*. O tratamento dos resultados foi efetuado pelo *software Zotero* e *Excel*. Os resultados obtidos da literatura foram sintetizados e foi possível observar o grande desempenho, resultante da combinação dessas adições minerais pozolânicas em várias propriedades e na durabilidade de pastas, argamassas e concretos. O uso combinado delas ocasiona uma ação sinérgica de micro e nano partículas que proporcionam alterações microestruturais muito relevantes nas matrizes cimentícias. Isso estabelece, em geral, um aumento considerável em termos de vida útil e de uso em longo prazo de materiais cimentícios.

Palavras-chave: Durabilidade. Microestrutura. Sílica ativa. Nanossílica. Revisão da literatura

Abstract

Research has been carried out highlighting that silica fume and nanosilica contribute with a positive effect on the performance and durability of concrete structures, especially when located in aggressive environments. However, the combined use of these two mineral additions in ternary mixtures is less studied. In this sense, the present paper carried out an extensive literature review, based mainly on results from the years 2015 to 2020, of research in concrete, pastes and mortars that simultaneously used silica fume and nanosilica. To this end, it was carried out using a specific search string in the



Scopus, Engineering Village and Web of Science databases. The processing of the results was performed using Zotero and Excel software. The results obtained from the literature were synthesized and it was possible to observe the great performance resulting from the combination of these pozzolanic mineral additions in various properties and durability of pastes, mortars and concretes. Their combined use causes a synergistic action of micro and nano particles that provide very relevant microstructural changes in cementitious matrices. This establishes, in general, a considerable increase in terms of service life and long-term use of cementitious materials.

Keywords: Durability. Microstructure. Silica fume. Nano silica. Literature review.

Resumen

Se han llevado a cabo investigaciones que destacan que el humo de sílice y la nanossílica contribuyen con un efecto positivo en el rendimiento y la durabilidad de las estructuras de hormigón, especialmente cuando se encuentran en entornos agresivos. Sin embargo, el uso combinado de estas dos adiciones minerales en mezclas ternarias está menos estudiado. En este sentido, este artículo realizó una extensa revisión bibliográfica, basada principalmente en resultados de los años 2015 a 2020, de investigaciones sobre hormigones, pastas y morteros que utilizaron microsílice y nanossílice simultáneamente. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica mediante una cadena de búsqueda específica en las bases de datos Scopus, Engineering Village y Web of Science. El procesamiento de los resultados se realizó mediante software Zotero y Excel. Se sintetizaron los resultados obtenidos de la literatura y se pudo observar el gran desempeño que resulta de la combinación de estas adiciones minerales puzolánicas en diversas propiedades y durabilidad de pastas, morteros y hormigones. Su uso combinado provoca una acción sinérgica de micro y nano partículas que aportan cambios microestructurales muy relevantes en las matrices cementosas. Esto establece, en general, un aumento considerable en términos de vida útil y uso a largo plazo de los materiales cementicios.

Palabras clave: Durabilidad. Microestructura. Sílice activa. Nano sílice. Revisión de literatura.

Introdução

A eficiência de adições minerais pozzolânicas, em misturas binárias de matrizes cimentícias, vem sendo testada e estudada pela literatura (HOR; LEWIS, 1985; ALEXANDER; MAGEE, 1999; POON; KOU; LAM, 2006; HASSAN; LACHEMI; HOSSAIN, 2012; ADIL; KEVERN, 2020; OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA, 2019; OLIVEIRA et al., 2023), tais quais: cinza volante, metacaulim, sílica ativa, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, dentre outras. Dentre elas, a sílica ativa (SA) possui composição química com partículas esféricas e micrométricas, elevada pureza e amorficidade (> 85% de SiO₂ amorfo), alta reatividade e superfície específica (entre 13.000 e 30.000 m²/kg). Ela é comumente utilizada em substituição parcial à massa de cimento Portland, em teores variáveis em geral inferiores a 12% (MEHTA; ASHISH, 2019; TRIPATHI et al., 2020). Atualmente, a SA é um subproduto industrial, mas também é produzida industrialmente (OLIVEIRA, FERREIRA, MARTINS FILHO, 2020; SANTOS; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2021). Sua utilização em materiais cimentícios é amplamente conhecida e difundida, sendo inclusive, normatizada, no Brasil pela norma ABNT NBR 13956-1 (2012).

Estudos relacionados à melhora no comportamento mecânico (CAMPOS et al., 2020) e à redução da suscetibilidade à reação álcali-agregado (HOOTON, 2020; BODDY; HOOTON, THOMAS, 2003) e aos ataques por sulfatos (SHANNAG; SHAIA, 2003), por cloretos (KAYALI; ZHU, 2005) ou por carbonatação (GHAHARI, et al., 2016) com uso de sílica ativa (SA) em misturas binárias com o cimento Portland são conhecidos na literatura. Da mesma forma, a melhoria da microestrutura, a redução de porosidade e da permeabilidade, o aumento da resistividade elétrica e a alteração da condutividade também foram observados (OLIVEIRA; CASCUDO, 2018; GARG; BANSAL; AGGARWAL, 2016; LI, et al., 2018). Vários são os tipos de sílica ativa utilizadas, tanto em pesquisas, quanto comercialmente, podendo ser mencionadas as formas: pó, lama, dispersa em água e granulada (MEHTA; ASHISH, 2019; TRIPATHI et al., 2020; BAJJAA et al., 2016; NOCHAIYA et al., 2017; KAREIN, et al., 2017).

Por outro lado, a nanossílica (NS) é um material mais recente, composto por partículas nanométricas de sílica, com altíssima pureza e amorficidade (> 95% de SiO₂ amorfo). Conceitualmente, o diâmetro das partículas pode variar entre 1 e 1000 nm (BERGNA, 1994), entretanto, em pesquisas com materiais cimentícios são utilizadas, em geral, partículas com diâmetros que variam entre 5 e 80 nm e superfície específica com variação entre 50 e 640 m²/g (PEREIRA; CASCUDO; CARASEK, 2018). A obtenção da nanossílica é resultante de um processo industrial de precipitação de soluções de silicato de sódio (KONTOLEONTOS et al., 2012), não tendo seu uso normatizado no Brasil. São três os tipos de nanossílica observados: *sol/s* ou coloidal (dispersa em solução), em pó e em gel. Em materiais cimentícios predominam o uso das formas coloidal e pó.

Além disso, quimicamente, as partículas de nanossílica são compostas por ligações intensas do tipo van der Waals de curto alcance. Essas ligações, associadas a grande superfície específica desse material, contribuem para a tendência à aglomeração (BAJJAA et al., 2016). Por isso, é necessária uma maior atenção quanto ao teor e forma de incorporação em sua utilização em materiais cimentícios. Nesse contexto, a nanossílica dispersa em uma solução coloidal, possui maior estabilidade e menor potencial de aglomeração, quando comparado ao material em pó. A Figura 1 ilustra a morfologia das partículas de nanossílica coloidal, juntamente com os seus diferentes diâmetros, verificados no ensaio de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) (OLIVEIRA et al., 2023). Nesta Figura 1 é possível verificar a tendência à aglomeração de partículas e a distribuição granulométrica variando entre 10 e 16 nm.

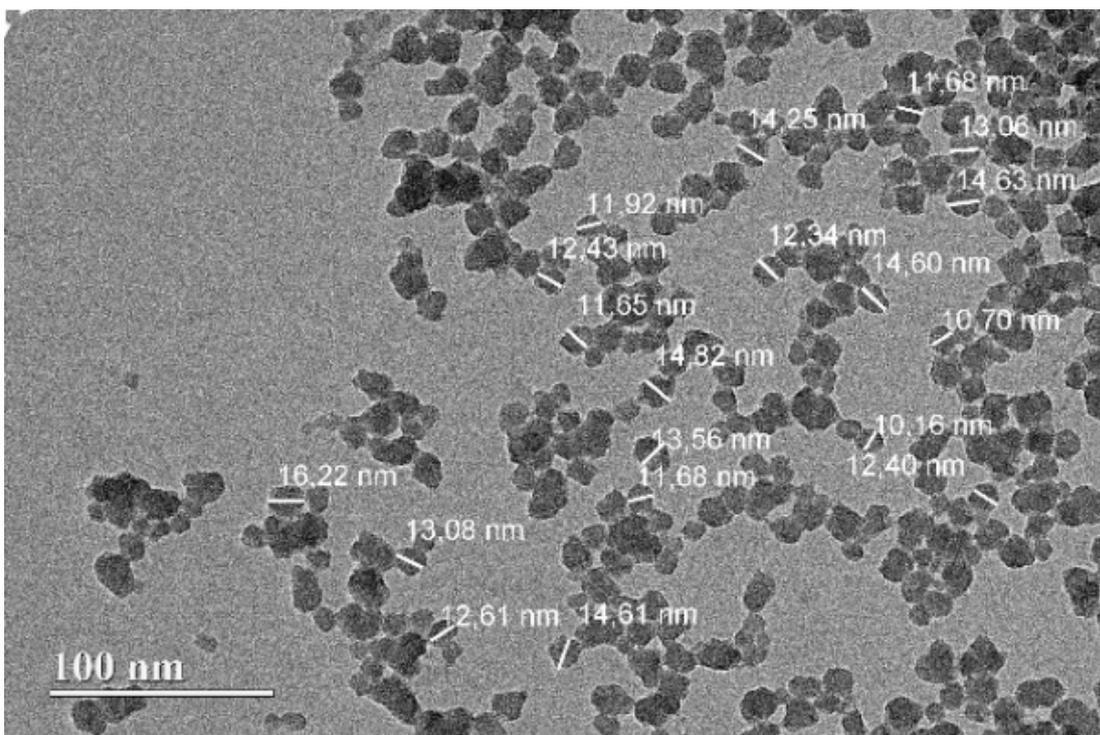


Figura 1 - Distribuição das partículas de nanossílica por MET – escala de 100 nm

Fonte: Oliveira et al., 2023

O ensaio conduzido por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresenta a morfologia da sílica ativa em escala micrométrica. Não foi possível realizar este tipo de ensaio com a nanossílica, devido a sua condição coloidal. Assim, a Figura 2 apresenta as partículas de sílica ativa em formato esférico, com diâmetros não uniformes e com grande tendência de aglomeração.

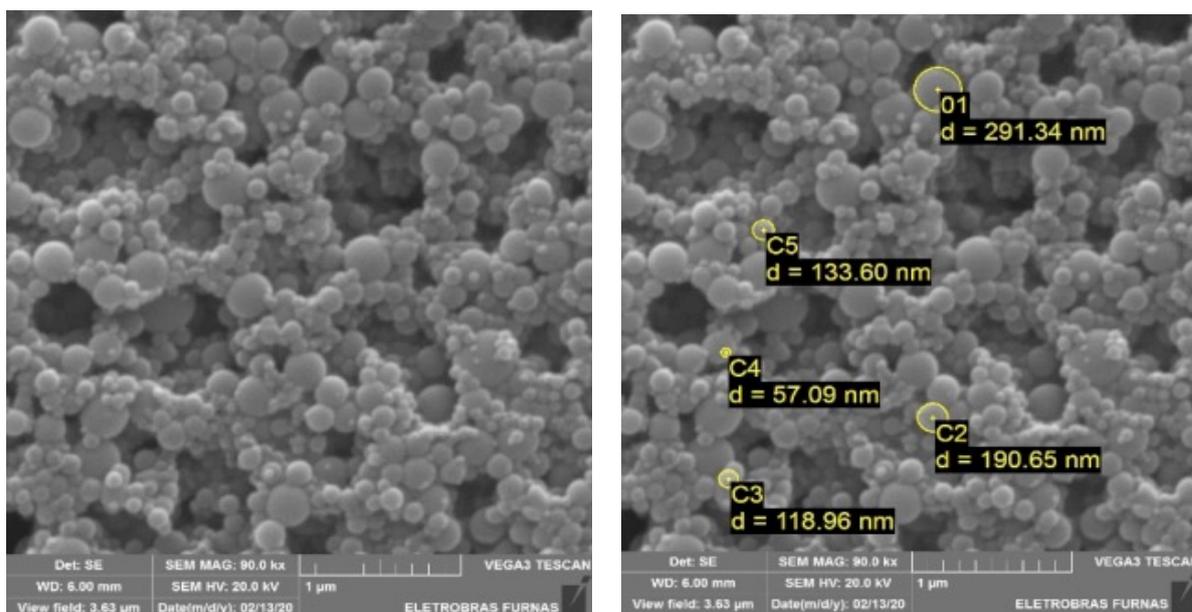


Figura 2 - Distribuição das partículas de sílica ativa em MEV com ampliação de 1 µm (esquerda e direita)
Fonte: Os autores.



Estudos vêm sendo desenvolvidos com o uso de nanossílica em misturas binárias com materiais cimentícios (SEFFF, 2009; MORAES; GEYER, 2012; DANTAS, 2013; SOARES, 2014; CAUDURO, 2015; MENDES; REPETTE; REIS, 2017; LIMA, 2017; JÚNIOR, 2017; DU, 2019; BALOCH et al., 2019; REIS; JÚNIOR; SILVA, 2019), em concretos de alto desempenho (DAHLAN, 2021), em microconcretos impressos em 3D (SIKORA et al., 2021), além de compósitos cimentícios do tipo ECC - *Engineered cementitious composites* (FU et al., 2021; RAZAVI; NAZARPOUR; BEYGI, 2021). Vários autores atestam a eficácia desse tipo de adição, no que se refere ao aumento da durabilidade de materiais cimentícios, principalmente quando submetidos ao ataque por Cl^- e especialmente em teores de utilização que variam de 1% a 5%, por exemplo (NILI; EHSANI, 2015). Nos teores mais elevados, particularmente em materiais com maior superfície específica, é necessário alto rigor e alta energia de mistura quanto à incorporação das partículas de nanossílica.

De forma geral, uma redução de desempenho de concretos, argamassas e pastas que utilizaram nanossílica, em substituição parcial da massa de cimento Portland, pode acontecer quando há a aglomeração de partículas, por meio de procedimento de mistura ineficiente dos materiais ou de um teor elevado de utilização (RAZAVI; NAZARPOUR; BEYGI, 2021; GHAFARI et al., 2014). Por isso, é aconselhável que, em partículas mais finas, se utilizem teores mais baixos, como forma de evitar esse fenômeno (QUERCIA et al., 2014; MADANI et al., 2014; BAGHERI et al., 2014).

Neste contexto, o uso combinado de sílica ativa e nanossílica em concretos, argamassas e pastas ainda é mais discreto no meio científico, principalmente no que tange às alterações microestruturais neles ocorridas pelo uso combinado dessas adições e a durabilidade desses materiais frente ao ataque por Cl^- e CO_2 , por exemplo. São mais recorrentes as pesquisas que comparam o desempenho entre a sílica ativa e nanossílica, quando utilizadas, em misturas binárias, nos materiais cimentícios (REGO, et al., 2018; SEFFF, et al., 2010; PINHEIRO, 2015).

Um artigo de revisão sistemática tem o objetivo de verificar o *status* atual, nacional e/ou internacional das pesquisas relacionadas a uma determinada temática. Com ele é possível conhecer os autores relevantes, os materiais e métodos utilizados, bem como os principais resultados obtidos. Dessa forma, a revisão sistemática é fundamental para composição da metodologia de pesquisa de um determinado estudo. Uma vez que a partir dela há um direcionamento quanto as práticas mais e menos assertivas relacionadas ao tema em questão. Neste sentido, este trabalho de revisão da literatura tem como objetivo sintetizar resultados de pesquisas experimentais que contemplaram o uso ternário de sílica ativa e nanossílica em materiais cimentícios (concretos, argamassas e pastas), com ênfase em alterações de propriedades físicas e de durabilidade em decorrência de alterações microestruturais. Esses resultados pontarão diretrizes para futuras pesquisas no tema.



Relevância e contribuição do artigo

Este artigo apresenta o *status* nacional e internacional, referente às pesquisas cujos focos foram o uso combinado de sílica ativa e nanossílica em materiais cimentícios, com ênfase nas alterações mecânicas, microestruturais e de durabilidade. A partir desse *status*, foi possível identificar os principais autores, ensaios e resultados obtidos relacionados ao tema. Como trata-se de uma temática mais recente, este artigo avança no conhecimento ao agrupar, sintetizar e processar informações, pesquisas e resultados experimentais relevantes. Esse conjunto de informações viabilizam e otimizam planejamentos experimentais atuais e futuros mais adequados, possibilitando, assim, que o limite de conhecimento, até então verificado, seja ultrapassado e isso aumenta a assertividade metodológica.

Destaca-se que a revisão sistemática da literatura – RSL é uma ferramenta útil, uma vez que proporciona a reunião, a organização e a posterior avaliação das informações disponíveis, a partir de pesquisas anteriores e, em sequência, a consolidação dessas informações. A categorização de informações por meio de RSL tem sido utilizada em vários trabalhos científicos e em várias áreas do conhecimento (KHAN et al., 2001; PETERSEN et al., 2008; ASHMED et al., 2021; OLENA, et al., 2021; LI et al., 2022)

1 Metodologia

Baseando-se na metodologia proposta por Tranfield, Denyer e Smart (2003) e Kitchenham e Charters (2007), neste artigo, a RSL foi empregada em três etapas: planejamento, condução e análise.

Primeiramente foi realizada uma busca exploratória no *Google Scholar* objetivando-se encontrar, em âmbito nacional, as pesquisas afins à temática proposta: o uso combinado de sílica ativa e nanossílica em concretos, argamassas e pastas, com ênfase à durabilidade, propriedades e possíveis alterações na microestrutura deles. Para isso, foram pesquisados artigos, teses e dissertações com os termos em conjunto “concreto”, “argamassa”, “pasta”, “microestrutura”, “durabilidade”, “caracterização mecânica”, “nano sílica” e “sílica ativa”.

Os trabalhos elencados e que apresentaram a temática proposta, foram considerados. Sete foi o total de páginas apresentado pelo *Google Scholar* para essa busca. As palavras-chave contidas em cada *abstract* das pesquisas selecionadas foram listadas e os termos mais assertivos foram utilizados para composição de uma nova *string* de busca. Essa nova *string*, foi composta com termos técnicos para procura de artigos em inglês em bases internacionais para conhecimento do *status* do tema em questão, no cenário internacional.

Para a revisão sistemática foi formada a seguinte *string* conjunta: (*microstructure AND durability*) AND (*silica fume AND nanosilica*) AND (*concrete OR*

paste OR mortar). Ela foi utilizada nas bases de dados *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science*. Nesse processo, foram procurados apenas artigos no idioma inglês e selecionados aqueles vinculados a revistas que possuíam *Journal Citation Reports -JCR*, publicados entre os anos de 2015 e 2020. Sendo este último o ano em que a revisão foi realizada. Buscou-se com isso encontrar os artigos mais recentes até o momento em questão, ano de delimitação metodológica de outras pesquisas relacionadas ao uso de sílica e nanossílica em materiais cimentícios que estavam em andamento.

A análise inicial de todos os artigos buscados por meio da *string*, nas três bases de dados, foi realizada no programa Zotero. Nele foram excluídos os materiais que apareceram simultaneamente em duas ou mais bases de busca, portanto *duplicados*. Depois foi realizada a análise por título e por resumo de cada um dos demais artigos.

Na análise por título foram considerados todos os materiais que, de forma direta ou indireta, se relacionavam ao tema de busca proposto. Depois, foi realizada a análise por resumo, no qual foram lidos os resumos de todos de todos os artigos remanescentes, sendo selecionados aqueles artigos que faziam referência ao tema de interesse. Ao final, permaneceram para leitura e coleta de dados, os artigos selecionados por título e por resumo.

Além disso, o critério de *snowball* para buscas mais amplas em termos de microestrutura e durabilidade foram considerados no presente trabalho, ou seja, as referências de estudos importantes, citados nos artigos lidos e que se relacionaram à temática proposta também foram consideradas, lidos e avaliados, mesmo se tratando de publicações anteriores ao ano de 2015. Todo material selecionado, tanto por meio da busca exploratória, quanto por meio da revisão sistemática, foi lido integralmente.

De todas as pesquisas selecionadas, por todos os critérios de busca, foram extraídas informações relevantes à composição das misturas dos materiais cimentícios que podem afetar diretamente sua durabilidade e microestrutura, a saber: tipo e teor das adições utilizadas e relação água/ligante (*a/lig*). Além disso, todos os resultados obtidos nas pesquisas dos diferentes autores foram catalogados e comparados com materiais com sem adições. Ao final, esses resultados foram associados aos diferentes teores de adições, relação água/ligante verificados e propriedades/interveniências observadas.

2 Apresentação e discussão dos resultados

2.1 Dados bibliométricos

Pela quantidade de artigos, teses e dissertações obtidos, foi possível perceber que essa temática ainda é mais recente no meio científico. Várias exclusões ocorreram, em sua maioria, pela grande presença de estudos que não atendiam

satisfatoriamente à *string* de busca proposta. Por exemplo, foi percebido que vários autores fizeram uso da sílica ativa e nanossílica em composições binárias (FLORES et al., 2017; SINGH et al., 2015; CARNEIRO et al. 2017; HOU et al., 2015; XU et al., 2016; HARUEHANSAPONG; PULNGERN; CHUCHEEPSAKUL, 2017). Alguns desses, no entanto, analisaram apenas o comportamento mecânico e reológico dos materiais cimentícios compostos com essas adições (BOLHASSANI; SAYYAHMANESH, 2015; JAISHANKAR; MOHAN, 2017; LI et al., 2018), não atendendo à *string* de busca.

Houve também artigos que estudaram apenas a durabilidade de concretos argamassas e pastas em exposição a outros agentes agressivos, que não o íon cloro ou, até mesmo, combinadas a outros tipos de adições pozolânicas, como metacaulim e cinzas volantes, por exemplo (GAO; YU; BROUWERS, 2015; SHAIKH; SUPIT, 2015; ANDRADE et al., 2018; BEHFARNIA; ROSTAMI, 2017; WANG et al., 2016).

Ao final das buscas foram analisadas e estudadas 13 pesquisas relacionadas à temática proposta, entre artigos, teses e dissertações, sendo a maioria composta por artigos internacionais (Figura 3). É possível perceber pela Figura 3 que se trata de uma temática mais recente, como mencionado antes. A primeira pesquisa data do ano de 2012, tendo ocorrido acréscimos dos estudos acerca do assunto com o passar dos anos.

A Tabela 1 explicita os resultados referentes a buscas nas bases internacionais. Ressalta-se que nacionalmente foram encontrados três estudos. Todo o material encontrado fez uso de procedimentos experimentais.

A Tabela 2 mostra os autores, tipo de pesquisa e materiais estudados. É possível notar que a maioria dos estudos foram conduzidos em concreto

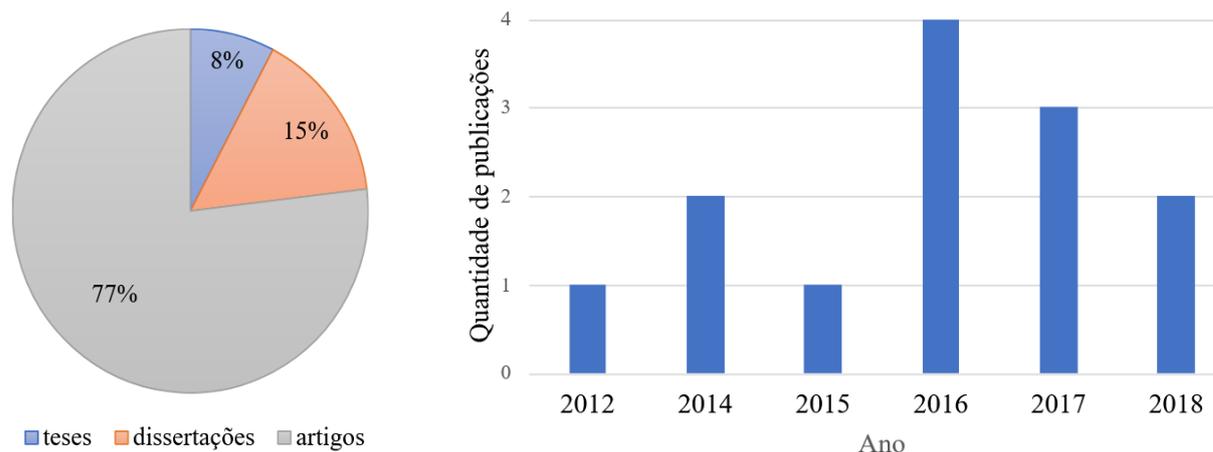


Figura 3 - Estudos encontrados relacionados ao tema: (a) tipos (esquerda) e (b) publicações por ano (direita).

Fonte: Os autores.



Etapa	Número de artigos
Busca por <i>string</i> na Scopus	+ 129
Busca por <i>string</i> na Engineering Village	+ 37
Busca por <i>string</i> na Web of Science	+ 69
Total de artigos encontrados nas bases de dados por <i>strings</i>	235
Verificação dos artigos duplicados	- 7
Excluídos por título	- 163
Excluídos por resumo	- 46
Sem fator JCR	-1
Lidos integralmente	18
Excluídos após leitura por incompatibilidade de temática <i>da string</i>	- 10
Artigo Finais	8
<i>Snowball</i>	+5
Artigos finais estudados e analisados	13

Tabela 1 – Etapas de seleção de artigos pela busca por *string*.

Base de busca	Autor	Tipo de material	Material estudado
Google Scholar	(ANDRADE, 2017)	Tese	Argamassa e pasta
Web of Science	(GARG; BANSAL, 2016)	Artigo	Argamassa
Scopus/ Engineering Village/Web of Science	(GESOGLU et al., 2016)	Artigo	Concreto
Scopus/Engineering Village	(GHAFARI et al, 2014)	Artigo	Concreto e pasta
Snowball	(JALALL et al., 2012)	Artigo	Concreto
Scopus/Web of Science	(LI et al, 2017)	Artigo	Argamassa
Scopus	(LI et al, 2017)	Artigo	Argamassa
Scopus	(Li et al., 2018)	Artigo	Concreto
Google Scholar	(MALAGONI, 2016)	Dissertação	Concreto
Google Scholar	(MARTINS, 2018)	Dissertação	Concreto
Scopus	(MASSANA et al, 2018)	Artigo	Concreto
Scopus/Engineering Village/Web of Science	(NILI; EHSANI, 2015)	Artigo	Concreto e pasta
Snowball	(OLTULU; ŞAHIN, 2014)	Artigo	Argamassa

Tabela 2 – Pesquisas encontradas em todas as buscas realizadas.

A Tabela 3 sintetiza as principais informações coletadas dos estudos selecionados, relacionadas à composição e ao proporcionamento dos materiais estudados.



Autor	Mistura	Relação água/ligante	Teor de adições em misturas ternárias (%)		Natureza da adição	Utilização em relação a massa de cimento Portland
			SA	NS		
(ANDRADE, 2017)	SA10NS3	0,35	10	3	SA Pó NS Coloidal	Substituição
(GARG; BANSAL; AGGARWAL, 2016)	SA5NS1	0,45	5	1	SA Pó NS Coloidal	Substituição
	SA10NS1		10	1		
	SA15NS1		15	1		
	SA20NS1		20	1		
(GESOGLU et al., 2016)	SA10NS0,5	0,20	10	0,5	SA Pó NS Pó	Substituição
	SA10NS1		10	1		
	SA10NS2		10	2		
	SA10NS3		10	3		
(GHAFARI et al. 2014)	SA27NS1	0,20	27	1	SA Pó NS Pó	Substituição
	SA27NS2		27	2		
	SA27NS3		27	3		
	SA27NS4		27	4		
(LI et al, 2017a)	SA10NS2	0,38	10	2	SA Pó N Pó	Substituição
(LI et al., 2017b)	SA10NS1	0,25; 0,30;	10	1	SA Condensada NS Pó	Substituição
	SA10NS2	0,35 e 0,40	10	2		
(LI et al., 2022)	SA10NS1	0,25, 0,30,	10	1	SA Condensada NS Pó	Substituição
	SA10NS2	0,35 e 0,40.	10	2		
(LI et al., 2018)	SA5NS0,5	0,30, 0,35,	5	0,5	SA Pó NS Pó	Substituição
	SA5NS1	0,40 e 0,45	5	1		
(MALAGONI, 2016)	SA9NS1	0,40 e 0,60	9	1	SA Pó NS Dispersa em aditivo	Substituição
(MARTINS, 2018)	SA9NS1	0,40 e 0,60	9	1	Pó NS Dispersa em aditivo	Substituição
(MASSANA et al., 2018)	SA2,5NS2,5	0,35	2,5	2,5	SA Pó NS Hydrosol	Adição
	SA2,5NS5		2,5	5		
	SA5NS2,5		5	2,5		
(NILI; EHSANI, 2015)	SA5NS1,5	0,45	5	1,5	SA Pó NS Pó	Substituição
	SA7,5NS1,5		7,5	1,5		
	SA5NS3		5	3		
	SA7,5NS3		7,5	3		
	SA5NS5		5	5		
	SA7,5NS5		7,5	5		
	SA5NS7,5		5	7,5		
(OLTULU; ŞAHIN, 2014)	SA5NS0,5	0,40	5	0,5	SA Pó NS Pó	Substituição
	SA5NS1,25		5	1,25		
	SA5NS2,5		5	2,5		

Tabela 3 – Caracterização das pesquisas.



2.2 Resultados relacionados aos materiais cimentícios

2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os autores (GAO; YU; BROUWERS, 2015) observaram um comportamento de acréscimo de resistência à compressão de concretos com a adição de nanossílica, obtendo-se o melhor resultado para concreto com 5% de sílica ativa e 1% de nanossílica (SA5NS1). Isso expressou um incremento de 63% e de 17% para as relações água/ligante (a/lig) 0,45 e 0,30, respectivamente. O estudo contemplou teores de 1 a 3% de nanossílica.

Segundo os autores (LI et al., 2017; GAO; YU; BROUWERS, 2015) há um efeito sinérgico entre as adições sílica ativa e nanossílica, que promovem um forte efeito químico responsável por promover reações pozolânicas mais efetivas, provocando o maior ganho de resistência em misturas ternárias (LI et al., 2017). Esse efeito torna-se mais perceptível à medida que se aumenta a relação a/lig (GAO; YU; BROUWERS, 2015).

Estudos revelaram que a resistência à compressão de concretos em composição ternária apresentaram melhor desempenho com 2,5% de sílica ativa e 2,5% de nanossílica, com 31% de aumento da resistência à compressão. Os autores atribuíram os bons resultados ao melhor empacotamento do sistema, ou efeito fíler, promovido pelo aumento do número de finos, que densificaram a matriz cimentícia. Entretanto, os autores afirmaram que a alta quantidade de aditivo policarboxilato (utilizado acima de 3,6%) pode ter gerado bolhas internas no concreto, prejudicando, assim, a resistência a compressão das misturas com teores mais elevado. Isso resultou em um valor de resistência mais baixo (MASSANA et al., 2018).

Em pastas de cimento e em concretos (NILI; EHSANI, 2015) foi percebido que o aumento do teor de 0% a 5% de nanossílica culminou em um significativo ganho de resistência em composições ternárias. Nos concretos, o melhor teor observado foi para pastas de cimento com 5% de sílica ativa e de 3% para nanossílica com incremento de 39%, 83% e 102%, aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Entretanto, a utilização de 7,5% de nanossílica resultou em redução de 20% da resistência à compressão para pastas e concretos, independentemente da quantidade de sílica ativa utilizada. Os autores justificaram este comportamento pela dificuldade de dispersão da nanossílica na mistura.

Os autores (NILI; EHSANI, 2015) concluíram que até o teor de 5%, a adição de nanopartículas de sílica ativa em pastas e concretos promoveu efeitos físico e químico mais benéficos para a matriz cimentícia. Além de acelerar o processo de hidratação pela geração de pontos de nucleação, melhorando as características microestruturais de interface cimento – agregado, densificando a zona de transição. O efeito contrário foi percebido ao se utilizar maiores teores, devido a aglomeração das nanopartículas, pela alta superfície específica e forças de van der Waals atuantes sobre elas.

Outros estudos mostraram um aumento da resistência à compressão à medida que se aumentou o teor de nanossílica até a quantidade de 2% (GESOGLU et al., 2016). A partir desse valor, esses autores apresentaram resultados com tendência de redução da resistência à compressão. Assim como em (NILI; EHSANI, 2015), os autores atribuíram essa redução a facilidade que a nanossílica tem em se aglomerar, devido presença de intensas forças intermoleculares, do tipo van der Waals, entre as suas partículas. Segundo eles, as partículas só se aglomeram quando o teor da adição ultrapassa a quantidade de CH excedente na hidratação do cimento para formação do C-S-H gel.

Em outra pesquisa, cientistas observaram um aumento da resistência à compressão nas argamassas estudadas à medida que houve um aumento do teor de utilização de nanossílica (LI et al., 2017). Na relação a/lig 0,25, esse incremento foi de 18% e 24% e de 31,1% e 49,3%, na relação a/lig 0,40, para SA10NS1 e SA10NS2 respectivamente, em comparação às respectivas referências.

Da mesma forma, Garg, Bansal e Aggarwa (2016) com seu estudo de argamassa com sílica ativa e nano sílica mostraram que os resultados de resistência à compressão cresceram com a mistura com 15% de sílica ativa e 1% de nanossílica. Os autores creditam os bons resultados ao fato da atividade pozolânica da sílica ativa se tornar mais efetiva em presença da nano sílica, pela melhor distribuição das partículas. Isso leva a um melhor empacotamento, preenchendo vazios, resultando em uma matriz cimentícia mais homogênea e densa.

Na pesquisa conduzida em argamassas, foram percebidos os melhores valores de resistência para misturas ternárias (LI et al., 2017) de 12% de sílica ativa e 2% de nanossílica. Como resultado, os incrementos foram de 19%, 19% e 20% para a relação a/lig 0,25 e de 61%, 48% e 37% para a relação a/lig 0,40 aos 7, 28 e 90 dias, em comparação as suas respectivas referências.

Outros autores (GESOGLU et al. 2017) sugerem a existência de um efeito sinérgico entre as adições, atribuindo a melhor performance ao uso combinados desses materiais. Eles conferem essa sinergia à alta área de superfície da nanossílica que promove uma maior atividade pozolânica nas primeiras idades. No que se aplica a sílica ativa, por ter uma menor área de superfície, seria responsável pela atividade pozolânica em idades após 28 dias e após a hidratação dos produtos de hidratação em especial Ca(OH)_2 com o SiO_2 da sílica ativa. Da mesma forma, Li et al. (2018) também citaram que o efeito sinérgico começa a diminuir à medida que a idade avança pela diminuição gradual da atividade pozolânica. Os autores atribuem os resultados ao perfeito empacotamento das misturas promovido pela utilização de adições com granulometria contínua que preenche os espaços vazios remanescentes existentes entre os materiais que compõem o sistema, densificando e compactando a microestrutura. Também em argamassas, Andrade (2017) obteve um incremento de resistência de 1%, 45% e 57%, aos 1, 7 e 28 dias, respectivamente para a mistura com 10% de sílica ativa e 3% de nanossílica.



Na pesquisa conduzida pela literatura em concretos de alta performance, foi notado que a nanossílica cresceu de forma considerável a resistência à compressão desse material em idades mais precoces. O teor ótimo de adições para os autores (GHAFARI et al., 2014) foi de 27% de sílica ativa e 3% de nanossílica. Este teor aumentou a resistência à compressão de 40% aos 7 dias, 8% as 28 dias e de 6% aos 90 dias. Os autores atribuíram os bons resultados obtidos à alta atividade pozolânica das adições que geraram uma matriz cimentícia mais densa. Além disso, eles citam que a nanossílica acelera a hidratação do cimento, devido à sua alta superfície específica, assim como verificado em Garg, Bansal e Aggarwal (2016) e Gesoglu et al. (2017). Neste último estudo também foi observado um aumento da resistência até o teor de 3%. Os autores explicaram que o teor de 4% pode ter sido demasiado elevado para a quantidade de CH disponível para reação pozolânica (GESOGLU et al., 2017). Além disso, o excesso de partículas muito finas pode ter promovido uma dispersão menos efetiva da adição, culminando na aglomeração de partículas e piores resultados.

No estudo do concreto autoadensável, conduzido por Li et al. (2017), foram obtidos incrementos de resistência de 28%, 38%, 61% e 70% para um consumo de cimento de 450 kg/m³, aos 3, 7, 28 e 90 dias, respectivamente. Para 400 kg/m³, esse incremento foi de 45%, 62%, 52% e 55% e de 26%, 30%, 67% e 73% para 500 kg/m³, obtidos nas mesmas idades. Os resultados foram atribuídos à mistura com 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica, que obteve o melhor desempenho, independentemente do consumo de cimento utilizado. Os autores Jalal et al. (2012) atribuíram esse ganho ao efeito fíler e ao efeito químico, que é acelerado pela presença dessas adições, em especial à nanossílica com sua alta pureza, amorficidade e área específica. Essas adições promoveram um rápido consumo de Ca(OH)₂ dentro da matriz cimentícia.

Em outra pesquisa, os autores (MALAGONI, 2016; MARTINS, 2018) obtiveram um incremento de 24% na resistência para 9% de sílica ativa e 1% de sílica ativa na relação a/lig 0,40 e de 15% na relação a/lig 0,60, ambos aos 28 dias. Os resultados foram atribuídos ao efeito físico provocado pelo uso das adições e relacionados aos ganhos de densidade e de compactidade, refinando poros e melhorando a zona de transição, elevando a rigidez do material.

Assim, de acordo com as pesquisas realizadas, é possível concluir que a resistência à compressão tende a aumentar, até certo ponto, à medida que se aumenta o teor de nanossílica. Este teor foi consenso de 1 a 3% de nanossílica para misturas ternárias de materiais cimentícios com sílica ativa e nanossílica. Posteriormente ao que pode ser chamado de teor ótimo, as partículas de nanossílica tendem a se aglomerar.

Assim, foi possível inferir que a quantidade de Ca(OH)₂ produzida durante a reação de hidratação do cimento pode ser fator limitante da reação química pozolânica, uma vez que o teor de adições utilizadas irá reagir somente até quando



houver Ca(OH)_2 disponível. Após todo o Ca(OH)_2 ser consumido, a quantidade excedente de nano partículas tendem a se aglomerar (GESOGLU et al., 2016), devido à sua elevada finura e intensas ligações do tipo van der Waals de curto alcance (BERGNA, 1989).

Também é possível perceber que a melhora da resistência à compressão ocorre devido à alta pozolanicidade dos materiais, que provêm efeitos físico e químico mais efetivos, densificando a matriz cimentícia e melhorando a zona de transição. Esses incrementos foram, em geral, notados até o teor de 5% de nanossílica, independentemente do teor de sílica ativa utilizada, mas que, em geral, se manteve inferior a 10%. Além disso, ele foi verificado, em geral, até os 28 dias, uma vez que a nano sílica é responsável por acelerar a reação de hidratação do cimento promovendo o ganho de resistência em primeiras idades.

2.2.2 EXPOSIÇÃO A CLORETOS

Em Li et al. 2018 foi executado o teste rápido de permeabilidade a cloretos em argamassas. Os autores relataram que nas misturas com 10% de sílica ativa e 1% e 2% de nanossílica ocorreram uma pequena redução da carga passante, não sendo possível verificar o efeito sinérgico existente entre as duas adições. Eles sugeriram que a quantidade de nano sílica utilizada foi pequena e que, por isso, não promoveu o efeito físico assertivo de forma a interferir na propriedade analisada.

Durante o ensaio de permeabilidade rápida de cloretos conduzido por Malagoni (2016) foi percebido que à medida que o teor de adições aumentou nas misturas, houve um decréscimo da carga passante. A mistura com 10% de sílica ativa e 1% de nanossílica obteve os melhores resultados que culminaram em uma redução da carga em 28%, 28%, 40% e 32% aos 28, 56, 90 e 180 dias. Aumentando-se o teor de nanossílica um aumento da carga passante foi registrado. Os autores atribuíram os resultados ao efeito químico e físico, promovidos pelo uso das pozolanas que densificaram a estrutura, reduziram os poros da matriz cimentícia e levaram a uma menor permeabilidade a agentes agressivos.

Em Jalal et al., 2017 foi verificada uma grande redução na resistividade e na carga passante de íons cloro, em concretos com a mistura de 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica. A porcentagem de íons cloretos reduziu 62%, 60% e 65% para os consumos de cimento de 400, 450 e 500 kg/m^3 , respectivamente. Quanto à resistividade, para o consumo de 500 kg/m^3 , os autores encontraram os valores de 125, 320 e 589 ($\Omega \cdot \text{m}$) aos 7, 28 e 90 dias. Após a análise, eles consideraram as pozolanas como agentes inibidores de corrosão, que contribuíram significativamente para a durabilidade do concreto frente a ambientes com exposição ao íon cloro.

Em seu estudo, Martins (2016) também obteve baixos valores de permeabilidade a Cl^- . Para as misturas com 9% de sílica ativa e 1% de nanossílica foram verificadas reduções de 91% e 82% para as relações a/lig, 0,40 e 0,60, respectivamente da carga passante. No ensaio de difusão de cloretos, foram

verificadas em Martins (2016) reduções de 82% e de 57% da difusão aos 91 dias, para as relações a/lig 0,40 e 0,60, respectivamente. No ensaio de resistividade foi relatado um aumento de 238% em relação ao mesmo teor de adições com a relação a/lig 0,40. Os resultados obtidos por Martins (2016) indicaram efeito físico efetivo de preenchimento de poros, promovido pelo uso das adições com diferentes granulometrias, além do efeito químico mais assertivo de formação de C-S-H, a partir de Ca(OH)_2 . Estes autores explicaram que a combinação desses efeitos promoveu uma matriz cimentícia mais densa e menos interconectada, dificultando a entrada de agentes agressivos, como é o caso do íon cloro.

As pesquisas avaliadas mostram que a associação das micro e nano adições foi responsável por expressivo ganho de desempenho dos materiais cimentícios frente à exposição ao íon cloro, o que aumenta consideravelmente a durabilidade desses materiais nesse ambiente agressivo.

Os autores, em sua maioria, atribuíram esse aumento do desempenho as reações pozolânicas mais efetivas (efeito químico) e ao efeito fíler (preenchimento) com maior capacidade de empacotamento. Essa combinação densifica a matriz cimentícia, reduzindo os poros interconectados, diminuindo a entrada de agentes agressivos e aumentando a resistência ao ataque por cloretos.

2.2.3 EXPOSIÇÃO AO GÁS DIÓXIDO DE CARBONO

A pesquisa de Li et al., (2017) cita que 10% de sílica ativa e 1 ou 2% de nanossílica foram capazes de reduzir a profundidade de carbonatação em argamassas, independentemente da relação a/lig utilizada. Para o valor a/lig 0,25, a redução foi entre 33% e 46%. Na relação a/lig 0,40, a redução foi de 53% e 61%. Assim, foi mostrado que o aumento da relação a/lig não prejudicou o efeito sinérgico existente entre as adições. Além disso, a profundidade de carbonatação diminuiu à medida que se aumentou o teor de nanossílica.

Pesquisas de Massana et al., (2018) não indicaram carbonatação após 60 dias de exposição a CO_2 nas misturas ternárias. Estes autores observaram os menores valores de frente de carbonatação para a mistura com 10% de sílica ativa e 1% de nanossílica aos 90 e 180 dias. A pesquisa associou os resultados ao efeito fíler e químico e a melhora da dispersão das nano partículas pela presença da sílica ativa.

2.2.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O estudo conduzido por Li et al. (2017) apresentaram uma menor absorção de água em misturas ternárias compostas por sílica ativa e nanossílica, independentemente da relação a/lig utilizada. O teor ótimo foi atribuído à mistura com 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica com redução da absorção de 85% e 74% para as relações a/lig 0,25 e 0,40, respectivamente.

Da mesma forma, Massana et al. (2018) também encontraram menores valores de absorção de água para as misturas ternárias. Entretanto, não houve grande



variação da absorção entre os diferentes teores de sílica ativa e nanossílica utilizados. Assim como Li et al. (2017), os autores concluíram que distribuição granulométrica continua, obtida por meio do uso das partículas com diferentes granulometrias, aumentou o empacotamento do sistema, reduzindo a porosidade, contribuindo com a durabilidade do material estudado.

O estudo conduzido por Ghafari et al. (2014) verificaram uma redução da absorção de água de 9%, 21%, 33% e 29% para os teores fixos de 27% de sílica ativa e os respectivos valores de 1%, 2%, 3% e 4% de nanossílica. No ensaio de absorção de água, a mistura com 27% de sílica ativa e 3% de nanossílica apresentou o melhor desempenho com redução de 15% dessa propriedade e 35% de redução dos poros capilares, medidos por porosimetria por intrusão de mercúrio. Na pesquisa de Jalal et al., (2012), os menores valores de absorção de água foram encontrados para a mistura com 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica. Esta dosagem promoveu uma redução de 66%, 65% e 66% para os consumos de cimento de 400 kg/m³, 450 kg/m³ e 500 kg/m³, respectivamente. Assim, como todos os outros autores, Jalal et al., (2012) explicaram que os resultados obtidos são resultados da melhora do empacotamento do sistema, devido a distribuição granulométrica gradual das partículas e refinamento dos poros.

Por fim, destaca-se que os diferentes estudos avaliados sugeriram que houve um refinamento dos poros, gerado pela densificação da matriz cimentícia, por meio das reações pozolânicas efetivas e melhor empacotamento do sistema. Esse refinamento dificulta a entrada de agentes agressivos como a água, CO₂, cloretos e demais agentes. Essa densificação da estrutura também é responsável pelo aumento da resistência à compressão anteriormente verificado.

2.2.5 ANÁLISE TÉRMICA, CALORIMETRIA E POROSIDADE

No estudo de análise termogravimétrica (TG/DTG) com pastas em misturas ternárias de nanossílica com o teor de 3%, Ghafari et al. (2014) observou aos 7 dias uma redução de 73% da quantidade de Ca(OH)₂ para a mistura binária com 3% de nanossílica. Aos 28 e 90 dias, esse valor foi de 85% e 90% para a mistura com nanossílica, respectivamente. Isso mostra uma pequena diferença entre os 7 e 28 dias, o que explica os grandes incrementos de resistência em idades precoces, relatados nesse mesmo estudo e nos estudos de Jalal et al. (2012) e Li et al. (2017).

Andrade (2017) também verificou a aceleração da reação de hidratação do cimento em misturas binárias de argamassas com um teor de 3% de nanossílica. Nesses materiais foi verificado um grande consumo de Ca(OH)₂, principalmente nas primeiras idades. O autor explicou os resultados por meio do efeito de nucleação promovido pela alta superfície das adições, juntamente com a elevada pozolanidade. Essa combinação além de acelerar, tornou a reação de hidratação mais efetiva.

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, Massana et al. (2018) verificaram que a mistura com 2,5% de sílica ativa e 2,5% de nanossílica reduziu a quantidade de poros totais e críticos dos concretos analisados, refinando a microestrutura. Assim, os autores citaram que a nanossílica foi responsável por refinar a microestrutura desses materiais, enquanto a sílica ativa reduziu a quantidade de poros totais.

Ghafari et al., (2014) também, por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, notaram que os concretos fabricados com nanossílica apresentaram um refinamento dos poros. Além disso, quanto maior foi a quantidade de nanossílica, menor foi a quantidade de poros capilares encontrada. Houve um decréscimo da porosidade de 25,3%, 26,7%, 32,2% e 24,5% para os teores fixos de 27% de sílica ativa e 1%, 2%, 3% e 4% de nanossílica, respectivamente. O teor de 3% de nanossílica com 27% de sílica ativa foi considerado o teor ótimo de adição com 35% de redução dos poros capilares. Os autores citam que houve desconexão dos poros, devido a maior quantidade de C-S-H, com menor relação Ca/Si, formada pelo efeito químico e densificação da matriz cimentícia, observada em análise de MEV, foram responsáveis pelos resultados.

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio conduzido, Oltulu e Şahin (2014) avaliaram argamassas com 5% de sílica ativa e 0,5% e 1,5% de nanossílica. Eles apresentaram uma redução total de mercúrio intrudido de 45% e 48%, respectivamente. A mistura com 1,5% de nanossílica apresentou o melhor resultado, com aumento considerável dos poros na faixa de 4 a 10 nm e redução dos poros entre 10 – 100 nm, comprovando o refinamento e densificação da microestrutura. Segundo os autores, isso foi possível pelo efeito químico e de nucleação promovido pelo uso das adições de altíssima reatividade que aumentaram a quantidade de C-S-H produzida, diminuindo a quantidade de cristais de CH disponíveis. Contudo, o traço SA5NS2,5 aumentou o teor de mercúrio intrudido em 43%, o que os autores atribuíram a aglomeração das partículas de adições.

No mesmo sentido, Andrade (2007), por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, realizado em argamassas, perceberam uma redução da porosidade total e refinamento dos poros, na mistura com 10% de sílica ativa e 3% de nanossílica, quando comparado à referência e às misturas binárias. Ele atribuiu esse resultado à utilização da nano sílica. Em análise de TG/DTG foi verificado um grande consumo de Ca(OH)_2 , que reduziu a relação Ca/Si da matriz cimentícia em comparação aos demais materiais citados. O mesmo resultado foi obtido para estudos em argamassas de Garg, Bansal e Aggarwal (2016) e Malagoni (2016) com mistura de 10% de sílica ativa e 1% de nanossílica, quando comparada ao material de referência e de 10% de sílica ativa e 2% de nanossílica para argamassas estudadas por Li et al., (2017) e Jalal et al., (2012).



Conclusões

Após análise de todos os dados e resultados mostrados pelos diferentes autores, é possível concluir que:

- a *string* mostrou uma maior lacuna de estudos para misturas ternárias de sílica ativa e nanossílica;
- os estudos avaliados citam que a combinação de sílica ativa e nano sílica em materiais cimentícios promove uma densificação da microestrutura dos materiais cimentícios. Isso se deve aos efeitos químico e físico, que promovem aumento de C-S-H e melhora o empacotamento das partículas, respectivamente. Esses efeitos foram apontados por praticamente todos os autores, como a causa para os bons resultados obtidos nos ensaios mecânicos e nas propriedades avaliadas de materiais cimentícios.
- em geral, os bons resultados foram obtidos para teores de até 5% de nanossílica e de sílica ativa inferiores a 10% em praticamente todos os estudos;
- a combinação das adições contribuiu significativamente com a durabilidade do concreto frente a ambientes com exposição a cloretos, aumentando a resistividade elétrica e reduzindo a permeabilidade, a carga passante e a difusão de cloretos;
- nos estudos relacionados ao CO₂, foi percebida uma menor profundidade de carbonatação com o aumento do teor de nanossílica;
- quanto à microestrutura, os estudos mostraram que a nanossílica promoveu um refinamento dos poros capilares, enquanto a sílica ativa diminuiu a quantidade de poros totais. Isso conduziu a menores valores de absorção de água e de permeabilidade a gases e água;
- por fim, percebe-se que há um efeito de sinergia entre as duas adições, sendo que a utilização combinada desses dois materiais culmina no maior desempenho mecânico, de durabilidade e de desempenho dos materiais cimentícios, em comparação a misturas binárias.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Eletrobras Furnas e a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil e FAPEG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás pelo apoio financeiro.

Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 13956-1- Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos*, 2012.



ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. V., 247 (2020) 118453.

ALEXANDER, M. G.; MAGEE, B. J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and Concrete Research*. V., 29 (1999) 917 – 922.

ANDRADE, D. S. Microestrutura de pastas de cimento portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas. 2017. 322 f. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S.; MORAIS, P. C.; ROJAS, M. F. Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosilica. *Construction and Building Materials*. V., 159 (2018) 18-26.

ASHMED, H. U.; FARAJ, R. H.; HILAL, N.; MOHAMMED, A. A.; SHERWANI, A. F. H. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*, v.125, n.15, p.108769, 2021.

BAJJAA, Z.; DRIDIA, W.; DARQUENNES, A.; BENNACER, R.; LE BESCOPIA, P. Effect of aggregates on the diffusion properties and microstructure of cement with slurried silica fume based materials. *Cement and Concrete Composites*. V., 70 (2016) 86-97.

BALOCH. H.; USMAN, M.; RIZWAN, S. A.; HANIF, A. Properties enhancement of super absorbent polymer (SAP) incorporated self-compacting cement pastes modified by nano silica (NS) addition. *Construction and Building Materials*. V., 203 (2019)18-26.

BEHFARNIA, K.; ROSTAMI, M. Effects of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. V.,131 (2017) 205-213.

BERGNA, H. E. *The Colloid Chemistry of Silica*. Advances in Chemistry; American Chemical Society: Washington, 1994.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. V., 33 (2003) 1263-1268.

BOLHASSANI, M.; SAYYAHMANESH, M. A study on mechanical properties of cement paste using magnetite - silica nano - composites. *Advances in Cement Research*. V., 27 (2015) 571 – 580.



CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J.; BIANCHINI, M. LOW-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. *Journal of Cleaner Production*, V., 261 (2020) 121228.

CARNEIRO, L. R. S.; Garcia, D. C. S.; Costa, M. C. F.; Houmard, M.; Figueiredo, R. B. Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement. *Construction and Building Materials*. V., 160 (2018) 252-257.

CAUDURO, F. Estudo da incorporação de nanotubos de carbono e nanossílica em pasta de cimento Portland. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

DAHLAN, A. S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. *Journal of Molecular Structure*. V. 1223 (2021) 128896.

DANTAS, M. H. O. Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pernambuco, Caruaru, Brasil.

DU, H. Properties of ultra-lightweight cement composites with nano-silica. *Construction and Building Materials*. V., 199 (2019) 696-704.

FLORES, Y. C.; CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; TAVARES, L. M. TAVARES. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica. *Construction and Building Material*. V., 146 (2017) 524-530.

FU, C.; GUO, R.; LIN, Z.; XIA, H., YANG, Y.; MA, Q. Effect of nanosilica and silica fume on the mechanical properties and microstructure of lightweight engineered cementitious composites, *Construction and Building Materials*. V., 298 (2021) 123788.

GAO, X.; Yu, Q. L.; Brouwers, H. J. H. Characterization of alkali activated slag-fly ash blends containing nano-silica. *Construction and Building Materials*. V., 98 (2015) 397 – 406.

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

GHAHARI, S. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; ESMAEILI, M. An Accelerated Test Method of Simultaneous Carbonation and Chloride Ion



Ingress: Durability of Silica Fume Concrete in Severe Environments. *Advances in Materials Science and Engineering*. V., 2016 (2016) 1650979.

GARG, R.; BANSAL, M.; AGGARWAL, Y. Strength, Rapid Chloride Penetration and Microstructure Study of Cement Mortar Incorporating Micro and Nano Silica. *International Journal of Electrochemical Science*. V., 11 (2016) 3697 – 3713.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; ASAAD, D. S.; MUHYADDIN, G. F. Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. *Construction and Building Materials*. V., 102 (2016) 706 – 713.

HAN, K.; RIET, G.; GLANVILLE, J.; SOWDEN, A.; KLEIJNEN, J. Undertaking Systematic Reviews of Research on Effectiveness: CRD's Guidance for those Carrying Out or Commissioning Reviews. NHS Centre for Reviews and Dissemination, University of York, 2001.

HARUEHANSAPONG, S.; PULNGERN, T.; CHUCHEEPSAKUL, S. Effect of Nanosilica Particle Size on the Water Permeability, Abrasion Resistance, Drying Shrinkage, and Repair Work Properties of Cement Mortar Containing Nano-SiO₂. *Advances in Materials Science and Engineering*. V., 2017 (2017) 4213690.

HMED, H. U.; FARAJ, R. H.; HILAL, N.; MOHAMMED, A. A.; SHERWANI, A. F. H. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*, v.125, n.15, p.108769, 2021.

HASSAN, A. A. A.; LACHEMI, M. ; HOSSAIN, K. M. A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*. V., 34 (2012) 801 801– 807.

HOOTON. R. D. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Materials Journal*. V., 90 (202) 143–152.

HOR, D. W. S.; LEWIS, K. Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete. *Cement and Concrete Research*. V., 15 (1985) 793-800, 1985.

HOU, P.; QIAN, J.; CHENG, X.; SHAH, S. P. Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂ on cement-based materials. *Cement e Concrete Composites*. V., 55 (2015) 250 – 258.

JAISHANKAR, P.; MOHAN, S. R. K. Behaviour of nano silica on strength characteristics of high performances concrete. *Revista Romana de Materiale*. V., 47 (2017) 470-475.



JALAL, M.; MANSOURI, E.; SHARIFIPOUR, M.; POULADKHAN, A. R. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. *Materials and Design*. V., 34 (2012) 389 – 400.

JIN, Z.; ZHAO, X.; DU, Y.; YANG, S.; WANG, D.; ZHAO, T.; BAI, Y. Comprehensive properties of passive film formed in simulated pore solution of alkali-activated concrete, *Construction and Building Materials*, v. 319, p. 126142, 2022.

JÚNIOR, P. F. S. Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica. 2017. 368 f. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil.) – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

KAREIN, S. M. M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; EBADI, T.; ISAPOUR, S.; KARAKOUZIAN, M. A. A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation. *Construction and Building Materials*. V., 157 (2017) 573-581.

KAYALI, O.; ZHU, B. Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution. *Cement & Concrete Composites*. V., 27 (2005) 117-124.

KHAN, K.; RIET, G.; GLANVILLE, J.; SOWDEN, A.; KLEIJNEN, J. Undertaking Systematic Reviews of Research on Effectiveness: CRD's Guidance for those Carrying Out or Commissioning Reviews. NHS Centre for Reviews and Dissemination, University of York, 2001.

KITCHENHAM B.; CHARTERS, S. Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report, EBSE-2007-001, 2007.

KONTOLEONTOS, F.; TSAKIRIDIS, P. E.; MARINOS, A.; KALOIDAS, V.; KATSIOTI, M. Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration: Physicochemical and microstructural characterization. *Construction and Building Materials*. V., 35 (2012) 347 – 360.

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 (2017a) 229 – 238.

LI, L. G.; ZHU, J.; HUANG, Z. H.; KWAN, A. K. H.; LI, L. J. Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar. *Construction and Building Materials*. V., 157 (2017b) p. 337 – 247.



- LI, L. G.; ZHENG, J. Y.; ZHU, J.; KWAN, A. K. H. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*. V., 168 (2018) 622 – 632, 2018.
- LI, X.; QIN D.; HU, Y.; AHMAD, W.; AHMAD, A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P. A. systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, v. 45, p. 103447, 2022.
- LIMA, C. J. O. Efeito da moagem conjunta da nanossílica e do cimento Portland no desempenho de pastas cimentícias. 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T.; RAISGHASEMI, A. Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing nanosilica hydrosols with different specific surface areas. *Cement and Concrete Composites*. V., 53 (2014) 18-24.
- MALAGONI, M. A. A. Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais. 2016. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.
- MARTINS, A. M. Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.
- 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 (2018) 93 – 103.
- MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J. Effects of nano-sílica on mechanical performance and microstructure of ultra-high-performance concrete. *Cerâmica*. V., 63 (2017) 387 – 394.
- MEHTA, A.; ASHISH, K. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*. V., 29 (2019) 100888.
- MORAES, M. Q.; GEYER, A. Análise da contribuição das adições de nanossílica em concretos de cimento Portland. In. 9º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão, 22-26 de Outubro, Goiânia, Brasil, 2012 (Anais).
- NILI, M.; EHSANI, A.. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. *Materials and Design*. V., 75 (2015) 174 – 183.



NOCHAIYA, T.; JEENRAM, T.; DISUEA, P.; TORKITTIKUL, P. Microstructure, compressive strength, and permeability of Portland-condensed silica fume cement. *Monatsh Chem.* V., 48 (2017) 1363-1370.

OLIVEIRA, A. P. Estudo de matrizes cimentícias ternárias contendo sílica ativa e nanossílica. 2019. 144 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.

OLIVEIRA, A.M. Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto a corrosão das armaduras induzida por cloretos. 2008. 276 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil, 2008.

OLIVEIRA, A. M., CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials.* V., 192 (2018) 467 - 477.

OLIVEIRA, A. M.; FERREIRA, R. A. R.; MARTINS FILHO, P. C. Production of Silica Gel From Waste Metal Silica Residue. *Materials Letters.* V., 275, p. 1-6, 2022.

OLIVEIRA, A. M., OLIVEIRA, A. P., VIEIRA, J. D., NEVES JUNIOR, A., CASCUDO, O. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques, *Journal of Building Engineering*, V., 64, (2023), 105616.

OLENA, K.; YELENA, K.; MAKSIM, B. The impact of the COVID-19 pandemic on the creative industries: A literature review and future research agenda. *Journal of business research*, v.139 p.1192 -1210, 2021.

OLTULU, M.; ŞAHIN, R. Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders. *Construction and Building Materials.* V., 53 (2014) 658 – 664.

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, A. P. ; VIEIRA, J. D. ; NEVES JR., A. ; CASCUDO, O. . Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. *JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING*, v. 64, p. 1-17, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105616>

PEREIRA, A. P. O; CASCUDO, O; CARASEK, H. Durabilidade de concretos, argamassas e pastas contendo nanossílica: Mapeamento e revisão sistemática da literatura. In: 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, 22-24 de Agosto, São Carlos, Brasil, 2018 (Anais).



PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. Systematic Mapping Studies in Software Engineering. 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 2008 (Anais).

PINHEIRO, S. C. Influência de sílica gel e de partículas micro e submicrométricas produzidas a partir da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na hidratação e estrutura de poros de pastas de cimento. 2015. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

POON, C. S.; KOU, C. S.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*. V., 20 (2006) 858-865.

QUERCIA, G.; SPIESZ, P.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. SCC modification by use of amorphous nano-silica. *Cement and Concrete Composites*. V., 45 (2014) 69-81.

RAZAVI, S.M.; NAZARPOUR, H.; BEYGI, M. H. Investigation of the efficacy of nano-silica on mechanical properties of Green-Engineered Cementitious Composite (GECC) containing high volume natural zeolite. *Construction and Building Materials*. V., 291

REIS, P. F. O.; JÚNIOR, F. E.; SILVA, E. F. Profile of internal relative humidity and depth of drying in cementitious materials containing superabsorbent polymer and nano-silica particles. *Construction and Building Materials*. V., 237 (2020) 1-9.

RÊGO, J. H. S.; ROJAS, M. F.; TERRADES, A. M.; FERNÁNDEZ-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 (2018) 1.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*. V., 36 (2012) 838-844.

SANTOS, M. A.; OLIVEIRA, A. P.; OLIVEIRA, A. M. Um Estudo da Perspectiva do Uso de Resíduo Industrial de Silício como Adição Mineral em Matrizes Cimentícias: Origem, Processamento e Propriedades. *Revista De Engenharia Da Universidade Católica De Petrópolis*. V., 15, p. 103-118, 2021.

SEFFF, L. Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2009.



SEFFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L.; FERREIRA, V.; LABRINCHA, J. A. Rheological characterisation of cement pastes with nanosilica, silica fume and superplasticiser additions. *Advances in Applied Ceramics (Print)*, v. 109, p. 213 – 218, 2010.

SHAIKH, F.U.A; SUPIT, S.W.M. Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles. *Construction and Building Materials*. V., 99 (2015) 208-225.

SHANNAG, M. J.; SHAIA, H. A Sulfate resistance of high-performance concrete. *Cement & Concrete Composites*. V., 25 (2003) 363-369.

SIKORA, P.; CHUNG, S. Y.; LIARD, M.; LOOTENS, D.; DORN, T.; KAMM, P. H.; STEPHAN, D.; ELRAHMAN, M. A. The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars. *Construction and Building Materials*. V., 281 (2021) 122574.

SINGH, L. P.; GOEL, A.; BHATTACHARYYA, S. K.; SHARMA, U.; MISHRA, G. Hydration studies of cementitious material using silica nanoparticles. *Journal of Advanced Concrete Technology*. V., 13 (2015) 345-354.

SOARES, A. L. M. Efeito da adição de nanosilica nas propriedades mecânicas e microestruturais de argamassas para construção. 2014. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil.

TRIPATHI, D.; KUMAR, R.; MEHTA, P.K.; SINGH, AMRENDRA. Silica fume mixed concrete in acidic environment. *Materials Today: Proceedings*. V., 27 (2020) 1001.

XU, Z.; ZHOU, Z.; DU, P.; CHENG, X. Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate. *Construction and Building Materials*. V., 125 (2016) 1169-1177.

WANG, D.; SHI, C.; WU, Z.; WU, L.; XIANG, S.; PAN, X. Effects of nanomaterials on hardening of cement–silica fume–fly ash-based ultrahigh-strength concrete. *Advances in Cement Research*. V., 28 (2016) 555-566.

ZHANG, X.; DU, X.; ZHAO, X.; ZHANG, R.; HOU, P.; ZONGHUI, Z.; CHENG, X. The synergistic effect of nano-SiO₂ with silica fume in cement-based material. *Journal of Sustainable Cement-Based Material*. V., 6 (2016) 267-279.