

Análise da microssilica como suplemento cimentício

Analysis of the influence of partial replacement of cement by micro silica

DOI:10.34117/bjdv7n4-691

Recebimento dos originais: 30/03/2021

Aceitação para publicação: 30/04/2021

Danilo Silva Bomfim

Mestrando em engenharia civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
(PUC-Rio)

R. Marquês de São Vicente, 225 - Casa XV - Gávea, Rio de Janeiro

E-mail: dsbomfim2@hotmail.com

Yan Álefe Miranda Ribeiro

Mestrando Modelagem Computacional

Universidade Estadual de Santa Cruz, DCET, Ilhéus, Brasil

E-mail: yamribeiro@uesc.br.

Igor José Santos Ribeiro

Mestrando em Ciência, Inovação e Modelagem de Materiais na Universidade Estadual
de Santa Cruz. Ilhéus, Brasil.

E-mail: ijsribeiro@uesc.br

Mariane Porto Lima

Mestre em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais

Rua Tereza Cristina, 10, São Sebastião, Ilhéus, Bahia

E-mail: engenheira.mariane@gmail.com

José Renato de Castro Pessôa

Doutor em modelagem computacional

Professor da Universidade Estadual de Santa Cruz, DCET, Ilhéus, Brasil

E-mail: jrcessoa@uesc.br

RESUMO

Distintas adições químicas e minerais são utilizadas na mistura do concreto para aprimorar suas propriedades e reduzir o consumo de cimento, cuja produção apresenta alto impacto ambiental. Dentre estas, encontra-se a microssilica que é um resíduo industrial. A influência de quantidades variáveis desta adição à mistura do concreto como substituição parcial do cimento na resistência mecânica à compressão, trabalhabilidade e porosidade foi alvo deste estudo. Os resultados demonstraram que a sílica ativa promoveu redução da trabalhabilidade e que o teor ótimo de substituição em 9%, onde houve ganho de resistência mecânica à compressão, havendo redução devido ao efeito de afastamento para incrementos superiores a esse teor ótimo.

Palavras-chave: Desempenho, Material Cimentício Suplementar, Microestrutura, Pozolânicos.

ABSTRACT

Different chemical and mineral additions are used in the concrete mixture to improve its properties and reduce cement consumption, whose production has a high environmental impact. Among these, there is the microsilica which is an industrial residue. The influence of varying amounts of this addition to the concrete mixture as a partial replacement of cement on the mechanical resistance to compression, workability and porosity was the target of this study. The results showed that the silica promoted a reduction in workability and that the optimum replacement content is within the range between 8% to 10%, where there was a gain in mechanical resistance to compression, with a reduction due to the spacing effect for increments greater than this optimum content.

Keywords: Performance, Supplementary Cement Material, Microstructure, Pozolanic

1 INTRODUÇÃO

Desde a publicação da NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho (2013), a durabilidade e o desempenho dos concretos têm avultado em importância. Neste âmbito, diversos autores têm feito análises com adições minerais inseridas na matriz cimentícia, e alguns destes por meio de substituição parcial, o que reduz o consumo de cimento, o mais caro componente do concreto.

Em justaposição, com a demanda cada vez maior por materiais sustentáveis as preocupações com a produção do cimento têm aumentado. A fabricação deste emite diversos poluentes na atmosfera, tem alto custo energético, sendo desejável concretos com menores teores deste aglomerante, mas que ainda atenda aos requisitos das normas vigentes.

Uma das adições que viabiliza o atendimento é a sílica ativa ou microssílica, que é produzida após a condensação da fumaça advinda do processo de fabricação de ligas de alumínio-silício. As partículas formadas mediante este processo são amorfas, têm diâmetro da ordem de um micrômetro e superfície específica em torno de 2000 a 2500 m²/kg [1].

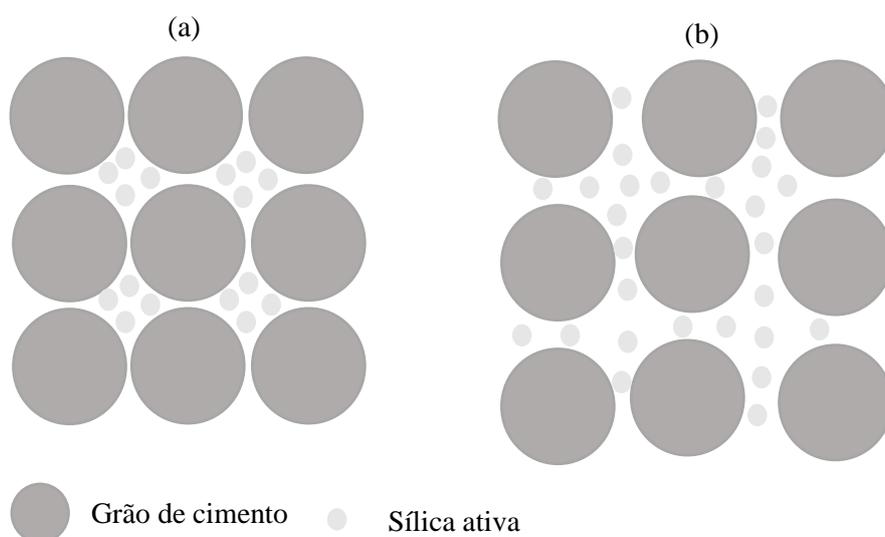
Um dos efeitos físicos conhecidos da inserção deste material é a nucleação heterogênea na reação de hidratação do cimento, acelerando esta ao fornecer mais núcleos de cristalização para formação da pasta de C-S-H, reação que em concretos convencionais só ocorre nas partículas de cimento. O principal desdobramento deste efeito é o aumento da resistência inicial, sendo este mais pronunciado para a nanossílica, por aumentar substancialmente o número de núcleos disponíveis [2][3].

Outro efeito físico é o *filler*. Devido ao pequeno diâmetro das partículas deste aditivo, bem como seu formato esférico, ao ser repelida por um dispersor tende a se inserir entre os grãos de cimento [4][5].

A sílica também faz parte da reação pozolânica, mediante a qual o hidróxido de cálcio é consumido na formação de silicato de cálcio hidratado, efeito este que majora a resistência mecânica, a resistência a penetração de agentes agressivos e minora os vazios, efeitos estes que desembocam em um material de maior durabilidade e melhor desempenho em distintos ambientes [6][7].

Entretanto, ao inserir gradualmente a microssílica, observa-se que ao ultrapassar o volume, as partículas maiores são afastadas pelas adições, corroborando aumentar a porometria, reduzir o ganho de durabilidade e resistência mecânica [4][8]. Este efeito está ilustrado na Figura 1

Figura 1. (a) Efeito *filler* (b) Efeito de afastamento. Fonte: Adaptado de HERMANN, LANGARO & KLEIN.



Uma vez que a maioria dos estudos se centram na adição da sílica no traço, não na utilização deste como material cimentício suplementar, esta análise baseou-se neste tipo de inserção para determinação de um teor ótimo, tendo como principal parâmetro para este teor a resistência mecânica à compressão do concreto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi dividido em seis etapas: seleção e caracterização dos materiais, definição do traço unitário, produção dos corpos de prova, procedimento de

concretagem, ensaio de índice de vazios e ensaio de compressão axial. O desenvolvimento do programa experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMCC) e no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Resistências dos Materiais (LEMER) da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC).

3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais selecionados foram usados de maneira como são fornecidos comercialmente, sem alterações em suas características iniciais, salvo os agregados que foram peneirados para redução das impurezas. A escolha da maioria dos materiais utilizados foi realizada de acordo com a disponibilidade da região, exceto o cimento e a sílica ativa.

4 CIMENTO

O cimento utilizado foi o cimento CP V ARI da marca Campeão apresentando as características, conforme as especificações do fabricante, apresentadas pelas Tabelas 1 e 2. Optou-se por utilizar esse tipo de cimento pois é o cimento que geralmente é utilizado comercialmente pelas indústrias produtoras de concreto devido a suas vantagens como módulo de finura e o ganho de resistência nas primeiras idades.

Tabela 1 Caracterização química do cimento.

Ensaio químico	(%)
Perda ao Fogo – PF	5,07
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	3,37
Resíduo Insolúvel – RI	0,66
Óxido de Magnésio – MgO	0,61

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2 Caracterização física do cimento.

Ensaio físico e mecânico	Resultados	
Área específica (Blaine) (cm ² /g)	5375	
Massa específica (g/cm ³)	3,07	
Finura – resíduo na peneira de 0,075 mm (#200) (%)	0,51	
Finura – resíduo na peneira de 0,075 mm (#200) (%)	2,63	
Água da pasta de consistência Normal (%)	31,2	
Início de pega (h:mín)	2:34	
Fim de pega (h:mín)	3:06	
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente	0,00	
	1 dia	28,00
Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	37,30
	7 dias	43,30
	28 dias	51,60

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

5 AGREGADOS

Foram utilizados agregados britados do tipo brita 1, com diâmetro máximo característico de 19 milímetros. As britas utilizadas estão em disponibilidade na Pedreira Dois Irmãos localizada em Ilhéus-BA.

Como agregado miúdo foi utilizado areia média, esse material passou por um processo de peneiramento para remoção de impurezas e partículas macroscópicas. Além disso, a sua umidade foi determinada antes da dosagem do concreto, para a correção do fator água/cimento no traço do concreto, conforme a NBR 9775 – Determinação da umidade superficial em areia natural ou britada (2011). Como resultado foi obtido uma umidade absoluta de 3,4%.

6 SILÍCA ATIVA

Foi utilizada a microssílica da marca Ferbasa, a qual apresenta composição e características físicas e químicas conforme denotado pelas Tabelas 3 e 4. Para cada série produzida, variou-se a proporção de sílica ativa, adicionando valores entre 5 a 25 % do peso de cimento.

Tabela 3 Composição química da microssílica.

Substância	Composição Química (%)
Sílica amorfa (SiO ₂)	≥ 85,0
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	≤ 1,5
Perda de fogo (PF)	≤ 6,0
Umidade (H ₂ O)	≤ 3,0

Fonte: Dados fornecidos pela Ferbasa.

Tabela 4 Propriedades físicas e químicas da microssílica.

Propriedades	Valores
Diâmetro médio (µm)	0,40
Resíduo na peneira 45 µm (%)	≤ 10
Ponto de fusão (°C)	1550 – 1570
Área específica (Blaine) (m ² /Kg)	≥ 15000 e ≤ 30000

Fonte: Dados fornecidos pela Ferbasa.

7 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO

Para a obtenção do traço foi utilizado o método IPT/EPUSP. Adotou-se um traço de referência e a partir dele variou-se os teores de sílica ativa para analisar o efeito da substituição do cimento por esse material pozolânico. Primeiramente, foi fixado alguns parâmetros visando obter uma resistência igual ou superior a 25 MPa pela curva de Abrams e uma boa trabalhabilidade para a moldagem dos corpos de prova:

- Relação água/aglomerante (cimento + sílica ativa): 0,55;
- Traço intermediário 1:5.

A partir destes valores, dando prosseguimento ao método de dosagem, obteve-se o seguinte traço unitário:

$$1 : 2,30 : 2,70 : 0,55$$

8 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram estabelecidos cinco traços de concreto, sendo quatro dosagens variando os teores de sílica ativa em porcentagem da massa de cimento e uma dosagem sem microsílica (referência). Foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para cada dosagem, totalizando 50 corpos-de-prova produzidos. A Tabela 5 mostra a quantidade de material utilizado em cada dosagem, determinada segundo o traço unitário.

Tabela 5 Quantidade de materiais utilizados em cada dosagem.

Material	Dosagem 1	Dosagem 2	Dosagem 3	Dosagem 4	Dosagem 5
Cimento (kg)	7,66	7,28	6,89	6,51	5,74
Areia (kg)	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62
Brita (kg)	20,68	20,68	20,68	20,68	20,68
Água (L)	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21
Microsílica (kg)	-----	0,38 (5%)	0,77 (10%)	1,15 (15%)	1,92 (25%)
Fator água/cimento	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

9 ENSAIO DE ÍNDICE DE VAZIOS

Para a determinação do índice de vazios do concreto foi seguido os critérios de ensaio estabelecidos pela NBR 9778/2009. Dos corpos de provas produzidos, 3 de cada dosagem foram destinados para esse ensaio. Inicialmente, determinou-se a massa seca de cada corpo de prova após secagem em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 72 horas. Em seguida, procedeu-se a imersão dos corpos de prova por 72 horas e determinou-se a sua massa saturada e a massa do corpo de prova saturada e imersa em água (Figura 2).

Figura 2. Determinação da massa do corpo de prova saturada e imersa em água.



10 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial foi realizado, seguindo os critérios da norma NBR 5739/2018, no LMCC da Universidade Estadual de Santa Cruz, utilizando a prensa hidráulica Emic SSH300, com taxa de incremento de tensão de 0,45 Mpa/s, conforme Figura 3.

Figura 3. Ensaio de compressão axial.



11 RESULTADOS E DISCUSSÕES

11.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

Os dados obtidos do ensaio de abatimento de tronco de cone encontram-se dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Dosagem	Microsílica (%)	Abatimento (mm)	Relação a/c
1	0	80	
2	5	62	0,55
3	10	54	
4	15	45	

Observa-se uma clara perda de trabalhabilidade para uma mesma relação água cimento desde a primeira inserção de 2,5 %. A redução para cada incremento, é aproximadamente linear. Este efeito é observado na literatura [6][8]. Ao alocar-se no espaço entre os grãos do cimento expulsando água que anteriormente ocupava estes vazios que se disponibiliza para a mistura. Não obstante, dada a alta superfície específica desta adição, a demanda de água gerada, é maior que a contribuição neste efeito sendo, em termos globais, aumentada a demanda de água ao substituir o cimento por um pó mais fino [9].

Reitera-se que uma dosagem foi descartada (25%) por apresentar abatimento não notável, implicando em eventuais problemas na moldagem e provocando CP's com grandes poros. Infere-se, portanto, a necessidade de um dispersor em termos de trabalhabilidade para adições em substituição do cimento superiores a 15%.

11.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência mecânica à compressão média de cada dosagem está exposta na Tabela 7.

Tabela 7 Média dos resultados de resistência mecânica à compressão.

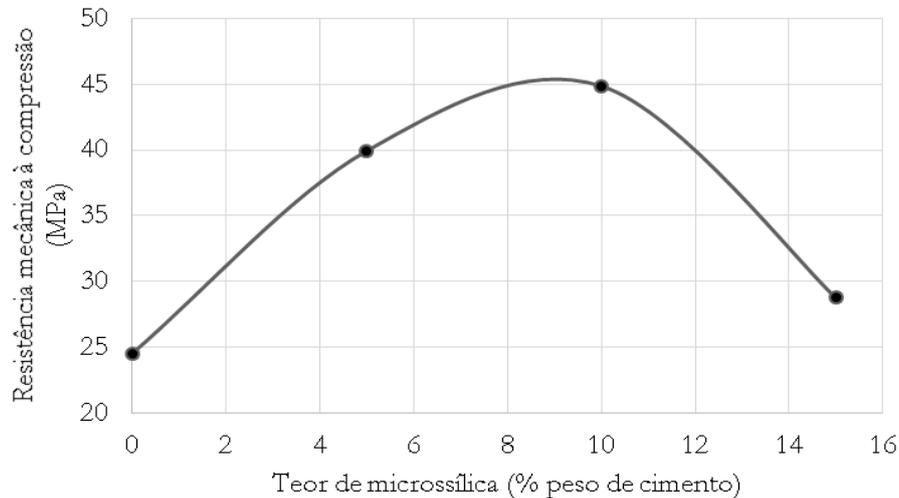
Dosagem	Microsílica (%)	Resistência mecânica à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Acréscimo de resistência* (%)
1	0	24,54	1,29	0
2	5	39,93	1,08	62,71
3	10	46,72	1,20	90,38
4	15	28,75	1,49	17,03

* Acréscimo de resistência à compressão com relação à dosagem 1 (referência).

O aumento gradual da resistência ocorre de modo similar à utilização deste material como adição ao invés de complementar. É notório o acréscimo de resistência, bem como a queda quando o valor máximo é atingido e ocorre o afastamento. PERUMAL et. al [8] obteve resultados similares em termos de incremento de resistência, bem como incorporação limite para queda deste parâmetro. Na Figura 4, estão dispostos os dados de

todas as séries conjuntamente de modo a enxergar a variação da resistência mecânica à compressão em função do teor de microssílica.

Figura 4. Variação da resistência mecânica à compressão do concreto (MPa) em função do teor de microssílica (% peso de cimento).



A mais alta resistência mecânica à compressão do concreto, o teor ótimo, foi encontrado no valor de 9% de substituição em peso do cimento de acordo com o gráfico elaborado a partir dos resultados (Figura 4). Embora HERMANN et.al [4], utilizando dosagem por empacotamento de partículas tenha incorporado cerca de 20% de sílica como substituição, foram utilizados 1 % em peso do cimento de superplastificante, para que a trabalhabilidade fosse adequada para moldagem. Distintos estudos têm obtido reiteradamente, resultados próximos a 10%, utilizando este material como adição ou como suplementação, fato este que impulsiona a utilização deste resíduo como substituição do cimento, reduzindo o impacto ambiental e concomitantemente, otimizando o desempenho do concreto [5][7][8].

11.3 ÍNDICE DE VAZIOS

Os valores de índice de vazios obtidos para cada dosagem encontram-se dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 Média dos resultados de índice de vazios

Dosagem	Microssílica (%)	Índice de vazios médio (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
1	0	15,71	0,46	2,95
2	5	16,50	1,39	8,44
3	10	18,81	0,83	4,43
4	15	19,69	0,04	0,21

Os resultados encontrados apontam um aumento no índice de vazios à medida que se acrescentou a microssílica em substituição ao cimento. Dessa forma, esperava-se uma redução da resistência mecânica à compressão do concreto, o que ocorreu apenas na dosagem 4. As dosagens 1, 2 e 3, apesar do aumento no índice de vazios, apresentaram um incremento da resistência com a adição da microssílica.

Uma vez que o índice de vazios não se refere a porometria, mas sim ao volume de vazios justaposto ao fato que se observou aumento gradual da resistência com a incorporação do adição, infere-se que o aumento deste parâmetro pode estar relacionado com o maior número de poros, de menor tamanho, que aumentam este índice. Os autores Metha e Monteiro [10] ratificam esta inferência ao afirmar que, apesar de usualmente o aumento de vazios resultar na redução da resistência mecânica à compressão do concreto, quando a estrutura de poros consiste em poros finos uniformemente distribuídos, as partículas do material são resistentes, não havendo decréscimo devido a este parâmetro.

Atesta-se ainda que o efeito da nucleação heterogênea, alinhado com o efeito *filler*, tendem reduzir a porometria, mas que para a majoração destes na utilização como suplementar, faz-se necessária a utilização conjunta de um dispersor, que reduza a viscosidade plástica, facilite o deslocamento das partículas mediante a repulsão coulombiana e viabilize não somente a redução da porometria, mas também a redução de vazios [3][9].

12 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a influência do teor de sílica como material cimentício suplementar para a determinação do teor ótimo de inserção, considerando a resistência mecânica à compressão do concreto. Os resultados obtidos demonstraram que:

- A trabalhabilidade da mistura diminui à medida que se aumenta o teor de microssílica em concretos de mesma relação água cimento, observando-se uma relação aproximadamente linear entre estes parâmetros;
- Ao considerar a resistência mecânica à compressão do concreto, o teor ótimo de adição de microssílica em substituição em peso do cimento foi de 9% para série em análise;
- O índice de vazios tende a aumentar com a inserção da microssílica em substituição ao cimento, porém nas dosagens com teor de microssílica de 5% e

10%, observou-se também um aumento da resistência mecânica à compressão do concreto;

- Para traços com adições de microssílica em substituição do cimento, recomenda-se o uso de um dispersor de modo a reduzir o índice de vazios e manter a trabalhabilidade para dosagens com teores de microssílica superiores a 15%.

REFERÊNCIAS

- [1] VASKE, N. R.; CAMPAGNOLO, J. L.; MOLIN, D. C. C. D. A. L. 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.
- [2] KAWASHIMA, S. et al. Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, v. 36, n. 1, p. 8-15, 2013.
- [3] TAENGUA, G.; EFFECTS, J. Effects of the addition of nanosilica on the rheology , hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, v. 81, p. 120-129, 2015.
- [4] HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; KLEIN, N. S. Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.
- [5] IMAM, A.; SRIVASTAVA, V. Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. *Advances in Concrete Construction*, v. 6, n. 2, p. 145-157, 2018.
- [6] ABID, F. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD). Development of High Performance Concrete. p. 1465–1479, 2018.
- [7] VARGUESE, LINCY; PARAMESWARAN, L. V. Nanosilica-added concrete: strength and its correlation with time-dependent properties. *Construction Materials*, v. 172, n. 2, p. 85-94, 2019.
- [8] PERUMAL, K.; SENTHILKUMAR, S.; SEKAR, K. Experimental Investigations on Strength Characteristics of High Performance Concrete Using Silica Fume and Superplasticizer. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development.*, v. 2, p. 382-390, 2018.
- [9] COSTA, H. et al. The effect of nanosilica addition on flowability , strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials and Design*, v. 59, p. 1–9, 2014.
- [10] MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.