

## AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MICROSSÍLICA DE ALTO TEOR DE CARBONO COMO MATERIAL POZOLÂNICO

R. L. S. Ferreira<sup>1</sup>; M. A. S. Anjos<sup>2</sup>; C. M. Pederneiras<sup>1</sup>; T. C. S. Costa<sup>1</sup>; A. K. Nobrega<sup>3</sup>; C. H. R. B. Silva<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Alunos da pós-graduação em Engenharia Civil da UFRN - Avenida Senador Salgado Filho, s/n, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal/RN, CEP: 59078 – 900.

E-mail: [ruan\\_landolfo@hotmail.com](mailto:ruan_landolfo@hotmail.com);

<sup>2</sup> Professor do IFPB, coordenação de Edificações;

<sup>3</sup> Professora do Departamento de Engenharia Civil/UFERSA;

<sup>4</sup>Aluno do curso de Engenharia Civil da UFRN.

### RESUMO

*As adições minerais possibilitam reduzir a produção do clínquer, o que minimiza o impacto ambiental causado pela produção do cimento e a geração de resíduos industriais, pois estas fornecem ganho mecânico e durabilidade. Assim, este artigo visa avaliar a potencialidade da utilização de microssílica de alto teor de carbono como material pozolânico, com base nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015). As técnicas de fluorescência de raios X (FRX), difração de raios-X (DRX) e resistência à compressão de argamassas de cal e cimento (aos 7 e 28 dias, respectivamente), foram utilizadas para avaliar a pozolanicidade. Os resultados indicaram que a microssílica de alto teor de carbono possui estrutura amorfa e elevado percentual de dióxido de silício. Nos DRX's das pastas houve formação de CSH, justificando os bons resultados de resistência mecânica, especialmente com o cimento. Desta forma, a adição mineral utilizada nesta pesquisa pode ser considerada como um material pozolânico.*

*Palavras-chave: adições minerais, atividade pozolânica, microssílica.*

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo dos recursos naturais tem aumentado proporcionalmente ao crescimento urbano e ao desenvolvimento dos setores econômicos. Como resultado, são gerados grandes impactos, muitas vezes irreversíveis, ao meio ambiente.

O alto consumo de energia e de matérias-primas, bem como as elevadas emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção do cimento Portland, têm preocupado a sociedade sobre a sustentabilidade do seu uso em concreto <sup>(1)</sup>, que continua a ser uma força motriz essencial para o desenvolvimento humano <sup>(2)</sup> em função de sua elevada produção que gira em torno de 2 milhões de toneladas anualmente <sup>(3)</sup>.

Por outro lado, são emitidos quase dois bilhões de toneladas de dióxido de carbono por ano, o que representa de 6 a 7% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no planeta <sup>(3)</sup>. Além disso, são consumidos cerca de 10 a 11 EJ (Exajoule) de energia por ano, o correspondente a cerca de 2 a 3% do consumo de energia primária global <sup>(4)</sup>.

O aumento dos custos de combustível, as metas de redução de carbono e a crescente demanda por alternativas mais sustentáveis estão impulsionando os fabricantes de cimento a buscar mudanças e a criação de novas tecnologias e produtos <sup>(2)</sup>.

Com o adequado controle de qualidade, grandes quantidades de muitos resíduos industriais podem ser utilizadas em concretos e argamassas, em forma de adições minerais, proporcionando considerável ganho ambiental e econômico, como a minimização do impacto causado pela emissão de gases poluentes, decorrentes da fabricação do cimento, e redução consumo desordenado dos recursos naturais <sup>(1)</sup>. À exemplo disto, tem-se a sílica ativa, também chamada de microssílica, que é um subproduto da indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício <sup>(5,6)</sup>.

A microssílica é constituída por partículas esféricas de dióxido de silício amorfo e é um material altamente reativo <sup>(2)</sup>, podendo melhorar significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios, dado o seu efeito pozolânico e de empacotamento da mistura <sup>(7)</sup>.

Além dos aspectos ambientais, a adição de pozolanas em materiais cimentícios, proporciona alguns benefícios, tais como: aumento da durabilidade da estrutura, melhoria das propriedades mecânicas, diminuição do consumo do aglomerante hidráulico por ser um dos insumos de mais alto custo em uma obra e o

proporciona um destino adequado aos resíduos, uma vez que grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais e cujo destino é o aterro sanitário <sup>(8)</sup>.

O uso de microssílica constitui uma argamassa mais homogênea, por reduzir a espessura da zona de transição interfacial, pelo consumo de hidróxido de cálcio. Além de minimizar a retração e o aparecimento de microfissuras, por reduzir o calor das reações de hidratação. A finura das partículas proporciona o preenchimento de vazios, o que torna a argamassa mais compacta devido ao efeito fíler <sup>(9)</sup>.

Neste sentido, o presente trabalho pretende avaliar o efeito da utilização de microssílica com alto teor de carbono como material pozolânico segundo as prescrições da NBR 12653 <sup>(10)</sup>.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado cimento CP II F-32, cal hidratada do tipo CH-I, areia normal produzida conforme a NBR 7214 <sup>(11)</sup> e microssílica de alto teor de carbono fornecida pela empresa Elken. Na tabela 1 e 2, verifica-se, respectivamente, as massas específicas e a composição química dos materiais utilizados para produção das argamassas.

Tabela 1: Massas específicas dos materiais utilizados na pesquisa

<b>Materiais</b>	<b>Massas específicas (g/cm<sup>3</sup>)</b> <sup>(12, 13)</sup>
CP II F-32	2,93
Cal CH I	2,64
Areia normal	2,62
Microssílica	2,00

Tabela 2: Composição química por fluorescência de raios X (FRX) dos materiais utilizados

<b>Óxidos</b>	<b>Composição (%)</b>		
	<b>Cimento</b>	<b>Cal</b>	<b>Areia normal</b>
SiO <sub>2</sub>	14,71	0,79	65,50
CaO	68,68	97,66	4,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,41	0,38	12,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35	0,37	8,99
MgO	2,70	-	0,80
SO <sub>3</sub>	5,48	0,15	-
K <sub>2</sub> O	1,26	0,48	3,51
Outros	0,41	0,17	2,13

## 2.2. Produção das argamassas

Para avaliação do índice de atividade pozolânica (IAP), com a cal e com o cimento, formulou-se três argamassas que foram definidas nesse estudo, como argamassa de cal (ARGCAL), argamassa de cimento, sendo uma de referência (ARGCIM-REF) e outra com a microssílica de alto teor de carbono (ARGCIM-M). Moldaram-se, para cada argamassa, seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, de acordo com a NBR 5751<sup>(14)</sup> e a NBR 5752<sup>(15)</sup>. As proporções em massa de cada material são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Quantidade, em massa, dos materiais utilizados para confecção das argamassas

Materiais	Quantidade (g)		
	ARGCAL	ARGCIM-REF	ARGCIM-M
Cimento	-	628,0	468,0
Cal	208,0	-	-
Areia normal	1872,0	1872,0	1872,0
Microssílica	315,2	-	156,0
Água	621,4	302,0	302,0
Aditivo superplastificante (SIKAMENT PF 171)	-	-	6,3

A quantidade de água estabelecida para a ARGCAL corresponde a um índice de consistência de  $(225 \pm 5)$  mm. Para manter a consistência da ARGCIM-M com uma variação de  $\pm 10$  mm em relação a consistência da ARGCIM-REF, foi necessário utilizar um aditivo superplastificante. A dosagem foi de 1,0% sobre o peso do cimento e da adição mineral estudada. Tem-se na literatura<sup>(5)</sup> o conhecimento sedimentando de que a microssílica demandada elevadas quantidades de água para a realização da mistura, justificando o uso do aditivo superplastificante.

A mistura das argamassas seguiu as prescrições da NBR 7215<sup>(16)</sup>, na qual inicialmente, adiciona na cuba do misturador toda a água e o cimento e, em seguida, adiona a areia normal. No caso da argamassa com a cal, a água foi adicionada gradativamente a fim de se verificar sua consistência, de modo a não ultrapassar os limites estabelecidos pela referida norma.

A cura dos corpos de prova com a cal foi realizada no próprio molde, sendo realizado encamisamento com látex na parte superior, e envolvido com filme plástico transparente. Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram mantidos a temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C, contidos em recipiente plástico com água e envolvido

com filme plástico transparente. Durante as 144 horas posteriores, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida aquecida a temperatura de 55 °C.

Para os corpos de prova com cimento, a cura nas primeiras 24 horas, também foram nos moldes com proteção em sua superfície. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em reservatório com água saturada de cal, durante 28 dias.

### 2.3. Difração de raios X (DRX)

A microsilica anidra, bem como pastas de cal e cimento produzidas com esta adição, foram caracterizadas por DRX em um equipamento Shimadzu DRX 6000. As amostras foram submetidas as seguintes condições de análise: radiação ka de um anodo de cobre ( $\lambda = 1,54056\text{\AA}$ ), 40 kV e 30 mA. Os resultados foram obtidos com a velocidade do goniômetro de 1,5°/min, faixa de varredura ( $2\theta$ ) de 5-70°, passo de varredura 0,02% e tempo por passo de 1s. Todo o material para ensaio foi previamente destorroado com o auxílio de um almofariz de porcelana e passado pela peneira 200 (0,075 mm).

### 2.4. Resistência à compressão

Avaliou-se a resistência à compressão das argamassas com a cal (ARGCAL), aos 7 dias. Os corpos de prova com cimento (ARGCIM-REF e ARGCIM-M), foram avaliados aos 28 dias. Todos os corpos de prova foram secos ao ar e capeados com enxofre. O ensaio foi realizado em prensa universal com carga de compressão a velocidade de 0,25 MPa/s, conforme as recomendações da NBR 7215 <sup>(16)</sup>.

O IAP, com a cal, é atingido quando a resistência à compressão do compósito é maior ou igual a 6,0 MPa. O índice de desempenho com o cimento (IDC) é definido pela razão entre a média das resistências dos corpos de prova moldados com cimento e adição mineral ( $f_{cB}$ ) e a média das resistências dos corpos de prova moldados, apenas, com cimento ( $f_{cA}$ ), conforme a equação A.

$$IDC = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} 100 \quad (A)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Requisitos químicos

A composição química da amostra de material pozolânico (microsílica), determinados por FRX, são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4: Composição química por FRX da microsílica

Composição	Teor (%)	Requisitos da NBR 12653 <sup>(10)</sup> : Pozolana Classe E
SiO <sub>2</sub>	90,33	≥ 50%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,21	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,10	
SO <sub>3</sub>	0,96	≤ 5%
Na <sub>2</sub> O	1,0	≤ 1,5%
K <sub>2</sub> O	1,66	-
CaO	0,15	-
Outros	3,59	-

A microsílica apresenta percentuais de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de 90,33%, 1,21% e 1,10%, respectivamente, cujos valores superam o mínimo estabelecido por norma, que é de 50%. O percentual de SO<sub>3</sub> também satisfaz o valor máximo de 5% exigido, atendendo, assim, às especificações químicas exigidas pela NBR 12653 <sup>(10)</sup> para que uma amostra seja considerada material pozolânico pertencente à classe E.

Além disso, os elevados percentuais de SiO<sub>2</sub>, indicam uma provável atividade pozolânica, visto que elevados teores de sílica são desejáveis em materiais ativos e tem papel importante, pois ao longo do tempo, tem-se reações que formam os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pela resistência mecânica desenvolvida.

#### 3.3. Composição mineralógica

Com a análise de DRX, pode-se verificar que no difratograma (Figura 1) que as amostras de material pozolânico apresentaram característica amorfa, ausente de picos característicos, o que pode contribuir para que ocorram as reações pozolânicas. As características que delimitam as adições minerais são de acordo com a sua granulometria (quanto mais finas as partículas, mais reativo será o material), a cristalinidade de origem e o grau de amorfização (quanto mais amorfo,

maior a reatividade). Dessa forma, os resultados do DRX mostram a microsilica como um material pozolânico reativo.

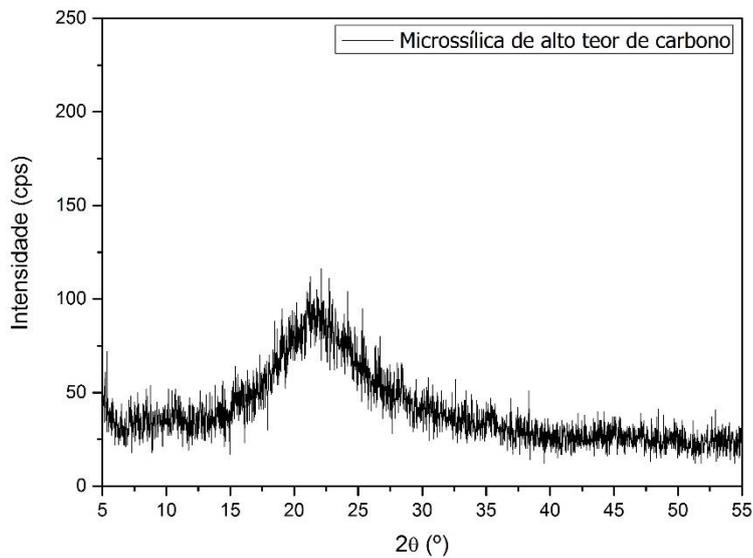


Figura 1: Difratograma da microsilica de alto teor de carbono

### 3.3. Requisitos mecânicos

Os resultados do índice de atividade pozolânica com cal e com o cimento, encontrados para as amostras de material pozolânico, estão apresentados na Figura 2.

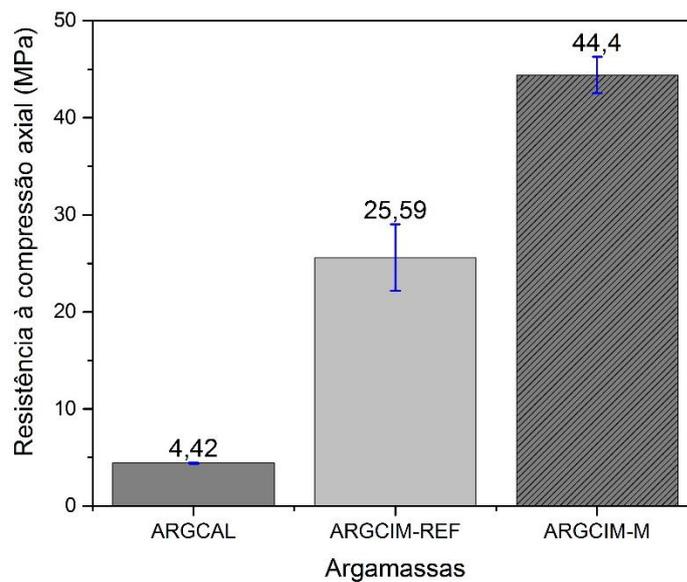


Figura 2: Resistência à compressão axial das argamassas de cal e cimento com a microsilica de alto teor de carbono

As ARGCAL apresentaram resistência média aos 7 dias de 4,42 MPa, sendo inferior a 6,0 MPa, isto é, aos requisitos da NBR 12653 <sup>(10)</sup> para que o material analisado seja considerado como pozolânico com a cal.

No difratograma da pasta de cal com a microssílica de alto teor de carbono (Figura 3) é possível verificar a ausência de picos de portlandita, o que indica a sua provável atividade pozolânica, decorrente da reação com SiO<sub>2</sub> na formação do CSH (silicato de cálcio hidratado).

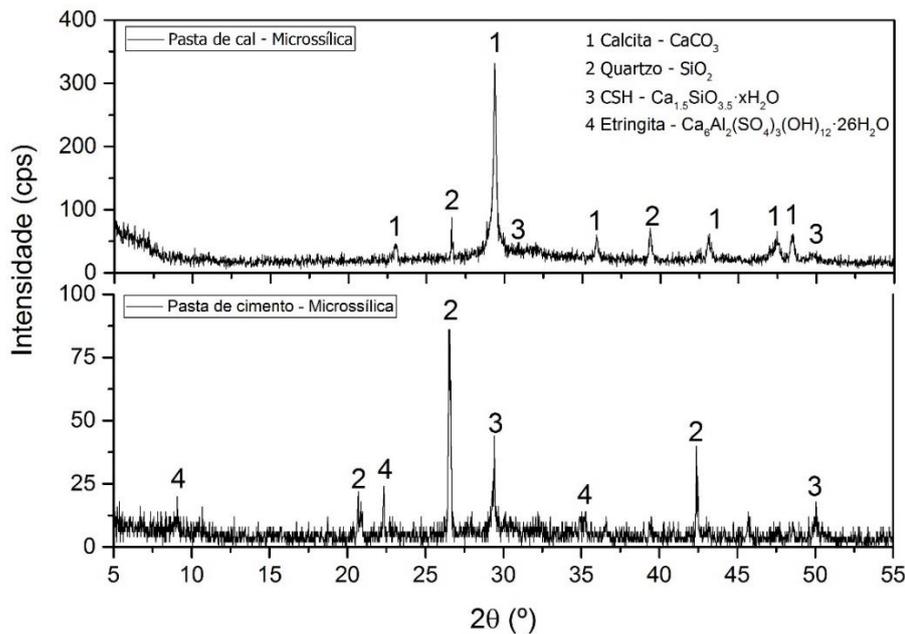


Figura 3: DRX da pasta de cal e cimento com microssílica

Deve-se ressaltar que a elevada quantidade de água requerida pela mistura da argamassa de cal com a microssílica, possivelmente, influenciou para a não evolução da resistência mecânica das argamassas. Sabe-se que a adição de microssílica melhora tanto a resistência mecânica como a durabilidade do material. Entretanto, como a sílica é constituída por um alto teor de finos implica numa grande quantidade de água requerida. Dessa forma, está adição pode ser combinada com outras para amenizar esse efeito na mistura, ou com dosagens específicas de superplastificantes que não interfiram nos resultados finais <sup>(17)</sup>.

As resistências médias obtidas pelas ARGCIM-REF foram de 25,59 MPa e de 40,40 MPa para as ARCIM-M (Figura 2), ressaltando que as amostras que apresentaram desvio relativo máximo superior a 6% foram desconsideradas no cálculo das resistências médias, assim como recomenda a NBR 7215 <sup>(16)</sup>. Dessa

forma, obteve-se um IDC de 173,5%, sendo significativamente superior ao requerido pela NBR 12653 <sup>(10)</sup>, que é de no mínimo 90%, o que corrobora com o observado no difratograma das pastas de cimento com a microssílica (Figura 3), devido a presença dos picos de CSH e etringita, responsáveis, respectivamente, pela reação pozolânica e elevada resistência mecânica.

O alto teor de sílica com comportamento amorfo e partículas extremamente finas das adições minerais proporciona melhorias na microestrutura das argamassas. Em razão do refinamento dos poros, a matriz se torna mais densa, o que contribui para a diminuição da porosidade e permeabilidade e, por consequência, fortalece a zona de transição interfacial da matriz, promovendo um ganho na resistência a compressão <sup>(18-21)</sup>.

O acréscimo na propriedade mecânica ocorre devido a formação adicional de CSH. Durante o processo de hidratação do cimento, o excesso de hidróxido de cálcio reage com a pozolana. No caso da argamassa de referência, como não ocorre esta reação, o acúmulo de hidróxido de cálcio na zona de transição enfraquece as ligações entre a pasta e o agregado, reduzindo assim a resistência mecânica em comparação com a argamassa com substituição de microssílica. Devido a lentidão das reações pozolânicas, tais melhorias tornam-se mais perceptível em idades posteriores <sup>(22)</sup>.

#### 4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar a potencialidade pozolânica da microssílica de alto teor de carbono, conclui-se que:

- A microssílica de alto teor de carbono é bastante reativa, especialmente com o cimento, justificada por sua composição química (elevado teor de SiO<sub>2</sub>) e mineralógica (perfil amorfo);
- Os resultados obtidos no estado endurecido, por meio das resistências mecânicas, demonstram que a microssílica de alto teor de carbono atinge os parâmetros mínimos para o índice de desempenho com a cal e para o índice de desempenho com o cimento;
- Tais resultados, corroboraram com os DRX's das pastas de cal e cimento, visto que houve formação de CSH.

Dessa forma, obtém-se que a microssílica de alto teor de carbono utilizada nesta pesquisa, atende os requisitos estabelecidos por norma e, portanto, pode ser considerada como um material pozolânico bastante reativo, sobretudo, em misturas com o cimento.

## 5. REFERÊNCIAS

- (1) KOTENG, D. O.; CHEN, Chun-Tao. Strength development of lime–pozzolana pastes with silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 294-300, 2015.
- (2) GRIST, Ellen R. *et al.* The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes. *Journal of Cleaner Production*, v. 93, p. 26-37, 2015.
- (3) SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, v. 41, n. 7, p. 750-763, 2011.
- (4) JUENGER, M. C. G. *et al.* Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1232-1243, 2011.
- (5) MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- (6) NOCHAIYA, Thanongsak; WONGKEO, Watcharapong; CHAIPANICH, Arnon. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, v. 89, n. 3, p. 768-774, 2010.
- (7) WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, v. 71, p. 97-109, 2016.
- (8) CARMO, JBM do; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. *Cerâmica*, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.
- (9) JAWAHAR, J. Guru *et al.* Micro and macrolevel properties of fly ash blended self compacting concrete. *Materials & Design*, v. 46, p. 696-705, 2013.
- (10) ABNT. NBR 12653: *Materiais pozolânicos — Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- (11) ABNT. NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- (12) ABNT. NBR NM 23: *Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

- (13) ABNT. NM 52: *Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2009.
- (14) ABNT. NBR 5751: *Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- (15) ABNT. NBR 5752. *Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- (16) ABNT. NBR 7215: *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- (17) NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, v. 26, n. 1, p. 317-326, 2012.
- (18) JALAL, Mostafa *et al.* Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 90-104, 2015.
- (19) SABET, Fereshteh Alsadat; LIBRE, Nicolas Ali; SHEKARCHI, Mohammad. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 175-184, 2013.
- (20) SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed; SUPIT, Steve WM. Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles. *Construction and Building Materials*, v. 99, p. 208-225, 2015.
- (21) ZHAO, Hui *et al.* The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 95, p. 66-74, 2015.
- (22) LEUNG, H. Y. *et al.* Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 369-375, 2016.

## **ABSTRAT**

*Supplementary Cementitious Materials reduce the production of clinker, which minimizes the environmental impact of cement production and the generation of industrial waste, also improve mechanical behavior and durability. Thus, this article aims to evaluate the potential use of microsilica with high content of carbon as pozzolanic material, based on the requirements of ISO 12653 (ABNT, 2015). The techniques of X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and compressive strength of mortar of lime and cement (at 7 and 28 days, respectively) were used to evaluate the pozzolanic of the microsilica as a mineral addition. The results indicated that the microsilica has a high amorphous silicon dioxide percentage structure. In the DRX could be possible to analyze the formation of CSH, justifying the good results of mechanical strength, especially with cement. Thus, the mineral admixture used in this research can be considered as a pozzolanic material.*

Key-words: Supplementary cementitious materials; pozzolanic material; microsilica.