

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE SUBPRODUTO DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA AO CONCRETO

EVALUATION OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF THE SUBPRODUCTIVE SUBSTANCE OF A STEEL INDUSTRY TO CONCRETE

I. S. O. QUEIROZ¹, N. F. RUAS FILHO², L. A. C. FINELLI³ e P. LUDVIG⁴

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Brasil.

Faculdade Vale do Gortuba, Departamento de Engenharia Civil, Brasil.

Faculdades Unidas do Norte de Minas, Departamento de Pós-Graduação, Brasil.

² FUNORTE-MG, Brasil.

³ Faculdades Unidas do Norte de Minas, Departamento de Pós-Graduação, Brasil.

⁴ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Brasil.

E-mail: isoqueiroz@gmail.com

article info

Article history:

Received 2017-09-04

Accepted 2017-11-20

Available online 2017-12-20

PALAVRAS-CHAVE: Concreto; Sustentabilidade; Silica Ativa; Resistência a Compressão Axial.

KEYWORDS: Concrete; Sustainability; Silica Fume; Resistance to Axial Compression.

RESUMO: *Os concretos tradicionais estão evoluindo tecnologicamente, fruto da pesquisa aplicada e resultado da introdução conjunta, no elenco das matérias primas básicas do concreto, de adições minerais e aditivos químicos, proporcionando Concreto de Alta Resistência (CAR) e Concreto de Alto Desempenho (CAD). A sílica ativa, um dos materiais cimentícios suplementares mais utilizados na confecção do CAR e do CAD, é um subproduto da fabricação de silício metálico, das ligas de ferrosilício e de outras ligas de silício. Este presente trabalho apresenta caracterização do subproduto (sílica ativa) em relação à sua morfologia, análise química qualitativa, resultados para determinar a influência no comportamento deste material como adição mineral na propriedade mecânica de resistência à compressão axial, trabalhabilidade e acabamento no concreto, a fim de tornar a indústria da construção em concreto mais sustentável. Trata-se de um estudo experimental, exploratório, descritivo e análise quantitativa. A população é composta por corpos de prova de concreto moldados a partir dos materiais convencionais somados a adição da sílica ativa reaproveitada da indústria siderúrgica. A amostra é constituída por 50 corpos de prova de concreto moldados em laboratório, com 2 (duas) formulações, uma com adição de 5% de sílica ativa em peso de cimento e outra sem adição de sílica ativa, sendo a referência de traço empírico comumente utilizado na região de Montes Claros-MG para o f_{ck} de 25 MPa. Os resultados apontam a melhoria do acabamento dos corpos de prova, aumento significativo da resistência à compressão axial e relativa diminuição na trabalhabilidade.*

ABSTRACT: *The traditional concretes are evolving technologically, fruit of the applied research and result of the joint introduction, in the list of the basic raw materials of concrete, of mineral additions and chemical additives, providing High Resistance Concrete (HRC) and High Performance Concrete (HPC). Silica Fume, one of the most used cementitious materials used in the manufacture of HRC and HPC, is a by-product of the manufacture of silicon metal, steel-silicon alloys and other silicon alloys. This work presents characterization of the by-product (active silica) in relation to its morphology, qualitative, chemical analysis and results to determine the influence on the behavior of this material as mineral addition in the mechanical properties of*

resistance to axial compression, in order to make the concrete construction industry more sustainable. This is an experimental, exploratory, descriptive and quantitative analysis. The population is composed of concrete specimens molded from conventional materials plus the addition of active silica reused from the steel industry. The sample consist of 50 molded concrete specimens, molded in the laboratory with 2 (two) formulations, one containing 5% silica fume by weight of cement and one without silica fume addition, the empirical trace reference being commonly used in the region of Montes Claros-MG for the f_{ck} 25 MPa. The results indicate the improvement of the finishing of the specimens, a significant increase in the axial compressive strength and a decrease in the workability.

1. INTRODUÇÃO

O uso de novas tecnologias na execução das estruturas de concreto pode levar a ganhos diretos, como a redução do volume de concreto utilizado, redução do consumo de aço e maior velocidade de execução, demandando menos homens/hora, e ganhos indiretos, como redução de impactos ambientais, maior flexibilidade de projeto e redução da seção das peças (SILVA, 2013).

As estruturas de concreto devem atender aos requisitos mínimos de qualidade, sendo estas: capacidade resistente (segurança à ruptura); desempenho em serviço (capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil); e durabilidade (resistir às influências ambientais previstas), durante sua construção e serviço, e aos requisitos adicionais definidas em projeto, segundo a Norma Brasileira (NBR) 6118:2014 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014).

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um material entendido como uma evolução tecnológica dos concretos tradicionais, fruto da pesquisa aplicada e resultado da introdução conjunta, no elenco das matérias primas básicas do concreto, de adições minerais e aditivos químicos. O desenvolvimento destes materiais, principalmente a descoberta da extraordinária ação de dispersão dos aditivos superplastificantes, permitem a redução de água em relação à quantidade de cimento, e é diretamente responsável pelo espetacular aumento da resistência à compressão dos concretos (AÏTCIN, 1995).

A primeira menção sobre o termo CAD foi realizada por Mehta e Aïtcin (1990). Os autores estabeleceram os princípios gerais que regem esse tipo especial de concreto e as principais características que o diferenciam do, até então, denominado Concreto de Alta Resistência (CAR). Este estudo é considerado um ícone, uma vez que, até hoje, são empregados, com poucas modificações, os fundamentos nele indicados.

De acordo com Aïtcin (2000), o que era conhecido como CAR no final da década de 1970 é agora referido como CAD porque se descobriu que é muito mais do que simplesmente mais forte. O American Concrete Institute (ACI, 1998) define o CAD como um concreto especialmente projetado, cuja uma ou mais características foram melhoradas por meio da seleção dos materiais componentes e proporções de mistura. Note-se que esta definição não abrange uma única, mas uma família de produtos de concreto de alta tecnologia cujas propriedades adaptadas para atender a necessidades específicas de engenharia, tais como alta trabalhabilidade, resistência à compressão de 30-40 MPa em 24 horas, alta tenacidade e alta durabilidade às condições de exposição.

Adições minerais são os materiais com atividade pozolânica que são inseridos na mistura, tipo: pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa e outras (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). A respeito das adições minerais, serão abordados aspectos relacionados apenas à sílica ativa, por ser a adição mineral utilizada na pesquisa. Segundo Mehta (1994) a sílica ativa é

um composto oriundo do processo de produção das indústrias de ferro silício e silício-metálico. Processo onde, o silício é produzido em grandes fornos elétricos, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas resultando na produção de monóxido de silício gasoso (SiO) que se condensa em temperaturas inferiores formando o dióxido de silício (SiO_2).

Segundo Aïtcin (2000), os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto são devido às suas características peculiares que tornam a sílica um material pozolânico muito reativo, devido ao seu elevado teor de SiO_2 , seu estado amorfo e a sua extrema finura, com partículas que podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento, quando estas estão desfloculadas na presença de uma dosagem adequada de superplastificantes (Figura 1).

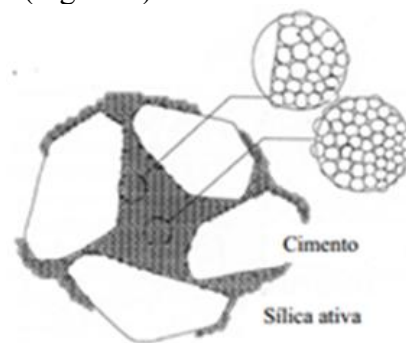


Figura 1 - Efeito da Sílica Ativa, Aïtcin (2000, p. 162).

A sílica ativa, um dos materiais cimentícios suplementares descritos por Aïtcin (2000), é um subproduto da fabricação de silício metálico, das ligas de ferrosilício e de outras ligas de silício e é composta principalmente de sílica (SiO_2). O teor de SiO_2 varia de acordo com o tipo de liga produzido, variando entre 75 a 90 % o teor de SiO_2 . Do ponto de vista estrutural, é composta principalmente de sílica vítrea, como mostrado na Figura 2, representado pelo difratograma de raios X, sendo que, quanto mais achatada for a crista observada, mais amorfa será a sílica ativa.

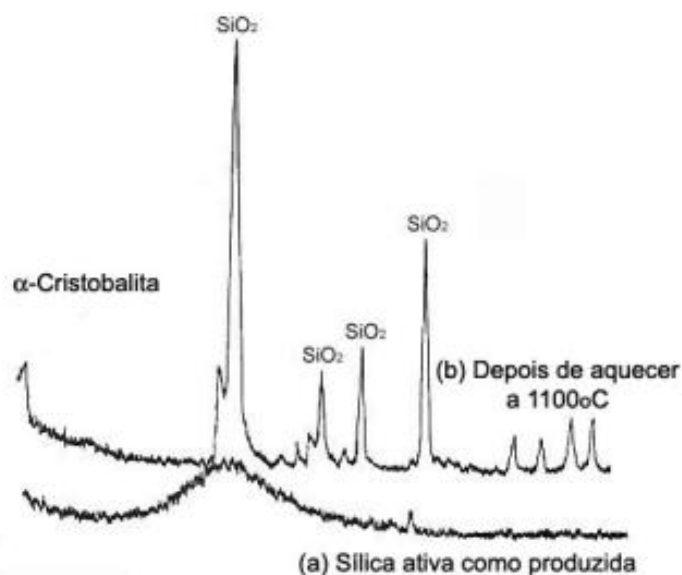


Figura 2 - Difratograma de raios X da sílica ativa (a) na forma como produzida (amorfa) e (b) depois de aquecida 1100° C (cristalina), Aïtcin (2000, p. 160)

As partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, do ponto de vista físico, com diâmetros variando de menos de 0,1 μm até 1 μm ou 2 μm , de tal forma que a esfera média de sílica ativa é 100 vezes menor do que a média das partículas de cimento, com superfície específica na ordem de 20.000 m^2/kg (AITCIN, 2000).

Quando a maioria dos sistemas antipó foi projetada, as indústrias do silício e do ferrosilício consideravam a sílica ativa como um rejeito e um material problemático, com nenhum valor comercial, de maneira que frequentemente a sílica ativa produzida por diferentes fornos, produzindo diferentes ligas, é coletada numa única “câmara de filtros”. (AITCIN, 2000).

Por uma variedade de razões, a indústria de construção de concreto não é sustentável. Primeiro, ela consome grandes quantidades de materiais virgens. Em segundo lugar, o concreto é de cimento Portland, cuja produção é um dos principais contribuintes para o aquecimento global e mudanças climáticas. Em terceiro lugar, muitas estruturas de concreto sofrem por apresentar durabilidade razoável perante os recursos que indústria de concreto proporciona (MEHTA, 2004).

Sendo assim, ao adicionar sílica ativa ao concreto, as três questões de sustentabilidade sugeridas por MEHTA (2004), são abordadas, permitindo a indústria de construção de concreto se tornar mais sustentável.

O controle de qualidade da sílica ativa, segundo Vernet e Noworyta, 1992 *apud* Aïtcin, 2000, deve ser executado, dentre outros, da seguinte maneira:

- Medir o teor de sílica ativa, de álcali e de carbono;
- Fazer um difratograma de raios X para verificar se ela não contém partes cristalinas em demasia.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da adição do subproduto de uma indústria siderúrgica no concreto. O objetivo específico é comparar, entre um traço de referência e o traço com adição de 5% de sílica ativa, as seguintes propriedades:

- A trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco;
- Inspeção visual no estado fresco e endurecido;
- Resistência à compressão axial do concreto endurecido nas idades 3, 7, 28 e 56 dias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho foram: cimento Portland CII E - 32, agregados (areia lavada natural e brita 01), água da rede de abastecimento (COPASA) e o subproduto de siderúrgica (sílica ativa).

As composições granulométricas dos agregados (NM 248:2001) foram determinadas no laboratório da FUNORTE-MG, campus JK, em Montes Claros-MG. O agregado miúdo apresentou dimensão máxima característica de 1,2mm, módulo de finura 1,84, apresentada na Tabela 1 e massa unitária de 1.540 kg/m^3 .

Tabela 1 - Composição granulométrica do agregado miúdo (NBR NM 248:2003).

PENEIRAS		1° DETERMINAÇÃO		2° DETERMINAÇÃO		MÉDIA	
N°	mm	Peso Retido (g)	% RETIDA	Peso Retido (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
3/8"	9,5	0	0,0	0	0,0	0	0
1/4"	6,3	0	0,0	0	0,0	0	0
4	4,8	0	0,0	0	0,0	0	0
8	2,4	2	0,4	2	0,4	0	0
16	1,2	8	1,6	8	1,6	2	2
30	0,6	120	23,6	102	20,4	22	24
50	0,3	174	34,3	194	38,8	37	61
100	0,15	186	36,6	178	35,6	36	97
Fundo	<0,15	18	3,5	16	3,2	3	100
TOTAL		508	100	500	100	100	

O agregado graúdo, com dimensão máxima característica de 25mm, apresentou módulo de finura 7,12 apresentada na Tabela 2, e massa específica de 1.640kg/m^3 .

Tabela 2 - Composição granulométrica do agregado graúdo. (NBR NM 248:2003)

PENEIRAS		1° DETERMINAÇÃO		2° DETERMINAÇÃO		MÉDIA	
N°	mm	Peso Retido (g)	% RETIDA	Peso Retido (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
1.1/2"	38	0	0	0	0	0	0
1.1/4	32	0	0	0	0	0	0
1"	25	12	0,2	0	0,0	0	0
3/4"	19	2144	42,8	1864	37,2	40	40
1/2"	12,5	2240	44,7	2210	44,1	44	85
3/8"	9,5	328	6,6	484	9,7	8	93
1/4"	6,3	0	0,0	0	0,0	0	93
4	4,75	246	4,9	386	7,7	6	99
8	2,4	0	0,0	0	0,0	0	99
16	1,2	0	0,0	0	0,0	0	99
30	0,6	2	0,0	42	0,8	0	99
50	0,3	0	0,0	0	0,0	0	99
100	0,15	0	0,0	0	0,0	0	99
Fundo	<0,15	34	0,7	24	0,5	1	100
TOTAL		5006	100	5010	100	1	

A sílica ativa utilizada foi obtida por meio de uma amostra de subproduto de siderúrgica de ligas a base de silício, a seguir, na Figura 3, é apresentado o Difractograma de raios X, processado pelos autores, no laboratório de análises do CEFET-MG, Campus II, em Belo Horizonte - MG.

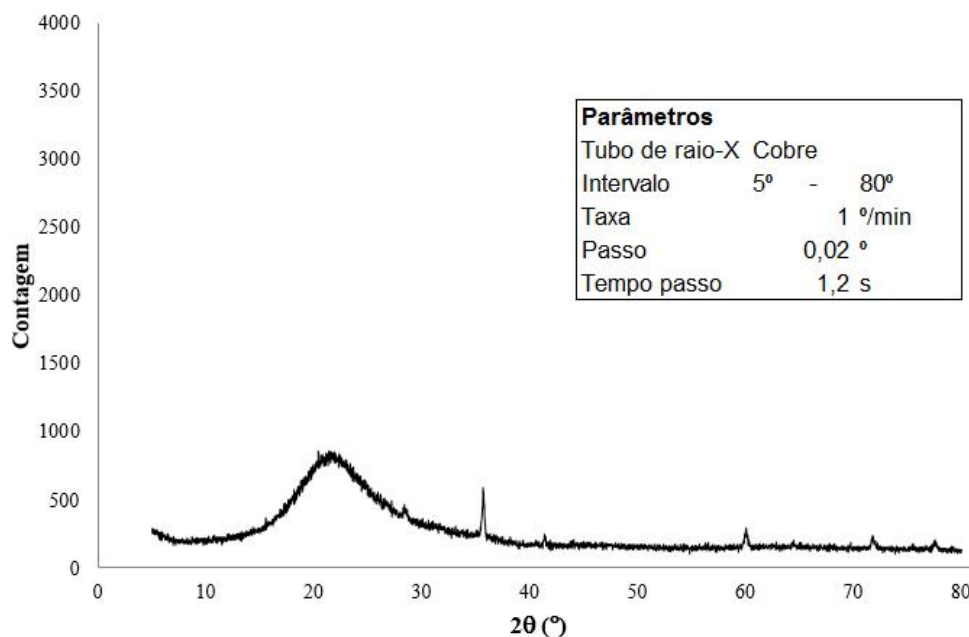


Figura 3 - Difratoograma de raios X em amostra e parâmetros de análise.

A análise química qualitativa da amostra de sílica ativa, caracterizada por meio de espectroscopia FRX (Fluorescência de Raios X), pelo CITSF – Centro de Inovação e Tecnologia SENAI FIEMG está apresentada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Análise química qualitativa em amostra	
Composição Química	Porcentagem
SiO ₂	ordem de 95%
Al ₂ O ₃ , CaO, K ₂ O	<5% - >1%
P ₂ O ₅ , F ₂ O ₃ , SO ₃ , MnO, SrO, ZnO	<1%

A amostra de subproduto analisada é proveniente dos filtros de uma usina de ligas a base de silício, um material problemático devido seu grande volume e a necessidade de uma destinação adequada, que pode ser explorada comercialmente, o que mudaria o cenário tanto economicamente quanto ambientalmente.

O traço empírico de referência está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Traço empírico de referência para 1m³ de concreto fresco, Calculador Caldas Branco (1974)

Traço em Volume	Traço em Massa	Relação a/ag	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Areia (kg/m ³)	Consumo de Brita 01 (kg/m ³)	Consumo de Água (kg/m ³)
1:1,5:3	1:1,63:2,94	0,49	387	409	918	189

Foram utilizadas duas dosagens, sendo uma de referência seguindo o traço empírico e outro com adição de 5% de sílica ativa, mantendo a mesma relação água/aglomerante conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade de materiais utilizados na confecção dos CP's

Traços	a/ag	Sílica Ativa (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 01 (kg)	Água (kg)
Traço Empírico (Referência)	0,49	-	18,13	24,18	59,30	8,92
Traço com adição (5% de sílica ativa)	0,49	0,91	18,13	24,18	59,30	9,37

A produção do concreto, o *slump test* (abatimento), a moldagem dos CP's, o ensaio de resistência à compressão e a inspeção visual foram realizadas no Laboratório de Materiais das Faculdades Integradas do Norte de Minas - FUNORTE, no Campus JK, em Montes Claros – MG e a Figura 4 apresenta alguns materiais constituintes.

Os equipamentos utilizados na realização do experimento para análise das propriedades do CAD foram: prensa hidráulica Pavitest I 3025 B; balança Toledo 3400/5; betoneira Menegotti 120L TOP 1000; balança de precisão Marte AS2000C; Estufa FANEM - Mod. A-HT; moldes cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, segundo ABNT NBR 5738:2015; recipientes plásticos de forma prismática; molde metálico tronco-cônico de enchimento; placa metálica de base 500 x 500 x 3 mm; haste metálica com extremidade semiesférica de 16mm; trena de alumínio 5m; concha metálica; colher de pedreiro; óleo mineral desmoldante; becker graduado 250ml; pincel de pintura 1/2".



Figura 4 - Materiais utilizados na realização do trabalho

A produção do concreto com traço empírico de referência ocorreu no dia 31/01/2017 e com o traço com adição de 5% de sílica ativa ocorreu no dia 01/02/2017, sendo o volume 1,5 vezes o necessário, conforme NM 33:1998.

A produção do traço empírico de referência foi executada na betoneira e se iniciou com a deposição do agregado graúdo e adição de cerca de 30% da água, seguida de rotação durante 2 minutos, foi adicionado o cimento, com 1 minuto de rotação, e em seguida o agregado miúdo e o restante da água em duas etapas com a betoneira em rotação durante 2,5 minutos.

A produção do traço com adição de 5% de sílica ativa foi executada na betoneira e se iniciou com a deposição do agregado graúdo e adição de cerca de 30% da água, com rotação durante 2 minutos, em seguida foi adicionado o cimento, com 1 minuto de rotação, seguida da adição da sílica ativa e rotação de 1 minuto, e em seguida o agregado miúdo e o restante da água em duas etapas com a betoneira em rotação durante 2,5 minutos.

Após a verificação da homogeneidade do concreto em estado fresco, foi procedido o ensaio de abatimento (*Slump Test*) e posterior moldagem de 25 (vinte e cinco) corpos de prova cilíndricos 10 x 20, conforme NBR 5738:2015 em cada produção, sendo que, após 24h de cura no molde, foi disposto em tanque de imersão e curado até as idades de rompimento.

Os CP's foram rompidos à compressão axial nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias, seguindo os requisitos da NBR 5739:2007, sendo que, para cada traço e idade respectiva, foram utilizados 6 CP's.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a produção do concreto, foi avaliado o aspecto no estado fresco, que apresentou uma boa consistência e homogeneidade para os 02 (dois) traços produzidos, e também foi executado o ensaio de abatimento por meio do tronco cone, sendo que o traço de referência obteve 8,0 cm de abatimento (Figura 5) e o traço com adição de 5% de sílica ativa obteve 6,1 cm (Figura 6) de abatimento, uma perda de trabalhabilidade de 23,75%, considerável, mas ainda recomendado para estruturas como pilares e vigas e dentro da trabalhabilidade esperada de 7 ± 2 cm (HELENE e TERZIAN, 1992)



Figura 5 - Abatimento para concreto de referência



Figura 6 - Abatimento para concreto com adição de 5% de Sílica Ativa

A Figura 7 apresenta os CP's moldados após as 24h de cura no molde e preparados para serem retirados e imersos em tanque para cura por imersão.



Figura 7 - Moldagem dos corpos de prova de concreto

Após o período de cura, os CP's foram retirados do tanque úmido (imersão) e foram lavados com água corrente para melhor visualização da superfície dos mesmos e pôde-se perceber por meio da inspeção visual que eles apresentaram uma superfície regular e lisa, sem rugosidades e brocas perceptíveis, conforme figura 8, e, o acabamento do concreto com adição de 5% de sílica ativa apresentou um melhor acabamento, mais liso e contínuo, aparentemente com uma maior densidade e menor quantidade de poros.



(a) (b)
 Figura 8 - CP referência (a) e CP com adição da sílica ativa (b)

Posteriormente, em suas respectivas idades de estudo, 3, 7, 28 e 56 dias, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial conforme NBR 5739:2007 em Prensa Hidráulica de Ruptura. Os resultados obtidos da resistência média à compressão axial e seus respectivos desvios padrão, para o traço de referência e adição de 5% de sílica ativa, estão apresentados a seguir na Figura 9.

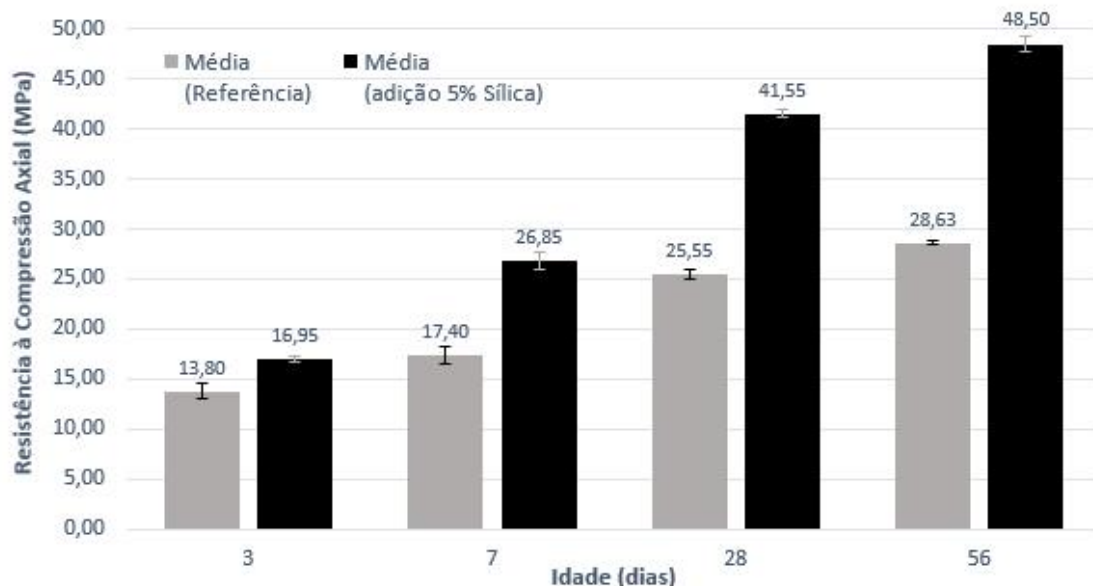


Figura 9 - Gráfico de resistência média à compressão dos corpos de prova x idade

A sílica ativa, por apresentar elevada finura e ser constituída basicamente por sílica amorfa, possui ação química como material pozolânico de alta reatividade e reage rapidamente com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional. Como resultado, obtém-se o refinamento da estrutura de poros e

a densificação da matriz cimentante do concreto (MEHTA e AÏTCIN, 1990). Neville (1997) explica o efeito físico na zona de transição entre pasta e o agregado, cuja capacidade da partícula fina da sílica ativa em se posicionar nesta região, facilita o arranjo do agregado na mistura, favorecendo a compacidade.

A resistência média à compressão axial do traço com adição de 5% de sílica ativa foi superior em todas as idades, ficando cada vez mais evidente essa diferença quanto mais avançada a idade. A Tabela 6 apresenta as resistências médias à compressão axial, os desvios padrão e a percentagem de acréscimo de resistência pela razão entre a resistência média do traço com 5% de sílica ativa e a resistência média do traço de referência.

Tabela 6 - Resistências médias à Compressão Axial, desvios padrão e percentual de acréscimo de resistência

dias	MPa				%
Idade	Média (Referência)	Desvio Padrão (Sd)	Média (adição 5% Sílica)	Desvio Padrão (Sd)	Adição 5%/Referência
3	13,80	0,76	16,95	0,29	22,8%
7	17,40	0,80	26,85	0,86	54,3%
28	25,55	0,48	41,55	0,38	62,6%
56	28,63	0,17	48,50	0,70	69,4%

A NBR 6118:2014 permite o cálculo da resistência característica do concreto, de acordo com o tipo de cimento utilizado e a idade, de acordo com a Equação 1 a seguir:

$$F_{ckj} = \exp \{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \quad (1)$$

onde:

s = 0,38 para concreto de cimento CPIII e IV;

s = 0,25 para concreto de cimento CPI e II;

s = 0,20 para concreto de cimento CPV-ARI;

t é a idade efetiva do concreto, expressa em dias.

O cálculo do F_{ckj} para os traços de referência e com adição de 5% de sílica ativa foi por meio da Equação 2:

$$F_{ckj} = X - 1,65 Sd \quad (2)$$

onde:

X = média;

Sd = desvio padrão.

Os resultados comparativos das curvas de crescimento de resistência à compressão axial ao passar do tempo do F_{ckj} utilizando o cimento CPII, do F_{ckj} do traço de referência e do F_{ckj} do traço com adição de 5% de sílica ativa, nas respectivas idades, estão descritos na Figura 10.

O crescimento de resistência F_{ckj} do traço de referência em relação ao F_{ckj} calculado de acordo com a NBR 6118:2014 foi bastante similar, acompanhando a curva. Já os resultados com adição de 5% sílica ativa desempenharam um melhor comportamento como na curva nos 7 dias e evoluindo com o passar do tempo.

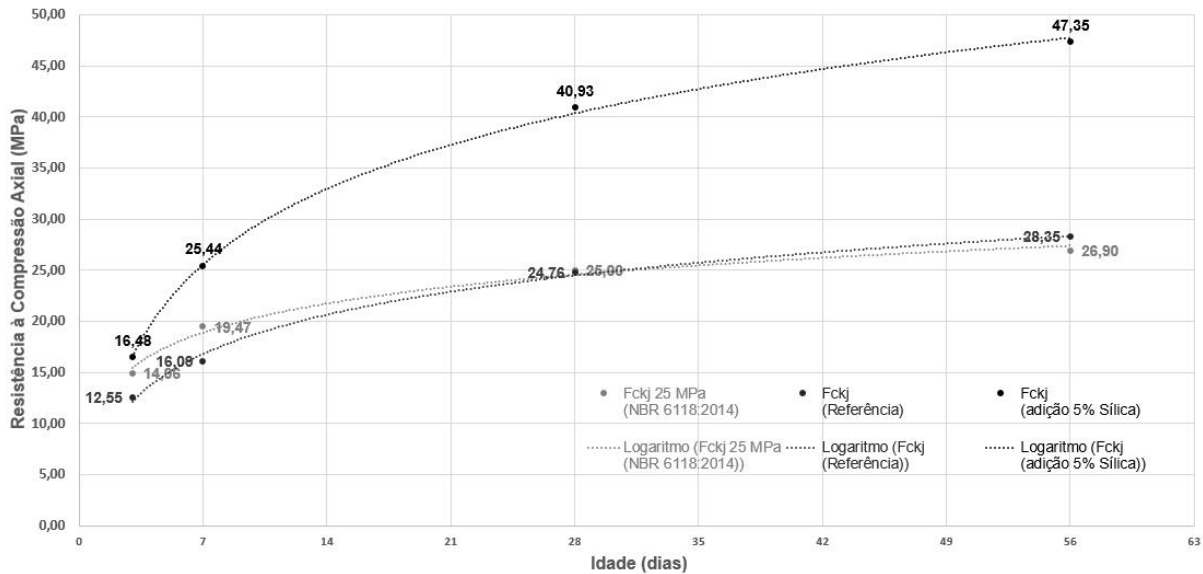


Figura 10 - Curvas de crescimento de resistência à compressão axial

Quanto ao tipo de ruptura, os CP's ensaiados foram classificados, segundo o Anexo A da NBR 5739:2007, como Tipo C - Colunar com formação de cones. A Figura 11 representam corpos de prova rompidos neste ensaio.

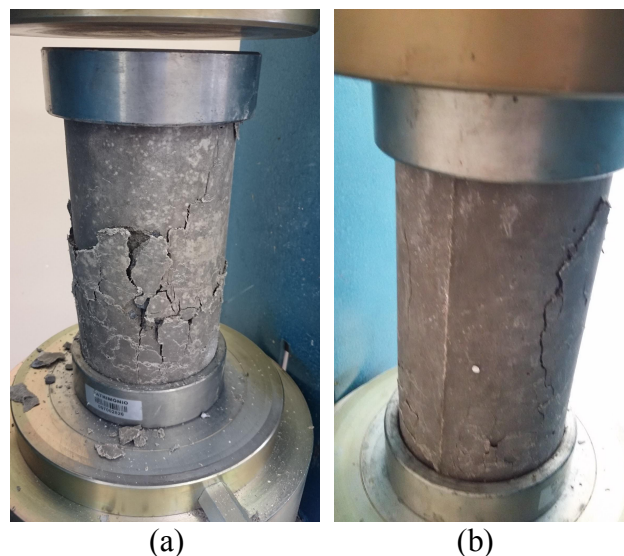


Figura 11 – CP concreto referência (a) e CP concreto com adição de 5% de sílica ativa (b), rompidos à compressão axial

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise da adição de 5% de sílica ativa à um traço empírico de concreto de 25 MPa de referência e uma comparação com a curva do F_{ckj} (resistência característica do concreto à compressão a j dias de idade) de um concreto de 25 MPa de acordo com a NBR 6118:2014, a trabalhabilidade por meio do ensaio do *slump test* (abatimento) e a aparência por meio da inspeção visual do concreto em estado fresco e

endurecido.

O aspecto em estado fresco foi homogêneo para os dois traços produzidos, mas, durante o *slump test* o concreto com adição de 5% de sílica ativa demonstrou uma melhor regularização, aparentemente devido à qualidade da argamassa.

Já no estado endurecido, o acabamento do concreto com adição de 5% de sílica ativa apresentou um melhor acabamento, mais liso e contínuo, aparentemente com uma maior densidade e menor quantidade de poros.

A trabalhabilidade diminuiu, conforme esperado, pois a microssílica apresenta uma superfície específica de aproximadamente 20.000 m²/kg, o que promove um maior consumo da água disponível. No traço empírico de referência o abatimento foi de 80mm e no traço com adição de 5% de sílica ativa foi de 61mm, um decréscimo de 23,75%, mas mesmo assim, com trabalhabilidade suficiente para estruturas, levando em consideração que não foram utilizados aditivos químicos redutores de água.

Os resultados da média da resistência à compressão axial do concreto com adição de 5% de sílica ativa em relação à comparação com o traço de referência demonstraram um incremento de bastante considerável, sendo de 22,8%, 54,3%, 62,6% e 69,4%, nas respectivas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.

Sendo assim, a utilização como adição mineral deste subproduto apresenta resultados numéricos e qualitativos bem melhores que o de referência, sendo indicado sua utilização para melhoria de resistência e de acabamento.

5. AGRADECIMENTOS

Aos técnicos do laboratório da FUNORTE-MG, CEFET-MG e SESC FIEMG, aos professores orientadores e àqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 667p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R-92 (Reapproved 1997). **State of the art report on high strength concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 33: **Concreto - Amostragem do concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: **Informação e documentação - Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

- CALDAS BRANCO, Abílio de Azevedo. **Calculador Caldas Branco**: Régua prática de traços de concreto em peso ou volume. Rio de Janeiro. 1974
- HELENE, P.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 350 p.
- MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- MEHTA, P. K.; AÏTCIN, J.-C. **Principles underlying production of high-performance concrete**. Cement & Concrete Aggregates, Philadelphia: American Society for Testing Materials, p. 70-78, winter 1990.
- MEHTA, P. K. **High-Performance, High-Volume fly ash concrete for sustainable development**. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. Iowa State University, 2004. p. 3-14 Disponível em: <<http://www.ctre.iastate.edu/PUBS/sustainable/mehtasustainable.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2º ed. São Paulo: PINI, 1997.
- SILVA, Pedro Luiz Sampaio Tomé. **Análise Estrutural e Econômica do uso de Concreto de Alto Desempenho em Pilares de Edifícios**. 2013. Monografia (Conclusão de Curso) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008173.pdf>> Acesso em: 26 mar. 2017.
- TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON, 2011.