

DOSAGEM DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM SÍLICA ATIVA EM SUSPENSÃO

DOSAGE OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH ACTIVE SILICA IN SUSPENSION

ALBERTO ANDRADE DE CASTRO¹; CARLOS DE SOUZA LARANJEIRA²; IGOR
MATHEUS CARVALHO SANTOS³; SÁVIO SERRA DO VALLE⁴; WELLENSON
NASCIMENTO PINHEIRO⁵; ERLUCIVÂNIA BUENO DA SILVA⁶.

RESUMO

O concreto é o segundo material mais consumido do mundo, com isso, surgiram importantes avanços nos estudos e pesquisas para o melhoramento das tecnologias empregadas nas estruturas de concreto, a fim de se ter um melhor entendimento acerca do comportamento mecânico do concreto. Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo verificar e analisar a influência da substituição de parte do volume da sílica ativa densificada, por sílica ativa em suspensão, submetendo os corpos de prova ao ensaio de compressão para verificar o ganho de resistência nas idades de 07, 14 e 28 dias em um concreto de ultra alto desempenho (CUAD). Sendo assim, a pesquisa é de cunho exploratório de análise literal, dispondo de procedimentos experimentais adquiridas em laboratório, e tendo como método o indutivo. De acordo com os resultados, a substituição de 100% da sílica ativa densificada por sílica ativa em suspensão no CUAD proporcionou um ganho de aproximadamente 8,8% na resistência à compressão, na idade de 28 dias em comparação com o CUAD com 50% de sílica ativa densificada.

Palavras-chave: Concreto de ultra-alto desempenho. CUAD. Sílica ativa densificada. Sílica ativa em suspensão.

ABSTRACT

Concrete is the second most consumed material in the world, with that, important advances have been made in studies and research to improve the technologies used in concrete structures, in order to have a better understanding of the mechanical behavior of concrete. Thus, the present research aims to verify and analyze the influence of replacing part of the volume of densified silica fume, by silica fume in suspension, subjecting the specimens to the compression test to verify the resistance gain at ages 07, 14 and 28 days in an ultra high performance concrete (CUAD). Therefore, the research is of an exploratory nature of literal analysis, using experimental procedures acquired in the laboratory, and using the inductive method. According to the results, the replacement of 100% of the densified silica fume by silica fume in suspension in the CUAD provided a gain of approximately 8.8% in the compressive strength, at the age of 28 days compared to the CUAD with 50% of densified silica fume.

Keywords: Ultra high performance concrete. UHPC. Densified silica fume. Suspended silica fume.

¹ Graduando em engenharia civil na FacUnicamps. E-mail: albertoandrade00@hotmail.com

² Graduando em engenharia civil na FacUnicamps. E-mail: carloscpu81@gmail.com

³ Graduando em engenharia civil na FacUnicamps. E-mail: igor.gyn16@gmail.com

⁴ Graduando em engenharia civil na FacUnicamps. E-mail: saviovalle6@gmail.com

⁵ Graduando em engenharia civil na FacUnicamps. E-mail: wellenson.pinheiro@gmail.com

⁶ Orientadora. Mestra e Engenheira civil. E-mail: erlucivania.silva@facunicamps.edu.br

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Concreto de ultra-alto desempenho (CUAD)	4
2.2	Composição do concreto de ultra-alto desempenho	6
2.2.1	Tipos e granulometrias dos materiais	6
2.3	Sílica ativa	7
2.4	Sílica ativa em suspensão	9
3	METODOLOGIA	10
3.1	Materiais utilizados	10
3.1.1	Cimento	10
3.1.2	Sílica Ativa (ELKEN 920 D)	11
3.1.3	Sílica Ativa em Suspensão	11
3.1.4	Agregados	13
3.2	Processo de mistura dos materiais	14
3.3	Ensaio no estado fresco	18
3.4	Ensaio no estado endurecido	19
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	20
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
6	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A revista OE (2012) apontou que o concreto é o segundo material mais consumido do mundo, perdendo apenas para a água. Tendo em vista isso, o desenvolvimento de novos compostos cimentícios com características e propriedades diferentes, e melhores do que já se tem no mercado, faz com que diversas pesquisas sejam realizadas visando o melhoramento das tecnologias empregadas nas estruturas de concreto na construção civil, buscando concretos com maiores resistências, economia e durabilidade (SIMONETTI, 2019).

Surge, então, na década de noventa, as investigações e criações desses tipos de concreto, onde basicamente surgiu após uma necessidade específica onde o concreto convencional não atenderia de forma segura (TUTIKIAN, 2007), o que culminou no desenvolvimento da pesquisa acerca do concreto conhecido como de alto desempenho (CAD) pelos pesquisadores Mehta e Aïtcin, tendo esse concreto em suas propriedades uma elevada resistência mecânica quando a edificação atinge uma certa idade útil, controle de retração, elevada durabilidade e controle do calor de hidratação (CHRIST, 2014).

Na mesma década de noventa, agora com os pesquisadores Richard e Cheyrezy (1995), o concreto de ultra-alto desempenho (CUAD), que primeiramente foi chamado de Concreto de Pós Reativos (CPR), por apresentarem em sua composição materiais bem finos, como os pós. O CPR possuía alta resistências à compressão, podendo chegar até 200 MPa através de cura térmica e cura submersa (ZANNI *et al.*, 1996), elevada durabilidade e tenacidade, tendo em sua composição agregados com diâmetros máximos de 0,2 a 0,3 mm não possuindo agregados graúdos, criando uma mistura homogênea de areia, pó de brita e ligante.

Para obter concretos com melhores propriedades, muitas vezes, são utilizados aditivos em suas misturas, esses aditivos fornecem ao concreto materiais de diferentes propriedades que podem sofrer alterações químicas através de reações com produtos de hidratação do concreto como as pozolanas, e aqueles que podem ser simplesmente preenchidos por vazios de materiais encontrados em concreto, como enchimento. Um desses materiais pozolânicos é a sílica ativa, ou microssílica, que reage com as partículas produzidas pela hidratação dos componentes do cimento, alterando quimicamente e fisicamente a microestrutura da pasta, melhorando a zona de transição e assim também o intervalo entre a matriz e a combinação agregada (BROOKS; NEVILLE, 2013).

A presente pesquisa tem como objetivo geral verificar a influência da substituição de parte do volume da sílica ativa densificada por sílica ativa em suspensão, na resistência à compressão axial de um traço de CUAD.

Os objetivos específicos desse texto são:

- Dosar três traços de CUAD, sendo um de referência baseado em pesquisas anteriores com apenas sílica ativa densificada da marca ELKEM 920 D e outros dois traços substituindo 50 % e 100 % da sílica ativa densificada por sílica ativa em suspensão CENTRILIT FUME S.
- Submeter corpos de prova cilíndrico de 5 x 10 cm a cura submersa e ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 07, 14 e 28 dias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste item serão apresentadas definições do CUAD e pesquisas relacionadas, assim como serão abordados também os benefícios da incorporação da sílica ativa no concreto.

2.1 Concreto de ultra-alto desempenho (CUAD)

A construção civil busca diariamente tecnologias que possam contribuir para seu desenvolvimento, tendo como objetivo estruturas duráveis com menor peso próprio, maior resistência, aproveitando ao máximo as propriedades de cada material.

Os primeiros materiais a surgir compostos de agregados reduzidos visando uma elevada resistência foram o DSP (*Densified with Small Particles*, Densificado com Partículas Pequenas) e o MDF (*Macro Defect Free*, Livre de Macros Defeitos), que foi descoberto segundo Aïtcin (2000), entre 1972 e 1973, por Brunauer. Esse concreto que poderia resistir a compressões de até 200 MPa, na sua composição utilizava partículas finas, com adições elevadas de minerais e de aditivos superplastificantes, devendo se trabalhar com a relação água/cimento na ordem de 0,10 a 0,20 em massa. (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

O CPR tem sido o material mais estudado e utilizado entre os CUAD (TUTIKIAN *et al.*, 2011), e derivou-se de pesquisas realizadas por Pierre Richards na França, ex-diretor da empresa francesa Bouygues, em 1990 a quem foi acreditado inventor desse tipo específico de concreto. Em conjunto com as empresas, Lafarge e Rhodia continuaram com os estudos, a

adição de micro fibras contribuiu para melhoria das propriedades do concreto, logo foi patenteado como Ductal, levando ao nome de Concreto de Pós Reativos (CPR), tendo uma aparência de argamassa pela granulometria reduzida, porém, conhecido ainda pelo termo “concreto” pela relação do seu alto desempenho e utilização principalmente em peças estruturais.

De acordo com Aïtcin (2008), CPR segue três princípios básicos:

- A homogeneidade é aumentada quando se elimina as partículas com maior espessura, utilização balanceada de areia para evitar o contato entre si na pasta de cimento endurecida, melhor propriedades mecânicas devido à hidratação e ausência da zona de transição pasta de cimento e agregados;
- Melhor compactidade devido às dimensões reduzidas dos agregados da mistura, e pelo endurecimento comprimido quando possível;
- Hidratação por tratamento de calor refinando a microestrutura do concreto;

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é um exemplo da constante busca de métodos mais eficientes para a construção civil, buscando resistência e viabilidade econômica, podendo ser considerado como evolução dos CAD (concreto de alto desempenho). O CUAD é um compósito à base de cimento, com baixo teor de água, relação *a/c* ente 0,15 e 0,28 (ABBAS *et al.*, 2015), com resistência à compressão de 150 MPa e resistência à tração de 6,2 MPa (GRAYBEAL, 2009). No entanto, de acordo com (HUANG *et al.*, 2017) todo concreto com uma resistência acima de 120 MPa já pode ser considerado como um concreto de ultra alta desempenho, mas não se tem um consenso sobre qual idade o CUAD atinge essa resistência, em várias pesquisas como a de Christ (2019) a resistência é atingida após os 90 dias. Vários países como Estados Unidos, Alemanha, Canadá, França e Austrália adotam o CUAD em seus projetos sendo uma de suas principais aplicações em peças pré-moldadas.

O controle da porosidade do concreto é bem similar entre o CPR e CUAD, diferenciando as dimensões dos agregados, CPR tendo como tamanho médio 0,2 mm (TUTIKIAN *et al.*, 2011), já o CUAD pode chegar a um diâmetro máximo de 0.6mm (KHAYAT *et al.*, 2019), com a diminuição dos poros da pasta de cimento, a sua interface está relacionada com a redução da relação água/aglomerante, fazendo com que as partículas de cimento fiquem mais próximas umas das outras na pasta de cimento fresca, portanto, quando ocorrem as reações de hidratação do cimento, a estrutura se fecha mais rapidamente, com

cristais menores, resultando em um concreto menos poroso, aumentando, conseqüentemente, a proteção e a qualidade do concreto (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

Ao eliminar os agregados graúdos tem se uma redução de grande parte dos vazios internos tornando a distribuição de cargas mais uniforme, aumentando a resistência do material devido à redução de tensões pontuais, que na maioria dos casos é responsável pelos danos à microestrutura. Logo, quanto menor for a dimensão das partículas maior será a superfície específica, ocasionando na melhor distribuição de forças e, conseqüentemente, a maior resistência às intempéries do tempo.

Em seguida se encontram as principais características do CUAD:

- Ausência de agregados graúdos;
- Uso de sílica ativa;
- Aplicação de agregado de quartzo;
- Redução da relação água/cimento;
- Uso de aditivos superplastificantes;
- Elevada resistência mecânica;

2.2 Composição do concreto de ultra-alto desempenho

2.2.1 Tipos e granulometrias dos materiais

Uma das coisas mais importantes ao se preparar uma dosagem é a seleção dos materiais. De acordo com Goes et al. (2020), os materiais que basicamente compõe o CUAD são:

- Cimento Portland;
- Areia artificial;
- Areia natural;
- Aditivo superplastificante;
- Sílica;
- Cinza volante;
- Fibras;
- Metacaliun;
- Fíler;

Segundo Neto (1999), as areias naturais (Figura 1), normalmente utilizadas como agregado, são de natureza quartzosa rolada de origem fluvial ou eólica. Já as areias artificiais (Figura 2), requerem um processamento específico que visa à adequação do tamanho e da forma (TONSO, 1994).

Figura 1 - Areia natural.



Fonte: Casa da Irene. Disponível em: <https://casadeirene.com/areia-natural-areia-industrial/>. Acesso: 26 out. 2022

Figura 2 - Areia artificial.



Fonte: Polimix. Disponível em: <https://polimixagregados.com.br/areia-industrial-a-areia-do-futuro/>. Acesso: 26 out. 2022

2.3 Sílica ativa

Almeida (1990) descreve que o primeiro interesse de aplicação da sílica ativa foi proveniente do processo de fabricação industrial, devido aos rejeitos de silício metálico e ligas de ferro silício. A sílica ativa é um material extraído partir da redução do quartzo à alta temperatura em fornos a arcos elétricos, onde os principais produtos são o silício, ou ligas contendo silício, ou seja, não se encontra na natureza. A sílica é um material extremamente fino, e que aplicado no concreto tem a função de preencher os espaços vazios de tal modo que todos eles são preenchidos, tornando um concreto quase impermeável, aumentado sua resistência e impedindo a entrada de ar e dificultando à corrosão nas estruturas de aço (HERMANN *et al.*, 2016).

Em 1950, foi realizada a primeira pesquisa sobre a utilização da sílica ativa na Universidade de Tecnologia da Noruega, com o objetivo de se obter um concreto que fosse resistente à água altamente sulfatada de uma parte do túnel construído em Oslo. No fim da década de 1990, no Canadá tiveram os primeiros indícios em relação à utilização da sílica

ativa. A partir de então, começaram a trabalhar e investigar este aditivo em diversos países (ALMEIDA, 1990).

A sílica ativa possui um teor de SiO_2 ⁷ amorfo superior a 85%, uma superfície específica de 20000 kg/m^2 , uma massa específica de 2200 g/cm^3 , sendo uma forma de partícula esférica. Os tamanhos típicos de sílica ativa estão entre 200 nm e 1000 nm. Sua massa unitária não densificada é menor que 350 kg/m^3 , e a massa unitária densa é maior que 350 kg/m^3 (TECNOSIL, 2013). Por outro lado, Sidodikromo (2019), discorre que a sílica ativa possui diâmetro médio com proporção ideal de adição de 20% a 35% em relação à massa do cimento.

A relação sílica/cimento também é outro fator considerado importante, as características da sílica são bem diferentes do cimento, desta forma deve-se ter um controle na mistura desses elementos, o cimento é um produto industrializado a partir de vários elementos químicos, já a sílica é proveniente de reações de materiais, as características físicas de cada material ao se misturarem reagem influenciando no resultado final do concreto.

Segundo Mehta & Monteiro (1994) e Bentz & Stutzman (1994), o processo químico da sílica ativa ocorre na zona de transição por meio do aumento da aderência. Nos concretos sem a adição, os cristais de cálcio de hidróxido, possuem ligações através de forças de interações intermoleculares definidas por de Van der Waals, ou seja, mais fracas que as do C-S-H⁸, aparecendo em grandes quantidades na zona de transição devido aos espaços vazios. Com a reação pozolânica tem-se a diminuição do teor de Ca(OH)_2 ⁹ e concepção de compostos com maior resistência, como o C-S-H ocasionando uma aderência melhor entre pasta/armadura e pasta/agregado.

De acordo com Souza & Ripper (1998), comparado ao concreto comum, o concreto com a adição de sílica ativa apresenta as seguintes vantagens:

- Maior resistência à compressão e tração;
- Menor permeabilidade, porosidade e absorção;
- Maior resistência à abrasão e à erosão;
- Mais resistência a produtos químicos como sulfato e cloreto;
- Forte aderência ao concreto novo e antigo (velho);

⁷ SiO_2 – Dióxido de silício.

⁸ C-S-H – Silicato de cálcio hidratado.

⁹ Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio.

- Menor índice de reflexão no concreto projetado.
- Redução de consumo quando tem substituição parcial do cimento por sílica.

2.4 Sílica ativa em suspensão

Os aprimoramentos e pesquisas com microssílica, bem como o desenvolvimento da nanotecnologia, levaram à descoberta de partículas ainda menores, chamadas de nanossílica.

A nanossílica é constituída de nanopartículas, ou seja, óxido de silício (SiO_2), podendo ser de origem biogênica, mineral ou sintética. Como a nanossílica é um material mais fino que a sílica, ela apresenta uma maior área superficial e, conseqüentemente, maior atividade pozolânica, resultando em uma microestrutura mais densa em relação aos materiais cimentícios (SANTOS, 2018).

Devido ao seu alto efeito pozolânico, quando comparado com o Ca(OH)_2 transformando em C-S-H, a nanossílica promove a hidratação do cimento, melhorando as propriedades mecânicas do concreto. Além disso, o acréscimo da nanossílica ao concreto induz um efeito de preenchimento (fíler), ou seja, refinamento dos poros (P. P. *et al.*, 2021).

Além de outros benefícios, como hidratação acelerada do cimento, aumento da tenacidade, resistência à compressão, cisalhamento, tensão e flexão, a nanossílica é um material eficiente para preencher os vazios entre as partículas de cimento e também aumentar a densidade de empacotamento do material (HONGJIAN, 2014).

Segundo o fabricante e ficha técnica, a sílica ativa em suspensão, ou microssílica, é uma interrupção estável de partículas dispersas em água. Essas partículas são de 50 a 100 vezes menor que os grãos de cimento que preenchem os vazios, tendo assim o aumento do grau de empacotamento da dispersão (MC BAUCHEMIE BRASIL, 2022). Assim, pode-se considerar que esse produto possui suas vantagens tais como:

1. Alta estabilidade da suspensão;
2. Redução do efeito álcali-agregado (RAA);
3. Melhor homogeneização no método de mistura;
4. Maior densidade e resistência do concreto;
5. Maior proporção entre as resistências à compressão e flexão;

6. Maior resistência química à abrasão e contra a corrosão;

Em comparação com o cimento Portland comum e as cinzas volantes, a distribuição do tamanho das partículas da microssílica é duas ordens de grandeza mais fina (CONSATI, 2018). Portanto, devido à pequena dimensão das partículas (1,0 μm), a microssílica possui uma grande área superficial específica, o que justifica a alta demanda hídrica e a necessidade de plastificantes, embora melhore a trabalhabilidade ao reduzir o tamanho e o volume dos vazios no concreto.

O estudo realizado por Carmo e & Portella (2008) mostrou que a substituição de 8% do ligante por sílica ativa apresentou melhorias nas reações álcali-agregado, tendo ganho nas propriedades mecânicas e no desempenho do concreto.

3 METODOLOGIA

A pesquisa realizada neste trabalho foi desenvolvida no laboratório de materiais da construção Campus III da FacUnicamps, localizada no município de Goiânia. Para a realização da pesquisa foram desenvolvidos três traços com agregados de dimensão máxima característica de 4,75 mm. A variável da pesquisa foi a sílica ativa ELKEN 920 D, ou seja, a partir de um traço de referência foram produzidos outros dois traços substituindo 50 % e 100 % do volume sílica ativa densificada por sílica ativa em suspensão - CENTRILIT FUME S.

Neste item serão apresentadas as propriedades dos materiais que foram utilizados, os traços e os ensaios realizados.

3.1 Materiais utilizados

O detalhamento contendo as respectivas especificações, bem como as curvas de granulometria dos agregados está a seguir:

3.1.1 Cimento

Neste trabalho foi utilizado cimento Portland composto com fíler - CP II-F-40, com adição de 6 a 10% de fíler calcário e maior grau de finura, o que proporciona maiores resistências em todas as idades. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas, mecânicas do cimento, segundo informações do fabricante e de acordo com a norma ABNT NBR 11578:1991.

Tabela 1 - Características físicas e mecânicas do cimento CPHI-F-40.

Propriedade	Idade	Lote 1	Lote 2
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	37,8	37
	7 dias	44,1	42,8
	28 dias	51,1	50,3
Blaine (cm ² /g)		5318	5180

Fonte: Votorantim (2022).

3.1.2 Sílica Ativa (ELKEN 920 D)

A sílica ativa densificada utilizada foi a ELKEN 920 D. A densidade aparente dessa sílica é de 350 kg/m³ e a mesma atende a ABNT NBR 13956-4:2012, possuindo as seguintes especificações de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações Sílica ELKEN 920 D.

Elemento	Unidade	Valores
SiO ₂	%	mín.: 85,0
H ₂ O	%	máx.: 3,0
Perda ao fogo (975° C)	%	máx.: 6,0
Índice de Atividades Pozolânica aos 7 dias	%	máx.: 105
Partículas > 45 µm (325mesh)	%	máx.: 10,0

Fonte: (DUXENGENHARIA, 2014).

3.1.3 Sílica Ativa em Suspensão

A sílica ativa em suspensão CENTRILIT FUME S da MC-Bauchemie foi utilizada nos traços com 50% e 100% de substituição da sílica ativa ELKEN 920 D. Esta sílica diferente da ELKEN 920 D que é em estado sólido, se encontra no estado líquido podendo ser utilizada em pré-moldados e concretos de alto desempenho, pois possui aumento de resistência química

à abrasão, densidade e principalmente aumenta a proporção de resistência entre a compressão e a flexão da estrutura (MC BAUCHEMIE, 2022). Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades da sílica em suspensão CENTRILIT FUME S.

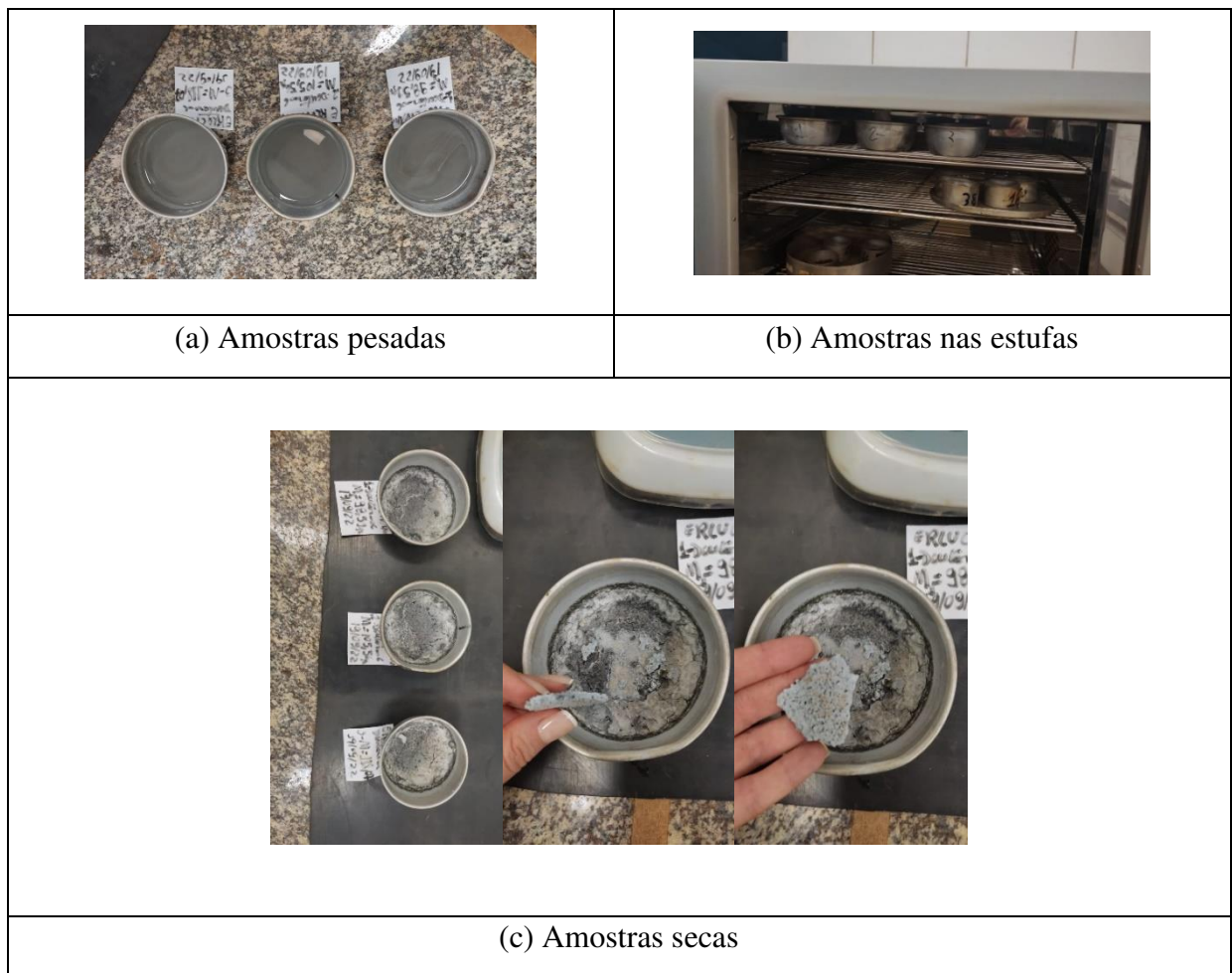
Tabela 3 - Propriedades da sílica em suspensão - CENTRILIT FUME S.

Características	Valor	Observações
Densidade	1,38 kg/L	NBR 11768-3: 2019
Dosagem máxima	20%	Sobre o peso do cimento

Fonte: (MC BAUCHEMIE, 2022).

Para determinação do teor de água da sílica ativa em suspensão três amostras (Figura 3) foram secadas em estufa com ventilação forçada obtendo um teor de sólido na sílica ativa em suspensão igual 22,64 % e, conseqüentemente, um teor de líquido 77,36 %.

Figura 3 - Determinação do teor de sólido da sílica ativa em suspensão.



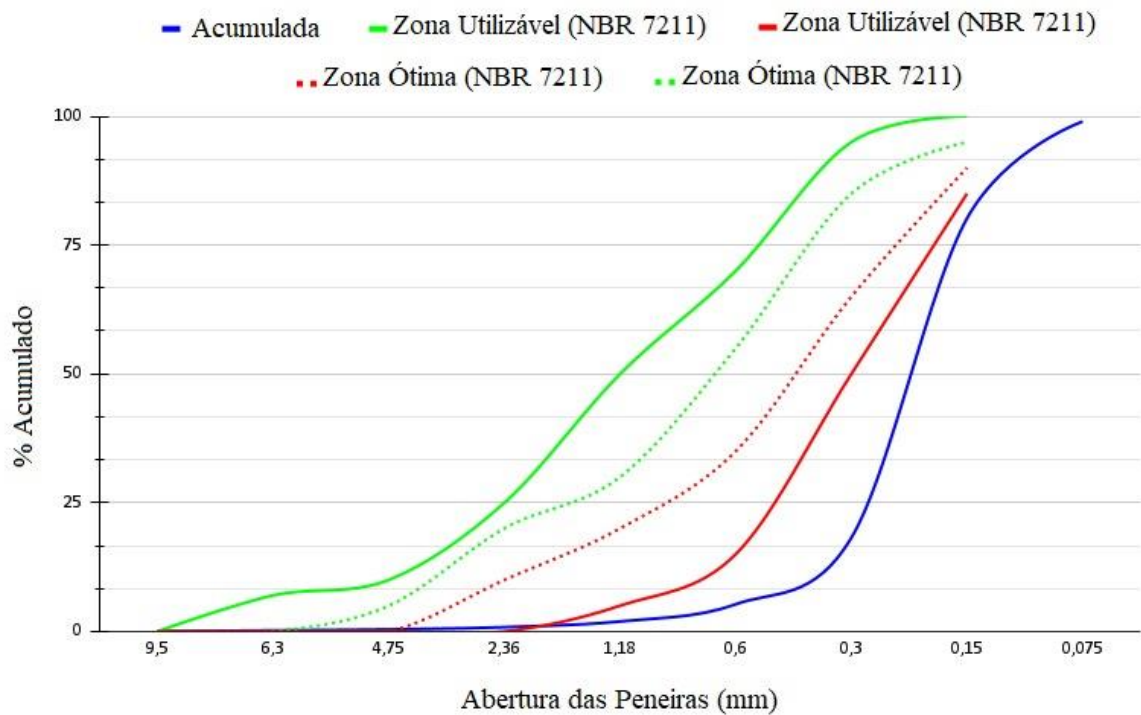
Fonte: (LABGEO-UFG, 2022).

3.1.4 Agregados

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados agregados miúdos obtidos na região.

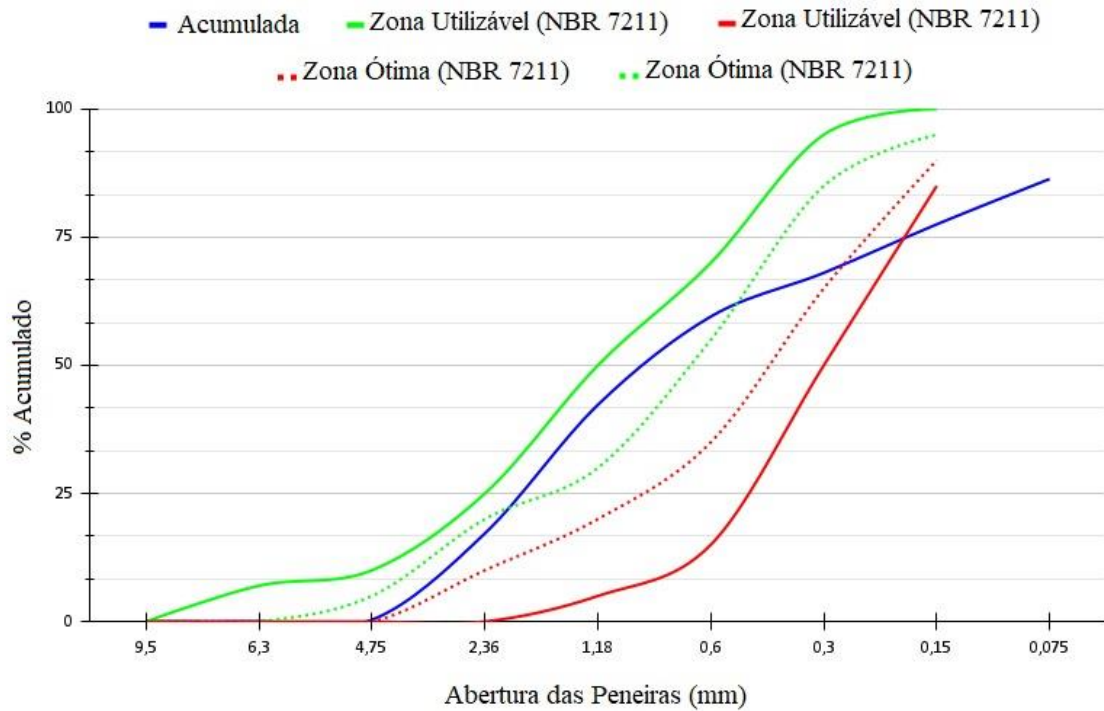
A areia natural de rio possuía dimensão máxima característica de 0,6 mm e módulo de finura de 0,99 mm. Na Figura 4 é apresentado a curva granulométrica e os limites impostos pela ABNT NBR 7211:2022.

Figura 4 - Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: LABITECC (2022).

A areia artificial empregada na pesquisa é resultante da britagem da pedra gnaise possuindo diâmetro máximo característico e módulo de finura iguais a 4,75 mm, 3,51 mm, respectivamente. Na Figura 5 são apresentadas as curvas granulométricas da areia artificial e as curvas dos limites impostos pela ABNT NBR 7211:2009.

Figura 5 - Curva granulométrica pó de pedra.

Fonte: LABITECC (2022).

Para garantir a fluidez necessária à mistura, foi empregado um aditivo superplastificante baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos, o aditivo utilizado foi o superplastificante MC-POWERFLOW 4001, cujo seu diferencial é ser um aditivo de redutor de água tipo 2. Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades do aditivo superplastificante.

Tabela 4 - Propriedades do aditivo - MC-POWERFLOW 4001.

Características	Valor	Observações
Densidade	1,12 kg/L	NBR 11768-3: 2019
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 5,0\%$	Sobre o peso do cimento

Fonte: (MC BAUCHEMIE, 2022).

3.2 Processo de mistura dos materiais

A produção do concreto foi realizada em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros, mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Argamassadeira Skymesen BPS-05L.



Fonte: O pesquisador (2022).

Para a produção dos traços do concreto de ultra-alto desempenho, foram obedecidos os seguintes passos:

1º Os materiais foram pesados e separados conforme apresentados na Figura 7;

Figura 7 - Materiais traço 50% e 100%.



Fonte: O pesquisador (2022)

2º Foram adicionados todos os volumes dos materiais em um recipiente para realizar a mistura de forma manual, para se ter uma melhor mistura entre todos os materiais (Figura 8);

Figura 8 - Mistura manual.



Fonte: O pesquisador (2022).

- 3° Em seguida, todo o volume do material misturado foi colocado dentro do recipiente da argamassadeira para ser misturar por 3 minutos, colocando a água já medida de forma gradativa (Figura 9-a);
- 4° Posteriormente, foi adicionado o aditivo plastificante e misturado por 2 minutos (Figura 9-b);

Figura 9 - Materiais na argamassadeira.



(a) Água sendo adicionada



(b) Superplastificante sendo adicionado

Fonte: O pesquisador (2022)

- 5° Logo após, já com todos os materiais já colocados na argamassadeira, o processo e mistura posterior se deu em 7 minutos em uma velocidade constante até atingir a trabalhabilidade necessária para se moldar os corpos de prova;

Figura 10 – CUAD.



Fonte: O pesquisador (2022)

6° Após passado o processo de mistura, colocou-se o concreto para descansar por 1 minuto para verificar se houve exsudação ou segregação, totalizando todo o processo em 15 minutos.

Figura 11 - Descanso do concreto.



Fonte: O pesquisador (2022).

Em seguida, foram realizados os ensaios no estado fresco para caracterização do CUAD, sendo então moldados 08 corpos de prova de 5 x 10 cm adensados em uma única camada. Após decorridas as primeiras 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram desenformados e levados para serem submetidos a cura submersa com cal até o dia dos

referidos rompimentos, para a obtenção da resistência à compressão com idades de 07, 14 e 28 dias respectivamente.

3.3 Ensaio no estado fresco

Para cada dosagem, foram realizados ensaios para determinação das propriedades do concreto no estado fresco, tais como: consistência pelo abatimento do tronco de cone de Hagermann regido pela norma alemã DIN 18555-2, e massa específica conforme a norma ABNT NBR 9833:2008. A Figura 12 mostra a realização desses ensaios.

Para determinar a consistência do CUAD no estado fresco foi realizado o teste da mesa de fluxo, ou Slump Teste com cone Hagermann, na execução foi utilizado o tronco de cone de aço inoxidável com as seguintes dimensões: 60 mm de altura, diâmetros internos, inferior e superior, de 100 mm e 70 mm respectivamente. Para a preparação do equipamento, foi necessária a análise do tronco de cone garantindo a ausência de qualquer impureza, também foi feita a verificação da base de superfície utilizada para o espalhamento e medição posterior do concreto, observando se a mesma se encontrava plana e nivelada, após a conferência do equipamento foi necessário criar uma leve película de água na base, com o objetivo de reduzir qualquer interferência no resultado devido ao atrito.

Após o preparo, o cone foi centralizado e pressionado com uma força constante sobre a base, e então preenchido até seu limite, utilizando-se de uma espátula efetuando um movimento de corte em ângulo de 45° da base o excesso foi retirado, deixando a argamassa em um nivelamento perfeito, logo, o cone foi imediatamente elevado durante 3 segundos com movimento constante perpendicular a base, liberando assim o espalhamento do CUAD, sendo então aferido o diâmetro do espalhamento.

Figura 12 - Slump teste.



Fonte: O pesquisador (2022).

3.4 Ensaio no estado endurecido

Os corpos de prova foram rompidos em uma empresa parceira da pesquisa, seguindo a ABNT NBR 5739:2018 (ABNT, 2018), que regulamenta os procedimentos para a realização dos ensaios de compressão de corpos de provas cilíndricos. Foi utilizado uma prensa hidráulica para a obtenção das cargas (kN), e posteriormente realizar o cálculo para se achar a resistência (MPa) do corpo de prova. Na Figura 13, um corpo de prova sendo submetido ao ensaio de compressão e forma de ruptura após o ensaio.

Figura 13 - Ensaio de compressão.



(a) Corpo de prova na prensa (b) Corpo de prova rompido

Fonte: O pesquisador (2022).

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste tópico, são apresentados os resultados e as análises de cada traço no estado fresco e no estado endurecido.

Na Figura 14 é apresentado o aspecto do CUAD durante a aferição do diâmetro de espalhamento de cada ensaio. Analisando cada traço, e levando em conta que cada um deles teve o mesmo tempo de mistura, velocidade e a sequência no qual foram colocados os materiais dentro do recipiente, nota-se que ambos os traços tiveram uma boa trabalhabilidade, sobressaindo o traço III, pois, na sua dosagem se utilizou mais componentes líquidos como a água, o aditivo superplastificante e a sílica ativa em suspensão. Todos os traços apresentaram também uma boa homogeneidade, sem que ficasse retido no centro da placa de espalhamento algum volume.

Figura 14 - Aspecto e ensaio e determinação do diâmetro no ensaio espalhamento do CUAD.



(a) Traço I

(b) Traço II

(c) Traço III

Fonte: O pesquisador (2022).

Realizou-se também o ensaio de slump em um CUAD, com o objetivo de fazer uma relação entre o espalhamento obtido com o tronco de cone convencional, regido pela norma ABNT NBR 16889:2020 com dimensões de 300 mm de altura, diâmetros internos, inferior de 200 mm e superior de 100 mm (Figura 15), e o espalhamento obtido pelo tronco de cone Hagermann com dimensões de 60 mm de altura, diâmetros internos, inferior de 100 mm e superior de 70 mm.

Figura 15 – Ensaio de comparação.

(a) Cone convencional

(b) Cone de Hagermann

Fonte: O pesquisador (2022)

A Tabela 5 apresenta os resultados de espalhamento obtidos no tempo de 50 s para ambos os ensaios.

Tabela 5 - Espalhamento com o tronco de cone convencional e com o troco de cone de Hagermann em T=50 s.

Tipo de tronco de cone	Espalhamento (mm)
Cone convencional	800
Cone de Hagermann	280

Fonte: O pesquisador (2022).

Analisando os valores tem-se que o espalhamento com o tronco de cone convencional foi 2,86 vezes superior ao do espalhamento com o tronco de cone de Hagermann.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados de espalhamento, massa específica e as resistências à compressão axial de cada traço nas idades de 07, 14 e 28 dias. Em relação à massa, observa-se que a incorporação da sílica em suspensão não alterou a trabalhabilidade quando se considerou apenas 50 % de substituição da sílica ativa ELKEM 920 D (Traço II), no entanto, quando houve a substituição de 100 % da sílica ativa ELKEM 920 D (Traço III) houve um aumento no espalhamento. Isso pode ter ocorrido devido ao melhor empacotamento

e dispersão da sílica suspensa em meio líquido proporcionado pela sílica CENTRILIT FUME S.

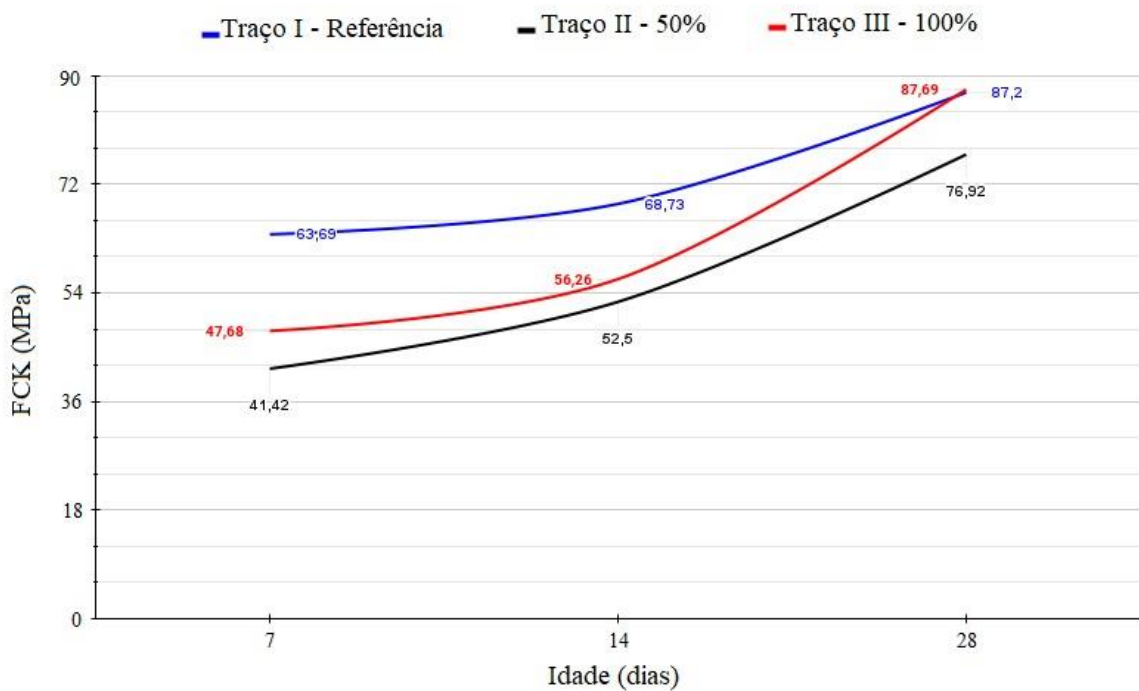
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de espalhamento à compressão.

TRAÇOS	ESPALHAMENTO (mm)	MASSA ESPECÍFICA (gr/cm ³)	07 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
			IND	MÉDIA	IND	MÉDIA	IND	MÉDIA
TRAÇO I	350	21,4	—	63,69	68,13	68,73	88,70	87,20
			63,69	69,34	85,71			
TRAÇO II	350	21,4	43,99	41,42	52,11	52,50	80,30	76,92
			38,85	52,89	73,55			
TRAÇO III	360	21,9	44,87	47,68	55,65	56,26	88,24	87,69
			50,49	56,86	87,15			

Fonte: O pesquisador (2022)

Na Figura 16 tem-se a evolução das resistências à compressão do CUAD.

Figura 16 – Evolução da resistência do CUAD.



Fonte: O pesquisador (2022).

Tendo em vista os resultados, tem-se que o CUAD do presente trabalho não atingiu 120 MPa aos 28 dias. HUANG (2017) defende que ao se atingir 120 MPa, já se pode considerar como CUAD, no entanto, o que não é estabelecido é qual a idade na qual esse concreto deve atingir a resistência requerida pela a classificação.

Paulo Roberto (2015) realizou um estudo sobre as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada e obteve a resistência de 77,7 MPa aos 28 dias. Christ (2019) realizou estudos de dosagem para concretos de ultra-alto desempenho chegando aos 28 dias com 95,9 MPa e após 90 dias chegando em um resultado de 121,6 MPa. Comparando resultados obtidos neste trabalho com as referidas pesquisas têm-se necessários a ruptura em outras idades como aos 90 dias.

Considerando os valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias na presente pesquisa com os valores obtidos por outros pesquisadores nessa mesma idade é provável que o CUAD deste trabalho atinja os 120 MPa aos 90 dias.

Em relação ao efeito da adição da sílica ativa em suspensão no CUAD, verifica-se que não houve uma variação de resistência à compressão aos 28 dias. O traço com 50 % de substituição da sílica ativa ELKEM 920 D por sílica ativa em suspensão apresentou resistência de 8,75% inferior ao traço de referência, enquanto que o traço com 100% de substituição apresentou um percentual de 1% superior ao traço de referência aos 28 dias. Também não foi observado nenhum ganho de resistência em relação ao traço de referência nas primeiras idades.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como propósito verificar o comportamento do concreto em relação à sua resistência a compressão axial, analisando a influência da substituição de dois traços do concreto de ultra-alto desempenho, um com 50% da microsílica ELKEN 920 D, pela sílica ativa em suspensão CENTRILIT FUME S e posteriormente a substituição de 100% desta mesma microsílica pela sílica ativa em suspensão.

Com as análises e os estudos realizados sobre a dosagem que foi proposta foi possível averiguar que a adição da sílica ativa em suspensão no traço II de 50% obteve uma menor resistência no decorrer dos dias de ruptura em comparação com o traço III que sempre ficou com um ganho de resistência superior. Enquanto que se comparar com o traço de referência, ambos ficaram abaixo nos períodos de 07 e 14 dias, em compensação ao se chegar nos 28 dias o traço com 100% de sílica ativa em suspensão conseguiu superar o traço de referência em 1%.

Com base nesses dados, é possível que a adição de sílica ativa em suspensão em um concreto pode acarretar um ganho maior de resistência após o período de 28 dias do que a sílica ativa densificada e, além disso, o uso dessa sílica pode trazer uma elevação no ganho da trabalhabilidade do concreto como se viu nos ensaios de espalhamento, propiciando um concreto muito mais homogêneo semelhante ao um concreto auto adensável.

Com isso, se pode perceber mais a importância de se estudar e aprofundar ainda mais sobre o tema, visto que esse tipo de concreto será cada vez mais utilizado para as grandes estruturas que vem surgindo a cada dia. Desta forma, obter novos conhecimentos acerca dos benefícios que a adição da sílica ativa em suspensão proporciona para o mesmo, se torna essencial para se tê-la como uma alternativa viável para o concreto de ultra-alto desempenho.

6 REFERÊNCIAS

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra-alto desempenho (UHPC)**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 2019. 154 p.

GOES, C. M. W. *et al.* Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra alto desempenho. Florianópolis. **Revista INBRACON**, 2020. p. 03 – 06.

GRAYBEAL, B. **UHPC making strides**, Public Roads, Federal Highway Administration, McLean, VA 72 (4) (2009) 17–21.

HERMANN, E. A. *et al.* Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. Curitiba. **Revista INBRACON**, 2016. p. 49 – 65.

HOFFMAN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001. 145 p.

HUANG, H.; GAO, X.; WANG, H.; **Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high-performance concrete**. Construction and Building Materials. Elsevier, v. 149, p. 621-628, 2017.

MC, BAUCHEMIE. **Centrilit Fume S – Sílica ativa em suspensão para concretos de alto desempenho**. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/aditivos-para-concreto/adicoes/centrilit-fume-s.html>. Acesso em: 22 out. 2022.

NEIRY, A. M. L. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Brasília: Universidade de Brasília (UNB), 1999. 191 p.

NOLI FILHO, P. R. **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2015. 95 p.

PEDROSO, H. T. R. **Análise da influência da nanosílica na resistência à compressão de concretos: uma revisão**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2021. 75 p.

REVISTA OE. **Segundo material mais consumido no mundo é tema do evento.** Disponível em: <https://revistaoe.com.br/segundo-material-mais-consumido-no-mundo-e-tema-de-evento/>. Acesso em: 01 out. 2022.

RIGO, L. A. **Estudo entre nano sílica e micro sílica em argamassa para aplicação em concretos como proposta de melhoria de desempenho.** Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. 83 p.

SANTANA, A. C. *et al.* **Estudo comparativo de concreto com sílica de cinza da casca de arroz e sílica ativa.** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018. 16 p.

SOUZA, M. C.; DAVI, A. S.; FRAGA, Y. S. B. **Efeito da sílica ativa nas propriedades do concreto leve com argila expandida.** Brasília: Centro Universitário UNIEURO, 2022. 12 p.

SOUZA, S. M. **Estudo comparativo das propriedades do concreto convencional e concreto com contribuição de sílica ativa.** Governador Mangabeira: Centro Universitário Maria Milza, 2022. 51 p.

SOUZA, T. S.; GALVÃO, S. P. **Concreto de ultra-alto desempenho – concepção, desempenho e análise da viabilidade técnica no mercado brasileiro atual.** Santo Agostinho: Universidade Federal de Pernambuco (UFP), 2021. 22 p.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TECNOSIL. **Reduza seus custos e aumente a qualidade do seu concreto com o uso de Sílica Ativa.** Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 14 out. 2022.

TRINDADE, D. S. **Patologia em estruturas de concreto armado.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2015. 88 p.

TUKITIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** Ibracon, 2011. Capítulo 36.

XU, L. *et al.* **Effects of coarse aggregate and steel fiber contents on mechanical properties of high performance concrete.** Construction and Building Materials. Elsevier BV, v. 182. P. 118-125, set 2018.

ZANNI, H. *et al.* Investigation of hidration and pozzolanic reaction in reactive powder (RPC) using ^{29}Si NMR. In: **Cement and Concrete Research**, vol. 26, n. 1, jan, 1996, p. 93-100.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Areia natural.</i>	7
<i>Figura 2 - Areia artificial.</i>	7
<i>Figura 3 - Determinação do teor de sólido da sílica ativa em suspensão.</i>	12
<i>Figura 4 - Curva granulométrica da areia natural.</i>	13
<i>Figura 5 - Curva granulométrica pó de pedra.</i>	14
<i>Figura 6 - Argamassadeira Skymesen BPS-05L.</i>	15
<i>Figura 7 - Materiais traço 50% e 100%.</i>	15
<i>Figura 8 - Mistura manual.</i>	16
<i>Figura 9 - Materiais na argamassadeira.</i>	16
<i>Figura 10 – CUAD.</i>	17
<i>Figura 11 - Descanso do concreto.</i>	17
<i>Figura 12 - Slump teste.</i>	19
<i>Figura 13 - Ensaio de compressão.</i>	19
<i>Figura 14 - Aspecto e ensaio e determinação do diâmetro no ensaio espalhamento do CUAD.</i>	20
<i>Figura 15 – Ensaio de comparação.</i>	21
<i>Figura 16 – Evolução da resistência do CUAD.</i>	22

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Características físicas e mecânicas do cimento CII-F-40.</i>	11
<i>Tabela 2 - Especificações Sílica ELKEN 920 D.</i>	11
<i>Tabela 3 - Propriedades da sílica em suspensão - CENTRILIT FUME S.</i>	12
<i>Tabela 4 - Propriedades do aditivo - MC-POWERFLOW 4001.</i>	14
<i>Tabela 5 - Espalhamento com o tronco de cone convencional e com o troco de cone de Hagermann em T=50 s.</i>	21
<i>Tabela 6 - Resultados dos ensaios de espalhamento à compressão.</i>	22

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

Eu Sérgio Serra de Valle RA 36103

Declaro, com o aval de todos os componentes do grupo a:

AUTORIZAÇÃO (X)

NÃO AUTORIZAÇÃO ()

Da submissão e eventual publicação na íntegra e/ou em partes no Repositório Institucional da Faculdade Unida de Campinas – FACUNICAMPS e da Revista Científica da FacUnicamps, do artigo intitulado: Desagem de concreto de ultra-alto desempenho com fibras ativas em suspensão

De autoria única e exclusivamente dos participantes do grupo constado em Ata com supervisão e orientação do (a) Prof. (a): Edsonômio Bueno

O presente artigo apresenta dados validos e exclui-se de plágio.

Curso: Engenharia Civil Modalidade afim TCC

Sérgio Serra de Valle
Assinatura do representante do grupo

Assinatura do Orientador (a):

Obs: O aval do orientador poderá ser representado pelo envio desta declaração pelo email institucional do mesmo.

Goiânia, 10 de junho de 2023