



**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO REFORÇADO
COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

**STUDY OF COMPRESSION RESISTANCE ENHANCED CONCRETE WITH
ADDITION OF ACTIVE SILICA**

Aline Botini Tavares Berthequini¹
Isabela da Silva Machi²
Wallace Doná³

RESUMO: O concreto é imprescindível para a construção civil. Originado pela mistura de aglomerantes, agregados, água e aditivos, possui alta resistência à compressão, a qual pode ser melhorada com adições de outros elementos, como a sílica ativa. Essa substância ao ser acrescida ao concreto, além de proporcionar um ganho de resistência, simultaneamente agrega outras características como a diminuição significativa de cimento adicionado à mistura, a redução do índice de vazios, entre outras. Os resultados obtidos apontaram que a adição de 5% de sílica ativa obteve o melhor desempenho comparado ao traço convencional na idade de 28 dias.

Palavras-Chave: Concreto; Sílica Ativa; Adição; Resistência.

ABSTRACT: Concrete is essential for construction. Originated by the mixture of binders, aggregates, water and additives, it has high compressive strength, which can be improved with additions of other elements, such as active silica. This substance when added to the concrete, besides providing a strength gain, simultaneously adds other characteristics such as the significant reduction of cement added to the mixture, the reduction of voids, among others. The results showed that the addition of 5% active silica obtained the best performance compared to the conventional trait at the age of 28 days.

¹ Professora do Centro Universitário Toledo Araçatuba - UNITOLEDO

² Graduada em Engenharia Civil – Centro Universitário Toledo Araçatuba - UNITOLEDO

³ Graduado em Engenharia Civil – Centro Universitário Toledo Araçatuba - UNITOLEDO

Key-Words: Concrete; Active Silica; Addition; Resistance.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais empregado na construção civil. Originado por um composto da mistura de pelo menos um aglomerante, agregados, água, aditivos além de outros materiais eventuais, as adições. O cimento ao ser hidratado pela água forma uma pasta que adere aos fragmentos agregados, formando uma mistura resistente e de fácil modelagem, possuindo alta resistência à compressão, e quando endurecido forma um bloco monolítico se adequando as exigências necessárias (PEDROSO, 2009).

O autor afirma que é estimado que, anualmente, são consumidos 11 bilhões de toneladas de concreto, onde segundo a Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), apresenta um consumo de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano.

Nos últimos anos surgiram muitas possibilidades para a modificação das características do concreto, seja no estado fresco ou endurecido. Estratégias para alterar a fluidez sem interferir na resistência, retardar ou acelerar o tempo de pega, ou ainda para diminuir a segregação e o consumo de cimento tornaram-se mais comuns, seja em edificações ou em obras de infraestrutura.

Na definição de Malhotra e Mehta (1996), o termo adição, de forma abrangente, refere-se a qualquer material além de água, agregados e cimento, que é utilizado como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura. Na literatura geral sobre concreto, entretanto, há uma definição distinta para as adições, que não se confundem com os aditivos. As adições são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento (devido às suas propriedades semelhantes às do cimento), enquanto que os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto.

A sílica ativa consiste em um subproduto da indústria que produz ligas metálicas com sílica em sua composição. Os fornos aquecidos a temperaturas acima de 2.000°C liberam SiO_2 em estado gasoso, que quando entra em contato com baixas temperaturas, solidifica-se, ficando na forma de pó, que é periodicamente removido dos filtros das chaminés (DALMOLIN, 2011).

A sílica ativa tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e a

compacidade dos concretos. Primeiramente ocorre o efeito fíler, devido à sua finura que atua em uma faixa complementar a dos materiais utilizados na dosagem dos concretos e argamassas, podendo elevar o fator de empacotamento de partículas. Também ocorre o efeito pozolânico, produzindo cristais de C-S-H, favorecendo a resistência e reduzindo a porosidade (ROMANO et al., 2008).

Quando se substitui parte de cimento Portland por cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno ou por sílica ativa, cada uma dessas adições minerais atua de modo distinto, de acordo com sua granulometria e atividade química ou física. O desenvolvimento das reações pozolânicas proporciona a formação de compostos hidratados mais homogêneos e induz a uma diminuição nos teores de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto, originando uma pasta mais densa e homogênea, substituindo poros grandes por menores, o que dificulta o ingresso e deslocamento de agentes agressivos no interior da pasta, como ilustrado na Figura 1. Por efeito físico, as partículas pequenas propiciam um maior empacotamento com o cimento e diminuem o efeito parede da zona de transição, promovendo o aumento da resistência do concreto, como ilustrado na Figura 2. A proporção para substituição do cimento por adições varia conforme o tipo de adição (FURQUIM, 2006).



Figura 1 – Falha de empacotamento

Fonte: FURQUIM (2006)

Figura 2 – Empacotamento adequado

Fonte: FURQUIM (2006)

Segundo FURQUIM (2006), o uso de adições minerais traz grande benefício à sociedade, por dar um destino a esses resíduos e, principalmente, por reduzir o consumo de energia e poluição do ar, gerados pela produção do cimento, ao substituir grande parte desse produto na indústria da construção civil. De acordo com o tipo de adição e dosagem, diversas características importantes podem ser obtidas:

- Redução do calor de hidratação;
- Incremento de resistência em idades avançadas;
- Melhora da coesão;
- Diminuição da exsudação;
- Melhora da fluidez do concreto;
- Melhoria da resistência na zona de transição entre a pasta e o agregado;

- Redução da permeabilidade;
- Influência na resistividade elétrica; e
- Aumento da resistência química.

1.1 CONCRETO

Segundo Battagin (2009), o concreto define-se como um material homogêneo resultante da mistura de cimento, água, agregados miúdos e graúdos, além de outros componentes minoritários, como, por exemplo, aditivos químicos ou minerais. Suas principais propriedades relacionam-se ao desempenho físico, químico e mecânico da pasta de cimento, seja em estado fresco ou endurecida, o que remete à significância da indústria cimenteira e do consumo de água para a fabricação deste material.

A ASTM (American Society for Testing and Materials) *apud* Pedroso (2009) define o concreto como um material compósito com matriz aglomerante e dispersos de diferentes naturezas. Os aglomerantes são caracterizados pela reação entre água e cimento. Já os agregados (material granular graúdo ou miúdo) seriam a fase dispersa: areia, pedregulhos, seixos, britas, escória, resíduos, sejam estes da construção civil ou de outros setores. Além da composição anteriormente descrita, substâncias aditivas podem ser incorporadas ao concreto em seu estado fresco como objetivo de alterar as suas propriedades.

1.1.1 Componentes do Concreto Cimento

Segundo Petrucci (1998), o cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, que ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem endurecimento da massa, elevando a resistência mecânica.

O cimento Portland é constituído fundamentalmente de cal (CaO), sílica ativa (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), alumina (Al₂O₃), uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₂) e uma limitada proporção de magnésia (MgO). Mas existem ainda constituintes menores, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂), impurezas e outras substâncias de menor importância (BAUER, 2011).

Conforme Bauer (2011), os componentes essenciais para o cimento Portland são a cal, a sílica, o óxido de ferro e a alumina que compõem aproximadamente de 95 a 96% do total da análise de óxidos. A magnésia está presente em proporções de 2 a

3%, podendo alcançar o máximo de 5% porém, no Brasil, chega-se a 6,4%. Já os outros óxidos menores chegam à proporção de no máximo 1%, mas se for algum caso especial não deve ultrapassar 2%.

Existem vários tipos de cimento Portland normatizados pela ABNT, sendo os principais demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de Cimento Portland

| Cimento Portland (ABNT) | Tipo | Clínquer + Gesso (%) | Escória siderúrgica (%) | Material pozolânico (%) | Calcário (%) |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| CP I | Comum | 100 | - | - | - |
| CP I - S | Comum | 95-99 | 1-5 | 1-5 | 1-5 |
| CP II - E | Composto | 56-94 | 6-34 | - | 0-10 |
| CP II - Z | Composto | 76-94 | - | 6-14 | 0-10 |
| CP II - F | Composto | 90-94 | - | - | 6-10 |
| CP III | Alto-forno | 25-65 | 35-70 | - | 0-5 |
| CP IV | Pozolânico | 45-85 | - | 15-50 | 0-5 |
| CP V - ARI | Alta resistência inicial | 95-100 | - | - | 0-5 |

Fonte: RIBEIRO, PINTO, STARLING (2011)

Agregados

Os agregados são os materiais granulares utilizados como meio cimentante para formar um concreto ou uma argamassa e podem ser: areia, pedregulho, pedra britada, resíduos de mineração, resíduos da construção civil, dentre outros. Normalmente são empregados termos como: “Agregado graúdo”, que são partículas maiores do que 4,8 mm (peneira Tyler nº4, “agregados miúdos”, que são partículas menores do que 4,8 mm, porém maiores do que 75 um (peneira Tyler nº 200) e “pedregulho”, que é o agregado graúdo gerado a partir da desintegração natural e abrasão ou do processamento mecânico de rochas e outros conglomerados (britagem) (MEHTA, 1994).

Aditivos e Adições

Aditivos e adições são produtos fundamentais para melhorar o desempenho do concreto. Historicamente, o uso desses materiais aumentou à medida que cresceu a necessidade de se obter concretos com características especiais. No entanto, existem, no meio técnico, dúvidas sobre a diferenciação precisa entre esses materiais, responsáveis por reduzir certas influências ou aumentar o efeito de outras quando desejado ou necessário (como alteração da fluidez, retardo ou aceleração do tempo de pega, diminuição da segregação e do consumo de cimento, dentre outros).

Segundo Battagin (2009), membro do conselho diretor do Instituto Brasileiro

do Concreto (Ibracon) e gerente dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), as principais diferenças entre aditivos e adições estão em sua origem e em suas propriedades.

Aditivos, explica o engenheiro, são produtos químicos adicionados em pequena quantidade aos concretos de cimento Portland e que não apresentam propriedades ligantes, mas modificam a cinética de hidratação do cimento. Já as adições, geralmente utilizadas em quantidades maiores, são de origem mineral e, por comumente apresentarem propriedades ligantes, são usadas para substituir parte do cimento e para a obtenção de concretos com certas características especiais, define. Ou seja, as adições conferem ao concreto, propriedades que ele originalmente não tinha, enquanto os aditivos potencializam ou enfraquecem uma característica previamente encontrada no concreto (BATTAGIN, 2009).

Água

A água é um indispensável componente do concreto tendo basicamente duas funções: provocar a reação de hidratação dos compostos do cimento, com seu consequente endurecimento, e aumentar a trabalhabilidade para que possa preencher devidamente as fôrmas, evitando-se os vazios ou nichos (AOKI, 2013).

1.1.2 Classes Básicas de Classificação

Com relação ao concreto, em função de suas massas específicas, obtidas pelas diferentes dosagens da mistura – também chamadas de traços – temos três classes básicas de classificação: **Concreto de densidade normal** (massa específica de 2000 a 2800 kg/m³); **Concreto leve** (densidade abaixo do intervalo estabelecido para o concreto normal, obtida com o uso de agregados com menor massa específica); e **Concreto pesado** (massa específica acima do intervalo estabelecido para o concreto normal, devido ao uso de agregados de alta densidade).

Os concretos podem também ser classificados em relação à sua resistência à compressão aos 28 dias, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015) em: **Concreto de baixa resistência** (menos de 20 MPa, não adequado à finalidade estrutural, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)); **Concreto de resistência normal** (de 20 a 50 MPa); e **Concreto de alta resistência** (mais de 50 MPa).

1.2 SÍLICA ATIVA

A sílica é uma das substâncias químicas mais importantes quando se deseja

deixar o concreto mais resistente e durável. Ela é o resultado da fabricação de silício metálico e das ligas de ferro silício. A sua produção se dá em fornos elétricos em temperaturas de aproximadamente 2000°C. No decorrer do processo, é gerado o gás SiO (monóxido de silício), que assim que sai do forno se oxida formando partículas de SiO₂ (óxido de silício). Esse óxido é recolhido ao passar por filtros especiais, e sua destinação final seria o descarte no meio ambiente. Uma possibilidade interessante seria sua reutilização como agregado mineral no concreto.

1.2.1 Principais Aplicações

As principais aplicações da sílica ativa, segundo a TECNOSIL (2018), são:

Reparo das estruturas: é considerada indispensável para o reparo de grandes estruturas.

Concreto armado: a sílica é um importante fator para a melhora de sua trabalhabilidade. Também torna a estrutura mais durável, oferece melhor custo-benefício e garante maior resistência às intempéries.

Concreto protendido: a vantagem da sílica ativa para tal, é sua capacidade de dar maior resistência mecânica ao concreto, além de elasticidade, aderência, entre outras características semelhantes.

Pré-moldados submetido a cura térmica: neste tipo de concreto o calor promove uma aceleração nas reações de hidratação do cimento, gerando rapidamente os produtos da hidratação. A sílica ativa sofre importante aceleração em suas reações o que promove um ganho maior de resistência frente a concretos sem adição, trazendo benefícios de redução de aglomerante ou no tempo de cura térmica. Reduzindo em muito os custos nestes tipos de concreto.

Pasta para revestimento: para revestimentos dos mais diversos tipos de construções, sua utilização é considerada fundamental e uma das técnicas de concretagem mais modernas da atualidade. A capacidade de torná-lo mais aderente e, principalmente, pouco permeável, são também outras das suas mais importantes características, quando combinada com outros tipos de aditivos minerais.

Rejuntas: aderência, permeabilidade e combate aos famosos depósitos cristalinos sobre o concreto (eflorescências) são alguns dos atributos dessa substância, que, por isso mesmo, é muito requisitada na indústria de argamassas. Uma dosagem de até 10% na mistura faz com que esse exija uma menor adição de aglomerantes, o que

contribui para diminuir o custo final.

Artefatos de cimento: o grande benefício está no acréscimo de resistência que essas peças adquirem, pelo fato de que os vazios na composição da argamassa são preenchidos pela sílica.

Pisos industriais: pisos industriais e de grandes centros comerciais, feitos de concreto, beneficiam-se com o ganho de resistência, durabilidade e melhor resistência à abrasão.

Fibrocimento: pode obter um ganho de qualidade, durabilidade e resistência nas suas fibras, além de tornar-se mais compacto com adição da sílica ativa.

1.2.2 Sílica Ativa Adicionada Ao Concreto

De acordo com MEHTA (1989), a sílica ativa é capaz de contribuir para a resistência de um determinado concreto mesmo no período inicial da hidratação (1 a 3 dias), sendo que a contribuição mais significativa ocorre até os 28 dias de idade. Após este período, a contribuição da sílica ativa para a resistência final é relativamente pequena.

Segundo a NBR 13956-1 (ABNT, 2012), a elevada área superficial melhora os aspectos reológicos no estado fresco através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo na retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, facilitando o acabamento final. A sílica ativa, ao reagir com o Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento Portland, forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, conferindo aos compósitos concreto, argamassa e pasta propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparada às propriedades desses compósitos sem sua presença, tais como:

- ✓ Aumento da resistência a sulfatos;
- ✓ Resistência à difusibilidade de íons cloreto;
- ✓ Mitigação da reação álcali-agregado;
- ✓ Redução da ocorrência de eflorescência;
- ✓ Aumento da resistividade elétrica;
- ✓ Concreto com menor consumo de energia e emissão de CO_2 .

Outra vantagem é que ao ser adicionada ao concreto, entre 6% a 8%, a sílica ativa diminuirá o teor de cimento a ser usado no traço, o que lhe confere maior durabilidade, resistência às agressões físicas e químicas (TECNOSIL, 2018).

Os resultados do estudo de CARLES-GIBERGUES et al. (1989) indicam que o fator mais importante na determinação da resistência à compressão não é o efeito pozolânico da sílica ativa, mas sim o efeito físico associado às adições ultra-finas.

1.2.3 Composição e Classificação

A sílica ativa é composta basicamente de dióxido de silício (SiO_2), com porcentagem em torno de 92%. Pequenas quantidades de ferro, magnésio e óxidos também têm sido encontradas (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 , LOI), compondo os 8% restantes.

Atualmente, é disponível em quatro diferentes formas: bruta, forma da nata sílica ativa, forma densificada e misturada com cimento Portland (AITCIN, 2000).

Mais de 95% das partículas de sílica ativa são mais finas que $1 \mu\text{m}$. Suas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas da sílica ativa

| <i>PROPRIEDADE</i> | <i>VALOR</i> |
|-----------------------|--|
| Tamanho de partícula | $< 1 \mu\text{m}$ |
| Densidade da massa | |
| <i>como produzida</i> | 130 a 430 Kg/m^3 |
| <i>pasta</i> | 1.320 a 1.440 Kg/m^3 |
| <i>densificada</i> | 480 a 720 Kg/m^3 |
| Gravidade específica | 2,22 |
| Área de superfície | 13.000 a 30.000 m^2/Kg |

Fonte: Silica Fume and Association (2005) *apud* SIDDIQUE (2011)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13956-1 (ABNT, 2012), a sílica ativa é classificada em três tipos: **Sílica ativa não densificada ou no estado natural** (material procedente diretamente do filtro coletor, apresentando massa específica aparente, no estado solto, com intervalos de 150 kg/m^3 a 350 kg/m^3); **Sílica ativa densificada** (material submetido a beneficiamento por aglomeração das partículas, apresentando massa específica aparente, no estado solto, superiores a 350 kg/m^3) e **Sílica em forma de lama** (material composto de sílica ativa em suspensão aquosa, com teor na lama típico de 50% em massa).

1.2.4 Efeitos físicos e químicos da Sílica Ativa

O efeito físico ocasionado pela Sílica Ativa ocorre devido ao fato de que suas partículas esféricas são extremamente pequenas, de 50 a 100 vezes menores que as do cimento, com aspecto de pó extremamente fino e diâmetro médio de $0,1 \mu\text{m}$ e $0,2 \mu\text{m}$, como mostra a Figura 3. Por ter partículas tão pequenas e dependendo do grau de

dispersão, ela possui efeito microfíler, podendo preencher até 100% dos vazios do concreto, como ilustrado na Figura 4, tornando-o mais denso, pouco permeável, auxiliando também no aumento da resistência a compressão e flexão, podendo superar 100 MPa, ou seja, proporcionando um aumento de até 78%, em relação ao concreto sem a adição do agregado mineral (VASKE; CAMPAGNOLO; MOLIN, 2008.)

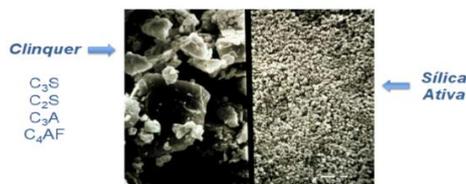


Figura 3 – Granulometria clínquer e sílica ativa

Fonte: TECNOSIL (2018)

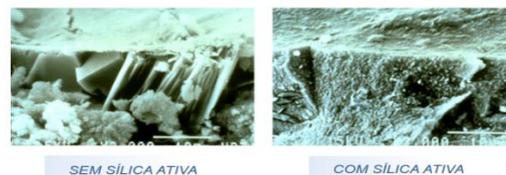


Figura 4- Porosidade do concreto

Fonte: TECNOSIL (2018)

O efeito químico, segundo Wolsiefer (1991), deve-se ao alto teor da sílica na forma amorfa, possuir um índice de atividade pozolânica com o cimento Portland com cerca de 210%. Já Mehta (1993) diz que a sílica ativa é uma superpozolana em consequência da sua alta reatividade.

2 OBJETIVOS

Os objetivos dessa pesquisa são: o estudo da sílica ativa, produto que contribui para a sustentabilidade e promove melhor desempenho quando adicionado ao concreto; a verificação do comportamento da trabalhabilidade do concreto com as adições; a comparação da resistência à compressão em função das idades dos concretos com adições e os convencionais e, por fim, a análise de custos da adição em relação aos concretos convencionais.

3 METODOLOGIA

O programa experimental foi realizado no LEC – Laboratório de Engenharia Civil Uniletoledo, constituindo-se das seguintes etapas:

- A caracterização dos materiais que atendam às exigências estabelecida para a produção do concreto.

- Definição do processo de dosagem do concreto da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (1995), sendo uma adaptação do método americano proposto pela ACI – (American Concrete Institute).

- Realização dos ensaios do concreto fresco e endurecido para a análise dos resultados.

3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados nas misturas foram: Cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, água e Sílica ativa.

O cimento utilizado foi o CP-V ARI fabricado pela Companhia Nacional de Cimento. As características físicas foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 3. A massa específica foi determinada cuidadosamente também em laboratório com amostra de 60g de cimento no frasco de Lê Chatelier.

Tabela 3 – Características físicas do Cimento Portland CP V ARI

| ENSAIOS | METODOLOGIA | UN | RESULTADO | EXIGÊNCIAS |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|-----------|---------------|
| Área Específica (Blaine) | ABNT NM 76/98 | cm ² /g | 4.872 | ≥ 3.000 |
| Massa Específica | ABNT NM 23/01 | g/cm ³ | 3,09 | Não aplicável |
| Índice de finura - #75µm | ABNT NBR 11579/13 | % | 0,25 | ≤ 6,0 |
| Resíduo na peneira #325 | ABNT NBR 9202/85 | % | 2,44 | Não aplicável |
| Água de consistência normal | ABNT NM 43/03 | % | 28,8 | Não aplicável |
| Início de pega | ABNT NM 65/03 | Minutos | 95 | ≥ 60 |
| Fim de pega | ABNT NM 65/03 | Minutos | 152 | ≤ 600 |
| Expansibilidade à quente | ABNT NBR 11582/12 | Mm | 0,94 | ≤ 5,0 |

Fonte: Companhia Nacional de Cimento (2018)

A composição granulométrica dos agregados segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003):

Como agregado miúdo utilizou-se a areia natural grossa, a qual foi caracterizada fisicamente com módulo de finura 2,1, massa específica de 2,4 g/cm³ e massa unitária de 1,55 g/cm³.

No agregado graúdo foi utilizada brita com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica de 2,85 g/cm³ e massa unitária de 1,37 g/cm³.

A sílica ativa utilizada nos traços foi fornecida pela Tecnosil, caracterizada física e quimicamente, conforme características do fabricante, apresentadas no item 1.2.3.

3.2 Dosagem

A dosagem foi desenvolvida para um traço de concreto, cuja resistência

estimada pelo método de dosagem ABCP (1995) é de **40 MPa**, onde o traço 1 é convencional, traço 2 tem substituição de 5% de sílica ativa e o traço 3 tem substituição de 10%. As Tabelas 4 e 5 apresentam os traços de concreto adotados.

Tabela 4 - Traço de concreto

| Traço unitário | | | | | |
|-----------------------|----------------|---------------------|--------------|--------------|-------------|
| Traços | Cimento | Sílica Ativa | Areia | Brita | Água |
| Traço 1 | 1 | | 1,81 | 2,40 | 0,50 |
| Traço 2 | 0,95 | 0,05 | 1,81 | 2,40 | 0,50 |
| Traço 3 | 0,90 | 0,10 | 1,81 | 2,40 | 0,50 |

Fonte: Próprio autor

Tabela 5 - Traços de concreto em massa

| Traço em massa para 1 metro cúbico | | | | | |
|---|---------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Traços | Cimento (kg) | Sílica Ativa (kg) | Areia (kg) | Brita (kg) | Água (kg) |
| Traço 1 | 421,70 | | 763,28 | 1.012,10 | 211 |
| Traço 2 | 399,6 | 21,00 | 761,30 | 1.009,50 | 211 |
| Traço 3 | 377,60 | 41,95 | 759,30 | 1.006,80 | 211 |

Fonte: Próprio autor

3.3 Realização do ensaio

Os materiais foram misturados de acordo com o procedimento que consta na NBR 12655 (ABNT, 2015):

Em primeiro lugar, foi adicionada parte da água, depois todo o agregado graúdo e em seguida o cimento/sílica, pois havendo água e pedra resulta em uma boa distribuição de água para cada partícula de cimento. Finalmente colocou-se o agregado miúdo e o restante da água para atingir a consistência ideal.

Imediatamente após a mistura, foi feito o ensaio de Abatimento do Tronco de Cone, segundo NBR NM 67 (ABNT, 1998) que mede a consistência e a fluidez do material, permitindo que se controle a uniformidade do concreto e logo após, realizou o procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, segundo NBR 5738 (ABNT, 2015) acondicionados em ambiente de laboratório por 24 horas, e então desmoldados e levados à cura úmida, onde permaneceram até as idades previstas nos ensaios no estado endurecido.

A resistência mecânica das argamassas foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão simples, segundo NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 7 e 28 dias. Para cada idade foram moldados cinco corpos de prova e os valores de resistência à compressão são dados pelo valor médio dos resultados.

4 RESULTADOS

Na Tabela 6 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos traços:

Tabela 6 – Resultados da resistência do concreto

| Traço | Materiais | 7 dias (MPa) | 28 dias (MPa) |
|----------------------|--|--------------|---------------|
| Convencional | Cimento / Areia / Brita | 34,20 | 38,29 |
| Adição 5% de sílica | Cimento / Sílica ativa / Areia / Brita | 32,63 | 42,39 |
| Adição 10% de sílica | Cimento / Sílica ativa / Areia / Brita | 32,59 | 40,79 |

Fonte: Próprio autor

A Figura 5 apresenta um gráfico de evolução da resistência com as adições de sílica ativa:

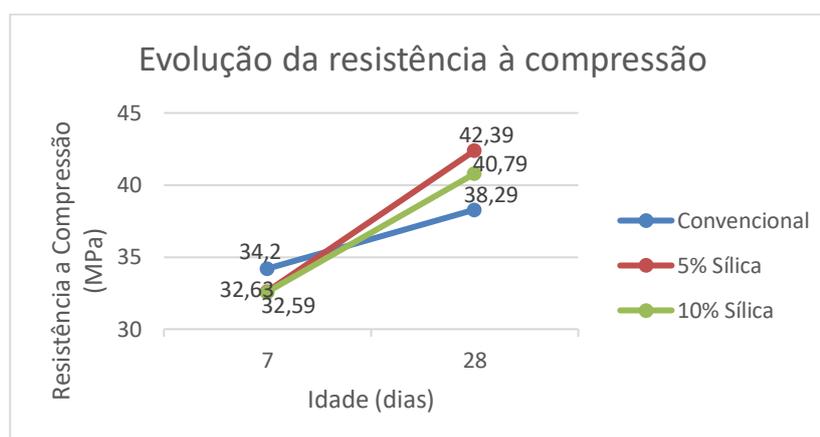


Figura 5- Evolução da resistência
Fonte: Próprio autor

5 DISCUSSÕES

Os resultados apresentados, ocorreram devido a uma série de correções e adaptações de um lote anterior confeccionado de resistência estimada de 46 MPa, no qual o concreto não obteve uma consistência adequada no seu abatimento.

Observou-se que a sílica em se tratando de um material mais fino, absorve mais água e a mesma não foi corrigida, prejudicando o adensamento, e como consequência, os resultados finais dos ensaios não atingiram o resultado esperado.

Foi feita uma análise e para o 2º lote de concreto, aumentou-se a relação água/cimento, alterou-se o FCK do concreto para 40 MPa, e a sílica foi misturada ao cimento antes de adicionar a mistura.

A influência da sílica ativa nas propriedades mecânicas avaliadas por meio dos

ensaios de resistência à compressão do concreto geraram uma série de correlações que comprovaram os benefícios das adições minerais.

O concreto com adições de sílica ativa apresentou melhor desempenho quando comparado ao concreto de referência com apenas cimento Portland como material aglomerante.

Quanto à evolução da resistência ao longo do tempo, o concreto de referência obteve maior ganho de resistência nos ensaios com 7 dias de idade.

Os ensaios com 28 dias de idade os concretos com adições de 5% de sílica obtiveram 10,7% de acréscimo, já a adição de 10% representou o menor ganho, com acréscimo de 6,5% de resistência.

Os valores dos traços foram analisados, sendo que o preço do concreto convencional saiu na faixa de R\$327,25/m³ e o concreto com adição de 5% em torno de R\$334,50/m³ com um ganho de 10,7% de resistência.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos nos ensaios realizados, conclui-se que os benefícios da adição da sílica ativa proporcionaram maior capacidade da resistência mecânica, redução do consumo de cimento à mistura, consequentemente dando maior durabilidade as estruturas de concreto armado, com a vantagem de apresentar um custo/benefício melhor que o concreto convencional superando a faixa de classe de resistência do mesmo.

Comprovou-se por meio de revisão bibliográfica que o uso de sílica ativa promove uma maior durabilidade das estruturas de concreto armado e além disso, contribui para o desenvolvimento sustentável, já que se trata do aproveitamento de um resíduo proveniente da indústria metalúrgica.

Devido a uma grande abrangência do tema, sugere-se a necessidade de novas pesquisas como: ensaios para verificar a permeabilidade, variação da porcentagem de sílica adicionada ao concreto, acompanhamento de várias idades na evolução da resistência, incluir aditivos plastificante e superplastificante para avaliar o desempenho com a utilização da sílica e utilizar mesa vibratória para obter um melhor adensamento nos ensaios.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.1995. Disponível em:
<<https://www.abcp.org.br>> Acesso em: 14 setembro 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**. Concreto -
Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro 2015. 09p.

_____. **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2018. 09p.

_____. **NBR 6118**. Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro 2014. 238 p.

_____. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos
de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 03p.

_____. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação –
Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23p.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. –
Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 06 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
Rio de Janeiro, 1998. 08 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro,
2003. 06 p.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

AOKI, Jorge. **Adicionar água suplementar ao concreto exige cuidados**. Maio, 2013. Disponível em :
<<http://www.cimentoitambe.com.br/adicionar-agua-suplementar-ao-concreto-exige-cuidados/>> Acesso
em : 14 setembro 2018.

BAUER, L. **Materiais de Construção**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011, 488 p.

BATTAGIN, A.F. **Uma breve história do cimento Portland**. ABCP. 2009. Disponível em:
<[http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-
portland](http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland)> Acesso em: 01 Maio 2018.

CARLES-GIBERGUES, A; OLLIVIER, J.B.; HANNA, B. **Ultrafine admixtures in high strength
pastes and mortars**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG,
AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 3., Trondheim, Norway, 1989. Proceedings...
Detroit: American Concrete Institute, 1989, v.2, p.1101-1116. (ACI Special Publication, 114).

COMPANHIA NACIONAL DE CIMENTO: Certificado de ensaios em cimento CP V-ARI MAX.
Disponível em <<http://www.cimentonacional.com.br/index.php/produto/cp-v-ari-max>> Acesso em: 03
Julho 2018

DALMOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. v. 1, cap. 08 pg. 233-260, São Paulo, 2011.

FURQUIM, P.R.V. **Estudo Estatístico de Produção de Concretos com Adições Minerais**. Universidade Federal de Santa Maria (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Materiais de Construção). Santa Maria, 2006.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in concrete technology. Volume 1, Canadá, 1996.

MEHTA, P. K. Durability of concrete: fifty years of progress? In: **Seminário de qualidade e durabilidade das estruturas de concreto**. Anais... Porto Alegre, RS. PPGEC, NORIE, UFRGS, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : Pini LTDA, 1994.

MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious by-products in concrete**. Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.2, p.1-44. (ACI Special Publication, 114).

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. *Concreto e Construções*, Mar. de 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf> Acesso em: 31 Março 2018.

PETRUCCI E, G. R. **Concreto de cimento**. São Paulo: Globo, (1998).

RIBEIRO, C.; PINTO, J.; STALING, T. **Materiais de Construção Civil**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 112 p.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H. JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa** – *Cerâmicas* v. 54, p 456-461, 2008.

SIDDIQUE, Rafat; NAIK, Tarun. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. **Waste Management**, New York, v. 24, p. 563-569, 2011.

TECNOSIL. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br>> Acesso em: 10 Abril 2018.

VASKE, N. R.; CAMPAGNOLO, J. L.; MOLIN, D.C.C.D. **Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto**. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/5366/4347>> Acesso em: 13 Setembro 2018.

WOLSIEFER, J. T. **Silica fume concrete: a solution to steel reinforcement corrosion in concrete**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2 Montreal.

Proceedings... Detroit: American Concrete Intitute, 1991. p. 527-558