

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUANA ISSO BATISTELA

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ALCALINIDADE NAS REAÇÕES DE
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL**

**Ilha Solteira
2023**

LUANA ISSO BATISTELA

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ALCALINIDADE NAS REAÇÕES DE
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheira Civil.

Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B333a Batistela, Luana Isso.
A influência das condições de alcalinidade nas reações de estabilização do solo-cimento autoadensável / Luana Isso Batistela. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
44 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Marco Antônio de Moraes Alcantara

Inclui bibliografia

1. Cimentos. 2. Solo-cimento autoadensável. 3. Atividade físico-química.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Serviço Técnico de Biblioteca, Arquivamento no manuseio e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

Luana Isso Batistela

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ALCALINIDADE NAS REAÇÕES DE
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenharia Civil, junto
ao Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho", Câmpus de Ilha Solteira.

Aprovada em 22/05/2023

Comissão Examinadora


Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcântara
UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP/FE - Ilha Solteira (Examinador)

Rodrigo Andraus Bispo
Doutorando Rodrigo Andraus Bispo
UNESP/Ilha Solteira (Examinador)

Ilha Solteira
22 de maio de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me guiado durante todos esses anos e ter me feito chegar até aqui.

Em seguida, agradeço aos meus pais, Sidneia e José, por todo apoio durante essa jornada, por me incentivarem sempre a correr atrás dos meus sonhos, por estarem presente em todos os momentos e entenderem meus momentos de ausência quando foi necessário. Vocês são minha base e minha maior inspiração. Também agradeço aos meus irmãos, Livia e Lucas, que sempre estiveram ao meu lado e também me deram todo suporte, e aos meus familiares, que sempre estiveram na torcida por mim.

Agradeço aos meus amigos que passaram esses 5 anos do meu lado, tanto nos momentos bons como ruins, que compartilharam todas as vivências comigo, vocês foram imprescindíveis para que hoje eu chegasse até aqui. Obrigada pela parceria, companhia, amizade e união que mantivemos todos esses anos, vocês com certeza fizeram esta caminhada ficar mais leve e divertida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara, o qual me deu todo suporte, ensinamento e confiou em mim para que juntos pudéssemos fazer esse projeto acontecer. Também agradeço aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil pela ajuda durante os experimentos e por sempre estarem a disposição, e a Isabella e a Thammy por terem me auxiliado durante esse estudo.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Ilha Solteira, por ter me acolhido, ter sido minha morada durante esses 5 anos e ter me feito crescer e aprender tantas coisas.

Por fim, deixo meu agradecimento a Alicerce Empresa Júnior de Engenharia Civil, que me trouxe tantas experiências e me fez ter um contato maior com o mundo da engenharia, além de amadurecer para minha carreira profissional.

RESUMO

O estudo tem como finalidade analisar a influência das condições de alcalinidade nas reações de estabilização do solo-cimento autoadensável, buscando correlacionar os níveis de alcalinidade com os valores de resistência e com as propriedades no estado fresco. Para isso, foram utilizados dois tipos de cimento: Portland composto por pozolana (CPZ-II-32) e Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI), solo do tipo argissolo, areia de origem natural, sílica ativa e superplastificante de origem estérica e eletrostática. Os teores de cimento propostos foram de 20%, 25% e 30% e os de sílica ativa 0% e 7,5%. Com estas composições foram realizados os ensaios no estado fresco, verificando sua trabalhabilidade e fluidez com o “slump-flow” e escoamento confinado, além da medição do pH. Já no estado endurecido foram feitos ensaios de compressão simples com os corpos de prova cilíndricos de dimensão 5x10 cm e a medição do pH, com tempo de cura de 7 e 28 dias. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que a sílica ativa auxilia no ganho de resistência apesar de influenciar nas condições no estado fresco do cimento do tipo CPZ-II-32. Além disso, o pH no tempo de 7 dias diminuiu devido ao consumo do hidróxido de cálcio, vindo a aumentar no tempo de 28 dias devido a liberação da cal hidratada.

Palavras-chave: cimentos, solo-cimento autoadensável, atividade físico-química.

ABSTRACT

The study aims to analyze the influence of alkalinity conditions in the stabilization reactions of self-compacting soil-cement, seeking to correlate the alkalinity levels with strength values and properties in the fresh state. For this, two types of cement were used: Portland cement composed of pozzolan (CPZ-II-32) and Portland High Initial Strength (CP-V-ARI), argissolo type soil, sand of natural origin, silica fume and superplasticizer of steric and electrostatic origin. The cement contents proposed were 20%, 25% and 30% and the silica fume contents were 0% and 7.5%. With these compositions were performed the tests in the fresh state, verifying its workability and fluidity with the "slump-flow" and confined flow, besides the pH measurement. In the hardened state, simple compression tests were performed with 5x10 cm cylindrical specimens and pH measurement, with curing times of 7 and 28 days. From the results obtained, it was possible to conclude that the silica fume helps in the strength gain despite influencing the conditions in the fresh state of the cement type CPZ-II-32. Moreover, the pH at 7 days decreases due to the consumption of calcium hydroxide, increasing at 28 days due to the release of hydrated lime.

Keywords: cements, self-compacting soil-cement, physical-chemical activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Materiais utilizados nas misturas.....	22
Figura 2	- Cone de “Adams” preenchido com a mistura de solo-cimento.....	25
Figura 3	- Diâmetro obtido a partir do “Slump-Flow”.....	25
Figura 4	- Ensaio do escoamento confinado.....	26
Figura 5	- Ensaio da massa específica.....	27
Figura 6	- Phmetro.....	27
Figura 7	- Corpos de prova desmoldados.....	28
Figura 8	- Medição do pH.....	29
Figura 9	- Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas de referência com CPZ-II-32.....	31
Figura 10	- Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas com sílica ativa com CPZ-II-32.....	32
Figura 11	- Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas de referência com CP-V-ARI.....	32
Figura 12	- Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas com sílica ativa com CP-V-ARI.....	33
Figura 13	- Resistência para a composição com teor de 20% de cimento.....	35
Figura 14	- Resistência para a composição com teor de 25% de cimento.....	35
Figura 15	- Resistência para a composição com teor de 30% de cimento.....	36
Figura 16	- Relação entre a resistência e tempo de cura para cimento CPZ-II-32....	36
Figura 17	- Relação entre a resistência e tempo de cura para cimento CP-V-ARI...	37
Figura 18	- Valores de pH ao longo do tempo para composição de 20% de cimento.....	39
Figura 19	- Valores de pH ao longo do tempo para composição de 25% de cimento.....	39
Figura 20	- Valores de pH ao longo do tempo para composição de 30% de cimento.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composições de referência da mistura de solo-cimento.....	23
Tabela 2	- Composições de referência da mistura de solo-cimento com adição de sílica ativa.....	23
Tabela 3	- Resultados obtidos dos ensaios no estado fresco para o cimento CPZ-II-32.....	30
Tabela 4	- Resultados obtidos dos ensaios no estado fresco para o cimento Portland de Alta Resistência Inicial.....	30
Tabela 5	- Resultados obtidos dos ensaios no estado endurecido para o cimento CPZ-II-32.....	34
Tabela 6	- Resultados obtidos dos ensaios no estado fresco para o cimento Portland de Alta Resistência Inicial.....	34
Tabela 7	- Dados estatísticos das composições de solo-cimento referência e com adição de sílica ativa.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVOS GERAIS	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1	SOLO-CIMENTO.....	13
3.1.1	Definição e histórico	13
3.1.2	Estabilização de solos	14
3.1.3	Composição do solo-cimento.....	15
3.1.4	Solo-cimento autoadensável.....	17
3.2	ESTUDOS AUXILIARES	19
3.2.1	Berté e Alcantara (2013).....	19
3.2.2	Alcantara, Custódio e Vizhalil (2015)	20
3.3	SÍLICA ATIVA.....	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	22
4.2	COMPOSIÇÕES	23
4.3.1	Ensaio no estado fresco.....	24
4.3.2	Moldagem dos corpos de prova.....	28
4.3.3	Ensaio no estado endurecido.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO	30
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO	34
6	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A construção civil vem desenvolvendo novas técnicas de construção e com materiais diversos em suas aplicações. Além disso, é o setor tecnológico que mais consome recursos naturais segundo Mendes (2015). Diante desse cenário, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas mais sustentáveis, uma vez que tais recursos se esgotarão se não tiver outra alternativa.

O solo-cimento se destaca como uma das alternativas sustentáveis e econômicas, visto que em sua fabricação não se utiliza nenhum tipo de queima de combustível. Ele possui diversas aplicações, como reforço de fundações de estruturas, construção de base e sub-base em pavimentos, paredes monolíticas, etc.

Os estudos acerca da estabilização do solo é algo antigo. Embora o solo seja um material que apresenta boas características mecânicas, ele tem baixa durabilidade e resistência a umidade. Isto, para o uso em construções é prejudicial, sendo assim, torna-se necessário adicionar estabilizantes, como cimento, cal, palha, dentre outros, que possam auxiliar no ganho de resistência e durabilidade do material (ABIKO, 1984).

O solo-cimento é um material resultante do processo químico de estabilização, de forma que o cimento hidratado envolve as partículas de solo, tornando este o microagregado.

De acordo com Segantini e Alcantara (2010), há três tipos de produção do solo-cimento: o compactado, o autoadensável e o vibrado. Eles variam nas formas de adensamento. No caso do solo-cimento compactado, deve ser adicionada água de forma que seja suficiente, possibilitando assim a máxima compactação, diferentemente do autoadensável, em que a água deve ser adicionada até que se obtenha uma consistência plástica.

Alguns trabalhos recentes vem apresentando resultados sobre o comportamento do solo-cimento autoadensável (SCAA), mostrando suas características no estado fresco e seu desempenho no estado endurecido, indicando um grande potencial para aplicação em diversas áreas da construção.

Em 2013, Bertè e Alcantara realizaram um estudo experimental sobre o solo cimento autoadensável, variando o teor de cimento, água e superplastificante, com a

finalidade de verificar a variação das propriedades no estado fresco e endurecido. Nesse estudo, foi possível ver que a resistência mecânica a compressão simples varia entre 2 MPa e 7,5 MPa, conforme varia a dosagem de cimento em relação ao solo seco.

Em 2015, Alcântara, Custódio e Vizhalil pesquisaram sobre a influência do uso de cinza de casca de arroz como aditivo auxiliar em solo-cimento autoadensável, visando observar a influência do fino no ganho de resistência.

O fino ativo utilizado para esta pesquisa foi a sílica ativa, que é composta por partículas de sílica amorfa esféricas e finas. Este fino apresenta uma grande reatividade com o produto da hidratação do cimento Portland, proporciona um melhor empacotamento das partículas de cimento pela sua finura e evita a formação de cristais de hidróxido de cálcio, uma vez que a partir das reações pozolânicas forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que aumenta a resistência a ambientes agressivos.

No Brasil há vários tipos de cimento, que variam na sua trabalhabilidade, durabilidade, resistência, etc., sendo o Portland um desses tipos. O cimento Portland é obtido através da pulverização do clínquer, que é formado por silicato e aluminato de cálcio, os quais ao serem misturados com água, sofrem o processo de hidratação e ocorre o endurecimento da massa, ganhando assim resistência mecânica. Dentro desse tipo de cimento há várias classificações e, dentre elas, há o cimento Portland composto por pozolana (CP-II-Z) e o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI).

De acordo com Neville (2016), o cimento Portland de Alta Resistência Inicial confere uma resistência mais elevada do que os cimentos convencionais. O ganho de resistência mais rápido é obtido através de um teor mais alto de C_3S e uma moagem maior do clínquer, adquirindo assim uma maior finura, que ocasiona uma rápida hidratação. Ainda em relação ao estado fresco, considera-se que a mistura possa sofrer variações na sua consistência, em razão da interferência da dupla camada difusa, pela presença de íons Ca^{++} ou pelo processo de troca iônica.

Entretanto, este ganho de resistência devido as reações pozolânicas, ocorrem com diminuição no valor do pH, de acordo com Segantini e Alcantara (2017). Assim,

torna-se importante o estudo acerca da variação do tipo de cimento, utilizando finos ativos como aditivo auxiliar, para assim verificar e correlacionar a resistência mecânica com os valores de alcalinidade, assim como a influência desta alcalinidade nas propriedades do estado fresco.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O estudo tem como objetivo analisar a influência das condições de alcalinidade nas reações de estabilização do solo-cimento autoadensável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência dos cimentos do tipo Portland composto com pozolana (CPZ-II-32) e de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI) no processo de estabilização solo-cimento autoadensável, contendo finos ativos como estabilizantes auxiliares.
- Correlacionar os valores da resistência mecânica alcançadas e os níveis de alcalinidade.
- Influência da alcalinidade no desenvolvimento de suas propriedades no estado fresco.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SOLO-CIMENTO

3.1.1 Definição e histórico

O solo-cimento pode ser definido, de acordo com a NBR 12253/2012, como um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Segundo Andrade Filho (1989), o conceito de solo-cimento teve origem em Salzburg em 1917, porém foi apenas depois de 1932 que tiveram os primeiros trabalhos cientificamente controlados por meio da utilização na pavimentação de 17.000 m² em Johnsonville, na Carolina do Sul, EUA. A normalização dos ensaios com o solo-cimento se deu em 1944, por meio da ASMT (American Society for Testing Materials), seguida da AASHO (American Association of State Highway) e pela PCA (Portland Cement Association).

No Brasil, o assunto se iniciou por meio da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) em 1936, o qual regulamentou e pesquisou sua aplicação, fazendo com que em 1941 ele fosse utilizado na pavimentação do aeroporto de Petrolina, PE. Já em 1945, foi realizada a primeira edificação com solo-cimento, que consistia na construção de uma casa de bombas no aeroporto de Santarém, Pará, seguida da construção de 10.800 m² de paredes monolíticas no hospital Adriano Jorge em 1950, em Manaus.

Após 1960, o solo-cimento teve mais aceitação e passou a ser utilizado na pavimentação das vias urbanas, rodovias e aeroportos; no revestimento de barragens de terra e de canais de irrigação; na fabricação de tijolos para alvenaria de vedação, entre outras aplicações. Tanto no Brasil como em outros países, ele é mais utilizado na pavimentação de rodovias e nos últimos anos houve o aumento do interesse pelas construções com tijolos modulares, por causa da preservação ambiental e redução de custos.

3.1.2 Estabilização de solos

O emprego do solo como material de construção civil é algo que vem sendo recorrente, porém ainda há muito a ser estudado sobre o material, como a relação entre a resistência no estado endurecido e a composição da mistura no estado fresco.

Os princípios que regem a estabilização dos solos tendem a conferir uma melhor estabilidade dimensional ao produto final, proporcionando uma redução de fissuras por retração e por expansão devido a variação da umidade e temperatura; aumento da resistência mecânica; diminuição da permeabilidade, e, por fim, o aumento da durabilidade do material. De fato, a estabilização promove:

- Redução do volume de vazios;
- O preenchimento dos vazios que não podem ser eliminados por completo;
- A melhoria da aderência entre os grãos, conferindo maior compacidade.

Há três principais métodos de estabilização dos solos:

- Estabilização mecânica;
- Estabilização física;
- Estabilização química.

A estabilização mecânica consiste em compactar o solo por meio de uma ação mecânica, conferindo a mistura ganho de densidade, de resistência mecânica e redução da permeabilidade e porosidade.

A estabilização física consiste na adição de grãos de diferentes granulometrias, de forma otimizar as proporções entre silte, argila e areia, promovendo assim um melhor empacotamento dos grãos.

A estabilização química ocorre quando outros materiais são adicionados ao solo, modificando suas propriedades por reação físico-química entre os grãos e o material ou criando uma matriz que aglutina e cobre os grãos, conferindo maior coesão entre as partículas. Os materiais mais utilizados para esse tipo de estabilização são: cimento Portland, cal, betume e fibras.

A opção pelo tipo de estabilização é influenciada por fatores como: viabilidade econômica, finalidade da obra, características das matérias e propriedades do solo que se deseja corrigir/adequar.

3.1.3 Composição do solo-cimento

De acordo com Pinto (1983), alguns fatores podem influenciar nas propriedades do solo-cimento, como: o tipo de solo, o teor de cimento, o teor de umidade, a compactação e a mistura.

3.1.3.1 Solo

O solo é o componente de maior proporção na mistura do solo-cimento e o tipo de solo a ser estabilizado é um fator essencial.

Os solos, segundo Pinto (1998), podem ser definidos por um conjunto de partículas sólidas provenientes da desagregação de rochas por meio físico e químico.

Geralmente, os mais adequados para a estabilização com cimento são os que apresentam uma granulometria não uniforme. Segundo Segantini e Alcântara (2010), a presença de grãos de areia grossa e pedregulhos é algo favorável à composição, uma vez que estes são materiais com função de preenchimento dos vazios, fazendo com que os produtos das reações do solo-cimento ajam somente na ligação dos grãos, influenciando assim na resistência.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) divide os solos em 3 tipos, de acordo com sua granulometria:

- **Solos arenosos e pedregulhosos com cerca de 10 a 35% da fração de silte+argila:** é considerado o mais favorável à estabilização com cimento.
- **Solos arenosos deficientes em finos:** há uma maior dificuldade em relação à compactação e acabamento, quando comparado ao anterior.
- **Solos siltosos e argilosos:** tem uma maior dificuldade na pulverização, além de apresentar um certo teor de matéria orgânica que tende a reduzir a resistência do solo-cimento.

Assim, os mais utilizados são o de origem arenosa ou areno-siltosa, uma vez que, de forma geral, como o teor de cimento aumenta conforme o teor de argila, esses

solos favorecem na diminuição da quantidade de cimento necessário, se tornando mais econômico. Entretanto, a argila é necessária na composição para dar coesão na mistura quando umedecida e compactada, de forma a garantir o desmolde.

3.1.3.2 Cimento

Em relação ao cimento, o mais utilizado é o cimento Portland, devido à sua fácil obtenção no mercado. Segundo a ABNT/NBR 5732:1991, o cimento Portland comum pode ser definido como:

Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

O clínquer tem como principais componentes o óxido de cálcio (CaO), o óxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), os quais ao serem pulverizados formam os silicatos e aluminatos de cálcio, dos quais se destacam:

- Silicato tricálcico, ou alita $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ ou pela fórmula usual C_3S ;
- Silicato dicálcico, ou belita $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ ou pela fórmula usual C_2S ;
- Aluminato tricálcico $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$ ou pela fórmula usual C_3A ;
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou pela fórmula usual C_4AF ;

Dentre esses componentes do cimento, dois têm grande importância no processo de hidratação. A alita (C_3S) e a belita (C_2S) são responsáveis pelo ganho de resistência, sendo uma pela resistência inicial, reagindo nas idades iniciais (3 a 28 dias) e com alta liberação de calor, e a outra a longo prazo (mais de 28 dias) com baixa liberação de calor, respectivamente. Já o C_3A reage nos primeiros instantes, não ocasionando um grande desenvolvimento de resistência e o C_4AF tem um desenvolvimento lento e pequeno em relação à resistência mecânica.

Esses componentes quando misturados com água, sofrem o processo de hidratação, que forma uma pasta, a qual tem como produtos: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita).

Durante a estabilização do solo-cimento, ocorre uma reação química entre o cimento e os minerais do solo. Os cátions que são fornecidos pelo hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução, formando, posteriormente, produtos cimentantes que acrecem rigidez a mistura.

Além disto, também ocorrem ligações mecânicas e químicas entre os grãos do solo e o cimento. Como o cimento se fixa através da superfície de contato entre os grãos, conforme maior a superfície de contato, a cimentação se torna mais efetiva, gerando assim um maior ganho de resistência.

De acordo com Pecoriello (2003), pode ser utilizado qualquer tipo de cimento na mistura, entretanto, segundo a ABCP, os cimentos a serem utilizados devem atender a uma das especificações:

- NBR 5732 - Cimento Portland Comum;
- NBR 11578 - Cimento Portland Composto;
- NBR 5735 - Cimento Portland de Alto-Forno;
- NBR 5736 - Cimento Portland Pozolânico;
- NBR 5733 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

O Cimento Portland Composto Com Pozolana (CP-II-Z) é caracterizado por constituir a pozolana, na ordem de 6% a 14%, o que confere uma maior impermeabilidade e durabilidade ao concreto, sendo mais presentes em obras subterrâneas e locais com a presença de água. Já o cimento Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI) é caracterizado por não conter aditivos e ser diferenciado no processo de dosagem e produção do clínquer.

3.1.4 Solo-cimento autoadensável

O solo-cimento pode ser produzido com características distintas. Segundo Segantini e Alcântara (2010), os tipos de solo-cimento podem ser classificados como:

- Compactado: o tipo mais convencional e que precisa de compactação para estabilizar e atingir as características desejadas;
- Vibrado: chamado também de solo-cimento plástico, ele é semelhante ao concreto convencional, sendo seu adensamento realizado por vibração;

- Autoadensável: requer menos energia para sua aplicação, uma vez que seu adensamento é realizado através do seu próprio peso, gerando uma economia na sua utilização.

O solo-cimento autoadensável é produzido com os mesmo insumos do solo-cimento convencional, entretanto recebe adição de superplastificantes para aumentar sua fluidez, aumentando assim sua trabalhabilidade. Além disso, possui um teor maior de cimento e pode receber a adição de finos que melhoram suas características no estado fresco e endurecido.

Os superplastificantes podem atuar por desfloculação ou dispersão das partículas, por meio da ação eletrostática e estérica, diminuindo a coesão da mistura ou como incorporadores de ar. Quanto maior seu uso na mistura, maior será a fluidez, melhorando assim a trabalhabilidade, mas o uso em excesso pode inviabilizar a mistura, gerando segregação e exsudação, impedindo a homogeneidade da mistura.

A água também é uma maneira para conferir fluidez a mistura, segundo Gomes e Barros (2009). A relação a/c varia de acordo com o tipo de concreto desejado. Para um de alto desempenho, a relação a/c é em torno de 0,35, já para concretos convencionais, ela sobe para a faixa de 0,5, enquanto que para concreto autoadensável gira em torno de 1,20. De acordo com a lei de Abrams, a resistência do concreto pe função da relação a/c e quanto maior essa relação, menor será a resistência do concreto.

O uso de ambos em excesso pode gerar a segregação ou exsudação e, para a contenção desse processo, podem ser adicionados finos a mistura. A utilização desses finos ajuda na realização do solo cimento autoadensável, visto que são agentes formados de pasta e conferem coesão interna e homogeneidade a mistura, impedindo que ocorra os processos de exsudação e segregação.

Um dos principais requisitos de desempenho do SCAA é manter um valor crítico de tensão interna que garanta a homogeneidade da mistura, impedindo que ocorra a segregação e a exsudação, e que simultaneamente apresente uma baixa viscosidade, aumentando a trabalhabilidade do material. Por fim, que apresente boas características no estado endurecido, como alta resistência mecânica e durabilidade.

3.2 ESTUDOS AUXILIARES

Neste item são apresentadas pesquisas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, visando a continuidade de uma linha de pesquisa.

3.2.1 Berté e Alcantara (2013)

Em 2013, Berté e Alcantara desenvolveram um estudo sobre o solo-cimento autoadensável em seu estado fresco e endurecido, estudando as características para as diferentes misturas.

A pesquisa contou com 27 misturas que tinha a massa de solo fixada e variavam os teores de cimento, água e aditivo superplastificante. No estado fresco foram realizados os seguintes ensaios: do funil, de espalhamento, de segregação, de adensamento e de moldagem de corpos de prova via escoamento por gravidade. Já no estado endurecido, realizaram ensaios de resistência a compressão axial e de absorção de água.

Com relação aos resultados dos ensaios no estado fresco, observou-se que a adição de água promove um aumento do diâmetro de espalhamento, enquanto que a adição de cimento inibe este aumento, promovendo assim uma diminuição do diâmetro. No ensaio do escoamento foi visto que a adição de cimento na maioria das misturas promove um aumento da viscosidade, diminuindo a vazão no funil, porém em outras observou-se o contrário, que pode ser explicado por um comportamento estérico-eletrostático.

Os ensaios de resistência a compressão axial mostraram que existe uma relação direta, e inversamente proporcional, da resistência com a relação a/c , de forma com que quanto maior a relação a/c , menor a resistência encontrada. Todas as resistências são maiores que 2 MPa, o que atende o prescrito na NBR 8491 (ABNT, 1984). Nos ensaios de absorção de água observou-se uma certa diminuição da absorção de água com o aumento do consumo de cimento, porém nada bem definido quando varia a quantidade de água e aditivo. Todos os resultados para este ensaio ficaram abaixo do que prescreve a NBR 8491 (ABNT, 1984).

Diante estes resultados, os autores concluíram que os objetivos foram alcançados e que os resultados sugerem que se possam produzir componentes de alvenaria em SCAA similares aos tradicionais.

3.2.2 Alcantara, Custódio e Vizhalil (2015)

Em 2015, Alcantara Custódio e Vizhalil desenvolveram um estudo sobre solo-cimento autoadensável com uso de cinzas de cascas de arroz (CCA) como aditivo auxiliar, para identificar a influência da cinza na mistura no estado fresco e endurecido.

A pesquisa tomou como base o peso de solo seco e adotou as seguintes proporções para a composição: 30% de cimento, 20% de areia, a quantidade em água em torno de 30% dos materiais secos, e o teor do superplastificante em torno de 0,4% dos materiais secos. Para as cinzas foram utilizadas as proporções: 0%, 5,0%, 7,5% e 10% em relação ao peso do cimento.

No estado fresco foram realizados os ensaios de espalhamento e o de escoamento confinado. Observou-se que o diâmetro de espalhamento é diretamente proporcional a vazão mássica, além de que quanto maior a porcentagem de CCA na mistura, menores os valores obtidos na vazão mássica e no diâmetro de espalhamento, gerando assim um aumento na viscosidade da mistura sem inviabilizar o processo de autoadensamento. Logo, pode-se dizer que a CCA se mostrou como um agente formador de pasta, reduzindo a segregação e exsudação.

Já no estado endurecido, foram feitos os ensaios de resistência à compressão simples e diametral e ensaio de absorção. Nos resultados, pode-se observar que aos 28 dias de cura, a adição de CCA oferece um ganho de resistência em relação a mistura de referência, podendo ser devido as reações pozolânicas da cinza que se somam a resistência fornecida pela hidratação do cimento. Para as composições de 7,5% e 10% de adição de cinza, o ganho de resistência foi menos significativo, o que pode ser devido a geração de uma matriz com condições desfavoráveis para o processo de difusão iônica. Com relação aos testes de absorção, a adição de cinzas não influenciou nos resultados.

Portanto, o estudo mostrou que a adição de cinzas de casca de arroz não inviabiliza o uso de solo-cimento autoadensável, uma vez que traz ganho de resistência de acordo com a porcentagem de cinza adicionada e com o tempo de cura.

3.3 SÍLICA ATIVA

Segundo Almeida (1996), a sílica ativa é um subproduto da indústria do ferrossilício, material que possui extrema finura e elevada leveza, porém altamente poluente.

O concreto possui uma zona de transição entre as partículas de agregado e a matriz do cimento, a qual é a mais fraca da composição. Sendo assim a adição de materiais pozolânicos fariam com que essa camada diminuísse de espessura, uma vez que há a formação de uma grande quantidade de hidróxido de cálcio nessa zona de interface, o qual é o material mais frágil dos produtos do cimento. Além disso, segundo Liborio (2002), nessa região também existem poros contendo água e ar, que, dependendo da forma do agregado, faz com que o corpo de prova seja rompido sem que sua capacidade de resistência seja atingida.

A sílica possui dois modos de atuação na matriz do cimento:

- Física: a sílica atua como fíler (ou preenchendo vazios), devido a sua elevada área específica, ocupando assim os espaços entre os grãos de cimento. Essa ação faz com que aumente a coesão e a compacidade da pasta e diminua a zona de interface agregado-pasta;
- Química: sua ação química é devido a reação pozolânica, a qual se dá pela transformação do hidróxido de cálcio em silicato de cálcio hidratado, que é o responsável pela aderência e que possui alta resistência.

Portanto, quando bem dosado, sua adição traz benefícios as composições, como: aumento de resistência mecânica a compressão e tração, menor permeabilidade, maior resistência ao ataque por sulfatos e cloretos, redução da fluência, etc.

Em relação a dosagem, há considerações sobre o teor ideal a ser adicionado nas composições. Monteiro (1995) concluiu a partir dos seus estudos que 5% de sílica reduz 57% da espessura da zona de interface em 30 dias. Já Isaia (1995) realizou estudos acerca do pH, concluindo que para uma substituição de até 20% de massa de cimento por microssílica, o pH tem valores acima de 12.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização das misturas, foram utilizados 4 elementos principais: solo, cimento, areia, água e superplastificante.

O solo proposto foi do tipo argissolo da região de Ilha Solteira, o qual já foi utilizados em demais pesquisas pela UNESP/FEIS. A areia incorporada foi de origem natural, a qual está presente no laboratório de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira. Apenas solo foi peneirado para apenas obter sua fração fina.

Para o cimento, serão abordados dois tipos: cimento Portland composto com pozolana, do tipo CPZ-II-32, e cimento de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI), uma vez que busca-se avaliar a resistência mecânica com diferentes propostas.

Em relação aos materiais líquidos, juntamente com a água, a qual tem origem do sistema de abastecimento municipal, foi utilizado o superplastificante de origem estérica e eletrostática, à base de carboxilatos, afim de garantir uma maior fluidez e trabalhabilidade para a mistura.

Como fino ativo, foi proposto a utilização da sílica ativa.

Figura 1 - Materiais utilizados nas misturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 COMPOSIÇÕES

Como o objetivo do estudo é avaliar a influência das composições na estabilização do solo-cimento, são propostas 12 diferentes misturas, as quais tem como variante: o tipo de cimento, a quantidade de cimento em relação a quantidade de solo utilizado e o teor de sílica ativa para cada teor de cimento.

Tratando dos elementos secos da mistura, os teores de cimento propostos foram de 20%, 25% e 30% em relação a massa seca de solo. Para a sílica ativa também foram utilizados dois teores: 0% (referência) e 7,5%. Já a areia foi da ordem de 15% em relação a massa seca de solo.

Acerca dos materiais líquidos, o teor de água empregado foi da ordem de 32% em relação ao material seco e o teor de superplastificante foi de 0,04% em relação a massa seca total.

Logo, nas tabelas abaixo estão as composições utilizadas para o estudo.

Tabela 1. Composições de referência da mistura de solo-cimento.

COMPOSIÇÃO	MATERIAIS				
	Solo (kg)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Superplastificante (g)
20% Referência	12	2400	1780	5180	38
25% Referência	8,4	2100	1246	3626	26,6
30% Referência	8,4	2520	1246	3626	26,6

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2. Composições da mistura de solo-cimento com adição de sílica ativa.

COMPOSIÇÃO	MATERIAIS					
	Solo (kg)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Superplastificante (g)	Sílica Ativa (g)
20% com 7,5% de Sílica	8,4	1680	1246	3626	26,6	126
25% com 7,5% de Sílica	7,2	1800	1068	3108	22,8	135
30% com 7,5% de Sílica	8,4	2520	1246	3626	26,6	189

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se notar que a quantidade de solo variou após a primeira mistura, uma vez que foi preferido evitar o desperdício dos materiais. Portanto, as composições de

25% e 30% referência, 20% e 30% com 7,5% de sílica, foram feitas com 70% do valor de base, que é o da composição de 20% referência. Já a de 25% com 7,5% de sílica, foi feita com 60% da composição de base.

4.3 METODOLOGIA

De início foram pesados todos os materiais que compõe as misturas, sendo a água separada em dois recipientes, cada um com 50% do total, para assim, em um dos recipientes ser misturado o superplastificante.

Em seguida, com o auxílio da betoneira, foram misturados os materiais secos: solo, areia, cimento e sílica (quando havia na composição) por 1 minuto. Após a mistura ficar homogênea, foi adicionado o recipiente de água sem superplastificante e em seguida bateu-se por mais 1 minuto.

Ao finalizar, com o auxílio de uma pá, foram destorreados alguns torrões presentes na mistura, de forma a garantir uma mistura mais homogênea. O restante da água com superplastificante foi incorporado e continuou-se a bater por mais 1 minuto. Ao serem observados alguns torrões restantes, utilizou-se a pá novamente e deixou-se a mistura descansar por 30 segundos.

Após o descanso, a primeira análise a ser feita era se a mistura estava fluida ou não, uma vez que a fluidez da composição pode alterar com o teor de sílica ativa e como ela reage com o tipo e teor de cimento. Após realizar esta observação, misturou-se novamente por 30 segundos. Esse processo de descanso e mistura se deu por mais 2 vezes, sendo que na última o descanso foi de 3 minutos, para assim serem iniciados os ensaios no estado fresco e em seguida serem moldados os corpos de prova.

4.3.1 Ensaios no estado fresco

Nos ensaios do estado fresco, foi preciso utilizar uma mesa de superfície lisa que já havia no laboratório. Antes de inicia-los, foi jogada água com a mangueira e tirado o excesso, para que a superfície ficasse homogênea afim de obter melhores resultados.

O primeiro ensaio a ser realizado foi o do espalhamento, também conhecido como “Slump-Flow”, o qual tem como finalidade avaliar a fluidez da mistura. Neste

ensaio foi utilizado o cone de Adams, o qual foi preenchido com a mistura até o final. Após o preenchimento, levantou-se o cone verticalmente e obteve-se um diâmetro com o espalhamento da mistura. Esse diâmetro foi medido com uma régua em duas direções, afim de garantir um diâmetro médio. Após finalizar o ensaio, a mistura voltou para a betoneira e bateu-se por mais 1 minuto.

Figura 2 – Cone de “Adams” preenchido com a mistura de solo-cimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3 - Diâmetro obtido a partir do “Slump-Flow”.



Fonte: Elaborado pela autora.

O segundo ensaio realizado foi o do escoamento confinado, o qual leva em consideração o tempo de fluxo e a massa escoada, para assim determinar a vazão

mássica, verificar se existem bloqueios e comparar as viscosidades dos diferentes teores.

Neste ensaio foi utilizado um balde, para coletar a massa da mistura escoada, e um funil feito com uma garrafa plástica, com duas aberturas, sendo uma de diâmetro pequeno e outra maior. Este funil foi preenchido com a mistura até restar aproximadamente 3 dedos, sendo essa medida fixada, tampando-se a abertura inferior com a mão para o preenchimento. Após isso, a mão foi removida e iniciou-se o escoamento. Durante esse processo, foi cronometrado o tempo até que o fluxo fosse finalizado. Por fim, foi pesada a massa coletada no balde.

Figura 4 - Ensaio do escoamento confinado.



Fonte: Elaborado pela autora.

O terceiro ensaio foi o da massa específica. Nele, foi utilizado um molde cilíndrico de PVC, com volume igual a 0,75L. Este molde foi preenchido com a mistura e pesado na balança, para assim obter a massa específica e verificar sua adensabilidade.

Figura 5 - Ensaio da massa específica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, foi feita a medição do pH, afim de analisar a alcalinidade da mistura. Com o molde preenchido pelo ensaio anterior, no laboratório de saneamento, utilizou-se do pHmetro, já calibrado, para realizar a medição. Primeiro foi feita a higiene do medidor com água potável e papel para não afetar a medição, em seguida o medidor foi submergido na mistura e feitos movimentos leves e circulares afim de garantir um resultado mais adequado. O resultado foi obtido assim que o equipamento deu um sinal sonoro.

Figura 6 – Phmetro.



Fonte: LABDEL^[1].

4.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Após a realização dos ensaios, foram moldados 16 corpos de prova em moldes cilíndricos de PVC com dimensão 5x10 cm. Estes moldes foram preenchidos e não foi necessário o uso de vibrador, uma vez que a mistura é autoadensável.

Após 24h, foi feita a desmoldagem com o auxílio do ar comprimido e os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida, com teor de umidade de aproximadamente 100% e a temperatura de aproximadamente 22°C.

Figura 7 - Corpos de prova desmoldados.



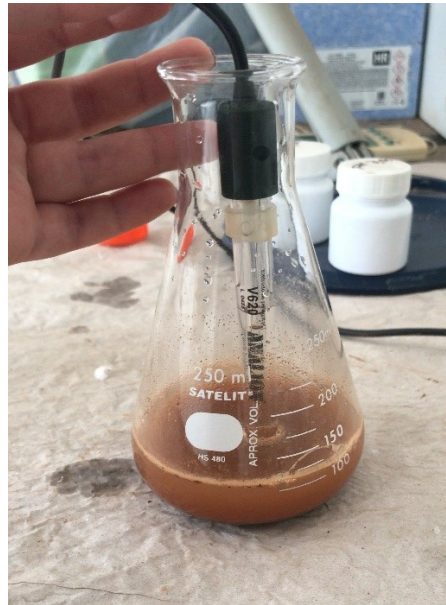
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3 Ensaios no estado endurecido

Para obtenção dos resultados foram propostos os tempos de cura de 7 e 28 dias. Quando dado o tempo de cura, foi realizado o ensaio mecânico de compressão simples, conforme a NBR 12025:2012, de forma a obter os resultados de resistência das diferentes misturas.

Realizado o ensaio de compressão, o corpo de prova foi destorreado em um almofariz e pesado, fixando uma massa de 20g para a realização da medição do pH. Além disso, com o auxílio de um Erlenmeyer, foi preparada uma solução com 100ml de água deionizada, onde foi adicionada a massa destorreada e misturado. Com essa mistura, no laboratório de saneamento foi efetuada a medição do pH com pHmetro, realizando o mesmo processo feito quando mediu-se no estado fresco.

Figura 8 – Medição do pH.



Fonte: Elaborado pela autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido, realizados de acordo com os itens 4.3.1 e 4.3.3, avaliando-se inicialmente a alteração da fluidez para os tipos e quantidades de cimento e adição da sílica, além da alcalinidade das misturas no estado fresco. Em seguida será avaliado a resistência mecânica a compressão axial e se houve alteração na alcalinidade nos diferentes tempos de cura e mistura.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO

Os resultados para os ensaios no estado fresco estão apresentados na Tabela 3 e 4.

Tabela 3. Resultados obtidos dos ensaios no estado fresco para o cimento CPZ-II-32.

CIMENTO CPII						
Composição/ Ensaio	Referência			Com 7,5% de sílica ativa		
	20%	25%	30%	20%	25%	30%
Diâmetro (cm)	32,92	30,25	26,5	27,25	15,25	16,25
Vazão (kg/s)	0,36	0,24	0,31	0,34	0,12	0,18
Massa específica (kg/L)	1,39	1,43	1,43	1,4	1,38	1,42
pH	12,25	12,73	13,16	13,3	13,09	13

Fonte: Elaborado pela autora.

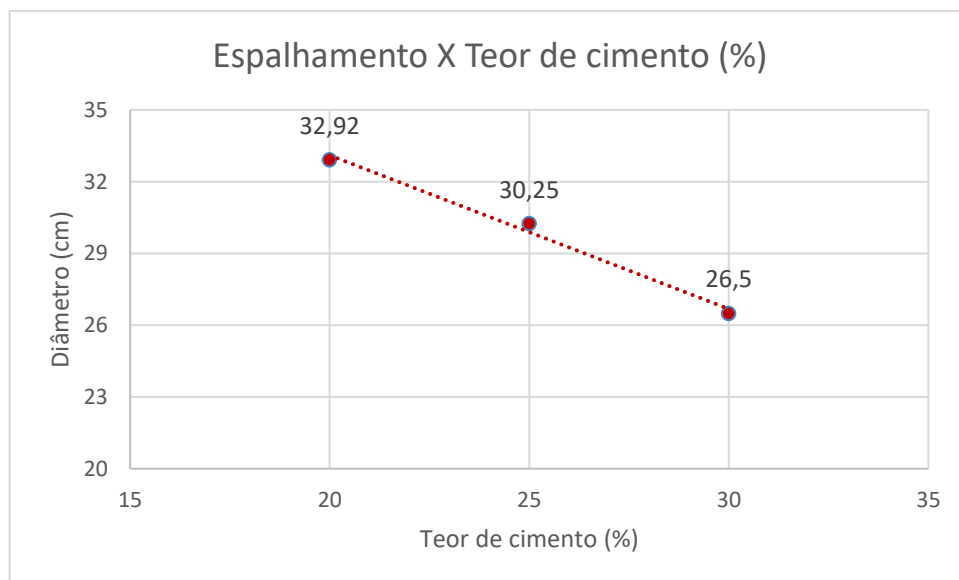
Tabela 4. Resultados obtidos dos ensaios no estado fresco para cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

CIMENTO ARI						
Composição/ Ensaio	Referência			Com 7,5% de sílica ativa		
	20%	25%	30%	20%	25%	30%
Diâmetro (cm)	36	33,5	29	27,5	20,5	29,75
Vazão (kg/s)	0,29	0,32	0,31	0,3	0,15	0,32
Massa específica (kg/L)	1,37	1,42	1,44	1,41	1,4	1,41
pH	12,75	12,87	13,22	13,08	13,15	13,07

Fonte: Elaborado pela autora.

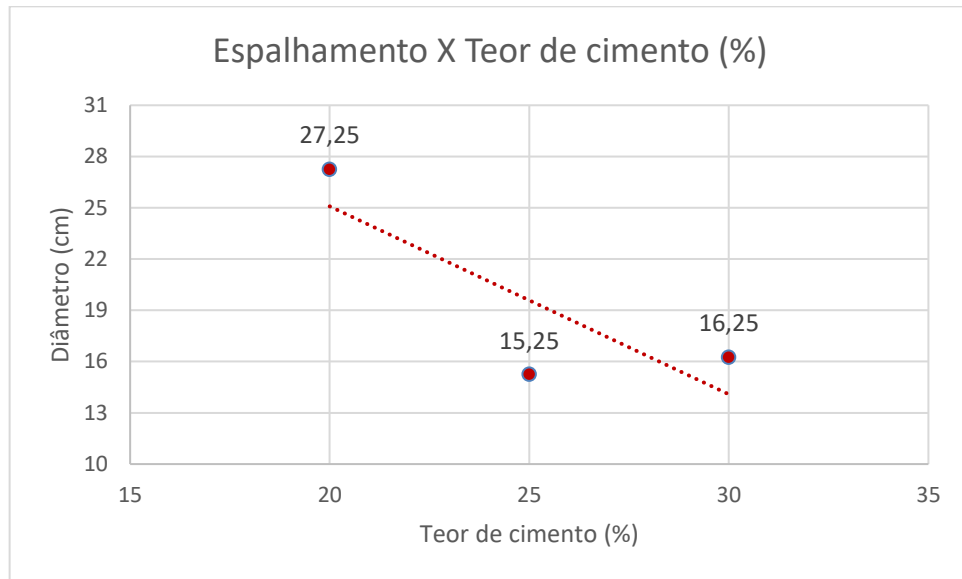
O diâmetro de espalhamento tem como objetivo evidenciar a fluidez e trabalhabilidade da mistura. Analisando as tabelas acima, pode-se observar que conforme elevou-se o teor de cimento, o diâmetro foi diminuindo. Além disso, quando comparado o cimento CPZ-II-32 e o de CP-V-ARI, pode-se notar que o CPZ-II-32 foi mais afetado com este aumento no teor de cimento. Quando adicionada a sílica, o diâmetro diminuiu ainda mais. Portanto, pode-se constatar que o cimento teve uma grande influência com relação a viscosidade da mistura, o que pode ser em razão da elevada superfície de contato, aumentando a coesão da mistura, e a sílica também pelas mesmas razões.

Figura 9 – Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas de referência com CPZ-II-32.



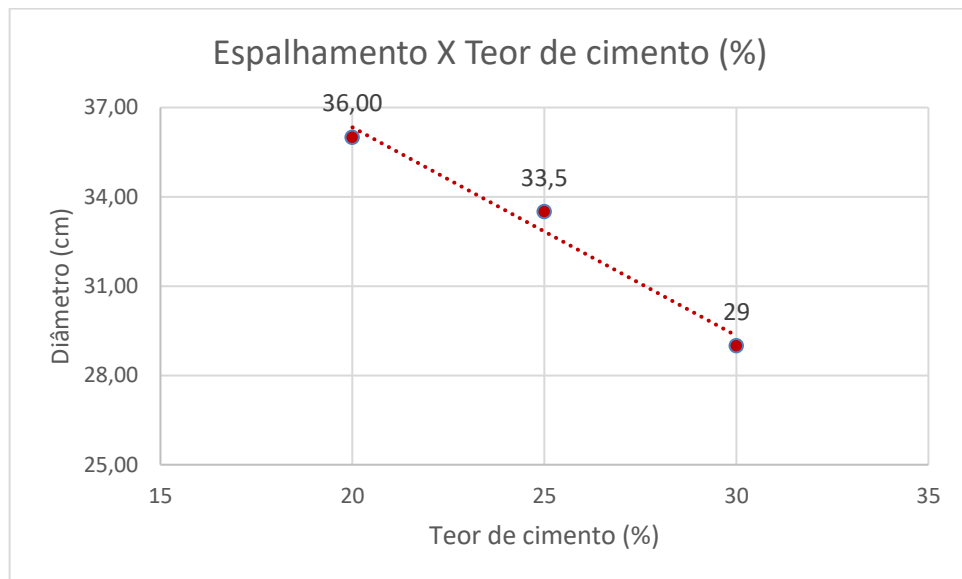
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas com sílica ativa com CPZ-II-32.



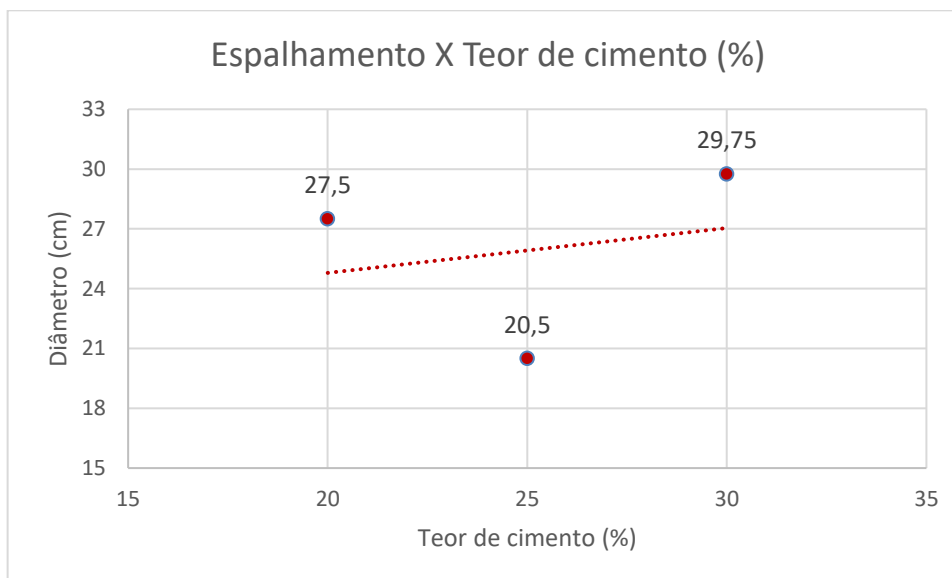
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11 – Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas de referência com CP-V-ARI.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Relação entre o diâmetro de espalhamento e teor de cimento para as misturas com sílica ativa com CP-V-ARI.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação a vazão mássica, é notável que o cimento de Alta Resistência Inicial teve pouca variação, salvo para a composição de 25% com sílica. Já para o CPZ-II-32, ocorreu uma variação quando adicionada a sílica ativa. Isto quando correlacionado com o diâmetro de espalhamento, pode-se notar que, no caso do Portland Composto com Pozolana, conforme diminuiu o diâmetro, ou seja, abaixou o nível de fluidez, a vazão também diminuiu pela maior viscosidade que a mistura apresentou.

No caso da massa específica, pode-se perceber que ela aumenta conforme aumenta o teor de cimento, isso porque a massa específica do cimento é da ordem de 3,15 kg/L e maior que a do solo. Entretanto quando adicionada a sílica, ocorre a diminuição da massa específica, o que pode ser justificado pela condição de mobilidade da mistura, conforme apresentado nos ensaios do espalhamento e do funil.

Além disso, quando comparado o cimento Portland Composto com Pozolana e o de Alta Resistência Inicial, é visto que o cimento ARI tem a massa específica menor que o CPZ-II-32, o que pode ser devido a cal que é liberada na reação de hidratação, modificando assim a textura da mistura.

As condições de alcalinidade, feita através da medição do pH, foram mais elevadas no cimento ARI quando comparado com o CPZ-II-32 nas composições de

referência, isso pode ser em razão de uma maior liberação de cal hidratada no processo de hidratação do cimento Portland. Nas composições com a presença da sílica, o pH é mais elevado quando comparado com as de referência, salvo para as composições de 30%. Isso se dá devido a sinergia entre as condições de alcalinidade da sílica e do cimento.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados para os ensaios no estado endurecido estão apresentados na Tabela 5 e 6.

Tabela 5. Resultados obtidos dos ensaios no estado endurecido para o cimento CPZ-II-32.

CIMENTO CPII							
Ensaio	Tempo de cura	Referência			Com 7,5% de sílica ativa		
		20%	25%	30%	20%	25%	30%
Compressão Axial (Mpa)	7 dias	1,4	3,77	2,67	1,58	2,51	2,81
	28 dias	1,99	2,36	2,53	2,61	3,57	5,48
pH	7 dias	12,77	12,68	12,74	12,78	12,73	12,81
	28 dias	12,75	12,82	12,7	12,72	12,78	13,12

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6. Resultados obtidos dos ensaios no estado endurecido para o cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

CIMENTO ARI							
Ensaio	Tempo de cura	Referência			Com 7,5% de sílica ativa		
		20%	25%	30%	20%	25%	30%
Compressão Axial (Mpa)	7 dias	2,64	4,9	2,67	2,2	4,11	2,88
	28 dias	3,22	3,15	6,1	4,82	5,45	4,22
pH	7 dias	12,54	12,66	12,68	12,76	12,65	12,92
	28 dias	12,91	12,95	12,88	12,84	12,9	13,29

Fonte: Elaborado pela autora.

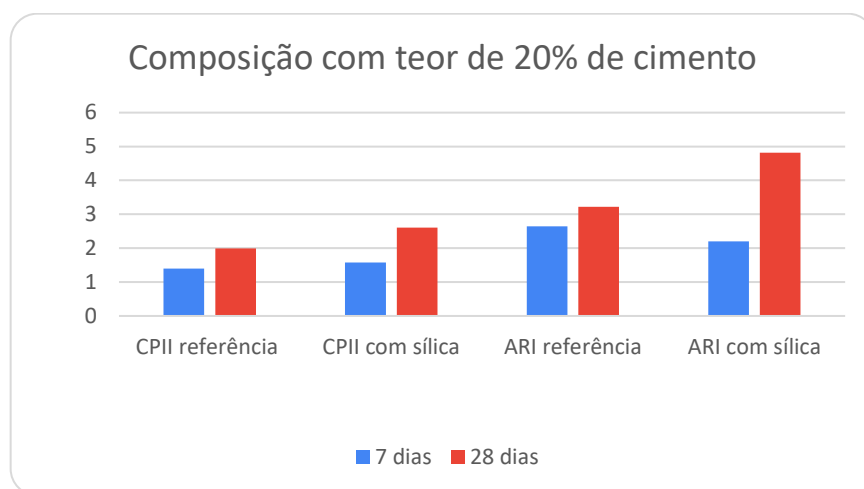
Analisando a resistência a compressão axial no geral, pode-se notar que ela tende a aumentar conforme aumenta o tempo de cura e o teor de cimento presente na mistura. O ganho percentual quando comparado ao tempo de cura de 7 e 28 dias foi da ordem de 20,59% para o cimento ARI referência e 57,26% para o ARI com sílica. Já para o cimento CPZ-II-32, o ganho foi da ordem de 3,07% para o referência e

66,17% para a mistura com sílica ativa. Assim, pode-se perceber que o ganho foi mais sensível para o cimento ARI, quando sem a sílica, e razoavelmente parecido quando adicionada a sílica.

Logo, é visível que a sílica faz com que o concreto tenha um melhor desempenho quanto a resistência, em razão da reação com o hidróxido de cálcio, que gera mais silicato de cálcio hidratado, ganhando assim resistência.

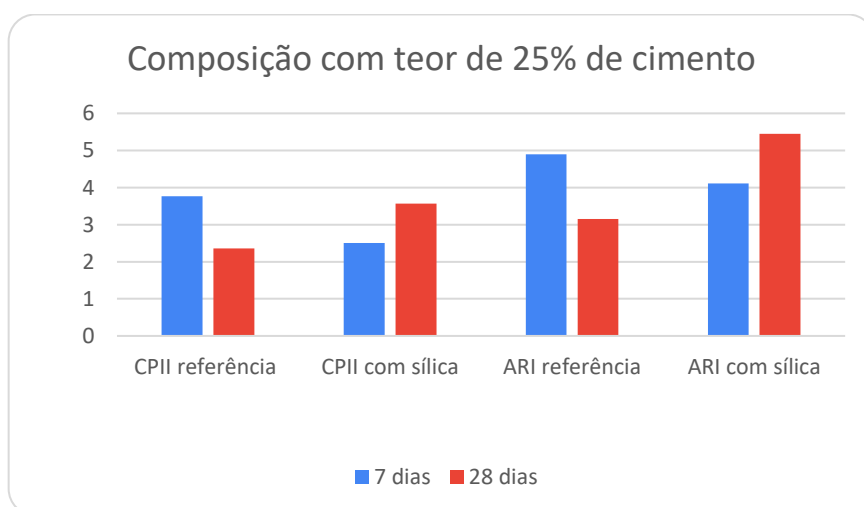
A partir dos gráficos abaixo pode-se observar as comparações das misturas.

Figura 13 - Resistência para a composição com teor de 20% de cimento.



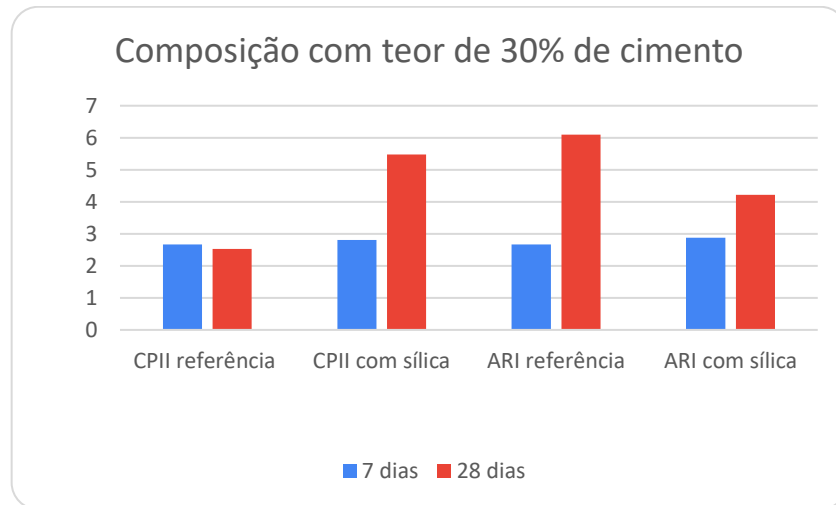
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14 - Resistência para a composição com teor de 25% de cimento.



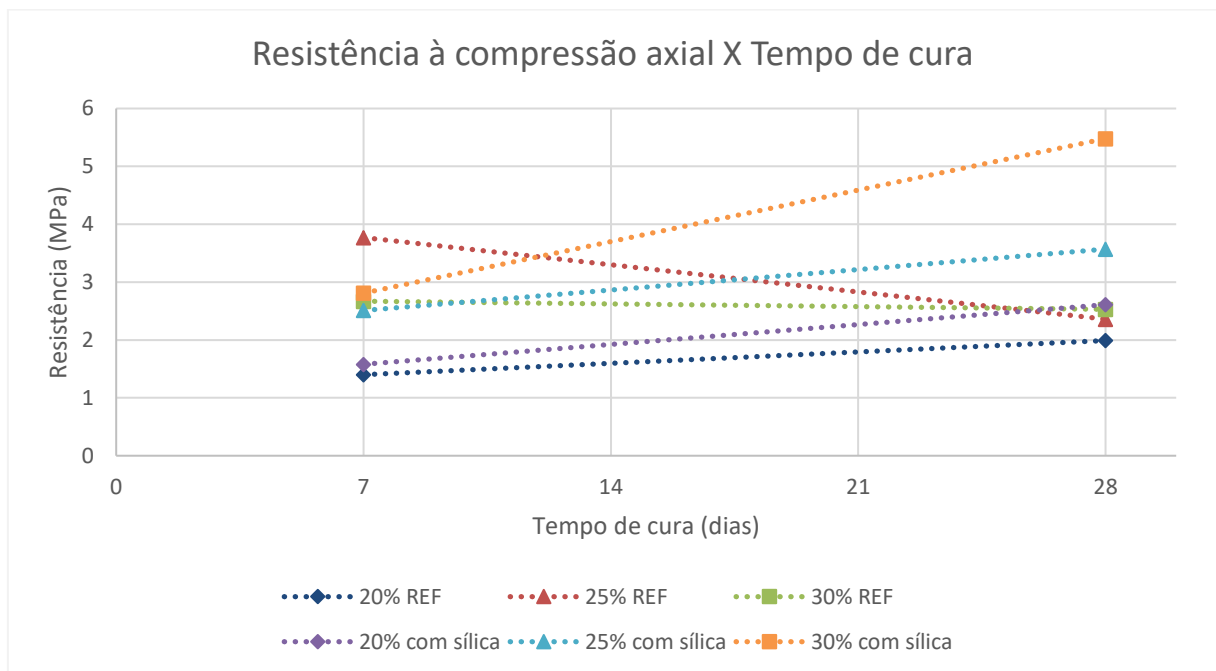
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15 - Resistência para a composição com teor de 30% de cimento.



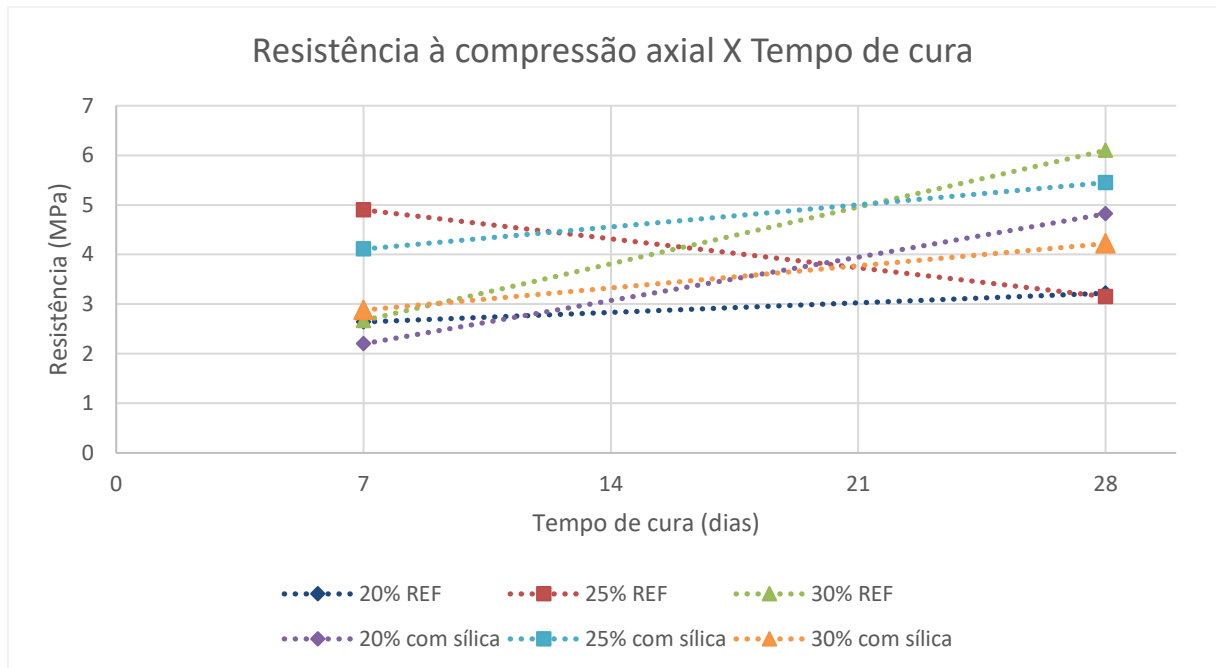
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 16 – Relação entre a resistência e tempo de cura para cimento CPZ-II-32.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 17 – Relação entre a resistência e tempo de cura para cimento CP-V-ARI.



Fonte: Elaborada pela autora.

No caso da alcalinidade, percebe-se que o pH tende a diminuir para o tempo de cura de 7 dias, vindo estes a aumentar para o tempo de 28 dias. Essa diminuição é devida ao consumo de hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas, as quais são responsáveis pelo ganho da resistência posteriormente. O aumento já é por conta da liberação da cal hidratada pela hidratação do cimento. Em relação ao tipo de cimento, não é observada uma mudança significativa, ambos variam bem igualmente.

Na tabela abaixo estão apresentados alguns dados estatísticos como o desvio padrão e a variação.

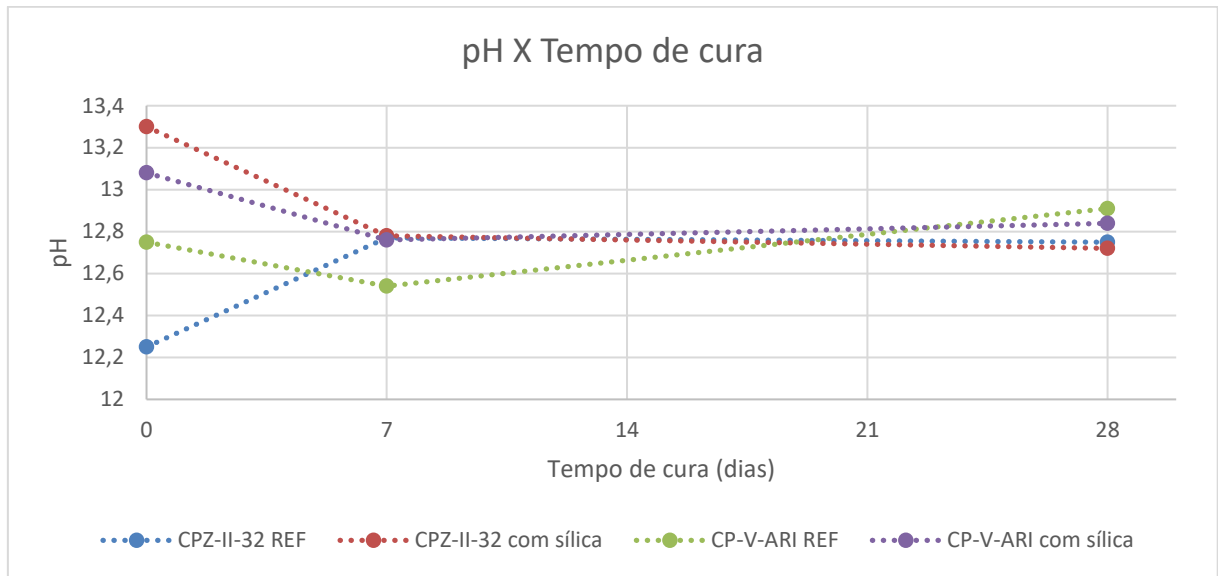
Tabela 7. Dados estatísticos das composições de solo-cimento referência e com adição de sílica ativa.

Composição		Tempo de cura	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação	Coefficiente de variação (%)
20%	CPII Referência	7 dias	1,405	0,0495	0,9935	0,0352	3,523
		28 dias	1,99	1,9375		0,9736	97,360
	ARI Referência	7 dias	2,64	0,0424	0,1167	0,0161	1,607
		28 dias	3,225	0,1909		0,0592	5,920
25%	CPII Referência	7 dias	3,775	0,9687	0,5091	0,2566	25,662
		28 dias	2,365	0,0495		0,0209	2,093
	ARI Referência	7 dias	4,9	0,4384	0,7531	0,0895	8,947
		28 dias	3,155	1,0677		0,3384	33,843
30%	CPII Referência	7 dias	3,025	0,1768	0,2333	0,0584	5,844
		28 dias	2,535	0,2899		0,1144	11,436
	ARI Referência	7 dias	2,67	0,6788	0,7283	0,2542	25,424
		28 dias	6,1	0,7778		0,1275	12,751
20%	CPII - 7,5% sílica ativa	7 dias	1,58	0,5798	0,6293	0,3670	36,698
		28 dias	2,61	0,6788		0,2601	26,009
	ARI - 7,5% sílica ativa	7 dias	2,2	0,2828	0,2263	0,1286	12,856
		28 dias	4,82	0,1697		0,0352	3,521
25%	CPII - 7,5% sílica ativa	7 dias	2,61	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
		28 dias	3,57	0,0000		0,0000	0,000
	ARI - 7,5% sílica ativa	7 dias	4,115	0,2899	1,0430	0,0705	7,045
		28 dias	5,45	1,7961		0,3296	32,955
30%	CPII - 7,5% sílica ativa	7 dias	2,815	0,2899	0,4384	0,1030	10,299
		28 dias	5,485	0,5869		0,1070	10,700
	ARI - 7,5% sílica ativa	7 dias	2,88	0,3818	0,6505	0,1326	13,258
		28 dias	4,22	0,9192		0,2178	21,783

Fonte: Elaborado pela autora.

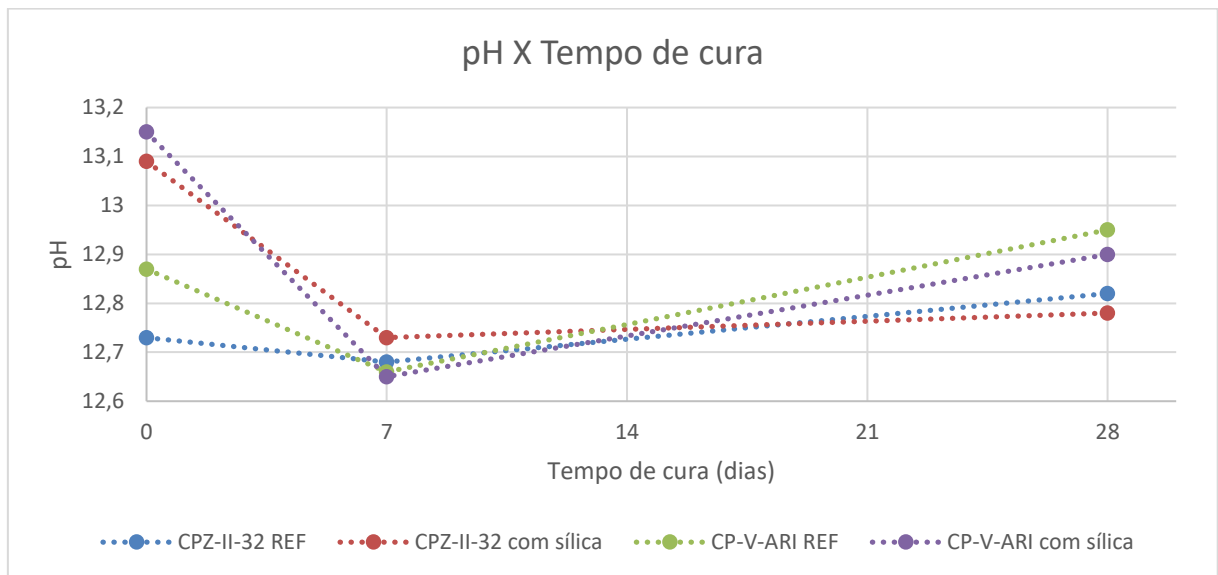
A partir dos gráficos abaixo é possível analisarmos as variações ao longo do tempo de cura e também das composições com o mesmo teor de cimento.

Figura 18 - Valores de pH ao longo do tempo para composição de 20% de cimento.



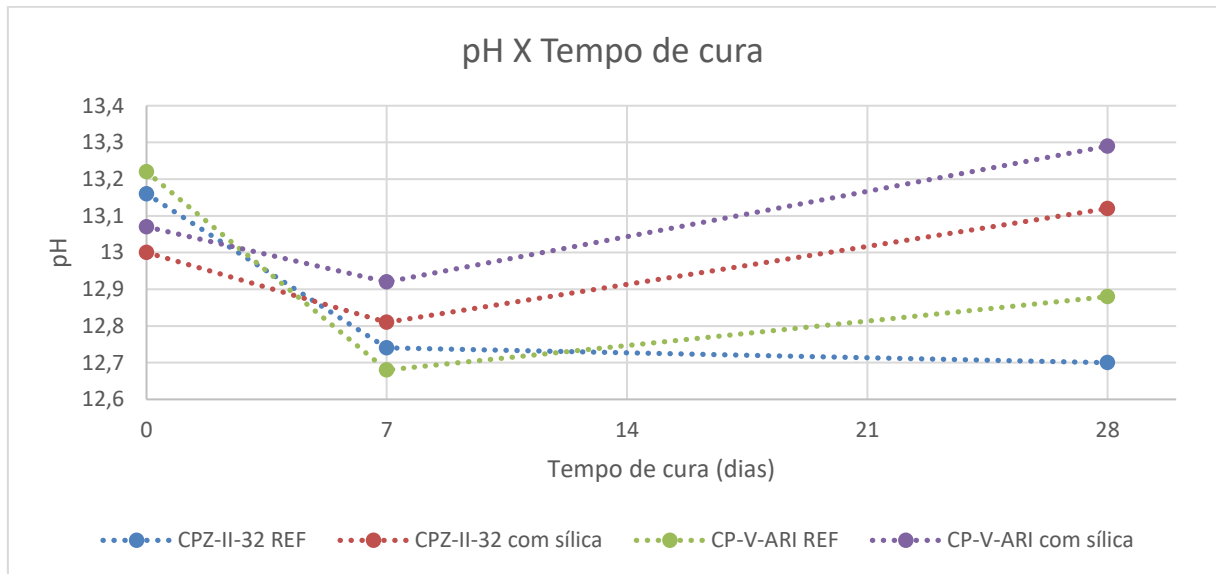
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Valores de pH ao longo do tempo para composição de 25% de cimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 - Valores de pH ao longo do tempo para composição de 30% de cimento.



6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a sílica ativa auxilia no ganho de resistência mecânica ao longo do tempo de cura, uma vez que o ganho de resistência quando utilizada foi em média de 60% aproximadamente. Este ganho é devido as reações pozolânicas, que formam o silicato de cálcio, o qual é responsável pelo ganho de resistência.

Em relação aos tipos de cimento utilizados, o cimento de Alta Resistência Inicial obtem uma melhor estabilização sem se tornar inviável para o uso, conforme foram os resultados acerca dos ensaios no estado fresco e endurecido.

Fazendo a correlação com os resultados obtidos nas medições do pH, no tempo de cura de 7 dias ele veio a sofrer uma diminuição, isto por causa da reação pozolânica, em que ocorre o consumo do hidróxido de cálcio, já para o tempo de 28 dias há um aumento do pH, uma vez que ocorreu a liberação da cal hidratada, que é o resultado da reação. Caso houvesse mais tempos de cura, ia ser possível verificar a evolução do pH nas misturas, uma vez que conforme maior o tempo, maior a liberação da cal hidratada.

Em relação as condições no estado fresco, o CPZ-II-32 foi mais sensível a adição da sílica e também ao aumento do teor do cimento, visto que a mistura se tornou menos fluida devido a elevação da superfície de contato, fazendo com que a mistura tenha mais coesão. Correlacionando com o pH, pode-se perceber que conforme aumenta tal valor, a mistura se torna mais viscosa.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A.K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

ALCANTARA, Marco. Estado fresco do concreto e as avaliações de trabalhabilidade. **Ars Aedificativa**, 2016. Disponível em: <<https://www.arsaedificativa.com/2016/03/estado-fresco-do-concreto-e-avaliacoes.html>>. Acesso em 25 de fevereiro de 2023.

ALCANTARA, Marco Antônio de Moraes; CUSTÓDIO, Miriam da Silva; VIZHALIL, Paul Mathew. **O solo-cimento auto-adensável com adição de cinzas de casca de arroz como aditivo auxiliar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57., 2015, Bonito. Anais Bonito: Ibracon, 2015. p. 1 - 16.

ALCANTARA, M. A. M.; NUNES, S. C. B.; RIO, J. F. M. E. **Estudo do solo-cimento-autoadensável produzido com solos da região do Porto-PT. PARTE I: caracterização de propriedades mecânicas**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 9, n. 1, 2014. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/29945>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

ALCANTARA, M. A. M.; SANTOS, L. P. dos; LIMA, D. C. de; SEGANTINI, A. A. da S.; AKASAKI, J. L. **O uso de cinzas de casca de arroz como aditivo auxiliar na produção de tijolos de solo-cal**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 3, n. 1, 2012. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/15723>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023.

ALMEIDA, I. R. **Superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos**. In: Técnica, nº24, set/out. 1996. São Paulo. Pini. P. 30-33.

ANDRADE FILHO, J. **Reforço de solos com a utilização de tubulões em solo-cimento**. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8491: tijolo solo-cimento**. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

BERTÉ, Susana Dalila Dolejal; ALCANTARA, Marco Antônio de Moraes. **Estudo do comportamento do solo-cimento auto-adensável**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 7, n. 2, p. 37-52, 2013.

DM-22 PHmetro de Laboratorio. LABDEL, © 2023. Disponível em: <<https://www.labdel.com.br/shop/dm-22-phmetro-de-laboratorio/>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues de. **Métodos de dosagem de concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2009. p 165

GILIO, C. G.; SAKAMOTO, C. A.; FIGUEIREDO, V. A.; ALCÂNTARA, M. A. de M. Comparação do solo-cimento auto adensável convencional e com adição de sílica ativa. **Revista Científica ANAP Brasil**, [S. l.], v. 12, n. 24, 2019. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/view/1981>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2023.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e terciárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão das armaduras**. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

LIBORIO, J. B. L. **Avanços tecnológicos dos concretos estruturais nos últimos 30 anos**. In: IBRACON 30 ANOS. São Paulo: Ibracon, 2002.

MENDES, Cleiton João. **Concreto auto adensável utilizado cinza de casca de arroz: estudo das propriedades mecânicas**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista —Júlio de Mesquita Filholl, Ilha Solteira, 2015.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concrete: its influence on the mechanical propertiers**. Tese de Doutorado da Universidade de Berkeley. 1995.

PECORIELLO, L A. **Recomendações práticas para uso do tijolo furado de solo-cimento na produção de alvenaria**. Dissertação (Mestrado Profissional em Habitação) São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2003 75 p.

PINTO. C.S. **Estabilização de solos**. São Paulo: USP – Escola Politécnica, 1983. 20 p. (Notas de Aula).

PINTO, C. S. **Propriedades dos solos**. In: Fundações: teoria e prática / Waldemar Hachich ... [et al.] São Paulo: PINI, 1998.

R. A. Bispo, G. O. Vicente, G. P. Silva Junior, D. U. Benjamim, M. A. M. Alcântara. **Investigation of rheological behavior of self-compacting and high performance composite concretes**. Materials Research. 24 (suppl. 2), 2021.

SEIDENSTUCKER, Micaela; GOULART, Cristiano; TOMIM, Kamille; JONER, Vanessa. Análise da contribuição da adição da sílica ativa na resistência à compressão de concretos. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Palmas, 2019. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/Contecc2019/Civil/ANALISE%20DA%20CONTRIBUI%C3%87%C3%83O%20DA%20ADI%C3%87%C3%83O%20DA%20SILICA%20ATIVA%20NA%20RESISTEN>>

CIA%20%C3%80%20COMPRESS%C3%83O%20DE%20CONCRETOS.pdf>.
Acesso em: 9 de fevereiro de 2023.

SEGANTINI, A. A. S.; ALCANTARA, M. A. M. **Solo-cimento e solo-cal**. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON (Org.). *Materiais de construção civil e princípios básicos de ciência e engenharia de materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, p. 863-891.

SOUSA, S.M.T.; BARBOSA, N. P. **Estabilização granulométrica de solos para a confecção de tijolos prensados de terra crua**. In: *Encontro nacional de Tecnologia do ambiente construído*, 8., 2000, Salvador, 2000.