

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

ISABELLA RAMOS CAMELO CARNEIRO

**A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR NAS
PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL NOS ESTADOS
FRESCO E ENDURECIDO**

Ilha Solteira

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR NAS
PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL NOS ESTADOS
FRESCO E ENDURECIDO

ISABELLA RAMOS CAMELO CARNEIRO

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Ilha Solteira - SP

Julho de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C289i Carneiro, Isabella Ramos Camelo.
A influência da otimização do esqueleto granular nas propriedades do solo-cimento autoadensável nos estados fresco e endurecido / Isabella Ramos Camelo Carneiro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
38 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024
- Orientador: Marco Antônio de Moraes Alcântara
- Inclui bibliografia
1. Solo-cimento autoadensável. 2. Esqueleto granular. 3. Propriedades mecânicas.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Isabella Ramos Camelo Carneiro

Título: "A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR NAS PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO"

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara

UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Adriano Souza

UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira

MSc. Rodrigo Andraus Bispo

UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira
22 de julho de 2024

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Nailda e Ary, e aos meus irmãos, Isadora e Geraldo, dedico esse trabalho pelo apoio, incentivo, companheirismo, amor incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus por todas as oportunidades, por ter me permitido viver tantos momentos bons e por me fortalecer para que eu pudesse vencer os mais desafiadores. Agradeço por me abençoar e iluminar durante toda essa caminhada.

Aos meus pais, Nailda e Ary, que, mesmo de longe, nunca deixaram faltar nada e sempre acreditaram no meu potencial. Aos meus irmãos, Isadora e Geraldo, que, além do companheirismo, sempre mandaram energias positivas e me incetivaram a entregar o meu melhor. De forma geral, à minha família, por se fazer tão essencial nessa fase e por nunca deixar nada abalar a nossa fé.

Ao meu professor e orientador Marco Antonio de Moraes Alcantara, pelo empenho dedicado a minha iniciação científica, pelo interesse em dar continuidade ao assunto por meio desse trabalho, pelo apoio, paciência e confiança em todos os momentos. Compartilhar esse projeto, juntamente com as minhas amigas Luana e Thammy, foi muito engrandecedor.

A todos os profissionais da Universidade que me acompanharam ao longo do curso e fizeram parte dessa história.

A todos os colegas e amigos que pude conhecer e trabalhar durante o período que estive na Alicerce Empresa Junior. Aos nossos professores Artur Pantoja e Claudia Marques por todo o respaldo e confiança nas nossas entregas.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que conheci durante a graduação, inclusive, às minhas amigas da Republica Label, que me ensinaram muito sobre tudo e estiveram comigo em todos os momentos. Agradeço, em especial, a minha amiga Manuela Bernardi que se tornou um grande exemplo para mim e sempre me deu muito apoio.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a variação do esqueleto granular sobre as propriedades reológicas do solo-cimento autoadensável, a partir da incorporação de material granular, de modo a se compreender os processos nos estados fresco e endurecido da mistura. O solo-cimento autoadensável é uma mistura de solo e cimento que propõe a ideia de se autoadensar, devido a ação do seu próprio peso, sem apresentar segregação ou exsudação, dependendo da sua dosagem para se tornar mais plástico e mais autoadensável. Considerando as intervenções no esqueleto granular, espera-se que a inclusão granular dê uma contrapartida nos valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade, conferindo aderência com a matriz cimentícia. Para tal estudo, a pesquisa utiliza 3 diferentes teores de cimento, 3 diferentes teores de material granular, sendo um deles 0%, e ensaios no estado fresco e endurecido (com 7 e 28 dias de cura). No estado fresco foram analisados o diâmetro de espalhamento, o tempo de escoamento em funil (para as composições de referência) e a massa específica aparente. No estado endurecido, a partir dos corpos de prova com dimensões 10x20 cm, foram analisados a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. Os resultados indicam que o ganho de resistência para as composições de referência pode estar relacionado com o aumento do teor de cimento e do tempo de cura, e para as composições com brita, percebe-se que para teores iguais de cimento, os valores tendem a diminuir conforme aumenta o teor de brita.

Palavras-chave: Solo-cimento autoadensável; esqueleto granular; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This paper presents a study on the variation of the granular skeleton on the rheological properties of self-compacting soil-cement, through the incorporation of granular material, in order to understand the processes in the fresh and hardened states of the mixture. Self-compacting soil-cement is a mixture of soil and cement that proposes the idea of self-compacting due to the action of its own weight, without segregation or bleeding, depending on its dosage to become more plastic and self-compacting. Considering the interventions in the granular skeleton, it is expected that the granular inclusion will provide a counterpart in the values of mechanical strength and modulus of elasticity, providing adhesion with the cementitious matrix. For this study, the research uses 3 different cement contents, 3 different granular material contents, one of them being 0%, and tests in the fresh and hardened states (with 7 and 28 days of curing). In the fresh state, the spreading diameter, funnel flow time (for reference compositions), and apparent specific mass were analyzed. In the hardened state, from the test specimens with dimensions of 10x20 cm, axial compression strength and modulus of elasticity were analyzed. The results indicate that the gain in strength for the reference compositions may be related to the increase in cement content and curing time, and for compositions with gravel, it is perceived that for equal cement contents, the values tend to decrease as the gravel content increases.

Keywords: Self-compacting soil-cement; granular skeleton; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Materiais utilizados na composição referência.
- Figura 2** – Cone utilizado para ensaio de espalhamento livre.
- Figura 3** – Diâmetro de espalhamento da mistura.
- Figura 4** – Ensaio de escoamento confinado.
- Figura 5** – Ensaio para determinação da massa específica aparente.
- Figura 6** – Ensaio de resistência à compressão.
- Figura 7** – Ensaio de módulo de elasticidade.
- Figura 8** – Preparo da mistura na betoneira.
- Figura 9** – Amostra após desmolde.
- Figura 10** – Resistência à compressão axial das composições de referência.
- Figura 11** – Módulo de elasticidade das composições de referência.
- Figura 12** – Resistência a compressão axial x módulo de elasticidade.
- Figura 13** – Resistência à compressão axial das composições com brita.
- Figura 14** – Módulo de elasticidade para as composições com brita.
- Figura 15** – Resistência à compressão axial – 7 dias de cura.
- Figura 16** – Módulo de elasticidade – 7 dias de cura.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros de espalhamento.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de escoamento confinado.

Tabela 3 – Massa específica das misturas.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Unesp – Universidade Estadual Paulista

SCAA – Solo-cimento Autoadensável

CP – Cimento Portland

CP II – Cimento Portland tipo II

SCC – Solo-cimento compactado

SCP – Solo-cimento plástico

CPs – Corpos de prova

E – Módulo de Elasticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL	14
3.2	CIMENTO PORTLAND	15
3.3	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	16
3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	MATERIAIS	19
4.2	MÉTODOS	19
4.2.1	ENSAIOS	20
4.2.2	PREPARO DOS CORPOS DE PROVA	26
4.2.3	CRITÉRIOS DE JULGAMENTO	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	ESTADO FRESCO	29
5.2	ESTADO ENDURECIDO	31
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O solo-cimento autoadensável é uma mistura de solo e cimento, que garante funcionalidades plástica e autoadensável, podendo ser adensado sob ação do seu próprio peso. Essa combinação cria um material homogêneo, resistente e durável, com propriedades adequadas para diversas aplicações na construção civil, além de ser econômica e sustentável. Seu uso eficaz depende da compreensão das características do solo local e da aplicação adequada das proporções e técnicas de mistura.

Por se tratar de uma denominação que foi introduzida recentemente, existem alguns estudos que buscam relacionar o desempenho obtido nos estados fresco e endurecido, a partir da variação da dosagem. Dessa forma, Berté e Alcantara (2013-2014) apresentaram ensaios a fim de compreender a mobilidade e estabilidade para a mistura no estado fresco, e a resistência a compressão simples para a mistura no estado endurecido. Utilizaram solos lateríticos e residuais, e porcentagens de 20 e 30% de cimento em relação ao solo seco. Os resultados obtidos favorecem o estado fresco e no estado endurecido apresentam valores de resistência mecânica a compressão entre 2,0MPa e 7,5MPa, dependendo da dosagem.

Para agregar mais valor aos estudos, Alcantara et al (2014) incorporaram cinzas de casca de arroz às misturas, visando aumentar a resistência mecânica da mesma. Os resultados foram satisfatórios e os ganhos foram proporcionais aos valores de teores de cimento e quantidade de cinzas incorporados, destacando a importância do equilíbrio na composição da mistura.

Verificaram ainda, que tais intervenções na mistura são responsáveis pelo ganho da resistência mecânica devido a hidratação do cimento Portland e as reações pozolânicas que podem ocorrer quando a cal hidratada é liberada. Sendo assim, concluíram que as intervenções são limitadas.

Desta forma, considera-se de grande valia o estudo da variação do esqueleto granular quando se reúne solo-cimento autoadensável e material granular. Espera-se que o material granular tenha aderência com a matriz cimentícia, e provoque variação nos valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade. Além disso, imagina-se que a dosagem do cimento continue

influenciando no resultado, conferindo possivelmente, variação na resistência mecânica da matriz e fortalecimento das tensões de aderência, tornando ainda mais importante a relação água/cimento.

Alcantara e Figueiredo (2019) investigaram também quais seriam os resultados se incorporassem finos à mistura de solo-cimento autoadensável. Utilizaram a sílica ativa e concluíram que houve ganho na resistência, quando comparado com a mistura referência. Supõe-se então, que devido a presença de finos e aumento do teor de cimento, as reações pozolânicas aumentaram, liberando, conseqüentemente, mais calor e oferecendo a formação de compostos cimentantes.

Considerando que a manipulação da composição granular do solo-cimento desempenha um papel fundamental na definição das características de fluidez e resistência em seu estado fresco e nas propriedades estruturais e durabilidade após o endurecimento, é interessante realizar um estudo que gere resultados envolvendo a variação do esqueleto granular e permita compreender os processos da mistura.

Para tal estudo, há uma vantagem que é a possibilidade de utilização do material local, permitindo a análise das variadas misturas.

Este trabalho compreendeu-se em estudar as propriedades do solo-cimento autoadensável (SCAA), de forma a analisar o comportamento de diferentes misturas de solo, cimento, água e aditivos e suas possíveis aplicações na área da construção civil, sem a necessidade de compactação e adensamento mecânico.

2 OBJETIVOS

O estudo tem como objetivo analisar a influência da presença de material granular com diferentes teores de cimento, no processo de estabilização do solo-cimento autoadensável, em função da capacidade de resistência mecânica da pasta e dos teores de agregado, os quais, possivelmente, influenciam na adesão da pasta aos resíduos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL

O solo-cimento autoadensável é uma combinação de solo e cimento projetada para se compactar naturalmente e sem necessidade de vibração externa, exibindo características plásticas e autoadensáveis que variam de acordo com sua proporção específica. Devido a sua resistência mecânica e a capacidade de se autoadensar e ser facilmente moldável, preenchendo os espaços de forma uniforme, esse tipo de solo-cimento representa um avanço significativo no campo da engenharia de materiais, visto que resulta em um material robusto, durável e de considerável resistência mecânica.

Muitas vezes, estudos comparativos são realizados para avaliar o desempenho do solo-cimento autoadensável em relação a outros materiais tradicionais, como concreto convencional ou solos não estabilizados, considerando aspectos como resistência à compressão, durabilidade e custo-benefício.

Segundo Segantini (2000), o solo-cimento pode ser classificado conforme a sua categoria, podendo ser solo-cimento compactado (SCC) ou solo-cimento plástico (SCP). O que diferencia as duas categorias é, principalmente, a quantidade de água adicionada. Para obter o SCC, deve-se adicionar uma quantidade de água suficiente para permitir que as reações de hidratação do cimento aconteçam e a mistura fique o mais compacta possível. No caso do SCP, deve-se adicionar água até que se obtenha uma consistência plástica.

Semelhante a este trabalho, Berté (2012) realizou um estudo com um solo comum da região Oeste do Estado de São Paulo, o Podzólico Vermelho Amarelo. O solo foi escolhido por ser facilmente encontrado e por apresentar granulometria que inclui grãos de argila, silte, areia fina e areia média. Desta forma, analisou o comportamento e as propriedades da mistura, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Berté (2012) afirma ainda, que os finos do solo apresentaram forte influência na instabilidade do comportamento das misturas, gerando uma dificuldade de homogeneização, e que em complemento a isso, quanto maior a densidade da mistura, maior a resistência a compressão axial. Segundo a NBR

8492 (ABNT, 2017) a resistência média de peças confeccionadas com solo-cimento não deve ser inferior a 2,0 MPa para que o material seja considerado adequado para uso em construção civil.

A adição de agregados ao solo-cimento autoadensável, como areia, brita ou pedra britada, melhora suas propriedades mecânicas e características estruturais. Geralmente, os agregados são adicionados para aumentar a resistência à compressão e melhorar a durabilidade do material.

As propriedades do solo-cimento autoadensável podem ser certificadas em ambos estados e dependem da composição da mistura. Neville (2016) diz que diversos fatores podem influenciar a resistência à compressão do concreto, incluindo a idade do concreto, fator água/cimento, qualidade dos materiais constituintes, cura e condições ambientais e aditivos e suplementos.

O estudo de Alcântara et al. (2014) sobre a fabricação de solo-cimento autoadensável com solos residuais de regiões de clima temperado oferece resultados interessantes sobre as propriedades e o desempenho desse material. Segundo os autores, os materiais estudados apresentaram propriedades favoráveis no estado fresco e valores de resistência à compressão simples variaram de 2,0 a 6,5 MPa, para consumo de cimento variou entre 20% a 30% em relação ao peso seco do solo, sugerindo que este seja capaz de suportar cargas consideráveis, adequadas para aplicações em estruturas de baixo a médio impacto.

Claverie (2015) afirma que o principal requisito de desempenho do SCAA é a condição de fluidez, enquanto a mistura está em seu estado fresco. Desta forma, a quantidade de água incorporada desempenha um papel crucial nesse processo, pois afeta diretamente a fluidez da mistura. Uma quantidade adequada de água é necessária para garantir que o concreto seja suficientemente fluido para se adensar e ao mesmo tempo não comprometer a resistência final do material.

3.2 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é um dos materiais de construção mais importantes e amplamente utilizados, e, segundo Neville (2016), as matérias primas utilizadas na produção do cimento consistem, principalmente, em calcário, sílica,

alumínio e óxido de ferro, os quais garantem qualidade e propriedades do cimento final.

Em 1824, Joseph Aspdin, um fabricante de tijolos e cerâmica de Leeds, na ilha de Portland, na Inglaterra, patenteou o que ele chamou de "Cimento Portland", uma mistura de calcário e argila calcinados em alta temperatura para produzir uma substância que endurece sob a água.

Segundo Neville (2016), o processo de fabricação do cimento envolve várias etapas essenciais. Inicialmente, a matéria-prima é moída e submetida à queima em grandes fornos rotativos, onde é sintetizado e parcialmente fundida, resultando em pequenas esferas conhecidas como clínqueres. Após o resfriamento do clínquer, uma pequena quantidade de sulfato de cálcio é adicionada e o material é moído até se tornar um pó fino. O produto final desse processo é o cimento Portland, amplamente utilizado em todo mundo, na construção civil.

Durante o século XX, houve esforços significativos para padronizar e regulamentar a produção e qualidade do cimento Portland. Organizações internacionais e nacionais estabeleceram normas e especificações para garantir a consistência e segurança do cimento Portland produzido e utilizado em diferentes partes do mundo.

Ao longo do tempo, ocorreram avanços significativos na tecnologia de produção de cimento Portland, incluindo melhorias nos processos de calcinação, moagem e embalagem. Novos aditivos e materiais auxiliares também foram desenvolvidos para melhorar as propriedades do cimento Portland e sua adequação para uma variedade de aplicações.

Hoje, o cimento Portland é um dos materiais de construção mais essenciais, utilizado em uma ampla gama de aplicações na construção civil e infraestrutura, e sua história continua a evoluir à medida que novas tecnologias e práticas sustentáveis são desenvolvidas.

3.3 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

A utilização de aditivos para melhorar a fluidez do concreto é uma prática que se desenvolveu ao longo do tempo, conforme a tecnologia de concretagem

evoluiu e as demandas por desempenho e eficiência aumentaram. No entanto, o uso sistemático de aditivos específicos para esse fim começou a ganhar destaque, principalmente, a partir das décadas de 1970 e 1980.

Durante esse período, houve uma expansão significativa na pesquisa e desenvolvimento de aditivos para concreto, impulsionada pela necessidade de atender a requisitos cada vez mais rigorosos de desempenho em diversas aplicações de construção. Os aditivos foram desenvolvidos para melhorar diferentes propriedades do concreto, incluindo sua trabalhabilidade, resistência, durabilidade e tempo de cura.

Em concordância com o que diz a NBR 11768, os aditivos superplastificantes (tipo SP) são produtos que aumentam o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilitam a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.

Os aditivos superplastificantes, em particular, desempenham um papel crucial na melhoria da fluidez do concreto. Eles são capazes de reduzir significativamente a quantidade de água necessária para manter a trabalhabilidade adequada da mistura, sem comprometer a resistência final do concreto. Isso permite a produção de concretos de alta resistência e auto-adensáveis, que são capazes de preencher completamente os moldes sem a necessidade de compactação mecânica.

3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material, ou seja, sua capacidade de deformar elasticamente sob carga, e o ensaio para sua determinação é prescrito pela NBR 8522 (ABNT, 2008). No caso do solo-cimento, esse módulo é influenciado, principalmente, pela proporção de cimento, tipo de solo e método de compactação.

Segundo Gerlach (2020), as alterações no módulo de elasticidade do solo-cimento podem variar significativamente devido à composição dos materiais utilizados e à sua tipologia, seja na formação de pastas endurecidas ou em arranjos granulares diversos. Essas variações são frequentemente consequência da formação da microestrutura do material composto.

A microestrutura do solo-cimento é formada durante o processo de cura e

endurecimento, onde a interação entre partículas de solo, aglomerantes de cimento e água desempenha um papel crucial. Uma microestrutura bem formada pode resultar em um material mais homogêneo e com propriedades mecânicas superiores, incluindo um módulo de elasticidade mais alto.

Estudos mostram que há uma relação empírica entre o módulo de elasticidade (E) e a resistência à compressão do solo-cimento. Em geral, um solo-cimento com maior resistência à compressão tende a ter um módulo de elasticidade mais elevado, apresentando maiores condições de rigidez. Isso ocorre porque a resistência mecânica está diretamente relacionada à coesão e à adesão dos materiais na matriz do solo-cimento.

A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica do solo-cimento também pode ser influenciada por parâmetros como a relação água/cimento, tipo de solo utilizado, teor de cimento, presença de aditivos e método de cura. Alterações nesses parâmetros podem afetar tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência mecânica do material.

Obter maiores condições de rigidez para o solo-cimento pode ser algo preocupante, sabendo que um material mais rígido tende a deformar menos quando submetido a cargas. Sendo assim, a falta de deformação pode significar que o material está operando em uma faixa mais próxima do seu limite de elasticidade, aumentando possivelmente o risco de fissuração se as cargas aplicadas forem significativas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

A pesquisa foi conduzida empregando o Cimento Portland comum, juntamente com solo do tipo argissolo da região de Ilha Solteira - SP, areia de origem natural integrada ao solo, um superplastificante à base de carboxilatos, caracterizado por sua ação estérica e eletrostática, e brita.

Figura 1 – Materiais utilizados na composição referência.



Fonte: Elaborada pela autora.

Essa combinação de materiais incorpora elementos essenciais como o agente aglutinante (Cimento Portland), o solo específico da região de estudo, a areia como parte integrante do solo, um aditivo superplastificante com para garantir condições de fluidez da mistura e brita para aprimorar as características mecânicas do composto. Essa escolha criteriosa de materiais proporciona uma base sólida para a pesquisa, abrangendo aspectos relacionados à composição, resistência e comportamento do material resultante.

Os ensaios são cruciais para compreender as propriedades mecânicas dos materiais e como são amplamente utilizados na engenharia civil, mecânica e de materiais para avaliar a adequação e a qualidade dos materiais em diversas aplicações, desde construção de estruturas até fabricação de componentes mecânicos.

4.2 MÉTODOS

Os teores de cimento variaram em 20%, 25% e 30%, considerando a massa seca do solo como base. Para cada teor de cimento, foram formuladas três composições: uma de referência (0%), outra com 25% e uma terceira com 50% de materiais granulares em relação à massa seca do solo. As definições

foram feitas a fim de analisar as diferentes condições de cimentação da matriz, tensões de aderência e viscosidade no estado fresco da mistura.

O teor de água em relação ao material seco total foi mantido em aproximadamente 32%, enquanto o teor de superplastificante foi fixado em 0,04% para as composições de referência. Essa abordagem visa manter uma consistência controlada nas proporções de água e superplastificante, fatores essenciais para a trabalhabilidade da mistura e para a avaliação das propriedades no estado fresco do material. Essa metodologia sistemática permite uma compreensão mais aprofundada dos efeitos das variações nos teores de cimento e materiais granulares nas propriedades da mistura, contribuindo para uma análise mais abrangente e precisa.

4.2.1 ENSAIOS

Visando garantir uma eficiência nos ensaios, de forma que todas as misturas utilizadas no estudo sejam uniformes e com materiais bem distribuídos, utilizou-se a betoneira. A máquina reduz significativamente o tempo e esforço manual necessários para realizar as misturas, de forma prática, e permite um controle mais preciso sobre a quantidade dos materiais utilizados, uma vez que reduz os desperdícios.

A variação nos teores de cimento em relação à massa seca do solo será de 20%, 25% e 30%, com o objetivo de criar condições distintas para a cimentação da matriz e reforçar as tensões de aderência. Além disso, essa variação afeta a viscosidade da mistura no estado fresco, influenciando na mobilidade devido à formação de pasta.

Essa abordagem permite ajustar a quantidade de cimento conforme as exigências específicas do projeto e das condições do solo, buscando alcançar as propriedades desejadas do concreto. A variação nos teores de cimento proporciona flexibilidade para adaptar a mistura de acordo com os requisitos de resistência, durabilidade e trabalhabilidade do concreto fresco.

Para cada teor de cimento do estudo, propõe-se otimizar uma composição de referência, uma com 25% e outra com 50% de materiais granulares em relação à massa seca do solo.

A variação no material granular tem como objetivo criar diferentes condições de inércia, que impactam diretamente na mobilidade do solo-cimento

no estado fresco e também influencia a porcentagem volumétrica de agregado na mistura, o que por sua vez afeta os valores das propriedades mecânicas.

Dessa forma, ajustar os teores de cimento e a porcentagem volumétrica de agregado permite uma adaptação mais precisa da mistura, visando atender às demandas específicas de cada aplicação e garantir a qualidade desejada do concreto final.

É importante ressaltar que o teor de água é o ponto de partida e deverá ser fixo da ordem de 32% com relação ao material seco, e o teor de superplastificante da ordem de 0,04% com relação ao material seco total.

Após a preparação de cada mistura, realizam-se os ensaios nos estados fresco e endurecido. Esses ensaios são fundamentais para avaliar as propriedades do material nas diferentes fases, garantindo sua adequação aos requisitos específicos de cada aplicação.

a) Estado fresco:

A realização dos ensaios no estado fresco da mistura são importantes para avaliar suas propriedades de trabalhabilidade e fluidez, especialmente por se tratar de uma mistura autoadensável, e se aplicam para todas as composições.

Neste caso, propõe-se a verificação dos ensaios de espalhamento livre, adaptado da norma NBR 13276/2012 e escoamento confinado, conforme método realizado por Berté e Alcantara (2013), com o uso do funil. Além disso, para cada composição, sugere-se ainda o cálculo da massa específica aparente, utilizando um molde de volume conhecido.

O ensaio de espalhamento livre tem como objetivo avaliar a capacidade do concreto de se espalhar livremente sem a necessidade de vibração, caracterizando sua autoadensabilidade, por meio dos valores de diâmetros de espalhamento da mistura.

Figura 2 – Cone utilizado para ensaio de espalhamento livre.



Fonte: Elaborada pela autora.

Neste ensaio, o cone é preenchido até a superfície com a mistura e após a retirada do cone, com o auxílio da régua, mede-se o diâmetro de espalhamento, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 3 – Diâmetro de espalhamento da mistura.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para que fique ainda mais preciso, é interessante que seja tirada mais de

uma medida de diâmetro para calcular a média. O que já se observa de início é que quando a mistura está mais homogênea, os diâmetros coletados apresentam valores mais próximos, ou seja, a mistura se espalha de maneira mais uniforme.

O ensaio de escoamento confinado tem a finalidade de avaliar o comportamento do concreto quando submetido a um escoamento confinado, onde se permite medir a vazão mássica da mistura. Essa vazão representa a quantidade de massa que flui por determinado tempo, e é influenciada pela trabalhabilidade e fluidez do concreto.

Neste ensaio, utiliza-se um funil, feito de garrafa pet para analisar o escoamento. Segurando o funil e impedindo que a mistura saia pela cavidade inferior, este é preenchido até que fique quase cheio. Com o auxílio de um balde para conter o material que está no funil, este é liberado e em paralelo a isso, o tempo de escoamento é cronometrado.

Figura 4 – Ensaio de escoamento confinado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Feito isso, a massa presente no balde é aferida para que se possa realizar o cálculo da vazão mássica.

Vale lembrar que o ensaio de escoamento confinado não é sugerido para as composições que possuem material granular (brita), somente para as composições referências.

Para a determinação da massa específica aparente das misturas, utiliza-se um molde com 0,75L de volume. Na realização do ensaio, o molde é preenchido ao máximo e levado para a balança, para que seja possível conferir a massa necessária da mistura para preencher o molde com volume conhecido.

Figura 5 – Ensaio para determinação da massa específica aparente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os ensaios são importantes também para garantir que a mistura seja capaz de fluir e preencher os moldes durante os estudos e a aplicação, sem a necessidade de compactação mecânica. A expectativa é que o solo-cimento autoadensável alcance boa fluidez e espalhamento sem segregação dos seus componentes.

b) Estado endurecido:

Após o endurecimento das amostras, é avaliada a capacidade de resistir

à compressão de forma direta, conforme estipulado pelas diretrizes da NBR 12025/2012, e a rigidez do solo-cimento autoadensável, expressa pelo módulo de elasticidade, de acordo com as especificações da NBR 8522/2008.

O teste de compressão simples determina a capacidade do material de suportar cargas que tendem a reduzir seu volume, por meio da aplicação progressiva de uma carga axial uniaxial sobre o corpo de prova até que ocorra sua falha, apresentando a carga máxima suportada pela amostra, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 6 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborada pela autora.

Por outro lado, o módulo de elasticidade é uma medida da rigidez de um material, ou seja, sua capacidade de resistir à deformação elástica quando submetido a uma carga. Esse módulo é representado pela relação entre o esforço aplicado e a deformação resultante dentro da região elástica do material. Em essência, o módulo de elasticidade descreve a inclinação da curva tensão-deformação na região elástica.

O módulo de elasticidade pode variar significativamente dependendo das

condições específicas de fabricação e das propriedades dos materiais utilizados. Geralmente, o módulo de elasticidade do solo-cimento é inferior ao do concreto convencional, devido à maior quantidade de solo na mistura, o que resulta em uma matriz mais fraca em comparação com o concreto tradicional.

Para determinar o módulo de elasticidade do solo-cimento autoadensável, é realizado um ensaio específico em corpos de prova para avaliar a resposta do material à aplicação de cargas e deformações, conforme demonstra a figura a seguir.

Figura 7 – Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tais ensaios são realizados para todas as composições, as quais foram submetidas a períodos de cura de 7 e 28 dias, em uma câmara úmida, com 100% de umidade e temperatura próxima a 22°C.

4.2.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

As misturas são feitas na betoneira e seguem uma ordem padronizada para garantir a homogeneidade e eficiência. Primeiro, adicionam-se e misturam-se os materiais secos, seguindo a sequência: solo, cimento, areia e brita. Posteriormente, acrescentam aos materiais na betoneira, 70% da água, e depois

a 30% da água já misturada com o superplastificante.

Figura 8 – Preparo da mistura na betoneira.



Fonte: Elaborada pela autora.

Após a mistura dos materiais e um período de descanso da pasta, os ensaios são realizados no estado fresco para avaliar as propriedades do solo-cimento autoadensável em sua fase inicial.

Feitos os ensaios, o material deverá ser moldado em moldes cilíndricos, de PVC com dimensões 10x20 cm, pelo processo autoadensável, sem que haja a necessidade de vibração. A mistura permanece no molde por 24 horas e após isso a amostra é retirada com o auxílio de ar comprimido.

Figura 9 – Amostra após desmolde.



Fonte: Elaborada pela autora.

Depois de desenformados, os corpos de prova são levados para a câmara úmida, com umidade e temperatura sugeridas, e inicia-se o processo de cura. As amostras permanecem na câmara úmida até o dia proposto para ruptura de cada uma delas.

4.2.3 CRITÉRIOS DE JULGAMENTO

Para tirar conclusões dos resultados, deve-se considerar os valores alcançados para a resistência a compressão simples e módulo de elasticidade, a porcentagem de material granular presente na mistura, o tempo de cura e ainda o teor de cimento, que possivelmente influencia na matriz cimentícia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTADO FRESCO

Feitos os ensaios de espalhamento para as misturas, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 1 – Diâmetros de espalhamento.

Teor de cimento (%)	Teor de material granular (%)	Diâmetro (cm)
20	0	36,5
	25	30,8
	50	28,8
25	0	32,3
	25	20,3
	50	20
30	0	32
	25	22,5
	50	22,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos casos das composições de referência, os quais não possuem material granular como parte da mistura, percebe-se que os diâmetros de espalhamento foram negativamente impactados pelo aumento do teor de cimento. Tal variação de diâmetro pode ser explicada pela coesão interna e viscosidade da mistura, que aumentam conforme a quantidade de cimento.

Para as situações em que há a inclusão de agregados nas composições, é evidente que ocorrem alterações no equilíbrio entre as forças viscosas provenientes da matriz do solo e as forças de inércia e atrito, devido à presença dos agregados. A partir do comportamento e resultados, observa-se tanto a redução da dispersão com o aumento da quantidade de cimento e agregados, quanto o aumento da mesma, especificamente nos casos em que se adicionaram 25% e 50% de agregados, respectivamente.

No ensaio de escoamento confinado, as composições de referência reagiram da seguinte forma:

Tabela 2 – Resultados do ensaio de escoamento confinado.

Teor de cimento (%)	Massa (kg)	Tempo (s)
20	1,05	3
25	0,75	3
30	0,82	3

Fonte: Elaborada pela autora.

Comparando a massa para cada teor de cimento com o tempo que esse material levou para escoar, é possível perceber que o tempo de escoamento no funil não se alterou com o aumento do teor de cimento, mesmo diante do aumento da coesão interna. Imagina-se que com o aumento do teor de cimento, consequentemente, obteve-se o aumento da massa específica da mistura e o tempo de escoamento não foi afetado.

Em complemento as análises das misturas no estado fresco, calculou-se as seguintes massas específicas, a partir da razão entre a massa de cada mistura e o volume do molde.

Tabela 3 – Massa específica das misturas.

Teor de material granular (%)	Teor de cimento (%)	Massa específica
0	20	1,35
	25	1,36
	30	1,38
25	20	1,43
	25	1,46
	30	1,48
50	20	1,4
	25	1,35
	30	1,5

Fonte: Elaborada pela autora.

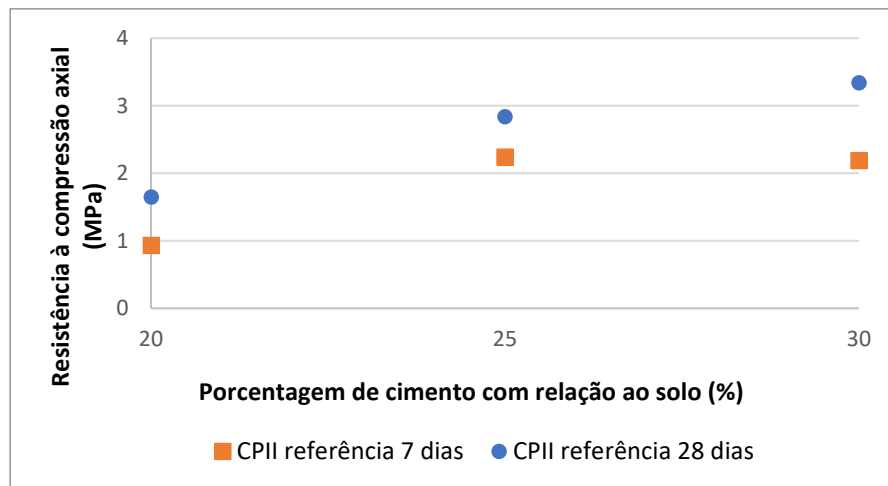
Inicialmente, analisando as composições referência, pode-se concluir que conforme o teor de cimento aumentou, a massa específica também aumentou. Sugere-se como justificativa para isso o aumento da contribuição do cimento proporcionalmente às misturas, sabendo que este apresenta valor maior de massa específica aparente que a do solo utilizado.

Para as misturas que incluem britas, observou-se que conforme o teor de cimento, a massa específica aumentou para as misturas com 25% de brita, em relação ao solo seco, e diminuiu para as misturas com 50% de brita. As razões prováveis para isso incluem as potenciais influências sobre a trabalhabilidade das misturas e a coesão interna da matriz cimentícia. Observa-se que, com a incorporação de 50% de britas, em relação ao solo seco, a área de contato entre o material granular e a matriz tende a aumentar, o que se reflete nas condições de mobilidade das misturas.

5.2 ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido comparou-se a resistência à compressão axial com a porcentagem de cimento em relação ao solo, e ainda, esses resultados para 7 e 28 dias de cura, conforme figura a seguir.

Figura 10 – Resistência à compressão axial das composições de referência com 7 e 28 dias.

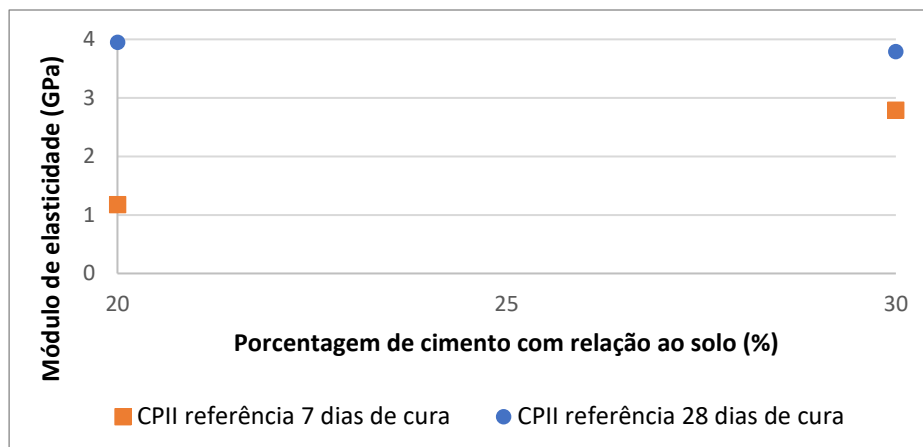


Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme resultados apresentados para as composições de referência, é possível perceber que há um aumento na resistência de acordo com o aumento do teor de cimento e tempo de cura. Observa-se ainda que esse aumento em função da quantidade de cimento incorporada foi mais considerável para as amostras com 28 dias de cura, possivelmente pelo maior tempo de hidratação.

Ainda testando as composições de referência, seguem resultados obtidos para o módulo de elasticidade das amostras.

Figura 11 – Módulo de elasticidade das composições de referência com 7 e 28 dias.

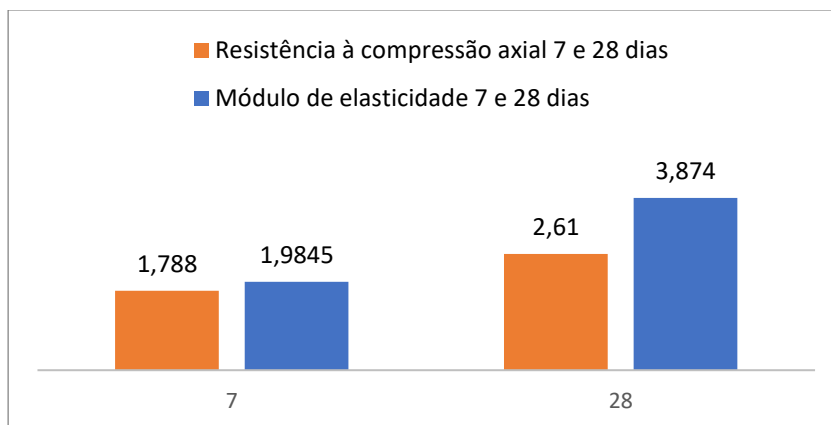


Fonte: Elaborada pela autora.

Supostamente por problemas de instrumentação, os resultados para as amostras com 25% de cimento em relação ao solo não se mostraram bem caracterizados. Ainda assim, analisando a variação do módulo de elasticidade em função do valor da resistência mecânica axial, garante-se um ganho de rigidez para o material, independente do tempo de cura.

Tais propriedades podem ser analisadas na figura a seguir.

Figura 12 – Resistência a compressão axial (MPa) x módulo de elasticidade (GPa).



Fonte: Elaborada pela autora.

Quando o nível de resistência do solo-cimento autoadensável aumenta, devido ao aumento da quantidade de cimento na mistura, o material se torna mais rígido. Isso significa que ele é capaz de resistir melhor aos esforços solicitantes, como cargas aplicadas, sem deformações excessivas ou falhas estruturais.

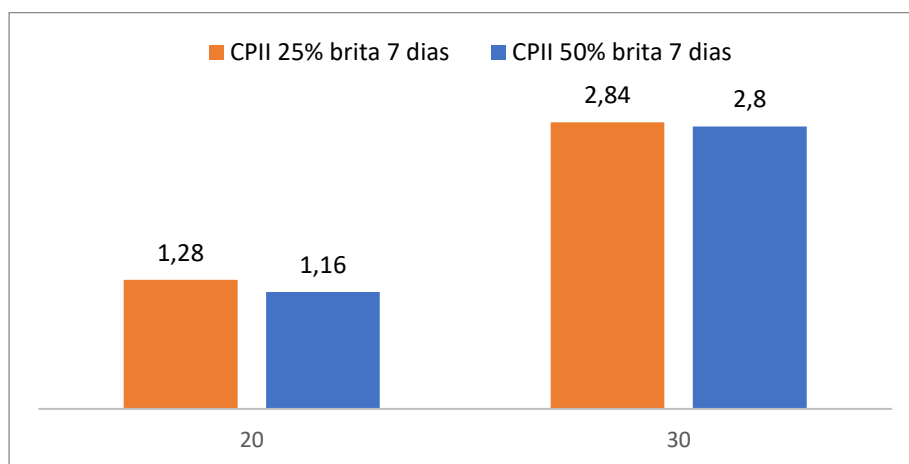
A rigidez do material está diretamente relacionada ao seu módulo de elasticidade, que é a medida da sua capacidade de resistir à deformação elástica

quando submetido a forças externas. Materiais com maior resistência e rigidez são preferíveis em muitas aplicações estruturais, pois proporcionam maior estabilidade e durabilidade às construções.

Portanto, o aumento na resistência do solo-cimento autoadensável não apenas melhora suas propriedades mecânicas, como também aumenta sua capacidade de suportar cargas e de resistir aos esforços aplicados durante sua vida útil. Isso é essencial para garantir a segurança e o desempenho das estruturas construídas com esse material.

Em razão do tempo de estudo, para os casos com o material granular incorporado, limitou-se a análise apenas para as amostras com 7 dias de cura.

Figura 13 – Resistência à compressão axial das composições com brita, após 7 dias de cura, em função do teor de cimento.



Fonte: Elaborada pela autora.

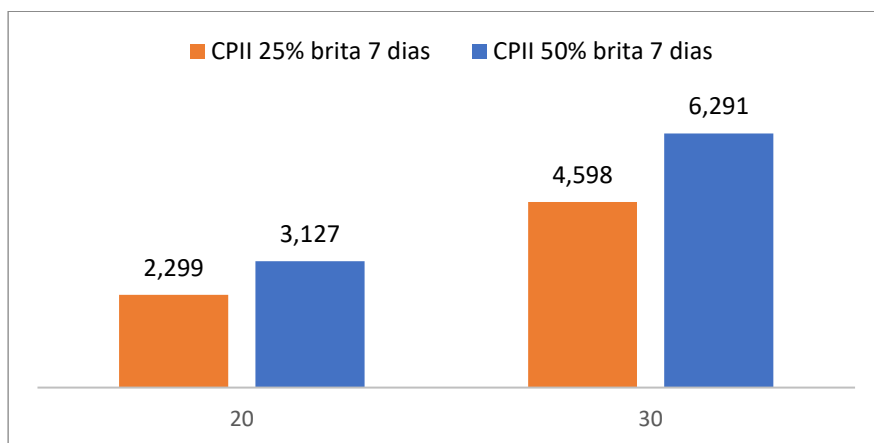
Assim como mostra a Figura 13, os resultados obtidos para as amostras com iguais teores de cimento mas diferentes teores de brita, são bem próximos. Apesar disso, sugere-se que para os valores de resistência à compressão axial em amostras com a mesma quantidade de cimento, há uma tendência onde os valores tendem a diminuir conforme se aumenta o teor de brita. Provavelmente isso acontece devido a diminuição das tensões de aderência entre a matriz cimentícia e as britas, conseqüentemente, pelo aumento da superfície de contato.

Se a área de contato aumenta significativamente, ou seja, se há um aumento na quantidade de material granular, haverá uma diminuição nas tensões de aderência, fazendo com que a resistência do material seja afetada negativamente.

Nessa análise, a matriz cimentícia atua como um aglomerante da mistura e a resistência passa a ser definida pela relação água/cimento.

Nos ensaios de módulo de elasticidade, os resultados foram mais dispersos, permitindo análises mais claras.

Figura 14 – Módulo de elasticidade para as composições com brita, após 7 dias de cura, em função do teor de cimento.

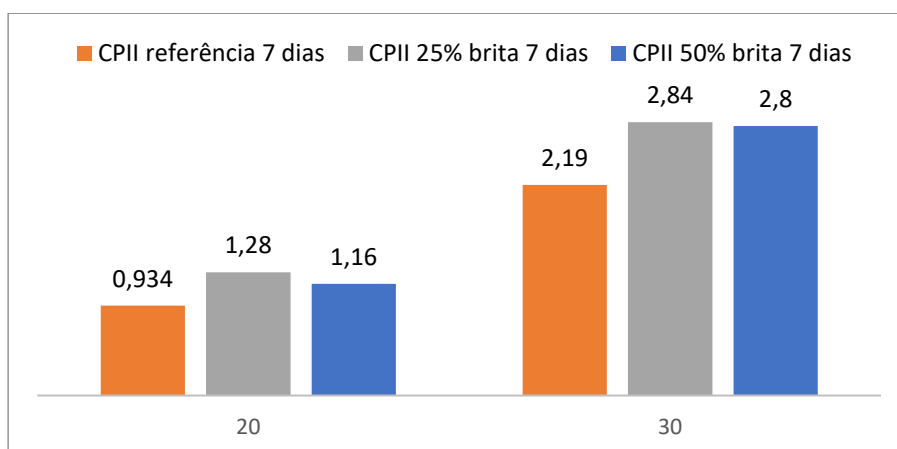


Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando o que foi apresentado, percebe-se que para as condições em que a matriz cimentícia é mantida constante, o módulo de elasticidade do compósito aumenta a medida que o teor de brita aumenta, e para maior teor de cimento, maior módulo de elasticidade.

Fazendo uma análise mais detalhada e comparativa das amostras com 7 dias de cura, tem-se os resultados da seguinte figura:

Figura 15 – Resistência à compressão axial das composições referência, após 7 dias de cura, em função do teor de cimento.



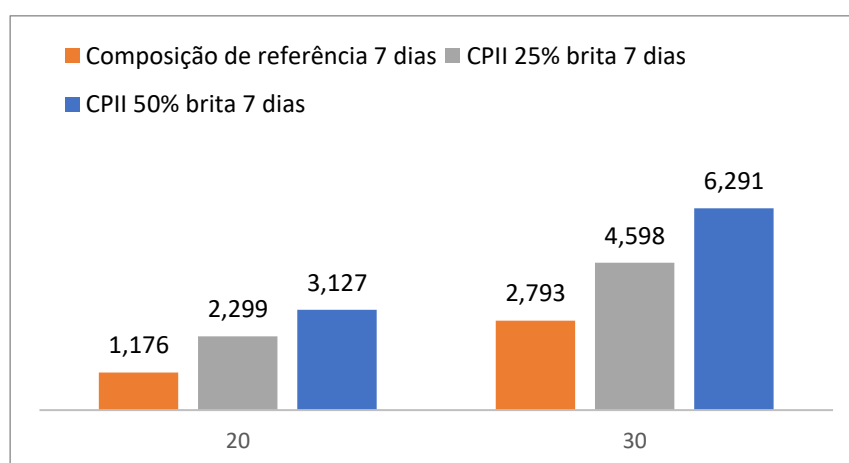
Fonte: Elaborada pela autora.

Para ambos os teores de cimento, a resistência à compressão axial aumentou com a presença do material granular, mas apresentou o início de uma queda para as composições com 50% de brita. Imagina-se que uma quantidade excessiva de brita pode resultar em uma distribuição inadequada da matriz cimentícia, deixando vazios que comprometem a resistência à compressão.

Supõe-se também que com uma alta proporção de brita, pode ser mais difícil compactar o concreto adequadamente, o que pode resultar em áreas com menor densidade e, portanto, menor resistência à compressão.

Faz-se essa mesma análise para o módulo de elasticidade e os resultados obtidos apresentam um comportamento diferente, conforme ilustra a figura a seguir.

Figura 16 – Módulo de elasticidade em função do teor do cimento – 7 dias de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

Sabendo que a brita é o material mais rígido quando comparado a matriz cimentícia, espera-se que ao aumentar o teor de brita, o compósito se torne mais rígido e, conseqüentemente, apresente um módulo de elasticidade mais alto.

As análises feitas a partir dos resultados ilustrados na Figura 16 não foram diferentes disso. A presença de brita na mistura pode ajudar a distribuir as tensões de forma mais eficaz e proporcionar uma boa aderência com a matriz cimentícia, resultando em um comportamento mais elástico da amostra.

Dessa forma, observa-se um crescimento concomitante do módulo de elasticidade, tanto com o teor de cimento quanto com o teor de brita.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que o aumento do teor de cimento resulta em um aumento na resistência mecânica do solo-cimento, de forma que o cimento desempenhe um papel crucial na resistência do material, e que o teor de brita na mistura influencie nas condições de rigidez e afete diretamente a mobilidade. No entanto, é importante ressaltar que a relação exata entre o teor de brita e o módulo de elasticidade pode depender de diversos fatores, incluindo a distribuição e tamanho das partículas de brita, a qualidade da matriz cimentícia, o método de mistura e o processo de cura do concreto. Portanto, é necessário realizar estudos e testes específicos para determinar essa relação em uma situação particular. A análise das condições de cimentação da matriz possibilita compreender como as diferentes quantidades de cimento afetam a coesão e a força interna da mistura. Além disso, a consideração das tensões de aderência oferece percepções sobre a capacidade da mistura de se ligar a outros materiais, como agregados, influenciando diretamente a integridade estrutural. Isso sugere que para casos em que se deseja obter um solo-cimento autoadensável mais resistente no estado endurecido e menos fluido no estado fresco, é necessário aumentar o consumo de Cimento Portland e de brita. Esses apontamentos são importantes para que a formulação do compósito seja feita conforme as necessidades e propriedades desejadas, até mesmo a durabilidade do material final.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, M. A. M.; NUNES, S. C. B; RIO, J. F. M. **Estudo do solo-cimento autoadensável produzido com solo da região de Porto-Pt.** Parte I: Caracterização das propriedades mecânicas. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 9, 1, p. 37-51, 2014.

ALCANTARA, M. A. M.; CUSTODIO, M. S.; VIZHALIL, P. M. **O solo-cimento autoadensável com adição de cinzas de casca de arroz como aditivo auxiliar.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 57, 2015, Bonito MS, Anais...56 Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo IBRACON, 2015. V.1 np-np.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8491: Amostragem de solo e materiais granulares de solo-cimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8492: Solo-Cimento - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522: Concreto. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11768: aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 13276. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

BERTE, S. D. D; ALCANTARA, M. A. M. **Estudo do comportamento do solo-cimento autoadensável.** REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 7, 2, pp. 16-31, 2013.

BERTÉ, S.D.D. **Caracterização do solo-cimento auto-adensável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, 2012, Ilha Solteira, 148p.

CLAVERIE, J. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento autoadensável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, Ilha Solteira, 2015.

GERLACH, F. **A resistência mecânica e o módulo de elasticidade do solo-cimento autoadensável.** In. Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, IBRACON, 2020.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** Porto Alegre, 2016, bookman, 887p.
SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M. Solo cimento e solo cal. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E PRINCÍPIOS DE CIÊNCIAS DE MATERIAIS, vol2, São Paulo, 2017.

MILANI, A.P.S; BARBOZA, C.S. **Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas**, Ambiente Construído, Porto alegre, v.16, p.143-153, 2016.

SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M. **Solo-cimento e solo-cal**. Materiais de Construção Civil e princípios de ciências de materiais, vol2, São Paulo, 2007, Geraldo Isaías/IBRACON, p. 988-961 ISBN 978-85-98576-19-0.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de Solo-Cimento Plástico em Estacas Escavadas Com Trado Mecânico em Ilha Solteira-SP**. Campinas, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.