



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL

Bruna Ramos de Souza Cruz

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE DOSAGEM DO
SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL**

BRUNA RAMOS DE SOUZA CRUZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de mestre no Curso de Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Ana Paula da Silva Milani

CAMPO GRANDE

JULHO / 2023



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNA RAMOS DE SOUZA

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE DOSAGEM DO SOLO- CIMENTO AUTOADENSÁVEL

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora em 05 de julho de 2023, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dra. Ana Paula da Silva Milani - (Orientadora)

Dr. Christian Souza Barboza.

Dr. Willy Alves de Oliveira Soler.

Dra. Andrea Naguissa Yuba.

Dr. Daniel Anijar de Matos.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani, Professora do Magistério Superior**, em 08/08/2023, às 14:43, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Christian Souza Barboza, Usuário Externo**, em 08/08/2023, às 14:52, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Willy Alves de Oliveira Soler, Professor do Magisterio Superior**, em 08/08/2023, às 14:58, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4259915** e o código CRC **20C02D3D**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

À minha família: meu esposo Wagner; meus
filhos Francisco e José; e os demais filhos que
Deus venha a nos conceder.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me sustentado até aqui, concedendo-me saúde, paciência e sabedoria para a realização desse trabalho.

A Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, por me socorrer nos momentos de angústia; por sempre interceder pelas minhas conquistas diante de Deus.

Ao meu esposo Wagner, por ter me incentivado desde o processo seletivo até a conclusão da dissertação; por ter suportado com paciência minha ausência para que eu pudesse me dedicar à realização desse trabalho; por trabalhar incansavelmente (dentro e fora de casa) para suprir as necessidades da nossa família para que eu tivesse tempo de desenvolver essa dissertação; por não ter me deixado desistir; por acreditar em mim mais do que eu mesma; por ser o meu porto seguro.

Aos meus filhos Francisco e José, por terem me acompanhado durante a realização desse trabalho e por serem a minha maior motivação para a conclusão do mesmo.

Aos meus pais e irmãs, por me incentivarem e acreditarem no meu potencial.

A minha orientadora, Ana Paula, por todo o conhecimento dividido comigo, pela paciência e pelo incentivo no decorrer da realização desse trabalho.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil e da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Diante da constante necessidade do desenvolvimento de novos sistemas construtivos que atendam, simultaneamente, aos requisitos de segurança, durabilidade, conforto térmico e valores acessíveis, o solo-cimento autoadensável (SCAA) apresenta-se como uma tecnologia promissora. Contudo, não há especificação técnica suficiente acerca desse material, o que torna necessário o aprofundamento do estudo sobre suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Diante disso, essa pesquisa teve por objetivo propor um método para a dosagem do SCAA para aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações. Para tanto, foram definidas as etapas necessárias para o fluxo do processo do estudo de dosagem do SCAA por meio de adaptação de métodos de dosagem para materiais cimentícios; e realizado o estudo do comportamento das misturas de solo + cimento + aditivo superplastificante + água nos estados fresco e endurecido para a formulação de diagramas que indiquem os teores de água, cimento e aditivo necessários para dosagem do SCAA. Os resultados culminaram na obtenção de uma equação de previsibilidade do comportamento mecânico do SCAA e um diagrama de dosagem que correlaciona o fator cimento:solo com a resistência à compressão axial. Estes, por sua vez, direcionaram para uma proposta de metodologia de dosagem focada na otimização da composição do SCAA versus desempenho mecânico requerido do material, cujos limites de aplicação são misturas com solo arenoso e/ou argiloso para construção de paredes monolíticas de edificações.

Palavras chaves: parede monolítica, caracterização físico-mecânica, fluidez, aditivo superplastificante

ABSTRACT

Faced with the constant need to develop new construction systems that answer the requirements of safety, durability, environmental comfort and economic access, the cement-stabilised self-compacting earth (CSCE) presents itself as a promising technology. However, there is no technical specification about this material, which makes it necessary to deepen the study on its physical-mechanical properties. In view of this, this research aimed to propose a method for the dosage of CSCE applied in the constructive system of monolithic walls of buildings. For this purpose, we defined the necessary steps for the CSCE dosing study process by means of adaptation of dosing methods for cementitious materials; and realized the study of the behavior of mixtures of soil + cement + superplasticizer additive + water in the fresh and hardened states for the formulation of diagrams that indicate the contents of water, cement and additive required for CSCE dosage. The results culminated in obtaining an equation that helps to predict the mechanical behavior of the CSCE and a dosing diagram that correlates the cement:soil factor with compressive strength. These results led to a proposal for a dosing methodology focused on optimizing the CSCE composition versus the required mechanical performance of the material, whose application limits are mixtures with sandy and/or clayey soil for construction of monolithic walls of buildings.

Keywords: monolithic wall, physical-mechanical characterization, fluidity, superplasticizer additive

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Método de dosagem para SCC em conformidade com a ABCP (1986).....	24
Figura 2: Fluxograma proposta metodológica de determinação da autoadensabilidade do SCAA.....	25
Figura 3: Esquema de dosagem de CAA proposto por Okamura e Ouchi (2003)	26
Figura 4: Fluxograma método de dosagem de CAA proposto por Tutikian	27
Figura 5. Fluxograma método de dosagem de CAA proposto por Domone (2009).....	28
Figura 6. Solos em estado natural	30
Figura 7. Fluxograma proposta metodológica do estudo de dosagem de SCAA	33
Figura 8: Carta de traços para o solo arenoso	35
Figura 9: Carta de traços para o solo argiloso	36
Figura 10. Diferença na homogeneização devido ao processo de mistura.....	37
Figura 11. Execução do ensaio de Slump Flow	38
Figura 12. Ensaio de absorção de água	39
Figura 13. Medição das alturas dos CP	40
Figura 14. Ensaio de avaliação da retração livre de 24h até 7 dias de idade	40
Figura 15. Execução do ensaio de resistência à compressão	41
Figura 16. Fluxograma retroalimentado da proposta de metodologia do estudo de dosagem do SCAA.	44
Figura 17. curva granulométrica do solo arenoso	46
Figura 18. curva granulométrica do solo argiloso	47
Figura 19. Diagrama de dosagem para SCAA	69
Figura 20. Metodologia de dosagem para SCAA	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados técnicos do aditivo	31
Tabela 2. Dados técnicos da água de abastecimento urbano	31
Tabela 3. Teor de cimento em relação à massa de solo	34
Tabela 4. Identificação dos traços	36
Tabela 5. Caracterização dos solos	45
Tabela 6. Resultados do espalhamento no ensaio de Slump Flow	48
Tabela 7. ANOVA e Tukey para Slump Flow do Solo Arenoso	48
Tabela 8. ANOVA e Tukey para Slump Flow do Solo Argiloso	48
Tabela 9. Resultados de absorção de água	51
Tabela 10. ANOVA e Tukey para absorção de SCAA com solo arenoso	51
Tabela 11. ANOVA e Tukey para absorção de SCAA com solo argiloso	52
Tabela 12. Retração linear livre por secagem nas idades de 24h e 7 dias	55
Tabela 13. ANOVA e Tukey para retração do SCAA com solo arenoso	55
Tabela 14. ANOVA e Tukey para retração de SCAA com solo argiloso	56
Tabela 15. Resistência à compressão simples do SCAA aos 7 e aos 28 dias	59
Tabela 16. ANOVA e Tukey para resistência à compressão do SCAA com solo arenoso	59
Tabela 17. ANOVA e Tukey para resistência à compressão do SCAA com solo argiloso	60
Tabela 18. Determinação da linha de tendência para SCAA com solo arenoso	64
Tabela 19. Determinação da linha de tendência para SCAA com solo argiloso	66
Tabela 20. Desvio relativo entre valores observados e teóricos – SCAA com solo arenoso	70
Tabela 21. Desvio relativo entre valores observados e teóricos – SCAA com solo argiloso	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	SCAA - características e aplicações.....	16
2.2	Fatores que influenciam no comportamento do solo-cimento	20
2.3	Métodos de dosagem de compósitos cimentícios	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Materiais.....	30
3.1.1	Solo	30
3.1.2	Cimento	30
3.1.3	Aditivo.....	31
3.1.4	Água	31
3.2	Etapas da proposta de metodologia do estudo de dosagem.....	32
3.3	Definição dos traços das misturas de SCAA	33
3.4	Caracterização do SCAA.....	37
3.4.1	Caracterização física	37
3.4.2	Caracterização mecânica	40
3.5	Análise estatística	41
3.6	Retroalimentação da proposta de metodologia do estudo de dosagem	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	Análise e caracterização dos solos	45
4.2	Caracterização do SCAA.....	47
4.2.1	Slump Flow	47

4.2.2	Absorção de água	50
4.2.3	Retração.....	54
4.2.4	Resistência à compressão simples	58
4.3	Diagramas de dosagem	63
4.4	Proposta de metodologia	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável é um plano de ação global que reúne 17 objetivos criados para erradicar a pobreza e promover a vida digna a todos dentro das condições que o nosso planeta oferece e sem comprometer a qualidade de vida das próximas gerações. Os objetivos são integrados e abrangem as três dimensões do desenvolvimento sustentável – social, ambiental e econômica.

A necessidade de implantação dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável é urgente, principalmente no que diz respeito ao Objetivo 11, cujas metas são, entre outras: garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível; aumentar a urbanização inclusiva e sustentável; apoiar os países menos desenvolvidos, inclusive por meio de assistência técnica e financeira, para construções sustentáveis e resilientes, utilizando materiais locais (ONU, 2015).

Para alcançar tais metas faz-se necessário um alto investimento no setor da construção civil. Contudo, esse setor impacta diretamente o ambiente natural, pois de acordo com Martins et. al. (2018) causa relevantes impactos ambientais negativos relacionados às emissões de CO₂, ao consumo intensivo de energia, ao esgotamento de recursos naturais não renováveis e à geração de resíduos. De acordo com Sameh (2014), a escassez de recursos, os problemas energéticos, a poluição resultante do uso de materiais de construção convencionais e o aumento dos custos de construção e transporte são fatores que levam muitos países a considerar métodos de construção baratos e de baixo impacto que sejam ecologicamente corretos e apropriados.

Diante disso, fica evidente a necessidade de desenvolver e considerar o uso de novos materiais e sistemas construtivos, que atendam, simultaneamente, aos requisitos de segurança, durabilidade, conforto, eficiência e preços acessíveis, utilizando materiais naturais e disponíveis localmente, garantindo, assim, a construção de edificações mais sustentáveis.

Neste cenário, a terra como material de construção surge como uma boa alternativa, já que é um dos materiais de construção mais antigos da história e de acordo com Pacheco-

Torgal e Jalali (2012) apresenta muitos benefícios sob os preceitos da sustentabilidade, como viabilidade econômica, baixa energia incorporada, boas propriedades higrotérmicas, possibilidade de reciclagem ao final da vida útil, entre outros. Ainda, de acordo com Cristelo et al. (2012), a terra tem sido vista como um material que pode criar edifícios agradáveis que corroboram com a sustentabilidade no setor da construção e com o suprimento da demanda por unidades habitacionais acessíveis. É importante ressaltar que, nesse trabalho, assim como no de Veraldo (2015) o termo terra é utilizado para designar a produção arquitetônica que emprega o solo como principal matéria-prima.

Um sistema construtivo à base do material terra que recentemente ganhou respaldo técnico-científico por meio da publicação da norma brasileira é o sistema taipa de pilão estabilizada, ou também intitulada, paredes monolíticas de solo-cimento. A NBR 17014 (2022) define a taipa de pilão como sendo parede de fechamento de edificações executada com a mistura de solo-água ou solo-estabilizante-água compactada em fôrmas removíveis e, que formam um único elemento contínuo, podendo ser portante ou sem função estrutural. No entanto, para garantir rapidez na produção e aplicação do material nas fôrmas removíveis, o solo-cimento fluido ou solo-cimento autoadensável (SCAA) apresenta-se como uma possibilidade tecnicamente viável (Milani e Barboza, 2016).

O SCAA consiste na mistura de solo, cimento, água e aditivo químico plastificante, podendo conter fibras ou outras adições minerais. De acordo com Berté e Alcântara (2013) e Milani e Barboza (2016), tal material deve ter sua consistência fluida a fim de se moldar sem a necessidade de adensamento mecânico (vibração, prensagem ou compactação) e não deve apresentar segregação ou exsudação na mistura para correta aplicação e desempenho em elementos construtivos.

Berté (2012) estudou dosagens de SCAA com uso de solo argiloso, cimento e aditivo a base de policarboxilatos, e encontrou uma mistura otimizada que apresentou os melhores resultados no que diz respeito à densidade aparente, retração, absorção de água e resistência à compressão axial, além de desempenho satisfatório em relação ao escoamento por gravidade e abertura de espalhamento da mistura no estado fresco.

Milani e Barboza (2016) estudaram a potencialidade do uso do SCAA - com uso de solo arenoso - na fabricação de paredes monolíticas de vedação, desenvolvendo misturas

com adequadas proporções para seu lançamento em fôrmas sem a necessidade de compactação e características físico-mecânicas adequadas para atender as solicitações usuais de paredes monolíticas. Contudo, segundo os autores, durante o processo de endurecimento, o SCAA apresentou retrações e suscetibilidade à ocorrência de fissurações, o que pode afetar o seu desempenho e durabilidade.

Paz et al. (2016) avaliaram o desempenho de SCAA com adição de fibras de resíduos de borrachas de pneu e microfibras de polipropileno. O SCAA apresentou desempenho adequado para aplicação em paredes de vedação com teores de consumo de cimento entre 20% a 25% em relação à massa de solo e aditivos superplastificantes na faixa de 0,8 a 1,2%. Ainda de acordo com esse estudo, a adição das microfibras de polipropileno no SCAA melhorou as propriedades mecânicas e reduziu a fissuração causada por retração plástica, enquanto as fibras de resíduos de borrachas de pneu reduziram o desempenho mecânico do produto.

Apesar dos avanços nas pesquisas do uso do SCAA em paredes monolíticas, não há especificação técnica suficiente, como caracterização mecânica (através da resistência à compressão) e propriedades físicas (capacidade de absorção de água e retração) para a construção de um arcabouço de dados experimentais que fomente o desenvolvimento de conjunto normativo ou diretrizes para a aplicação do SCAA de forma corrente e com respaldo tecnológico do produtor ou consumidor.

É importante ressaltar que a ABCP (1986) prescreve uma metodologia de dosagem de solo-cimento compactado, que é feita em conformidade com os métodos da Portland Cement Association (PCA). Porém, em se tratando de SCAA, não há uma metodologia de dosagem normalizada.

Aio et al. (2011) afirmam que a granulometria do solo influencia na qualidade e nos custos do solo-cimento, já que solos arenosos bem graduados com silte e argila exigem uma menor quantidade de cimento para estabilizá-los. Berté (2012) constatou que diferentes proporções granulométricas do solo podem aumentar a retenção de água nas misturas de SCAA e que o aditivo superplastificante é importante para a sua estabilidade. Além disso, verificou que a trabalhabilidade das misturas é função da variação da relação água/cimento e água/(cimento+solo), indicando que é possível ter boa resistência mecânica sem prejuízos

à trabalhabilidade. Alcântara et al. (2017) estudaram a reologia e aspectos mecânicos do SCAA e concluíram que a autoadensabilidade das misturas manteve forte correlação com as relações água/(cimento+solo) e superplastificante/cimento; e que a resistência à compressão tem dependência da relação água/cimento, reafirmando os resultados de Berté (2012).

Assim, a morfologia e a composição granulométrica do solo, a relação água/cimento, a relação água/(cimento+solo) e a porcentagem de aditivo são fatores que influenciam diretamente nas características do SCAA, deixando exposto que o estudo de dosagem é determinante para que se tenha um bom desempenho do material final.

Diante disso, faz-se necessário o aprofundamento do estudo das características físico-mecânicas do material SCAA para o estabelecimento das relações entre tais características e a composição/proporção dos materiais solo-cimento-água-aditivo químico. No mais, poder-se-á obter uma metodologia de dosagem do SCAA que englobe os variados fatores que interferem no desempenho do produto final, o que irá contribuir com a especificação técnica desse material, e consequente difusão do sistema construtivo paredes de SCAA no país.

Portanto, o **objetivo geral** da pesquisa foi propor um método preliminar de estudo de dosagem do solo-cimento autoadensável (SCAA) para atender a aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações.

Como **objetivos específicos** elencam-se:

- Estudar a influência dos fatores tipo de solo, teor de cimento, teor de água e teor de aditivo nas características físico-mecânicas das misturas de SCAA;
- Verificar se existem correlações entre os fatores da composição do SCAA e as suas características físico-mecânicas para previsibilidade do comportamento;
- Definir diagramas de dosagem do SCAA e seus limites de aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SCAA - características e aplicações

O solo-cimento apresenta em sua composição: solo, cimento e água. De acordo com Segantini (2000), esse material pode ser classificado em: SCC (solo-cimento compactado) e SCP (solo-cimento plástico), de modo que para o SCC a água deve ser adicionada até que se obtenha compactação máxima e que ocorram as reações de hidratação do cimento; e para o SCP a adição de água deve ocorrer até que se obtenha uma consistência plástica (semelhante a de uma argamassa de emboço). Mas, Berté (2012) acrescenta mais uma classificação, o SCAA (solo-cimento autoadensável), que terá adicionado à sua composição o aditivo superplastificante, permitindo uma alta fluidez e características semelhantes ao do concreto autoadensável.

Apesar das diferentes classificações no que diz respeito à consistência da mistura no estado fresco, todo compósito de solo-cimento deve apresentar características físico-mecânicas e de durabilidade compatíveis com sua aplicação. De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012a) a resistência à compressão simples média, aos 7 dias de idade, de tijolos de solo-cimento prensados sem função estrutural deve ser superior a 2,0 MPa e a média dos valores de absorção de água não pode ultrapassar 20%. Já a NBR 13553 (ABNT, 2012c) prescreve que o limite mínimo para a resistência aos 7 dias de painéis monolíticos de solo-cimento compactado deve ser 1,0 MPa e capacidade de absorção de água menor ou igual a 20%.

Martins et al. (2012) avaliaram o desempenho de compósitos solo-cimento-fibras de sisal autoadensáveis com reologia programada para alcançar espalhamento de 600 mm no Slump Flow. O consumo dos materiais utilizados na dosagem foi: solo – 1338,4 kg/m³, cimento CP II-F-32 – 19 kg/m³, metacaulinita – 19 kg/m³, superplastificante da marca Glenium 51 – 12,39 kg/m³, água – 461,35kg/m³. As fibras de sisal foram incorporadas nos teores de 0,5; 1,0 e 1,5% (em relação à massa de solo seco). Como resultado encontraram resistência à compressão simples aos 28 dias entre 2,8 e 3,3 MPa e capacidade de absorção de água por capilaridade variando entre 3,65 e 3,75 g/cm², aos 130 dias.

Berté e Alcântara (2013) e Arooz e Halwatura (2018) estudaram misturas de SCAA para produção de componentes de alvenaria. No trabalho desenvolvido por Berté e Alcântara (2013) – que utilizou quantidade fixa de solo podzólico vermelho amarelo com iguais quantidades de argila, silte, areia fina e areia média, cimento CP II Z 32 com teor variando de 20% a 30%, água variando de 36% a 42% e aditivo superplastificante dispersante de ação estérica e eletrostática com teores de 0,4% a 0,8% - no que diz respeito às características do produto no estado endurecido, a resistência à compressão variou de 2,0 MPa a 7,5 MPa e a absorção de água variou de 1,5% a 22,8%; e analisando as misturas no estado fresco, o diâmetro de espalhamento no Slump Flow ficou entre 29 cm e 77 cm. Já Arooz e Halwatura (2018) utilizaram solo arenoso (menos de 10% de finos, 55 a 60% de areia, 30 a 35% de cascalho), 4% de cimento Portland e 18 a 20% de água; e encontraram uma dosagem ideal para o SCAA que alcançou resistência à compressão simples de 8,0 MPa, valor de espalhamento da mistura no ensaio de Slump Flow de 500 mm e durabilidade atestada pelo teste de erosão acelerada prescrito pela norma SLS 1382 - parte I do Sri Lanka.

Milani e Barboza (2016) e Ouellet-Plamondon e Habert (2016) estudaram as propriedades físico-mecânicas do SCAA para a execução de paredes monolíticas. Milani e Barboza (2016) obtiveram potencialidade de aplicação para a dosagem de 1:8 (cimento:solo arenoso, em massa) com 0,8% aditivo e relação água/cimento igual a 2, alcançando uma média de resistência à compressão simples aos 7 dias de 1,72 MPa e capacidade de absorção de água máxima de 18%. Já Ouellet-Plamondon e Habert (2016) investigaram as propriedades do “concreto de argila autoadensável” nos estados fresco e endurecido. Para tanto, utilizaram solo cuja composição era 55% finos (silte + argila) e 45% areia, aditivo Viscocrete (Sika) com porcentagem variando 0,5%, 1,0% e 2,0% em relação à massa de finos e cimento de sulfoaluminato de cálcio. Como resultados, Ouellet-Plamondon e Habert (2016) obtiveram resistência a compressão variando de 1,5 a 6,0 MPa e bons resultados de trabalhabilidade no estado fresco da mistura.

Simioni (2019) analisou a influência da incorporação parcial de areia oriunda de Resíduos de Construção Civil (RCC) nas misturas de SCAA, tanto no estado fresco quanto no endurecido, com o intuito de desenvolver uma mistura adequada para fabricação de paredes monolíticas. Para a dosagem do SCAA utilizou-se latossolo vermelho amarelo,

cimento CP-II-Z-32, resíduos de areia reciclada de RCC, aditivo superplastificante e água. O traço composto por 70% de solo + 30% de areia de RCC estabilizado com 20% de cimento e adicionado 27% de água e 1,2% de aditivo foi recomendado para a aplicação em paredes monolíticas, pois apresentou espalhamento de 667,5 mm do Slump Flow, valor este considerado adequado para lançamento do concreto autoadensável em paredes monolíticas. Segunda a autora, esta foi a mistura com melhor homogeneidade, maior índice de fluidez e espalhamento visual sem segregação e/ou exsudação; teor de ar incorporado próximo a 17%; absorção de água igual a 18,6%; índice de vazios de 24,4% e resistência mecânica aos 7 dias igual a 2,8 MPa, assim atendendo aos requisitos mínimos para paredes monolíticas de solo-cimento compactado.

Alcântara et al. (2017) estudaram misturas de SCAA compostas por solo residual saprolítico da região de Porto - Portugal, cimento Portland CEM I, superplastificante de ação estérica e eletrostática, e água, com o intuito de aplicá-las a elementos construtivos. Os teores de cimento em relação à massa de solo variaram entre 20%, 25% e 30%, obtendo resistência a compressão simples entre 2,7 MPa e 6,5 MPa e resistência à flexão entre 1,24 MPa e 3,18 MPa. O diâmetro médio de espalhamento das misturas no Slump Flow Test variaram de 207mm a 333mm e a característica de porosidade entre 41,55% e 48,41%.

Já Helson et al. (2017) avaliaram a influência do teor de cimento e de argila em dosagens de SCAA. As misturas foram dosadas buscando obter diâmetro de abertura de 300 mm a 320 mm no teste de espalhamento usando o mini-cone. Como resultado, obteve-se porosidade variando de 28% a 60%, densidade aparente compreendida entre 900 e 2000 kg/m³ e resistência a compressão entre 5,5 e 17,7 MPa, após 180 dias de cura.

Claverie (2015) pesquisou o comportamento do SCAA com adição de cinza de casca de arroz (CCA) no estado fresco e endurecido. Foram realizadas 18 dosagens com teores de cimento variando em 26,7%, 30% e 33,3%; relação água/materiais em massa seca fixada em 30% e quantidade de aditivo em relação ao solo+cimento fixada em 0,4%. Vale ressaltar que foi substituído no solo um teor de 10% de areia e que as relações CCA/cimento utilizadas foram 0%, 5%, 7,5% e 10% (com relação cal/cimento igual a 0) e 0% e 5% (com relação cal/cimento igual a 5%). Os resultados apontaram uma diminuição da trabalhabilidade com a adição de cinza de casca de arroz para o maior teor de cimento adotado. No estado

endurecido, houve crescimento da resistência à compressão com os teores de cimento, de cinza de casca de arroz, de cal, e dos dois conjuntamente (4,42 MPa a 11,45 MPa) e a absorção de água diminuiu ao longo do tempo e com a adição de cimento.

Já o trabalho desenvolvido por Fernandes (2017) teve como objetivo estudar a viabilidade de aplicação do solo-cimento autoadensável para fabricação de blocos de alvenaria a partir de três traços diferentes (1:6, 1:9 e 1:12, cimento:solo, em massa). No estado endurecido, os ensaios de resistência a compressão apresentaram valores entre 3,0 MPa a 3,7 MPa e absorção de água entre 26,49% a 27,08% (em desacordo com a normativa brasileira). No estado fresco, o SCAA apresentou características autoadensáveis, sem a presença de exsudação ou segregação, e com ótima trabalhabilidade, oferecendo viscosidade suficiente para manter a coesão interna; mas ao mesmo tempo, fluidez insuficiente para permitir o trabalho de preenchimento das fôrmas de madeira utilizadas para a moldagem dos blocos.

Carsana e Bertolini (2012) estudaram misturas de solo-cimento fluido para utilizar no preenchimento de cavidades subterrâneas inundadas por água contaminada com sulfato. Foram avaliadas 27 misturas, estabelecidas a partir de três tipos diferentes de solo (siltoso, argiloso e arenoso), cimento Portland-calcário tipo CEM II e água, em que foram variadas as relações água/solo e água/cimento. Foi possível encontrar um material adequado para o enchimento da antiga mina de gesso de Santa Brigida (Itália); composto por solo argiloso, cimento e água, com consistência de 102%, resistência a compressão de 1,29 MPa aos 28 dias, relação água/solo 0,85 e relação água/cimento 4,42. É importante explicar que a consistência da mistura é calculada de acordo com a equação (1), em que d_m é a média de dois diâmetros perpendiculares medidos na amostra no final do ensaio de consistência flow table e d_0 é o diâmetro da base do molde cônico – que é igual a 100 mm.

$$C = \frac{d_m - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

Nota-se que o SCAA pode ser utilizado para variados tipos de aplicação e que é possível obter características físico-mecânicas e de durabilidade compatíveis com o fim a que se destinam. Apesar disso, há uma variabilidade nos resultados obtidos nesses estudos,

o que pode ser explicado pelos diversos fatores que influenciam no comportamento do solo-cimento, que serão detalhados na seção a seguir.

2.2 Fatores que influenciam no comportamento do solo-cimento

O comportamento das misturas de SCAA deve-se a uma combinação de fatores que atuam no sistema solo-cimento, independentemente do método de adensamento aplicado no material para preenchimento das fôrmas.

A composição química e granulométrica do solo, bem como a morfologia dos grãos que o compõem são os primeiros a influenciarem no comportamento do solo-cimento. De acordo com o CEPED (1985), os solos ideais para a mistura com cimento preferencialmente devem possuir teor de areia um pouco superior a 50% e não devem ter presença de matéria orgânica, pois “esta pode perturbar a hidratação do cimento e, conseqüentemente, a estabilização do solo matéria-prima” (ABCP, 1985).

A ABCP (1985) prescreve que, em geral, os solos mais adequados para a fabricação de solo-cimento compactado são aqueles em que 100% dos grãos passam na peneira 4,8 mm e 10 a 50% passam na peneira 0,075 mm. O limite de liquidez deve ser menor ou igual a 45% e o índice de plasticidade menor ou igual a 18%. Também neste boletim técnico sobre fabricação de tijolos de solo-cimento usando prensas manuais destaca que os solos arenosos quase sempre requerem menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos. Contudo, a presença de argila na composição do solo é necessária para dar à mistura de solo-cimento coesão suficiente que permita a desmoldagem e o manuseio dos tijolos logo após a prensagem.

Segantini e Alcântara (2010) apontam que solos argilosos requerem grandes quantidades de água para atingirem consistência plástica. Tal afirmação é comprovada por Helson et. al. (2017), que discutiu a influência do teor de argila nas propriedades das misturas de SCAA e concluiu que quanto maior a quantidade de argila, maior a quantidade de água necessária para obter uma mesma consistência da mistura. De acordo com o referido autor, a alta demanda de água de misturas de solo-cimento contendo argila é causada pela retenção de água em sua estrutura e por sua elevada área superficial específica. Helson et al. (2017) ainda observou que características como a densidade

aparente seca, densidade aparente úmida e módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos estudados diminuíram com o aumento do teor de argila.

Estudos sobre o comportamento do solo-cimento na forma autoadensável indicam que os teores de água, cimento e aditivo superplastificante também são determinantes no comportamento final do solo-cimento.

Depois de analisar 27 misturas diferentes de SCAA - mantendo fixa a quantidade de solo e variando os teores de cimento (20%, 25% e 30%), água (36%, 39% e 42%) e aditivo superplastificante (0,4%, 0,6% e 0,8%) - Berté e Alcantâra (2013) observaram que as misturas que alcançaram menor espalhamento no Slump Flow Test tinham os maiores teores de cimento e os menores teores de água e aditivo superplastificante. Além disso, foi observado que a resistência mecânica do material SCAA diminui quando se aumenta a quantidade de água na mistura para cada consumo de cimento, indicando que a resistência é função da relação água/cimento. Outra constatação é de que a absorção de água do material diminui com o aumento do consumo de cimento. Os referidos autores ainda concluíram que a água e o aditivo químico atuam como agentes de fluidificação e o cimento como agente de viscosidade e ressaltaram que a relação água/cimento é um importante parâmetro de dosagem, haja vista que a resistência mecânica depende diretamente dela – são inversamente proporcionais. Essas descobertas foram reafirmadas por Alcântara et. al (2017), que ainda adicionou que as propriedades de fluxo do SCAA apresentam forte correlação e são diretamente proporcionais a relação água/cimento + solo e superplastificante/cimento.

Pensando ainda na influência dos fatores água e cimento, Martins et. al. (2012) desenvolveram um traço de SCAA composto de solo arenoso, cimento, fibras, adições minerais e aditivo superplastificante e concluíram que os fatores relacionados à dosagem e reologia do material estão diretamente ligadas à razão água/solo e água/cimento, atentando ao fato de que o percentual de umidade é próximo ao limite de plasticidade encontrado para o solo quando se pretende trabalhar com o solo-cimento em estado plástico.

Milani e Barboza (2016) exploraram a influência do aditivo superplastificante e do teor de água nas características do SCAA no estado fresco, bem como sua relação com os Limites de Atterberg (também conhecidos como limites de consistência do solo, referem-se

aos limites de liquidez, plasticidade e contração do solo e são definidos por ensaios laboratoriais criados por Albert Atterberg). Os autores pontuaram que a incorporação de aditivos superplastificantes nas misturas de solo-cimento reduziu significativamente a relação água/solo para a obtenção da consistência fluida. Contudo, não foi possível a redução de água abaixo do limite de liquidez do solo (que é a água necessária para que ocorra a fluidificação dos siltes e das argilas que o compõem), demonstrando que o alcance do autoadensamento do sistema solo-cimento está intimamente ligado aos limites de consistência do solo. Milani e Silva (2018) corroboraram esta influência do aditivo químico superplastificante, ficando comprovado que ele exerce importante papel para a estabilidade do material SCAA no estado fresco, conferindo às misturas aumento da mobilidade e não ocorrência de segregação dos componentes.

Ferreira (2020) verificou que os solos tropicais caracterizados como argilosos ou arenosos, cuja granulometria tenha 100% das partículas menores que 4,8 mm, são adequados para estabilização com cimento Portland e aditivo superplastificante, o que possibilita a obtenção do material construtivo SCAA para aplicação em paredes monolíticas de edificações. Já os solos caracterizados como siltosos não são adequados para produção do referido material, visto que é um solo instável perante a estabilização químico-mecânica de água+cimento+aditivo superplastificante em teores que alcancem a autoadensabilidade da mistura SCAA.

Em se tratando de características do SCAA no estado endurecido, Milani e Barboza (2016) afirmam que misturas de SCAA com maior quantidade de água apresentam maior retração, enquanto as misturas com mais cimento são mais suscetíveis à fissuração (devido à presença elevada de componentes finos).

No que diz respeito à retração, a observação de Milani e Barboza (2016) foi também constatada por Ouellet-Plamondon e Habert (2016) que em seu estudo com SCAA observaram que o aumento do teor de água permite um aumento na trabalhabilidade inicial das misturas no estado fresco, mas irá induzir uma maior retração no estado endurecido.

Helson et. al (2017) em seu estudo sobre influência do teor de cimento e de argila em dosagens de SCAA verificou que o módulo de elasticidade das misturas de SCAA aumentam

com o teor de cimento, mas diminuem com o aumento do teor de argila. O aumento no teor de argila também faz diminuir as densidades aparentes seca e úmida.

Em suma, a presença de finos (siltes e argilas) na composição do solo é importante para a coesão do material solo-cimento e influencia diretamente na quantidade necessária de água e aditivo superplastificante para alcançar o espalhamento que garanta a autoadensabilidade do SCAA. As relações água/cimento, água/solo e água/(cimento+solo) interferem na reologia do material, na sua resistência mecânica, na capacidade de absorção de água, na retração e fissuração. E, por fim, o aditivo superplastificante garante estabilidade ao material no estado fresco e permite a redução do teor de água necessário para o SCAA alcançar consistência fluida.

Diante do exposto, fica nítido como a morfologia, a composição granulométrica e os limites de liquidez e plasticidade do solo, bem como os teores de água, cimento e aditivo superplastificante nas misturas de solo-cimento estão intimamente relacionados e influenciam no comportamento final do material, ressaltando a importância de um adequado estudo de dosagem.

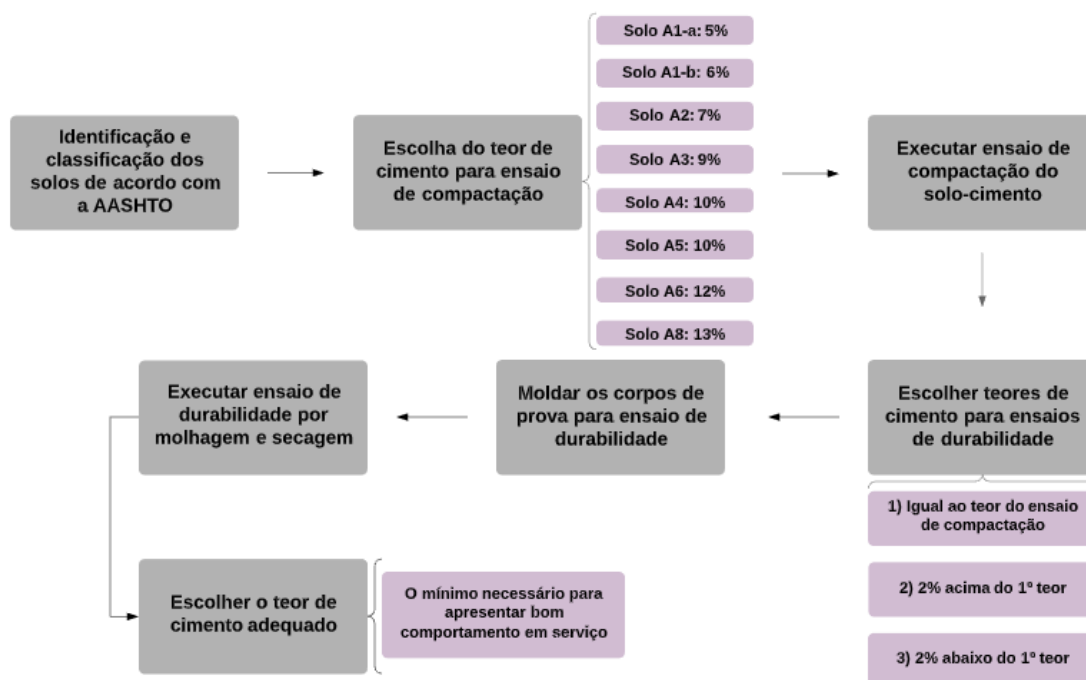
2.3 Métodos de dosagem de compósitos cimentícios

Solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional (ABCP, 1985). A metodologia de dosagem para o solo-cimento dependerá da sua classificação em relação a sua consistência: umidade ótima (SCC), plástica (SCP) ou fluida (SCAA).

A ABCP (1986) prescreveu um método de estudo de dosagem para o solo-cimento compactado (SCC) baseado nos métodos da Portland Cement Association, cujo objetivo é fixar um teor adequado de cimento para estabilização do solo, que será usado em camadas de pavimentação. A dosagem é feita de forma experimental, onde diferentes teores de cimento são empregados durante a aplicação de ensaios e a análise dos resultados indica o menor deles capaz de estabilizar quimicamente o solo sob a energia de compactação controlada, podendo ser resumida nas seguintes operações: identificar e classificar o solo (em conformidade com a AASHTO); escolher o teor de cimento para o ensaio de compactação (de acordo com a classificação do solo); executar o ensaio de compactação do

solo-cimento (onde se determinará a umidade ótima e a massa específica aparente máxima); escolher os teores de cimento para o ensaio de durabilidade (pode ser realizado com o mesmo teor de cimento para o ensaio de compactação e com teores 2 pontos percentuais acima e 2 pontos percentuais abaixo dele); moldar os corpos de prova para ensaio de durabilidade; executar o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; escolher o teor de cimento adequado (deve ser escolhido o mínimo teor que confira à mistura as características necessárias para um adequado comportamento em serviço). A Figura 1 apresenta o método de forma esquematizada:

Figura 1. Método de dosagem para SCC em conformidade com a ABCP (1986)



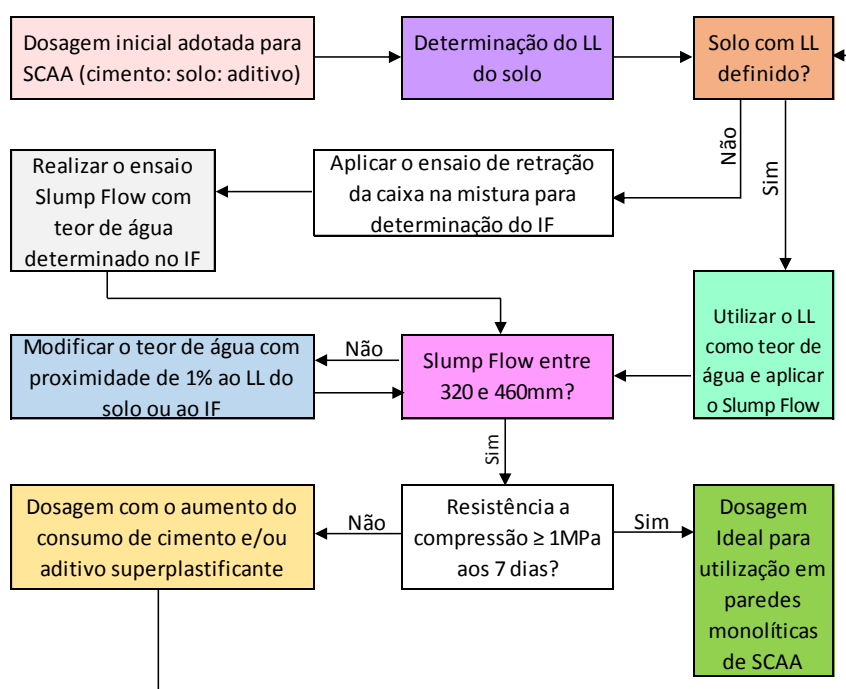
Fonte: adaptado de ABCP (1986)

Já quando é abordado o solo-cimento plástico (SCP), a consistência da mistura passa a ser um critério importante de dosagem. O abatimento de tronco de cone deve estar próximo a 10 cm no ensaio normatizado pela NBR 7223 (ABNT, 1992), pois de acordo com Segantini (1994), com esse abatimento observa-se um bom nível de homogeneidade da mistura para o SCP. Diante disso, o teor de água deve estar entre o limite de plasticidade e o limite de liquidez do solo (SEGANTINI, 1994).

Para a dosagem de solo-cimento autoadensável (SCAA), além de definir o teor de cimento, será necessário definir o teor de água e de aditivo superplastificante, pois esses dois componentes são responsáveis pela consistência fluida desejada para o SCAA.

Ferreira (2020) apresentou uma proposta metodológica para determinação da autoadensabilidade do SCAA. Nessa proposta, o ponto de partida é definir uma dosagem inicial de solo + cimento Portland + aditivo superplastificante. Depois será feita a determinação do limite de liquidez do solo, que será utilizado como teor de água para aplicação do Slump Flow. Se a mistura alcançar espalhamento entre 320 e 460 mm, considera o solo-cimento como autoadensável; se não, modifica-se o teor de água com proximidade de 1% ao limite de liquidez. Vale ressaltar que quando o solo não tem limite de liquidez definido, o teor de água adotado será definido pelo índice de fluidez, determinado por ensaio de retração na caixa. A Figura 2 contém um fluxograma esquemático que resume a proposta metodológica.

Figura 2. Fluxograma proposta metodológica de determinação da autoadensabilidade do SCAA



Fonte: Ferreira (2020)

Conforme observado, a proposta metodológica de Ferreira (2020) define como será feita a determinação do teor de água do SCAA para que alcance a autoadensabilidade, mas a

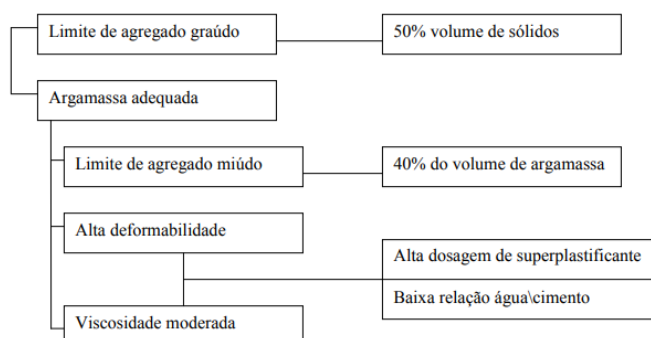
partir de teores pré-determinados de solo, cimento e aditivo. Contudo, não há ainda na literatura uma metodologia para dosagem dos teores de cimento e aditivo superplastificante na mistura.

Tratando-se ainda do SCAA no estado fresco, no momento da execução do sistema construtivo, a mistura de SCAA ao ser lançada nas fôrmas precisa de uma adequada mobilidade dos grãos, e estabilidade em relação à exsudação e a segregação, assim como o concreto autoadensável (CAA). Por isso faz-se necessário compreender as metodologias de dosagem do CAA.

Para o estudo de dosagem de concretos convencionais, a relação água/cimento é fixada primeiramente para atender a sua resistência, mas no concreto autoadensável, devido a sua alta sensibilidade, a relação água/aglomerante será decidida em função da trabalhabilidade do CAA (TOKUDOME, 2006).

Okamura e Ouchi (2003) propuseram as premissas para uma dosagem de concreto autoadensável fixando os seguintes parâmetros: consumo de agregado graúdo fixado em menor que 50% do volume do concreto; consumo de agregado miúdo fixado em menor que 40% do volume da argamassa; relação água/aglomerante em volume entre 0,9 e 1,0, dependendo das propriedades do tipo de fino; dosagem do superplastificante determinada para garantir alta deformabilidade; e relação água/aglomerante final determinada para assegurar viscosidade moderada. Os critérios “alta deformabilidade” e “viscosidade moderada” são necessários para inibir a segregação entre o agregado graúdo e a argamassa do concreto. O esquema de dosagem proposto pelos autores está expresso na Figura 3.

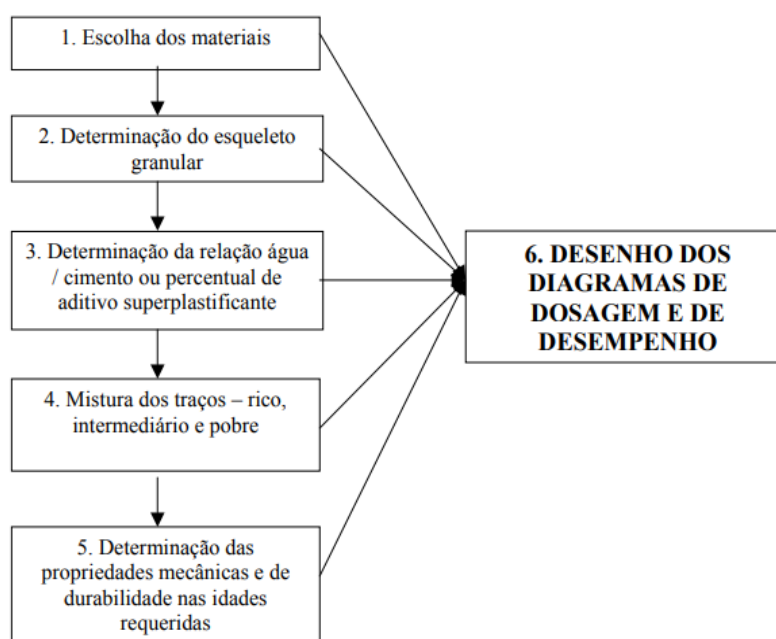
Figura 3. Esquema de dosagem de CAA proposto por Okamura e Ouchi (2003)



Fonte: Tokudome (2006)

Tutikian (2007) propõe um método de dosagem do CAA composto por seis etapas, a saber: escolha dos materiais (cimento, agregado graúdo e miúdo e água, além de um material fino com granulometria inferior ao do agregado miúdo e aditivo superplastificante); determinação do esqueleto granular – cujo objetivo é determinar a proporção entre dois materiais que possua a menor quantidade de vazios, usando o método do empacotamento; determinação – em função da escolha do traço intermediário - da relação água/cimento (com base nas tabelas da NBR 6118/03) ou do percentual de aditivo superplastificante (com base no histórico de outros concretos similares); mistura dos traços (rico, intermediário e pobre) – nesta etapa, a água deverá ser dosada de modo que torne a mistura fluida e devem-se realizar ensaios especiais para medir a trabalhabilidade dos concretos e verificar as suas propriedades de autoadensabilidade; determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas; e por fim, desenhar os diagramas de dosagem e desempenho. O fluxograma da Figura 4 resume a metodologia exposta.

Figura 4. Fluxograma método de dosagem de CAA proposto por Tutikian

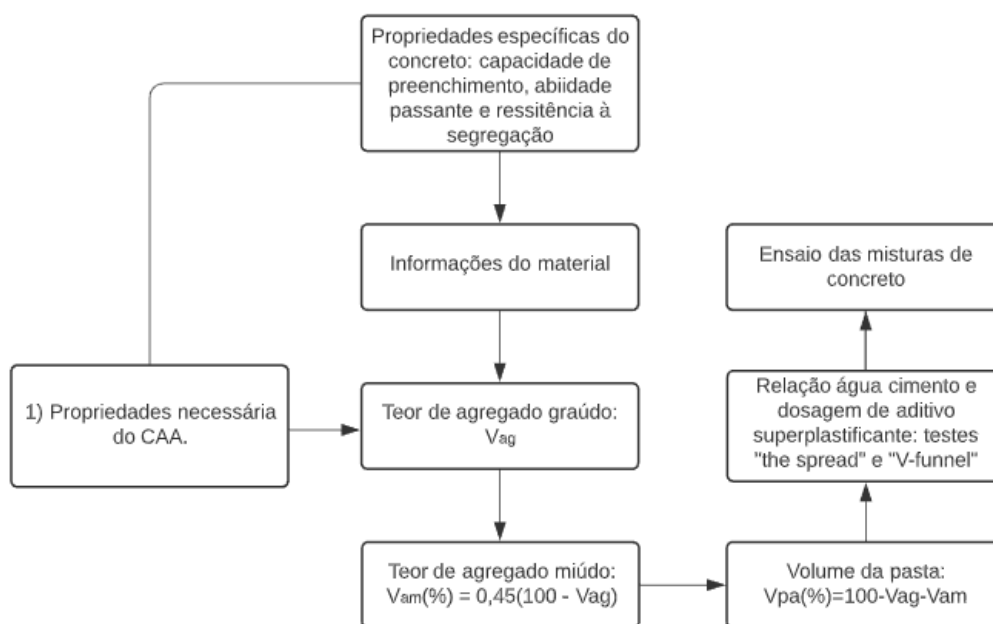


Fonte: Tutikian (2007)

Domone (2009) propôs um método baseado na experiência e compreensão do comportamento do CAA denominado método UCL. O método estimou as proporções da mistura para um determinado conjunto de características necessárias e, em seguida, ajustou-as por meio de misturas de teste. A fração de argamassa do concreto foi testada por

meio de testes de espalhamento e funil em V para determinar a proporção água / aglomerante e a dosagem de superplastificante. A Figura 5 mostra o procedimento deste método.

Figura 5. Fluxograma método de dosagem de CAA proposto por Domone (2009)



Fonte: adaptado de Domone (2009)

Nota-se que nas metodologias do CAA apresentadas, fixa-se os agregados, depois determina-se o teor de aglomerante e superplastificante e por último o teor de água. Esta, por sua vez, é acrescentada à mistura até que o concreto alcance propriedades autoadensáveis, que são: a fluidez, a coesão e a resistência à segregação (Tutikian, 2007).

Este viés metodológico foi realizado por Berté e Alcântara (2013) em seu estudo de dosagem de SCAA. Eles fixaram a quantidade de solo e combinaram três teores de cimento, três teores de água e três teores de aditivo, resultando em 27 misturas diferentes. Destas, uma foi considerada otimizada por ter as melhores características físico-mecânicas e de durabilidade.

Milani e Barboza (2016) também seguiram essa mesma proposta de dosagem de SCAA, fixando a quantidade de solo e o índice de consistência próximo a 200 mm, obtido através da adaptação do ensaio de determinação do índice de consistência de argamassas prescrito na NBR 13276 (ABNT, 2016b). Os autores usaram dois teores de cimento, variaram

a quantidade de aditivo de 0,4 a 1,6% em relação à massa de cimento; e adicionaram quantidade de água até alcançar a consistência adotada. Porém, os referidos autores aplicaram como critério de traço otimizado o atendimento aos requisitos mínimos para aplicação em paredes monolíticas (resistência a compressão aos 7 dias maior que 1,0 MPa e absorção de água menor que 20%).

Apesar de não haver diretrizes ou um método específico para a dosagem do SCAA, a revisão de literatura foi capaz de mostrar caminhos de como proceder com o estudo de dosagem desse material, podendo realizar adaptações de métodos como o da ABCP (1986) para solo-cimento compactado, os de Tutikian (2007) e Domone (2009) para concreto autoadensável, e complementá-los com a experiência de Berté e Alcântara (2013), Milani e Barboza (2016) e Ferreira (2020) que trataram especificamente de estudos experimentais do solo-cimento autoadensável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Foram empregados dois tipos de solos: um solo arenoso e um solo argiloso, ambos extraídos da cidade de Campo Grande/MS, com o intuito de analisar a influência das características de cada tipo de solo no estudo de dosagem.

Os solos foram caracterizados de acordo com os seguintes ensaios: Análise de granulometria conjunta (ABNT NBR 7181/2018); Massa específica dos sólidos (ABNT NM 6458/2017a); Limite de Liquidez (ABNT NBR 6459/2017b) e Limite de Plasticidade (ABNT NBR 7180/2016a). A partir dos resultados desses ensaios de caracterização, foi determinada a classificação dos solos de acordo com a AASHTO. A Figura 6 contém fotos dos solos em estado natural.

Figura 6. Solos em estado natural



a) Solo arenoso



b) Solo argiloso

Fonte: Autora (2023)

3.1.2 Cimento

Foi utilizado apenas um tipo de cimento para manter um mesmo padrão de comparação para todos os traços estudados. O cimento escolhido foi o CP V ARI – Alta Resistência Inicial – da marca Cauê, que é um considerado um cimento de uso estrutural e apresenta resistência inicial acima de 21 MPa com 24 horas. A escolha foi feita para garantir que quando o SCAA for usado em paredes monolíticas, alcance resistência adequada aos 2

dias para a desforma. Além disso, o cimento CP V ARI não contém adições (pode conter no máximo 5% de material carbonático), isso inibe a ocorrência de interferências no desempenho do material SCAA, o que poderia acontecer com outros tipos de cimento devido a suas adições.

3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado foi o MasterGlenium ACE 400 do fabricante BASF S.A, cuja composição química é a base de policarboxilato. Foi adotado por atuar como dispersante do material aglomerante, possibilitando a redução da água incorporada; além de estar disponível no mercado local. Os dados técnicos do referido aditivo estão expressos na tabela 1.

Tabela 1. Dados técnicos do aditivo

Aditivo MasterGlenium ACE 409	
Característica	Valor
pH	5,95
Densidade (g/cm ³)	1,068
Teor de sólidos (%)	31,56
Dosagem (%)	0,2 a 1,2% em relação a massa de cimento

Fonte: Certificado de análise BASF S.A

3.1.4 Água

Foi utilizada água de abastecimento urbano da cidade de Campo Grande/MS fornecida pela concessionária Águas Guariroba. Os dados técnicos da água de abastecimento urbano estão expressos na tabela 2.

Tabela 2. Dados técnicos da água de abastecimento urbano

Água de abastecimento urbano	
Característica	Valor (mínimo/médio/máximo)
Turbidez (uT)	<1 / <1 / <2,4
Cloro residual livre	<0,2 / 0,7 / 2,0
Cor aparente	<10 / <10 / <10
Ph	4,5 / 6,9 / 8,2
Coliformes	Ausente / Ausente / Ausente

Fonte: Relatório geral da qualidade da água (2021)

3.2 Etapas da proposta de metodologia do estudo de dosagem

Diante da apresentação dos métodos existentes sobre dosagem de misturas de compósitos cimentícios, foi formulada a proposta de estudo de dosagem do SCAA através da junção e adaptação dos métodos mencionados no referencial teórico. Assim, a proposta de metodologia de estudo de dosagem do SCAA (Figura 7) seguiu as seguintes etapas:

A) determinação do conjunto de características necessárias do SCAA: corresponde à aplicação do SCAA em paredes monolíticas, a qual a partida será resistência mínima à compressão simples de 1,0 MPa; e fluidez a partir do alcance de abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm no ensaio de Slump Flow;

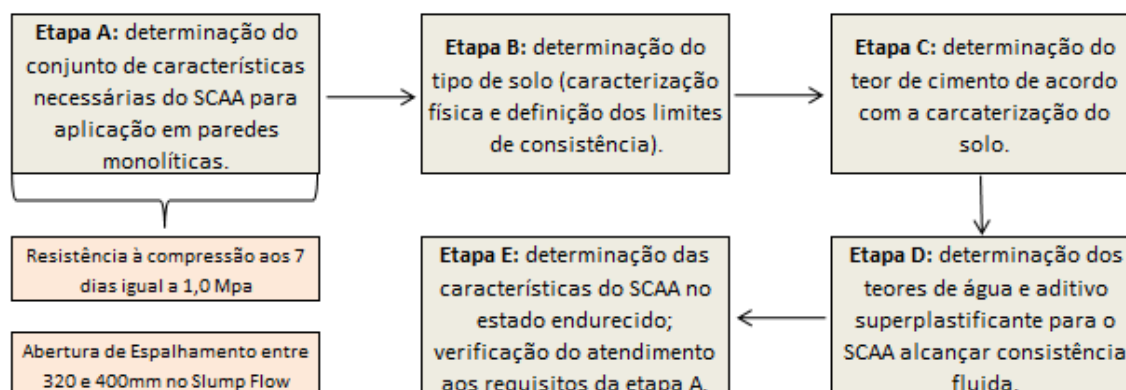
B) caracterização do tipo de solo: corresponde a caracterização física do solo e o entendimento do seu comportamento reológico diante dos seus limites de consistência;

C) determinação do teor de cimento: corresponde ao entendimento do comportamento do solo diante da estabilização físico-química e mecânica com cimento;

D) determinação do aditivo superplastificante e da água: corresponde as quantidades de aditivo e água para que a mistura de solo-cimento alcance a consistência fluida;

E) determinação das características do SCAA: corresponde a caracterização físico-mecânica no estado endurecido, e da fluidez no estado fresco; e a verificação ao atendimento do conjunto de características necessárias do SCAA, elencados na etapa A.

Figura 7. Fluxograma proposta metodológica do estudo de dosagem de SCAA



Fonte: Autora (2023)

Diante destas etapas necessárias para o fluxo do processo do estudo de dosagem do SCAA, verificou-se a necessidade do entendimento do comportamento da mistura de solo+cimento+aditivo+água nos estados fresco e endurecido para a formulação de diagramas de dosagem que indiquem as relações água:cimento, água:solo e água:(cimento+solo), resistência mecânica e capacidade de absorção de água. Desta forma, com esta compreensão do desempenho do SCAA, foi possível estabelecer critérios e/ou limites dentro de um método de dosagem para que o mesmo otimize o estudo experimental do SCAA.

Para tal, foi desenvolvida uma carta de traços de SCAA através da variação do tipo de solo, teor de cimento, teor de aditivo químico e quantidade de água. Estas misturas de SCAA foram avaliadas nos estados fresco e endurecido para análise da influência de cada variável na dosagem do SCAA. Posteriormente, foi aplicada a análise estatística para a determinação das relações existentes entre as variáveis da dosagem e as características físico-mecânicas, possibilitando a execução dos diagramas de dosagem do material SCAA e a definição dos seus limites de aplicação.

3.3 Definição dos traços das misturas de SCAA

Foram utilizados dois tipos de solos - um argiloso e um arenoso, cuja granulometria tem 100% das partículas menores que 4,8mm, pois de acordo com Ferreira (2020), os solos com essas características são adequados para a mistura com água, cimento Portland e

aditivo superplastificante para obtenção do material SCAA para aplicação em paredes monolíticas de edificações. Não foi utilizado solo do tipo siltoso, pois ainda de acordo com Ferreira (2020), o solo com essas características é instável e com dificuldades para estabilização químico-mecânica na presença de água+cimento+aditivo superplastificante em teores que garantem a autoadensabilidade da mistura SCAA.

Para a composição da carta de traços de SCAA a quantidade de solo foi fixada em todas as dosagens. Foram utilizados quatro teores de cimento para cada tipo de solo. A dosagem de cimento para ambos os solos teve como ponto de partida a relação cimento:solo, em massa, igual a 1:8 (12,5%); pois de acordo com os resultados de Milani e Barboza (2016) e Ferreira (2020) com essa proporção foi alcançada a resistência mínima de 1,0 MPa aos 7 dias exigida para paredes monolíticas; os traços intermediários foram 1:6 (16,67%) e 1:5 (20%), finalizando com relação cimento:solo igual a 1:4 (25%) - veja na Tabela 3.

Tabela 3. Teor de cimento em relação à massa de solo

	Traço 1:8	Traço 1:6	Traço 1:5	Traço 1:4
Teor de cimento (%)	12,50	16,67	20,00	25,00

Fonte : Autora (2023)

Apesar de o SCAA necessitar de teores de cimento mais elevados que o solo-cimento compactado, teores acima de 30% adicionado ao solo passam a comprometer a sustentabilidade ambiental e econômica do produto final. Martins et al. (2018) em sua avaliação do desempenho ambiental de compósitos solo – cimento – fibras de sisal autoadensáveis, através de análise de ciclo de vida, constatou que para a maioria das categorias de impacto ambiental estudadas, o cimento foi o material que apresentou a maior contribuição. Logo, teores de cimento demasiadamente elevados aumentarão o custo e o impacto ambiental do produto SCAA, o que vai contra os preceitos da sustentabilidade. Por isso, foi estabelecido o limite de 25%.

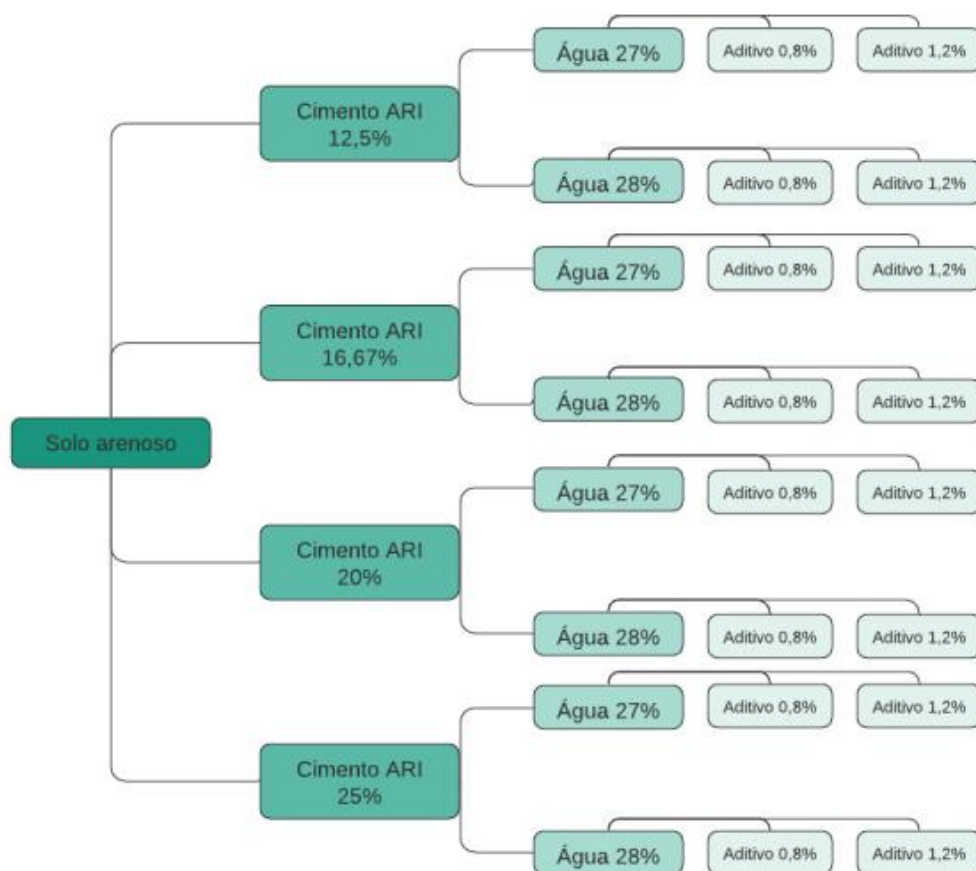
Para avaliar a influência do teor de água incorporado às misturas, foram utilizados dois teores de água. Eles foram definidos de acordo com o método para determinação da autoadensabilidade do SCAA proposto por Ferreira (2020), de modo que o valor de abertura

de espalhamento das misturas no ensaio de Slump Flow estivesse compreendido entre 320 e 460 mm. Dessa forma, para misturas de SCAA com solo arenoso, as porcentagens de água utilizadas foram 27% e 28% e para o solo argiloso 47% e 48%. Para não haver interferência da umidade do solo nos resultados referentes à quantidade de água nas misturas, o solo foi seco em estufa.

Para analisar a influência do aditivo superplastificante nas misturas de SCAA, foram usadas duas dosagens: 0,8% e 1,2% em relação à massa de cimento, assim como no estudo de Ferreira (2020). De acordo com Milani e Barboza (2016), essas dosagens estão dentro dos teores limites de aditivo para que ocorram ganhos significativos na consistência fluida de SCAA.

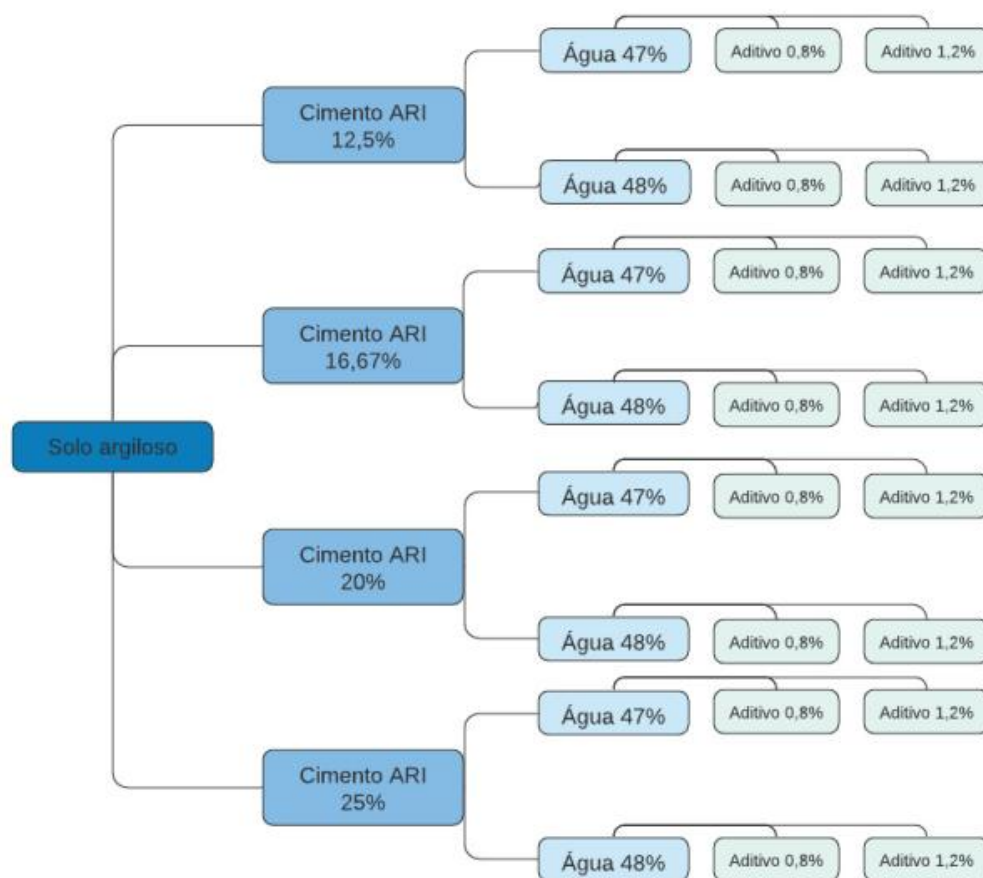
Os fluxogramas que determinam a carta de traços para o solo arenoso e para o solo argiloso estão expressos nas Figuras 8 e 9.

Figura 8. Carta de traços para o solo arenoso



Fonte: Autora (2023)

Figura 9. Carta de traços para o solo argiloso



Fonte: Autora (2023)

Para cada traço foi atribuído uma denominação para facilitar a identificação das amostras e a apresentação dos resultados (Tabela 4).

Tabela 4. Identificação dos traços

	Are 1	Are 2	Are 3	Are 4	Are 5	Are 6	Are 7	Are 8	Are 9	Are 10	Are 11	Are 12	Are 13	Are 14	Are 15	Are 16
Teor de cimento (%)	12,50	12,50	12,50	12,50	16,67	16,67	16,67	16,67	20,00	20,00	20,00	20,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Teor de água (%)	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00	27,00	28,00
Teor de aditivo (%)	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20
	Arg 1	Arg 2	Arg 3	Arg 4	Arg 5	Arg 6	Arg 7	Arg 8	Arg 9	Arg 10	Arg 11	Arg 12	Arg 13	Arg 14	Arg 15	Arg 16
Teor de cimento (%)	12,50	12,50	12,50	12,50	16,67	16,67	16,67	16,67	20,00	20,00	20,00	20,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Teor de água (%)	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00	47,00	48,00
Teor de aditivo (%)	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	1,20

3.4 Caracterização do SCAA

Após a definição da carta dos traços, foi feita a caracterização das misturas de SCAA nos estados fresco e endurecido, sendo aplicados em cada mistura os ensaios elencados nas seções 3.4.1 e 3.4.2. Como a especificação técnica para o SCAA é escassa, alguns ensaios foram adaptados das normas técnicas de concreto e argamassa - já que, de acordo com Berté e Alcantara (2013), o SCAA busca relações próximas a desses materiais.

3.4.1 Caracterização física

Antes de dar início à caracterização do SCAA foi necessário estabelecer um processo adequado de mistura dos seus componentes, a fim de garantir uma boa homogeneização do material, evitando, assim, a formação de “torrões” que poderiam afetar o seu desempenho.

O processo que garantiu a melhor homogeneização das misturas de SCAA consistiu em misturar – em misturador mecânico - primeiro os materiais secos (solo e cimento) por 30 segundos. Em seguida adicionar aos poucos, porém ininterruptamente, cerca de 80% da água total estabelecida para o traço. Assim, a mistura seca passará rapidamente para a fase plástica, evitando a formação de torrões e o travamento do misturador. Feito isso, acrescentar o aditivo e o restante da água e misturar por mais 30 segundos.

A Figura 10 mostra um traço de solo-cimento sem uma boa homogeneização e um traço com boa homogeneização, feito de acordo o processo de mistura descrito.

Figura 10. Diferença na homogeneização devido ao processo de mistura



a) Mistura mal homogeneizada



b) Mistura bem homogeneizada

Fonte: Autora (2021)

Com o processo de mistura estabelecido, deu-se início à caracterização do SCAA no estado fresco, através da adaptação do ensaio Slump Flow aplicado no CAA (regido pela ABNT NBR 15823-2/2017c), que consistiu em colocar a placa-base (dimensões 500mm x 500mm) em superfície plana, acima dela posicionar o cone de Abrams adaptado para as dimensões de $\phi_{\text{menor}}=50\text{mm}$, $\phi_{\text{maior}}=100\text{mm}$ e altura=150mm e preenchê-lo com o SCAA de forma contínua e uniforme, sem adensamento. Depois, levantar cuidadosamente o molde e realizar duas medidas perpendiculares entre si do diâmetro de espalhamento. A média dessas duas medidas é a abertura de espalhamento.

Este ensaio foi realizado sempre que finalizado o processo de mistura de um traço de SCAA para verificar a fluidez do material e se este parâmetro se encontrava dentro do limite de consistência estabelecido por Ferreira (2020). A Figura 11 ilustra a execução desse ensaio.

Figura 11. Execução do ensaio de Slump Flow



Fonte: Ferreira (2020)

Após o processo de mistura e verificação da fluidez do material, foram imediatamente moldados os corpos de prova cilíndricos (CPs) necessários para esse estudo. A moldagem dos CPs consistiu em verter o material do misturador para a forma até que ela fosse totalmente preenchida e sem aplicar nenhuma forma de adensamento.

No estado endurecido, a caracterização física foi feita através do ensaio de absorção de água – de acordo com a NBR 13555 (ABNT, 2012), além do ensaio de retração linear, de acordo com as descrições de Wongtanakitcharoen e Naaman (2007).

Para a determinação da capacidade de absorção de água, foram moldados dois corpos de prova cilíndricos (CPs), que é o mínimo prescrito pela norma vigente, com dimensões iguais a 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Os CPs foram desmoldados com 24h, submetidos à cura em câmara úmida e o prosseguimento do ensaio foi feito em conformidade com a NBR 13555 (ABNT, 2012).

Como critério, a absorção de água média não pode ultrapassar 20% e a individual não deve ser maior que 22%. Este ensaio foi realizado nas idades de 7 e 28 dias. A Figura 12 mostra algumas etapas do ensaio de absorção.

Figura 12. Ensaio de absorção de água



a) CPs secos em estufa



b) CPs submersos em tanque



c) Pesagem dos CPs

Fonte: Autora (2021)

A retração linear livre por secagem natural foi avaliada nas idades de 24h e 7 dias, pois de acordo com o estudo de Milani e Barboza (2016) as variações dimensionais mais significativas ocorrem nesse período.

Para tanto, foram moldados dois CPs (com dimensões iguais a 10cm de diâmetro e 20cm de altura) para cada mistura estudada. A desmoldagem também foi feita com 24h, mas nesse ensaio não houve cura em câmara úmida.

Devido à consistência fluida das misturas de SCAA nas primeiras horas após a moldagem dos CPs, a primeira medição da retração linear foi feita logo após a desmoldagem, com uso de paquímetro - subtraindo a medida da altura do CP da medida da altura da forma, conforme a Figura 13.

Figura 13. Medição das alturas dos CP



a) Medida do CP



b) Medida da forma

Fonte: Autora (2021)

Para medir a retração das primeiras 24h após a moldagem até os 7 dias de idade, foram acoplados extensômetros (Figura 14) nos corpos de prova, seguindo as recomendações de Wongtanakitcharoen e Naaman (2007).

Figura 14. Ensaio de avaliação da retração livre de 24h até 7 dias de idade



Fonte: Autora (2021)

3.4.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica foi feita através do ensaio de resistência à compressão simples, regido pela NBR 12025 (ABNT, 2012b).

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 7 e 28 dias para analisar o ganho de resistência ao longo do tempo. Para cada traço e para cada idade foram moldados 3 CPs com dimensões iguais a 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os CP foram desmoldados com 24h, capeados e curados em câmara úmida até a idade de rompimento. A resistência mínima a ser alcançada aos 7 dias deve ser de 1,0 MPa, pois esse é o valor recomendado para paredes monolíticas de solo-cimento pela NBR 13553 (ABNT, 2012c). A Figura 15 mostra os procedimentos do ensaio de resistência à compressão.

Figura 15. Execução do ensaio de resistência à compressão



a) CPs capeados e medidos



b) Aplicação de carga no CP

Fonte: Autora (2021)

3.5 Análise estatística

Os resultados da caracterização físico-mecânica obtidos nos ensaios laboratoriais foram submetidos a análises descritivas: calculou-se a média, o desvio-padrão e coeficiente de variação.

Para comparar os resultados dos ensaios de espalhamento, absorção, retração e compressão entre os diferentes traços e diferentes idades, foi utilizado teste ANOVA de três vias. O teste ANOVA foi construído com as variáveis independentes cimento, água e aditivo e incluíram apenas os efeitos isolados dessas variáveis. A ANOVA permite verificar se as médias dos tratamentos são estatisticamente iguais, através da observação do valor F, que

quanto mais distante estiver de 1,0 significa que o que está sendo comparado é diferente e, quanto mais próximo estiver de 1,0, indica que as médias podem ser iguais.

Testes ANOVA estatisticamente significativos foram seguidos pelo teste post-hoc de Tukey para investigar quais grupos apresentavam médias que diferiam estatisticamente entre si, verificando o valor p – se for maior que 0,05 significa que as médias deste tratamento podem ser iguais; e quanto menor o valor p , mais confiável que as médias que estão sendo comparadas é diferente.

Dado o impacto do tamanho da amostra no valor de p (SULLIVAN; FEINN, 2012), foram calculadas medidas de tamanho de efeito. Para o teste ANOVA, foi calculado o tamanho de efeito ômega-quadrado (ω^2), sugerido como um tamanho de efeito menos enviesado que o eta-quadrado (η^2) (YIGIT; MENDES, 2018). O tamanho de efeito ômega-quadrado pode ser classificado como: pequeno ($\omega^2 \geq 0,01$), médio ($\omega^2 \geq 0,06$) ou grande ($\omega^2 > 0,14$) (FIELD, 2013). Todas as análises foram conduzidas no software R versão 4.1.0 e consideraram um nível de significância (α) de 5%.

Com a carta de traços de SCAA caracterizada e definidas as variáveis de dosagem que mais influenciam estatisticamente em cada ensaio, foram determinadas as equações das linhas de tendência (junto com o coeficiente de determinação R^2) usando recursos computacionais, que correlacionaram as propriedades das misturas no estado fresco e no estado endurecido (abertura de espalhamento, resistência à compressão, capacidade de absorção de água e retração) com suas variáveis de dosagens (cimento e água – que foram as que apresentaram maior influência sobre o SCAA). Entre as possíveis linhas de tendência (linear, logarítmica, polinomial, exponencial ou de potência) foi escolhida a que apresentou melhor confiabilidade, isto é, R^2 o mais o próximo possível de 1,0.

As correlações foram determinadas separadamente para as misturas com cada tipo de solo utilizado, já que a sua composição granulométrica e mineralógica faz com que as características das misturas de forma geral mantenham semelhante comportamento físico-mecânico, porém com alcance de desempenho físico-mecânico diferente. Isso identifica a importância do agrupamento dos solos por tipo de classificação granular e índices físicos.

Com essas correlações definidas, foi traçado o diagrama de dosagem para as misturas de SCAA com solo arenoso e com solo argiloso, sendo analisada a confiabilidade de equações de previsibilidade do desempenho físico-mecânico do SCAA conforme as modificações das variáveis cimento, água e aditivo.

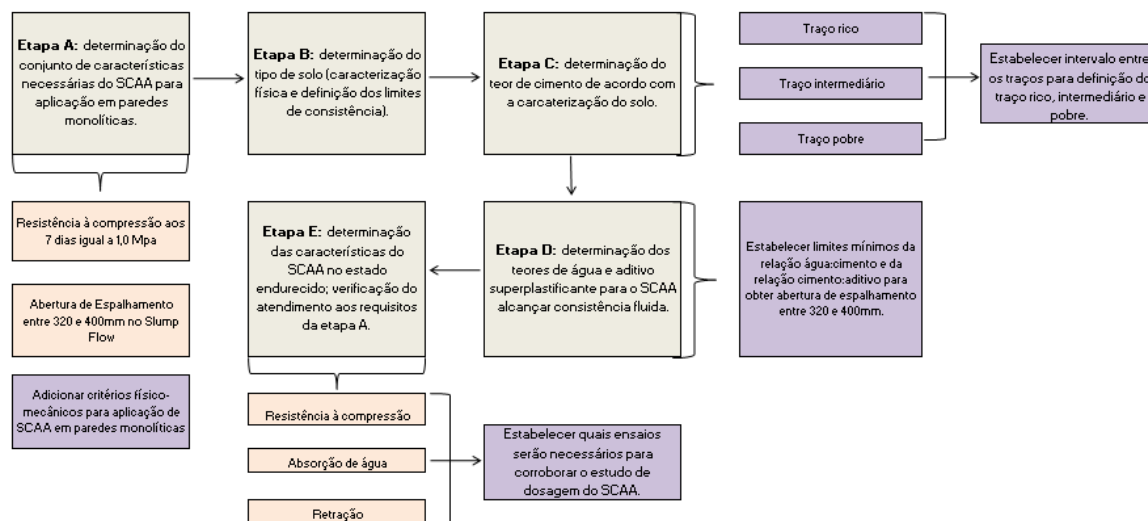
3.6 Retroalimentação da proposta de metodologia do estudo de dosagem

O conhecimento adquirido sobre o comportamento do SCAA e a inferência estatística das variáveis solo, cimento, água e aditivo nas características físico-mecânicas do SCAA, foram utilizados para retroalimentar o fluxograma da proposta de metodologia de dosagem do SCAA, de forma a estabelecer limites e critérios do material SCAA para direcionar as etapas da proposta metodológica de dosagem na otimização da composição da mistura. Dessa forma, foram retroalimentadas as etapas na Figura 16 de modo que:

- Etapa B, com a caracterização do solo escolhido e a definição dos seus limites de consistência, foi possível definir o intervalo adequado de variação do teor de cimento entre traços rico, intermediário ou pobre para o estudo de dosagem;
- Etapa D, foi possível determinar o limite mínimo de aditivo superplastificante e água em função do tipo de solo e do teor de cimento para alcançar o intervalo adequado de abertura de espalhamento;
- Etapa E, com a inferência estatística das relações cimento:solo, água:solo e aditivo:solo no desempenho físico-mecânico do SCAA foi possível saber quais são os ensaios com significativa influência das relações e, por consequência, relevantes para a caracterização do SCAA e definição de seus respectivos parâmetros a serem atingidos.

Os dados que foram retroalimentados estão na cor roxa na Figura 16, que mostra como ficará o fluxograma retroalimentado da proposta metodológica do estudo de dosagem do SCAA.

Figura 16. Fluxograma retroalimentado da proposta de metodologia do estudo de dosagem do SCAA.



Fonte: Autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise e caracterização dos solos

A Tabela 5 contém o resultado da caracterização dos solos utilizados nesse trabalho.

Tabela 5. Caracterização dos solos

Característica dos solos		Solo arenoso	Solo argiloso
Distribuição granulométrica	Areia grossa (0,60 - 2,00 mm) (%)	1,24	1,51
	Areia média (0,20 - 0,60 mm) (%)	69,7	6,36
	Areia fina (0,06 – 0,20 mm) (%)	11,81	5,82
	Silte (0,02 – 0,06 mm) (%)	7,16	41,6
	Argila (< 0,002 mm) (%)	10,09	44,71
	Material que passa na peneira 4,8 mm (%)	100	100
	Material que passa na peneira 0,075 mm (%)	19,18	87,73
Índices físicos	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,57	3,08
	Limite de liquidez (%)	NL	45,54
	Limite de plasticidade (%)	NP	30,73
	Índice de plasticidade (%)	NP	14,81
Classificação	Classificação AASHTO	A-2-4	A-7-5

Fonte: Autora (2021)

O solo arenoso apresentou massa específica dos sólidos de 2,57 g/cm³. De acordo com Hao et al. (2008) a massa específica das partículas que compõem o solo é função de sua mineralogia e composição. Nos solos minerais predominam a presença de quartzo, feldspatos e silicatos coloidais, cujas massas específicas variam de 2,60 a 2,75 g/cm³. Isso indica que o solo arenoso dessa pesquisa apresenta esses materiais em sua mineralogia e composição, já que sua massa específica se encontra dentro desse intervalo. Já o solo argiloso apresentou massa específica de 3,08 g/cm³, o que indica que em sua mineralogia e composição deve haver maior quantidade de minerais de alta densidade como magnetita, zircão, turmalina e hornblenda.

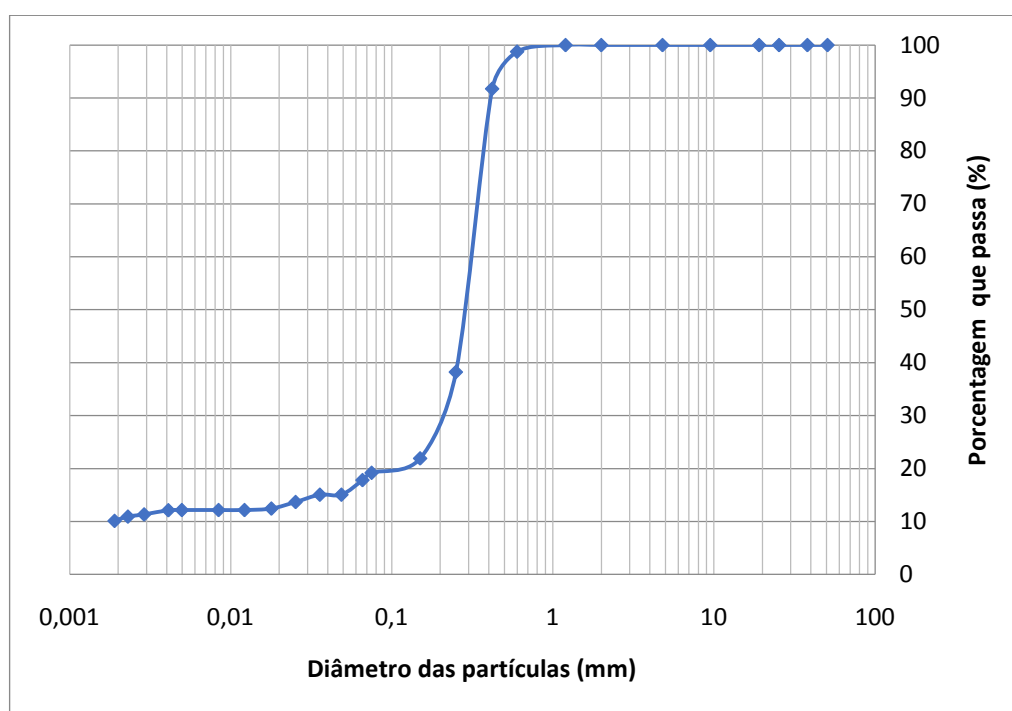
No que diz respeito aos índices físicos, para o solo arenoso não foi possível fechar a ranhura com mais de 25 golpes no ensaio de Limite de Liquidez e nem foi possível obter um cilindro com 3 mm de diâmetro no ensaio de Limite de Plasticidade, o que indica que o solo não apresenta limite de liquidez (NP), nem limite de plasticidade (NP). Isso se deve à baixa

coesão dos solos com grandes quantidades de areia, o que impossibilita a obtenção de resultados numéricos nos referidos ensaios.

O solo argiloso, por sua vez, apresentou LL de 45,54%; LP de 30,73% e IP de 14,81%, reafirmando que solos com maior quantidade de argilominerais apresentam maior limite de liquidez. Isso aponta para uma maior necessidade de água para alcance da autoadensabilidade nas misturas de solo-cimento com esse tipo de solo.

A curva granulométrica do solo arenoso está exposta na Figura 17 e mostra composição majoritária de areia média 69,7%, seguido da areia fina 11,81%, pelas séries de peneiras do sistema ABNT. Os dados da sua composição granulométrica aliados aos índices físicos levam à classificação A-2-4 da AASHTO, que significa predominância de areia siltosa ou argilosa.

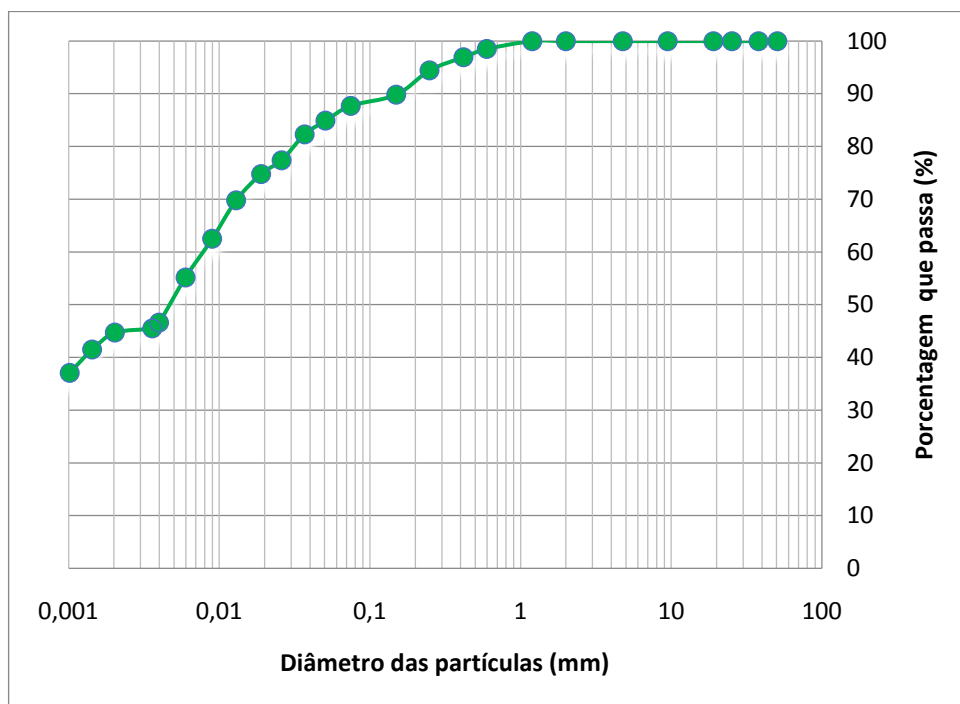
Figura 17. curva granulométrica do solo arenoso



Fonte: autora (2021)

A Figura 18 apresenta a curva granulométrica do solo argiloso, que é composto principalmente de argila – 44,71% e silte – 41,60% pelas séries de peneira do sistema ABNT. Sua granulometria e seus índices físicos apontam para a classificação A-7-5 da AASHTO, que significa predominância de solo argiloso.

Figura 18. curva granulométrica do solo argiloso



Fonte: Autora (2021)

4.2 Caracterização do SCAA

4.2.1 Slump Flow

Os resultados referentes à abertura de espalhamento no ensaio de Slump Flow modificado para os solos arenoso e argiloso estão representados na Tabela 6. Em seguida, temos os resultados do Teste ANOVA e do Teste de Tukey para a comparação das médias de Slump Flow no SCAA com solo arenoso (Tabela 7) e solo argiloso (Tabela 8) de acordo com cimento, água e aditivo.

Tabela 6. Resultados do espalhamento no ensaio de Slump Flow

Amostra	Are 1	Are 2	Are 3	Are 4	Are 5	Are 6	Are 7	Are 8	Are 9	Are 10	Are 11	Are 12	Are 13	Are 14	Are 15	Are 16
Média (mm)	320	325	340	345	350	360	365	375	360	380	395	415	360	380	395	410
DPM	2,00	5,00	1,76	4,36	2,25	10	13,23	10,6	10,83	18,41	7,25	15,39	18,31	12,39	2,36	2,78
CV	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,02	0,04	0,05	0,03	0,01	0,01
Amostra	Arg 1	Arg 2	Arg 3	Arg 4	Arg 5	Arg 6	Arg 7	Arg 8	Arg 9	Arg 10	Arg 11	Arg 12	Arg 13	Arg 14	Arg 15	Arg 16
Média (mm)	350	360	375	390	370	375	380	400	360	365	375	385	340	360	390	405
DPM	20,00	10,02	22,91	5,53	11,77	3,4	13,43	4,48	6,05	15,91	4,75	7,09	7,26	4,54	6,53	4,36
CV	0,06	0,03	0,06	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01

Fonte: Autora (2023)

Tabela 7. ANOVA e Tukey para Slump Flow do Solo Arenoso

Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	332,46	11,16	0,03	F(3,42) = 73,201; p < 0,001; $\omega^2 = 0,819$	a
16,70%	359,88	13,87	0,04		b
20%	387,21	24,21	0,06		c
25%	386,08	21,3	0,06		c
Água				F(1,42) = 15,207; p < 0,001; $\omega^2 = 0,228$	
27%	360,5	25,57	0,07		a
28%	372,31	31,2	0,08		b
Aditivo				F(1,42) = 78,349; p < 0,001; $\omega^2 = 0,617$	
0,80%	353	23,21	0,07		a
1,20%	379,81	28,05	0,07		b

Fonte: Autora (2023)

Tabela 8. ANOVA e Tukey para Slump Flow do Solo Argiloso

Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	368,92	21,09	0,06	F(3,42) = 2,413; p = 0,080; $\omega^2 = 0,081$	a
16,70%	381,29	14,4	0,04		a
20%	371,12	12,76	0,03		a
25%	373,75	26,98	0,07		a
Água				F(1,42) = 13,070; p < 0,001; $\omega^2 = 0,201$	
47%	367,5	19,18	0,05		a
48%	380,04	18,26	0,05		b
Aditivo				F(1,42) = 62,460; p < 0,001; $\omega^2 = 0,561$	
0,80%	360,06	14,13	0,04		a
1,20%	387,48	13,84	0,04		b

Fonte: Autora (2023)

Dos resultados expressos nas Tabelas 7 e 8, nota-se que tanto para as amostras com solo arenoso, quanto para as amostras com solo argiloso, o teor de água e o teor de aditivo influenciam na abertura de espalhamento do SCAA. Isto é, amostras com teores maiores de água e de aditivo apresentam médias estatisticamente superiores às amostras com teores menores de água e aditivo. Contudo, a ANOVA mostra - através do valor ω^2 - que o aditivo exerce maior influência no espalhamento do que a água. Isto ocorre porque a incorporação de aditivo em teores diferentes proporciona em diferentes graus a melhor dispersão do cimento, e o melhoramento da floculação e mobilidade da mistura, conforme observados em estudo de Berté (2013).

O aditivo superplastificante à base de policarboxilato atua nas partículas de cimento por mecanismos de repulsão eletrostática e também por repulsão estérica, onde as moléculas do superplastificante adsorvem nas superfícies das partículas de cimento, e devido às longas cadeias laterais das moléculas do policarboxilato, impedem a aproximação das suas partículas (PUERTAS et al., 2005; HARTMANN e HELENE, 2003). Assim, a ação do aditivo nas partículas de cimento é muito mais eficiente do que a ação da água, que apenas acarreta a dispersão eletrostática. Por isso, a quantidade de aditivo exerce maior influência na trabalhabilidade do SCAA do que a quantidade de água. Contudo, é importante ressaltar que há limites para os teores de água e aditivo, pois ambos em excesso podem acarretar em segregação final do material (ALCÂNTARA, 2004).

O resultado da ANOVA também mostra que as misturas de SCAA com solo arenoso e argiloso não tiveram o mesmo comportamento nos valores de espalhamento frente à influência do teor de cimento.

Para o solo arenoso, o cimento é o fator que mais influencia o Slump flow, isto é, a influência do teor de cimento supera a influência da água e do aditivo. A ANOVA mostra, ainda, que traços com maiores teores de cimento apresentam maior fluidez, e o Teste de Tukey aponta que os traços ricos (com 20% e 25% de cimento) são estatisticamente iguais.

Para o solo argiloso, não há efeito do cimento sobre o espalhamento – o valor ω^2 indica um efeito muito pequeno e o teste de Tukey confirma que as médias de espalhamento em relação ao cimento são estatisticamente iguais.

Silva (2016), em seu estudo sobre as interações físico-químicas dos componentes do SCAA com solo arenoso e argiloso concluiu que ambos os solos em suas respectivas misturas de SCAA não impedem as reações de hidratação do cimento nem a ação de dispersão do superplastificante. Portanto, apesar de ocorrerem as reações de hidratação do cimento em misturas de SCAA com solo argiloso, elas não são suficientes para influenciar no espalhamento do material.

Uma possível explicação para esse fenômeno é que solos argilosos requerem quantidades maiores de água do que solos arenosos para obter uma mesma consistência da mistura, assim como explicado por Helson et. al. (2017). Ou seja, o maior teor de água nas misturas de SCAA com solo argiloso devido à composição granulométrica e a mineralogia deste tipo de solo deixa em evidência a menor influência do cimento no estado fresco do SCAA.

Em relação ao desempenho do SCAA no estado fresco das misturas, observa-se que todos os traços de SCAA com solo arenoso e argiloso alcançaram abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm no ensaio de Slump Flow modificado, que é um dos requisitos mínimos necessário para aplicação em paredes monolíticas.

4.2.2 Absorção de água

Os resultados referentes à capacidade de absorção de água média do SCAA nas idades de 7 e 28 dias estão representados na tabela 9. Em seguida, temos os resultados do Teste ANOVA e do Teste de Tukey para a comparação das médias de capacidade de absorção de água aos 7 e aos 28 dias do solo arenoso (tabela 10) e do solo argiloso (tabela 11) de acordo com cimento, água e aditivo.

Tabela 9. Resultados de absorção de água

Amostra - Solo Arenoso		Are 1	Are 2	Are 3	Are 4	Are 5	Are 6	Are 7	Are 8	Are 9	Are 10	Are 11	Are 12	Are 13	Are 14	Are 15	Are 16
Absorção aos 7 dias (%)	Média (%)	23,37	21,09	21,01	20,99	22,82	22,60	22,71	22,62	22,24	20,67	20,63	19,98	20,54	20,11	20,51	20,46
	DPM	0,23	0,63	0	0,03	0,48	0,38	0,21	0,83	1,22	0,67	0,32	0,32	1	0,03	0,46	0,65
	CV	0,01	0,03	0	0	0,01	0,02	0,01	0,04	0,06	0,03	0,02	0,02	0,05	0	0,02	0,03
Absorção aos 28 dias (%)	Média (%)	21,92	19,7	20,92	20,74	20,63	19,92	20,42	19,91	19,72	19,67	19,79	19,21	20,44	19,7	19,62	19,4
	DPM	0,59	0,23	1,05	0,3	0,08	0,38	0,49	0,54	0,51	0,84	0,03	1	0,33	0,09	0,14	0,28
	CV	0,03	0,01	0,05	0,01	0	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0	0,05	0,02	0	0,69	0,01
Amostra - Solo Argiloso		Arg 1	Arg 2	Arg 3	Arg 4	Arg 5	Arg 6	Arg 7	Arg 8	Arg 9	Arg 10	Arg 11	Arg 12	Arg 13	Arg 14	Arg 15	Arg 16
Absorção aos 7 dias (%)	Média (%)	42,44	40,97	44,58	40,83	44,01	42,94	51,93	51,11	52,96	52,7	51,98	50,98	52,72	50,06	48,25	43,86
	DPM	0,11	0,4	0,95	0,13	0,01	1,74	0,48	0,01	0,19	0,16	0,88	0,16	0,25	0,08	0,46	0,39
	CV	0	0,01	0,02	0	0	0,04	0,01	0	0	0	0,02	0	0	0	0,01	0,01
Absorção aos 28 dias (%)	Média (%)	44,93	44,68	45,85	42,53	46,94	42,38	44,54	55,56	39,87	41,42	40,01	40,88	38,58	38,87	44,5	42,71
	DPM	0,98	1,21	0,78	1,11	0,16	0,52	0,07	0,46	0,24	0,28	0,28	0,15	0,04	0,07	0,64	0,39
	CV	0,02	0,03	0,02	0,03	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0,01	0,01

Fonte: Autora (2023)

Tabela 10. ANOVA e Tukey para absorção de SCAA com solo arenoso

Solo arenoso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	21,61	1,11	0,05	$F(3,26) = 15,480$;	b
16,70%	22,69	0,41	0,02	$p < 0,001$;	c
20%	20,88	1,05	0,05	$\omega^2 = 0,576$	ab
25%	20,4	0,52	0,03		a
Água				$F(1,26) = 6,896$;	
27%	21,73	1,23	0,06	$p = 0,014$;	b
28%	21,06	1,06	0,05	$\omega^2 = 0,156$	a
Aditivo				$F(1,26) = 4,982$;	
0,80%	21,68	1,28	0,06	$p = 0,034$;	b
1,20%	21,11	1,03	0,05	$\omega^2 = 0,111$	a
Solo arenoso - 28 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	20,82	0,97	0,05	$F(3,26) = 7,544$;	b
16,70%	20,22	0,46	0,02	$p < 0,001$;	ab
20%	19,6	0,58	0,03	$\omega^2 = 0,380$	a
25%	19,79	0,45	0,02		a
Água				$F(1,26) = 10,928$;	
27%	20,43	0,83	0,04	$p = 0,003$;	b
28%	19,78	0,59	0,03	$\omega^2 = 0,237$	a
Aditivo				$F(1,26) = 1,116$;	
0,80%	20,21	0,82	0,04	$p = 0,301$;	a
1,20%	20	0,75	0,04	$\omega^2 = 0,004$	a

Fonte: Autora (2023)

Tabela 11. ANOVA e Tukey para absorção de SCAA com solo argiloso

Solo argiloso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	42,21	1,66	0,04	F(3,26) = 16,824; p < 0,001; ω² = 0,597	a
16,70%	47,5	4,38	0,09		b
20%	52,15	0,89	0,02		c
25%	48,72	3,46	0,07		bc
Água					
27%	48,61	4,24	0,09	F(1,26) = 3,666; p = 0,067; ω² = 0,077	a
28%	46,68	4,85	0,1		a
Aditivo					
0,80%	47,35	5,08	0,11	F(1,26) = 0,344; p = 0,563; ω² = 0,000	a
1,20%	47,94	4,18	0,09		a
Solo argiloso - 28 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	44,49	1,52	0,03	F(3,26) = 9,219; p < 0,001; ω² = 0,435	ab
16,70%	47,35	5,36	0,11		b
20%	40,54	0,71	0,02		a
25%	41,17	2,71	0,07		a
Água					
27%	43,15	3,08	0,07	F(1,26) = 0,208; p = 0,652; ω² = 0,000	a
28%	43,63	4,95	0,11		a
Aditivo					
0,80%	42,21	3,01	0,07	F(1,26) = 5,153; p = 0,032; ω² = 0,115	a
1,20%	44,57	4,7	0,11		b

Fonte: Autora (2023)

Ao analisar os dados expressos na Tabela 9 tem-se a impressão de que os traços com solo arenoso e os traços com solo argiloso não apresentam variações significativas com o aumento dos teores de cimento, água e aditivo na capacidade de absorção de água média aos 7 dias.

Contudo, a ANOVA e o Teste de Tukey (Tabela 10) mostram que para o solo arenoso, os três componentes avaliados influenciam nos resultados de absorção aos 7 dias – sendo o cimento o que exerce maior influência, seguido da água e do aditivo. Tanto para amostras com concentrações maiores de cimento, quanto para amostras com maiores concentrações de água, as médias de absorção são estatisticamente inferiores às amostras

com concentrações menores. A mesma relação é observada para o aditivo, pois quanto maior a concentração de aditivo, menor a capacidade de absorção aos 7 dias.

Já para o solo argiloso, a ANOVA e o Teste de Tukey (Tabela 11) mostram que apenas o cimento exerce influência nos resultados de absorção aos 7 dias, sendo que amostras com concentrações maiores de cimento apresentam médias de absorção estatisticamente superiores às amostras com concentrações menores. Ou seja, a análise estatística da absorção de água aos 7 dias evidenciou um comportamento bastante distinto das misturas de SCAA com solo arenoso e com solo argiloso.

Da Tabela 9, pode-se observar, ainda, que o solo argiloso apresentou absorção média aos 7 dias muito maior do que o solo arenoso. Essa constatação está de acordo com o estudo de Silva (2011), que observou que para argamassas com maiores teores de finos, o valor para capilaridade e absorção de água foi maior. Isso se deve ao fato que as partículas do solo argiloso apresentam uma maior área de superfície e, portanto, apresentam um maior consumo de água no estado fresco da mistura.

Analisando a absorção de água aos 28 dias, os dados da ANOVA e do teste de Tukey (Tabela 10) indicam que o cimento e a água exercem influência sobre esse ensaio para os traços com solo arenoso – sendo que o cimento exerce influência maior do que a da água. Amostras com menores concentrações de cimento apresentam médias de absorção de água aos 28 dias estatisticamente superiores às amostras com maiores concentrações. Da mesma forma, amostras com concentrações menores de água apresentam médias superiores às amostras com maiores concentrações.

Já os dados da ANOVA e do teste de Tukey expressos na Tabela 11 indicam que para os traços com solo argiloso, há influência do cimento e do aditivo sobre a absorção de água aos 28 dias, sendo que o cimento exerce influência maior do que o aditivo. Assim como no solo arenoso, amostras com menores concentrações de cimento apresentam médias de absorção de água aos 28 dias estatisticamente superiores às amostras com maiores concentrações. Da mesma forma, amostras com concentrações menores de aditivo apresentam médias superiores às amostras com maiores concentrações.

Conclui-se, portanto, que a diminuição na capacidade de absorção de água aos 28 dias com o aumento do consumo de cimento é válida para os dois tipos de solo. Isso também foi constatado no estudo de Berté e Alcantara (2013).

Aos 28 dias a absorção média de água do solo argiloso foi muito maior do que o solo arenoso, reafirmando os resultados desse mesmo ensaio na idade de 7 dias e o estudo de Silva (2011).

Em relação ao desempenho físico, a absorção de água do SCAA com solo argiloso apresenta valores elevados, que extrapolam a média de 20% estabelecida pela normativa brasileira vigente. Isto é, as misturas de SCAA com solo argiloso não atendem ao requisito de capacidade de absorção de água para aplicação em paredes monolíticas.

Em se tratando do SCAA com solo arenoso, a absorção média aos 7 dias não atende ao requisito estabelecido pela norma vigente. Porém, como os valores encontrados aproximam-se do limite de 20%, alguns ajustes no traço – teor de aditivo e água - são capazes de melhorar essa característica. Já na idade de 28 dias, o requisito é atendido pelos traços 1:6, 1:5 e 1:4. Isso mostra que a absorção média de água diminuiu com o decorrer do tempo em conformidade com os estudos de Claverie (2015).

4.2.3 Retração

Os resultados referentes à retração linear livre por secagem do SCAA nas idades de 24h e 7 dias estão representados na Tabela 12. Em seguida, temos os resultados do Teste ANOVA e do Teste de Tukey para a comparação das médias de retração linear livre por secagem em 24h e aos 7 dias do solo arenoso (Tabela 13) e solo argiloso (Tabela 14) de acordo com cimento, água e aditivo.

Tabela 12. Retração linear livre por secagem nas idades de 24h e 7 dias

Amostra - Solo arenoso		Are 1	Are 2	Are 3	Are 4	Are 5	Are 6	Are 7	Are 8	Are 9	Are 10	Are 11	Are 12	Are 13	Are 14	Are 15	Are 16
Retração 24h	Média (mm)	3,00	6,00	3,00	5,00	3,00	5,00	4,00	6,00	4,00	6,00	5,00	6,00	4,00	6,00	4,00	7,00
	DPM	0,71	0,71	0,71	1,41	0,00	0,71	1,41	1,41	1,27	0,00	0,71	0,71	0,00	0,57	1,41	0,85
	CV	0,24	0,12	0,24	0,28	0,00	0,14	0,35	0,24	0,31	0,00	0,14	0,12	0,00	0,09	0,35	0,12
Retração 7 dias	Média (mm)	1,80	2,00	1,75	1,95	1,50	1,60	1,65	1,80	0,88	1,50	1,00	2,25	0,55	0,90	0,85	1,40
	DPM	0,28	0,71	0,35	0,49	0,71	0,14	0,49	0,28	0,18	0,71	0,00	0,35	0,07	0,14	0,21	0,14
	CV	0,16	0,35	0,20	0,25	0,47	0,09	0,30	0,16	0,20	0,47	0,00	0,16	0,13	0,16	0,25	0,10
Amostra - Solo argiloso		Arg 1	Arg 2	Arg 3	Arg 4	Arg 5	Arg 6	Arg 7	Arg 8	Arg 9	Arg 10	Arg 11	Arg 12	Arg 13	Arg 14	Arg 15	Arg 16
Retração 24h	Média (mm)	5,00	6,00	5,00	6,00	3,00	7,00	4,00	6,00	5,00	7,00	5,00	8,00	5,00	8,00	5,00	10,00
	DPM	0,00	0,99	0,71	0,71	0,57	0,28	0,64	0,07	0,21	0,00	0,00	0,71	0,85	1,41	0,35	0,64
	CV	0,00	0,16	0,14	0,12	0,14	0,04	0,16	0,01	0,04	0,00	0,00	0,09	0,17	0,18	0,07	0,06
Retração 7 dias	Média (mm)	2,00	2,75	2,25	3,25	1,75	2,50	1,90	2,75	1,85	2,25	1,90	2,75	1,35	2,40	2,00	1,85
	DPM	1,41	1,06	0,35	1,77	0,35	0,71	0,28	1,06	0,21	0,35	0,14	0,35	0,49	0,28	0,00	0,49
	CV	0,71	0,39	0,16	0,54	0,20	0,28	0,15	0,39	0,11	0,16	0,07	0,13	0,37	0,12	0,00	0,27

Fonte: Autora (2023)

Tabela 13. ANOVA e Tukey para retração do SCAA com solo arenoso

Solo arenoso - 24h					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	4,25	1,56	0,37	F(3,26) = 3,037; p = 0,047; $\omega^2 = 0,160$	a
16,70%	4,5	1,44	0,32		a
20%	5,28	1,04	0,2		a
25%	5,25	1,52	0,29		a
Água				F(1,26) = 49,631; p < 0,001; $\omega^2 = 0,603$	
27%	3,76	0,97	0,26		a
28%	5,88	0,89	0,15		b
Aditivo				F(1,26) = 1,267; p = 0,271; $\omega^2 = 0,008$	
0,80%	4,65	1,35	0,29		a
1,20%	4,99	1,49	0,3		a
Solo arenoso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	1,88	0,38	0,21	F(3,26) = 8,826; p < 0,001; $\omega^2 = 0,423$	b
16,70%	1,64	0,37	0,22		b
20%	1,41	0,65	0,46		ab
25%	0,92	0,35	0,37		a
Água				F(1,26) = 9,848; p = 0,004; $\omega^2 = 0,217$	
27%	1,25	0,53	0,43		a
28%	1,68	0,52	0,31		b
Aditivo				F(1,26) = 3,111; p = 0,090; $\omega^2 = 0,062$	
0,80%	1,34	0,59	0,44		a
1,20%	1,58	0,52	0,33		a

Fonte: Autora (2023)

Tabela 14. ANOVA e Tukey para retração de SCAA com solo argiloso

Solo argiloso - 24h					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	5,5	0,75	0,14	F(3,26) = 6,397; p = 0,002; ω² = 0,336	a
16,70%	5,28	1,39	0,26		a
20%	6,26	1,4	0,22		ab
25%	7,02	2,31	0,33		b
Água				F(1,26) = 60,503; p < 0,001; ω² = 0,650	
47%	4,79	0,57	0,12		a
48%	7,24	1,44	0,2		b
Aditivo				F(1,26) = 0,485; p = 0,492; ω² = 0,000	
0,80%	5,91	1,38	0,23		A
1,20%	6,12	1,91	0,31		A
Solo argiloso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	2,56	1,08	0,42	F(3,26) = 1,490; p = 0,241; ω² = 0,044	a
16,70%	2,22	0,68	0,3		a
20%	2,19	0,44	0,2		a
25%	1,9	0,49	0,26		a
Água				F(1,26) = 9,567; p = 0,005; ω² = 0,211	
47%	1,88	0,49	0,26		a
48%	2,56	0,77	0,3		b
Aditivo				F(1,26) = 1,025; p = 0,321; ω² = 0,001	
0,80%	2,11	0,69	0,33		a
1,20%	2,33	0,76	0,33		a

Fonte: Autora (2023)

Dos resultados da Tabela 12, pode-se observar que para todos os traços a maior variação dimensional aconteceu nas primeiras 24 horas. Isso se deve à perda de água que ocorre nas horas iniciais após a moldagem dos corpos de prova. Barboza (2014) verificou em seu estudo que as misturas de SCAA apresentaram as maiores variações dimensionais nas primeiras 48h, o que corrobora com a observação aqui elencada.

Os dados da ANOVA para a retração linear livre por secagem em 24h para os solos arenoso e argiloso (Tabelas 13 e 14) evidenciam que a água e o cimento exercem influência nesse ensaio, mas não o aditivo, sendo que a quantidade de água incorporada exerce influência maior do que o teor de cimento.

O teste de Tukey (Tabelas 13 e 14) mostra que para ambos os solos, os traços com maiores quantidades de água apresentaram valores de retração mais elevadas, isto é, quanto mais água adicionada para garantir fluidez à mistura, mais água a ser perdida na

secagem dos corpos de prova após a moldagem. Tal constatação foi também observada no estudo de otimização de Berté (2013), Milani e Barboza (2016) e Ouellet-Plamondon e Habert (2016).

Ainda que a ANOVA tenha detectado efeito do cimento ($p = 0,047$) na retração em 24h para o solo arenoso, o teste de Tukey, que corrige para múltiplas comparações, não detectou diferenças entre os grupos (Tabela 13). Essa discordância entre o resultado da ANOVA e o do teste de Tukey pode acontecer, principalmente quando o valor de p da ANOVA está próximo ao nível de significância (TIAN et al., 2018). Em contrapartida, para o solo argiloso realmente foi detectado efeito do cimento na retração em 24h, sendo que misturas de SCAA com maiores teores de cimento apresentaram médias maiores de retração.

A ANOVA para o ensaio de retração aos 7 dias de misturas de SCAA com solo arenoso (Tabela 13) indicou que há influência do cimento e da água sobre esse ensaio – sendo que, nesse caso, o cimento exerce influência maior do que a da água.

O teste de Tukey (Tabela 13) mostra que a relação entre os teores de água e a retração permanece a mesma do ensaio em 24h – quanto mais água, maior a retração. Em contrapartida, assim como no estudo de Berté (2013), a retração diminuiu com o aumento dos teores de cimento. Isto é, traços com maiores teores de cimento apresentaram valores menores para a retração. A justificativa é decorrente do fato de que maiores teores de cimento requerem maiores quantidades de água para as reações de hidratação, resultando em menor quantidade de água para evaporação, e consequente retração.

A ANOVA para o ensaio de retração aos 7 dias de misturas de SCAA com solo argiloso (Tabela 14) indicou que há influência apenas da água sobre esse ensaio, e o teste de Tukey confirmou a mesma relação do ensaio em 24h, ou seja, maiores teores de água no SCAA apresentam maiores retrações.

Observa-se também que as misturas de SCAA com solo arenoso apresentaram retração menor do que as misturas com solo argiloso, o que também provavelmente está relacionado ao fato de que solos argilosos por apresentarem maior superfície específica requerem maior teor de água para garantir a fluidez no estado fresco, água esta que será evaporada no processo de cura dos corpos de prova.

Quanto a análise do desempenho físico, de acordo com a metodologia para aferição da retração do CEPED (1984) - ensaio de retração pelo método da caixa - após 7 dias a retração no sentido do comprimento da caixa não deve ser superior a 2 cm. Já Barboza e Milani (2016) encontraram deformações inferiores a 1,55 mm aos 7 dias para os traços avaliados.

Assim, os resultados obtidos neste estudo estão em conformidade com as referências adotadas, haja vista que para todas as misturas estudadas, a retração aos 7 dias não ultrapassou 2 cm e foi da mesma ordem de grandeza do trabalho de Barboza e Milani (2016).

4.2.4 Resistência à compressão simples

Os resultados referentes à resistência à compressão simples do SCAA nas idades de 7 e 28 dias está representado na Tabela 15. Em seguida, temos os resultados do Teste ANOVA e do Teste de Tukey para a comparação das médias de compressão simples aos 7 dias e aos 28 dias do solo arenoso (Tabela 16) e solo argiloso (Tabela 17) de acordo com cimento, água e aditivo.

Tabela 15. Resistência à compressão simples do SCAA aos 7 e aos 28 dias

Amostra - Solo arenoso		Are 1	Are 2	Are 3	Are 4	Are 5	Are 6	Are 7	Are 8	Are 9	Are 10	Are 11	Are 12	Are 13	Are 14	Are 15	Are 16
Resistência à compressão aos 7 dias	Média (MPa)	1,84	1,54	1,55	1,29	3,20	2,79	2,49	2,00	3,49	3,25	3,23	2,99	5,29	4,26	3,91	3,18
	DPM	0,01	0,03	0,11	0,16	0,25	0,05	0,24	0,88	0,66	0,26	0,33	0,2	0,23	0,02	0,45	0,31
	CV	0,01	0,02	0,07	0,13	0,08	0,02	0,1	0,44	0,19	0,08	0,1	0,07	0,04	0	0,11	0,1
Resistência à compressão aos 28 dias	Média (MPa)	2,78	2,05	3,18	2,88	3,92	3,7	4,32	3,2	5,41	4,59	5,47	4,7	7,58	6,15	8,84	8,19
	DPM	0,09	0,01	0,21	0,15	0,11	0,19	0,02	0,08	0,3	0,3	0,33	0,64	0,31	0,27	1,17	0,45
	CV	0,03	0	0,06	0,05	0,03	0,05	0	0,02	0,06	0,07	0,06	0,14	0,04	0,04	0,13	0,05
Amostra - Solo argiloso		Arg 1	Arg 2	Arg 3	Arg 4	Arg 5	Arg 6	Arg 7	Arg 8	Arg 9	Arg 10	Arg 11	Arg 12	Arg 13	Arg 14	Arg 15	Arg 16
Resistência à compressão aos 7 dias	Média (MPa)	0,66	0,62	0,61	0,48	1,22	1,02	0,83	0,73	1,37	1,33	1,29	1,28	1,48	1,41	1,38	1,36
	DPM	0,03	0,04	0,02	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,08	0,23	0,23	0,1	0,12
	CV	0,04	0,06	0,03	0,16	0,03	0,05	0,01	0,02	0,04	0,03	0,03	0,06	0,15	0,17	7,2	0,09
Resistência à compressão aos 28 dias	Média (MPa)	1,02	0,86	1,1	0,87	1,89	1,15	1,32	0,99	1,51	1,42	1,78	1,59	3,04	2,33	3,36	0,07
	DPM	0,09	0,07	0,07	0,08	0,31	0,03	0,12	0,08	0,19	0,1	0,14	0,08	0,48	0,25	0,35	0,15
	CV	0,08	0,08	0,06	0,09	0,16	0,03	0,09	0,08	0,12	0,07	0,08	0,05	0,16	0,11	0,11	0,05

Fonte: Autora (2023)

Tabela 16. ANOVA e Tukey para resistência à compressão do SCAA com solo arenoso

Solo arenoso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	1,56	0,22	0,14	F(3,42) = 90,306; p < 0,001; ω² = 0,848	a
16,70%	2,62	0,61	0,23		b
20%	3,24	0,39	0,12		c
25%	4,16	0,83	0,2		d
Água					
27%	3,13	1,18	0,38	F(1,42) = 16,331; p < 0,001; ω² = 0,242	b
28%	2,66	0,99	0,37		a
Aditivo					
0,80%	3,21	1,18	0,37	F(1,42) = 29,641; p < 0,001; ω² = 0,374	b
1,20%	2,58	0,93	0,36		a
Solo arenoso - 28 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	2,72	0,45	0,16	F(3,42) = 189,830; p < 0,001; ω² = 0,922	a
16,70%	3,79	0,43	0,11		b
20%	5,04	0,55	0,11		c
25%	7,69	1,18	0,15		d
Água					
27%	5,19	2,06	0,40	F(1,42) = 23,617; p < 0,001; ω² = 0,320	b
28%	4,43	1,91	0,43		a
Aditivo					
0,80%	4,52	1,74	0,38	F(1,42) = 13,646; p < 0,001; ω² = 0,209	a
1,20%	5,10	2,23	0,44		b

Fonte: Autora (2023)

Tabela 17. ANOVA e Tukey para resistência à compressão do SCAA com solo argiloso

Solo argiloso - 7 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	0,59	0,08	0,14	F(3,42) = 138,909; p < 0,001; ω² = 0,896	a
16,70%	0,95	0,2	0,21		b
20%	1,32	0,06	0,05		c
25%	1,41	0,16	0,11		c
Água				F(1,42) = 5,918; p = 0,019; ω² = 0,093	
47%	1,11	0,34	0,31		b
48%	1,03	0,36	0,35		a
Aditivo				F(1,42) = 20,606; p < 0,001; ω² = 0,290	
0,80%	1,14	0,34	0,30		b
1,20%	0,99	0,36	0,36		a
Solo argiloso - 28 dias					
Variável Independente	Média	DP	CV	ANOVA	Tukey
Cimento					
12,50%	0,97	0,13	0,13	F(3,42) = 116,631; p < 0,001; ω² = 0,878	a
16,70%	1,33	0,38	0,29		b
20%	1,57	0,17	0,11		b
25%	2,87	0,49	0,17		c
Água				F(1,42) = 24,780; p < 0,001; ω² = 0,331	
47%	1,87	0,86	0,46		b
48%	1,49	0,68	0,45		a
Aditivo				F(1,42) = 0,668; p = 0,418; ω² = 0,000	
0,80%	1,65	0,73	0,44		a
1,20%	1,72	0,86	0,50		a

Fonte: Autora (2023)

O teste ANOVA para traços com solo arenoso e argiloso indicou que há efeito do cimento, da água e do aditivo sobre o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias. Para ambos os tipos de solo, amostras com concentrações maiores de cimento apresentam médias de resistência à compressão estatisticamente superiores às amostras com concentrações menores. Já amostras com concentrações maiores de água e aditivo apresentam médias de resistência à compressão estatisticamente inferiores. Também é interessante evidenciar que o cimento é o componente que exerce maior influência sobre esse ensaio, seguido do teor de aditivo. Assim, a água é o componente que menos influência na resistência à compressão aos 7 dias. Esses resultados estão detalhados nas Tabelas 16 e 17.

O aumento da resistência à compressão aos 7 dias com o aumento dos teores de cimento vai de encontro ao estudo de Berté (2013), que observou que as resistências para o solo-cimento autoadensável estão ligadas ao consumo de cimento, pois de acordo com resultados encontrados em sua pesquisa, as misturas que tiveram um maior teor de cimento incorporado tiveram maiores valores para a resistência mecânica. Souza (2017) em seu estudo sobre viabilidade técnica do SCAA em paredes de vedação também observou ganho de resistência à compressão aos 7 dias em traços de SCAA com maiores teores de cimento. O mesmo foi observado por Paz et al. (2016).

Sobre a água e o aditivo é importante ressaltar que o aumento dos teores desses componentes nas misturas de SCAA resulta em uma matriz cimentícia mais fluida no estado fresco, mas com características físico-mecânicas afetadas no estado endurecido. Isto é, o aumento do teor desses componentes faz aumentar o espalhamento e diminuir a resistência à compressão. Ferrari et al. 2010 descrevem que nas pastas cimentícias aditivadas existem regiões onde o superplastificante depositado são compostas principalmente por potássio e enxofre, observando que o superplastificante interage com estas espécies iônicas em solução. A forte interação entre superplastificante e sulfato reduz a quantidade real de íons disponíveis na solução dos poros da pasta cimentícia, retardando a formação inicial de etringita nas primeiras idades. De forma análoga, o SCAA com o maior teor de aditivo pode ter apresentado maior interação química na mistura, diminuindo os produtos das reações de hidratação do cimento na fase inicial do SCAA no estado endurecido.

Aos 28 dias, o teste ANOVA para traços com solo arenoso e argiloso indicou que há efeito do cimento e da água sobre o ensaio de resistência à compressão. Para ambos os tipos de solo, amostras com concentrações maiores de cimento apresentam médias de resistência à compressão estatisticamente superiores às amostras com concentrações menores. Já amostras com concentrações maiores de água apresentam médias de resistência à compressão estatisticamente inferiores. O cimento é o componente que exerce maior influência sobre esse ensaio, seguido do teor de água. Esses resultados estão detalhados nas Tabelas 16 e 17.

Em relação ao aditivo, há efeito sobre a resistência a compressão aos 28 dias em traços com solo arenoso, sendo que quanto maior o teor de aditivo, maior a resistência a

compressão; no entanto não há efeito sobre a resistência a compressão aos 28 dias em traços com solo argiloso. Isto pode ser explicado por Milani e Silva (2018), na qual corroboraram que a interação físico-química entre os argilominerais presentes nos solos arenoso e argiloso e superplastificante não influencia na microestrutura final do SCAA.

Um fator importante a ser observado é que os traços com solo arenoso apresentaram resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias maiores do que os traços com solo argiloso. Ferreira (2020) também observou um melhor comportamento mecânico das misturas de SCAA com solo arenoso do que com solo argiloso em termos absolutos de valores alcançados de resistência a compressão simples.

Isso ocorre devido à interação do cimento com as partículas de argila e areia. As argilas possuem formato lamelar e são consideradas quimicamente ativas. Além disso, possuem uma grande superfície específica e alto grau de plasticidade (devido ao diâmetro de suas partículas ser inferior a 0,05mm), o que dificulta a estabilização química e mecânica desse tipo de solo (Milani e Ferreira, 2022). Ainda de acordo com as autoras, o formato arredondado das partículas de quartzo interage melhor com o cimento, tornando sua estabilização mais fácil. Ou seja, a maior resistência a compressão apresentada pelas misturas de SCAA com solo arenoso é decorrente do processo de estabilização com cimento ser mais eficiente do que com o solo argiloso.

Não se pode deixar de citar que, independente do tipo de solo, há um aumento significativo de resistência ao longo do tempo, conforme mostram os dados da Tabela 17. Segantini (1994), utilizando um solo A4, realizou ensaios de compressão simples em corpos de prova de Solo-Cimento-Compactado (SCC) e de Solo-Cimento-Plástico (SCP) e observou ganho de resistência em função do tempo de cura. Barboza (2014) em sua avaliação físico-mecânica de SCAA realizou ensaios de resistência à compressão para dois traços diferentes nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias e ambos apresentaram ganho de resistência com o decorrer do tempo. Isso ocorre porque as reações de hidratação do cimento continuam a acontecer com o passar dos dias, reduzindo o volume de poros pelo preenchimento por silicatos e aluminatos hidratados, e por consequência o aumento da resistência mecânica axial.

Em relação ao desempenho mecânico do SCAA, observa-se que todos os traços de SCAA com solo arenoso atenderam às características mínimas necessárias para aplicação em

paredes monolíticas - que são a resistência à compressão simples de 1,0 MPa aos 7 dias e abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm no ensaio de Slump Flow. Portanto, os teores de cimento, água e aditivo superplastificante adotados no estudo de dosagem são compatíveis com a aplicação.

Apesar de todos os traços de SCAA com solo argiloso terem alcançado abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm no ensaio de Slump Flow, o traço 1:8 não alcançou a resistência à compressão simples de 1,0 MPa aos 7 dias; e o traço 1:6 só alcançou esse marco nas misturas com teor de aditivo igual a 0,8%. Portanto, misturas de SCAA com solo argiloso no traço 1:8 não podem ser usadas para a fabricação de paredes monolíticas e no traço 1:6, somente com teor de aditivo igual a 0,8%.

Os resultados mostram que, de fato, solos argilosos demandam uma maior quantidade de água do que solos arenosos para alcançar a consistência fluida, como aponta o estudo de Helson et. al. (2017). Em decorrência disso, as misturas de SCAA com solo argiloso necessitam de maior quantidade de cimento do que as misturas com solo arenoso para alcançar a resistência à compressão mínima compatível com a sua aplicação, o que corrobora com as conclusões de Berté e Alcântara (2013).

4.3 Diagramas de dosagem

A análise estatística mostrou que, independente do tipo de solo, os fatores que mais influenciam nas características físico-mecânicas do SCAA são o cimento e a água. Portanto, foram geradas as equações das linhas de tendência e o coeficiente de determinação R^2 , correlacionando essas variáveis de dosagem com as propriedades das misturas no estado fresco e no estado endurecido (abertura de espalhamento, resistência à compressão, capacidade de absorção de água e retração). Devido os valores encontrados para as características das misturas não manterem a mesma ordem de grandeza com a variação do tipo de solo, as correlações foram determinadas separadamente para o solo arenoso e o solo argiloso. Os resultados dos coeficientes de determinação R^2 estão expressos nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18. Determinação da linha de tendência para SCAA com solo arenoso

Determinação das linhas de tendência - solo arenoso			
Variável de dosagem	Propriedade da mistura	Linha de tendência	R ²
Cimento	Espalhamento	Linear	0,5141
		Exponencial	0,5251
		Logarítmica	0,5519
		Polinomial	0,5977
		Potência	0,5654
Cimento	Compressão aos 7 dias	Linear	0,7495
		Exponencial	0,7258
		Logarítmica	0,7540
		Polinomial	0,7543
		Potência	0,7531
Cimento	Compressão aos 28 dias	Linear	0,8521
		Exponencial	0,8873
		Logarítmica	0,8103
		Polinomial	0,8778
		Potência	0,8750
Cimento	Retração 24h	Linear	0,0863
		Exponencial	0,0926
		Logarítmica	0,0890
		Polinomial	0,0910
		Potência	0,0973
Cimento	Retração 7 dias	Linear	0,3976
		Exponencial	0,4403
		Logarítmica	0,3817
		Polinomial	0,4046
		Potência	0,4180
Cimento	Absorção 7 dias	Linear	0,2614
		Exponencial	0,2664
		Logarítmica	0,2234
		Polinomial	0,3452
		Potência	0,2280
Cimento	Absorção 28 dias	Linear	0,2699
		Exponencial	0,2671
		Logarítmica	0,2987
		Polinomial	0,3532
		Potência	0,2954
Água	Espalhamento	Linear	0,0428
		Exponencial	0,0404
		Logarítmica	0,0428
		Polinomial	0,0428
		Potência	0,0404

Água	Compressão aos 7 dias	Linear	0,0455
		Exponencial	0,0426
		Logarítmica	0,0455
		Polinomial	0,0455
		Potência	0,0426
Água	Compressão aos 28 dias	Linear	0,0364
		Exponencial	0,0441
		Logarítmica	0,0364
		Polinomial	0,0364
		Potência	0,0441
Água	Retração 24h	Linear	0,5770
		Exponencial	0,5580
		Logarítmica	0,5770
		Polinomial	0,5770
		Potência	0,5580
Água	Retração 7 dias	Linear	0,1505
		Exponencial	0,1662
		Logarítmica	0,1505
		Polinomial	0,1505
		Potência	0,1662
Água	Absorção 7 dias	Linear	0,0815
		Exponencial	0,0818
		Logarítmica	0,0818
		Polinomial	0,0818
		Potência	0,0815
Água	Absorção 28 dias	Linear	0,1812
		Exponencial	0,1801
		Logarítmica	0,1801
		Polinomial	0,1801
		Potência	0,1812

Fonte: Autora (2023)

Tabela 19. Determinação da linha de tendência para SCAA com solo argiloso

Determinação das linhas de tendência - solo argiloso			
Variável de dosagem	Propriedade da mistura	Linha de tendência	R ²
Cimento	Espalhamento	Linear	0,0010
		Exponencial	0,0007
		Logarítmica	0,0022
		Polinomial	0,0148
		Potência	0,0018
Cimento	Compressão aos 7 dias	Linear	0,7831
		Exponencial	0,7583
		Logarítmica	0,8177
		Polinomial	0,8397
		Potência	0,8081
Cimento	Compressão aos 28 dias	Linear	0,7581
		Exponencial	0,8194
		Logarítmica	0,7017
		Polinomial	0,8278
		Potência	0,7843
Cimento	Retração 24h	Linear	0,1470
		Exponencial	0,1197
		Logarítmica	0,1339
		Polinomial	0,1638
		Potência	0,1079
Cimento	Retração 7 dias	Linear	0,1035
		Exponencial	0,0750
		Logarítmica	0,1046
		Polinomial	0,1043
		Potência	0,0718
Cimento	Absorção 7 dias	Linear	0,3192
		Exponencial	0,3293
		Logarítmica	0,3798
		Polinomial	0,5884
		Potência	0,3906
Cimento	Absorção 28 dias	Linear	0,1970
		Exponencial	0,2218
		Logarítmica	0,1817
		Polinomial	0,2021
		Potência	0,2068
Água	Espalhamento	Linear	0,1048
		Exponencial	0,1046
		Logarítmica	0,1048
		Polinomial	0,1048
		Potência	0,1046

Água	Compressão aos 7 dias	Linear	0,0122
		Exponencial	0,0148
		Logarítmica	0,0122
		Polinomial	0,0122
		Potência	0,0148
Água	Compressão aos 28 dias	Linear	0,0594
		Exponencial	0,0681
		Logarítmica	0,0594
		Polinomial	0,0594
		Potência	0,0681
Água	Retração 24h	Linear	0,5698
		Exponencial	0,6212
		Logarítmica	0,5698
		Polinomial	0,5698
		Potência	0,6212
Água	Retração 7 dias	Linear	0,2330
		Exponencial	0,2434
		Logarítmica	0,2330
		Polinomial	0,233
		Potência	0,2434
Água	Absorção 7 dias	Linear	0,0455
		Exponencial	0,0474
		Logarítmica	0,0455
		Polinomial	0,0455
		Potência	0,0474
Água	Absorção 28 dias	Linear	0,0035
		Exponencial	0,0021
		Logarítmica	0,0035
		Polinomial	0,0035
		Potência	0,0021

Fonte: Autora (2023)

A partir dos dados das Tabelas 18 e 19, nota-se que a maioria das correlações entre variável de dosagem e propriedade da mistura apresentou um coeficiente de determinação muito distante de 1,0; o que significa que a representação pela linha de tendência obtida na regressão não é muito precisa. Assim, as únicas correlações fortes encontradas tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso foram da variável de dosagem cimento com a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias.

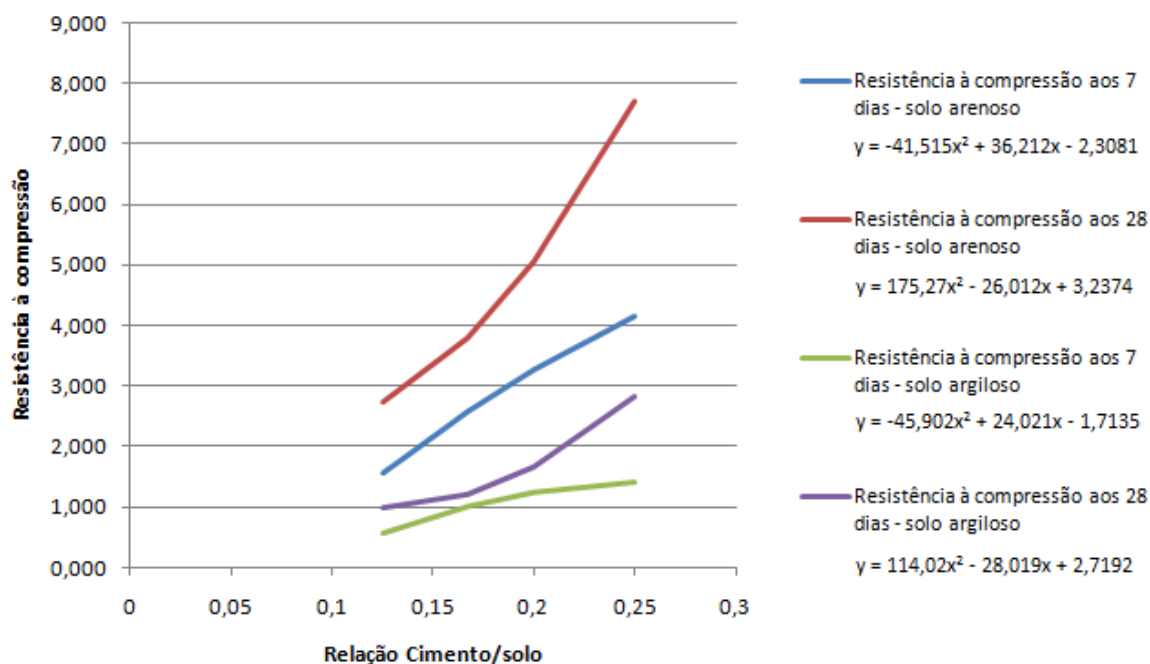
Entre as possíveis linhas de tendência (linear, exponencial, logarítmica, polinomial ou de potência) deve ser escolhida a que apresenta melhor confiabilidade, isto é, R^2 o mais o

próximo possível de 1,0. Para a correlação entre cimento e resistência à compressão aos 7 dias do solo arenoso a linha de tendência que mais se adéqua é a polinomial, enquanto que para a correlação entre cimento e resistência à compressão aos 28 dias do solo arenoso, a melhor é a linha de tendência exponencial. Já para o solo argiloso, em ambas as idades a linha de tendência com melhor R^2 é a polinomial.

A análise das tabelas mostra que para as correlações entre cimento e resistência à compressão as linhas de tendência para ambos os solos têm coeficiente de determinação (R^2) muito próximos. Então, para uma generalização do método, adotou-se a linha de tendência polinomial para todas as situações. Neste trabalho, a linha de tendência para todas as situações estudadas é dada por um polinômio de grau 2, da forma $y = ax^2 + bx + c$, em que “y” é a variável dependente (resistência à compressão), “a”, “b” e “c” são os coeficientes e “x” é a variável independente (relação cimento/solo).

Diante do exposto, para o diagrama de dosagem será considerada apenas a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, que foi a o único parâmetro a apresentar uma correlação forte com uma das variáveis de dosagem. O diagrama de dosagem para o SCAA está exposto na Figura 19.

Figura 19. Diagrama de dosagem para SCAA



Fonte: Autora (2023)

Do diagrama, pode-se notar que para os menores teores de cimento, o ganho de resistência de 7 para 28 dias é pequeno em ambos os tipos de solo. Contudo, para valores de relação cimento/solo a partir de 0,20; os ganhos de resistência com o decorrer do tempo passam a ser mais significativos principalmente para o solo arenoso.

Das equações das linhas de tendência, nota-se que para a idade de 7 dias os coeficientes “a”, “b” e “c” de ambos os tipos de solo apresentam o mesmo sinal (“a” negativo, “b” positivo e “c” negativo), mas o solo arenoso apresenta coeficientes com valores maiores. Para a idade de 28 dias os coeficientes “a”, “b” e “c” de ambos os tipos de solo continuam a apresentar o mesmo sinal - mas agora “a” positivo, “b” negativo e “c” positivo - e o solo arenoso segue apresentando coeficientes com valores maiores.

Isso evidencia a semelhança do comportamento físico-mecânico do SCAA independentemente do tipo de solo. Isto é, para a mesma idade, o SCAA com ambos os tipos de solo apresenta o mesmo comportamento, sendo que solos mais arenosos apresentarão maior ganho de resistência com o aumento do consumo de cimento em comparação aos solos argilosos.

Para validação do diagrama, os resultados experimentais e teóricos (calculados a partir da equação exponencial) da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias foram confrontados através do cálculo do desvio relativo. O desvio relativo é calculado tendo como base o resultado experimental, conforme a equação (2):

$$\text{Desvio relativo} = |\text{valor}_{\text{exper}} - \text{valor}_{\text{teórico}}| / \text{valor}_{\text{exper}} \quad (2)$$

Os resultados da validação para solo arenoso e solo argiloso estão expressos nas Tabelas 20 e 21, a seguir:

Tabela 20. Desvio relativo entre valores observados e teóricos – SCAA com solo arenoso

Solo arenoso					
Resistência à compressão experimental aos 7 dias	Resistência à compressão teórica aos 7 dias	Desvio relativo	Resistência à compressão experimental aos 28 dias	Resistência à compressão teórica aos 28 dias	Desvio relativo
1,85	1,57	0,15	2,72	2,72	0,04
1,83	1,57	0,14	2,72	2,72	0,04
1,86	1,57	0,15	2,72	2,72	0,02
1,56	1,57	0,00	2,72	2,72	0,33
1,51	1,57	0,04	2,72	2,72	0,32
1,55	1,57	0,01	2,72	2,72	0,33
1,50	1,57	0,04	2,72	2,72	0,13
1,68	1,57	0,07	2,72	2,72	0,09
1,48	1,57	0,06	2,72	2,72	0,20
1,17	1,57	0,34	2,72	2,72	0,11
1,48	1,57	0,06	2,72	2,72	0,01
1,24	1,57	0,27	2,72	2,72	0,04
3,37	2,58	0,23	3,78	3,78	0,07
3,31	2,58	0,22	3,78	3,78	0,02
2,92	2,58	0,12	3,78	3,78	0,02
2,75	2,58	0,06	3,78	3,78	0,03
2,77	2,58	0,07	3,78	3,78	0,02
2,84	2,58	0,09	3,78	3,78	0,07
2,73	2,58	0,06	3,78	3,78	0,13
2,25	2,58	0,15	3,78	3,78	0,13
2,49	2,58	0,04	3,78	3,78	0,12
2,33	2,58	0,11	3,78	3,78	0,17
1,00	2,58	1,58	3,78	3,78	0,16
2,66	2,58	0,03	3,78	3,78	0,21
2,79	3,27	0,17	5,05	5,05	0,03
3,57	3,27	0,08	5,05	5,05	0,12
4,10	3,27	0,20	5,05	5,05	0,04

3,28	3,27	0,00	5,05	5,05	0,02
2,98	3,27	0,10	5,05	5,05	0,16
3,49	3,27	0,06	5,05	5,05	0,13
3,56	3,27	0,08	5,05	5,05	0,14
2,90	3,27	0,13	5,05	5,05	0,06
3,22	3,27	0,02	5,05	5,05	0,03
2,98	3,27	0,10	5,05	5,05	0,04
2,80	3,27	0,17	5,05	5,05	0,26
3,21	3,27	0,02	5,05	5,05	0,04
5,50	4,15	0,25	7,69	7,69	0,03
5,06	4,15	0,18	7,69	7,69	0,04
5,32	4,15	0,22	7,69	7,69	0,04
4,25	4,15	0,02	7,69	7,69	0,30
4,27	4,15	0,03	7,69	7,69	0,27
4,23	4,15	0,02	7,69	7,69	0,19
3,41	4,15	0,22	7,69	7,69	0,22
4,26	4,15	0,03	7,69	7,69	0,01
4,06	4,15	0,02	7,69	7,69	0,15
2,88	4,15	0,44	7,69	7,69	0,02
3,16	4,15	0,31	7,69	7,69	0,12
3,50	4,15	0,19	7,69	7,69	0,04

Fonte: Autora (2023)

Tabela 21. Desvio relativo entre valores observados e teóricos – SCAA com solo argiloso

Solo argiloso					
Resistência à compressão experimental aos 7 dias	Resistência à compressão teórica aos 7 dias	Desvio relativo	Resistência à compressão experimental aos 28 dias	Resistência à compressão teórica aos 28 dias	Desvio relativo
0,63	0,57	0,09	1,12	1,00	0,11
0,67	0,57	0,15	0,96	1,00	0,04
0,68	0,57	0,16	0,99	1,00	0,00
0,62	0,57	0,07	0,90	1,00	0,11
0,59	0,57	0,02	0,78	1,00	0,27
0,66	0,57	0,13	0,91	1,00	0,09
0,61	0,57	0,06	1,17	1,00	0,15
0,62	0,57	0,08	1,04	1,00	0,04
0,59	0,57	0,02	1,11	1,00	0,10
0,54	0,57	0,07	0,94	1,00	0,06
0,39	0,57	0,46	0,78	1,00	0,28
0,51	0,57	0,12	0,88	1,00	0,13
1,24	1,02	0,18	2,17	1,22	0,44
1,24	1,02	0,18	1,56	1,22	0,22
1,18	1,02	0,14	1,94	1,22	0,37

1,03	1,02	0,02	1,17	1,22	0,04
1,06	1,02	0,04	1,17	1,22	0,05
0,96	1,02	0,06	1,11	1,22	0,10
0,82	1,02	0,24	1,43	1,22	0,15
0,84	1,02	0,22	1,32	1,22	0,07
0,83	1,02	0,23	1,18	1,22	0,03
0,73	1,02	0,39	1,09	1,22	0,12
0,72	1,02	0,42	0,96	1,22	0,28
0,75	1,02	0,36	0,93	1,22	0,31
1,43	1,25	0,12	1,29	1,68	0,30
1,34	1,25	0,06	1,56	1,68	0,07
1,35	1,25	0,07	1,65	1,68	0,02
1,38	1,25	0,09	1,49	1,68	0,13
1,29	1,25	0,03	1,32	1,68	0,27
1,32	1,25	0,05	1,48	1,68	0,13
1,34	1,25	0,06	1,89	1,68	0,11
1,26	1,25	0,01	1,62	1,68	0,04
1,28	1,25	0,02	1,80	1,68	0,07
1,22	1,25	0,03	1,52	1,68	0,10
1,25	1,25	0,00	1,68	1,68	0,00
1,37	1,25	0,08	1,54	1,68	0,09
1,61	1,42	0,11	3,55	2,84	0,20
1,22	1,42	0,17	2,97	2,84	0,04
1,62	1,42	0,12	2,60	2,84	0,09
1,14	1,42	0,25	2,04	2,84	0,39
1,53	1,42	0,07	2,41	2,84	0,18
1,55	1,42	0,08	2,53	2,84	0,12
1,52	1,42	0,06	2,95	2,84	0,04
1,30	1,42	0,10	3,60	2,84	0,21
1,32	1,42	0,07	3,52	2,84	0,19
1,37	1,42	0,04	2,91	2,84	0,02
1,26	1,42	0,13	2,67	2,84	0,06
1,45	1,42	0,02	2,64	2,84	0,07

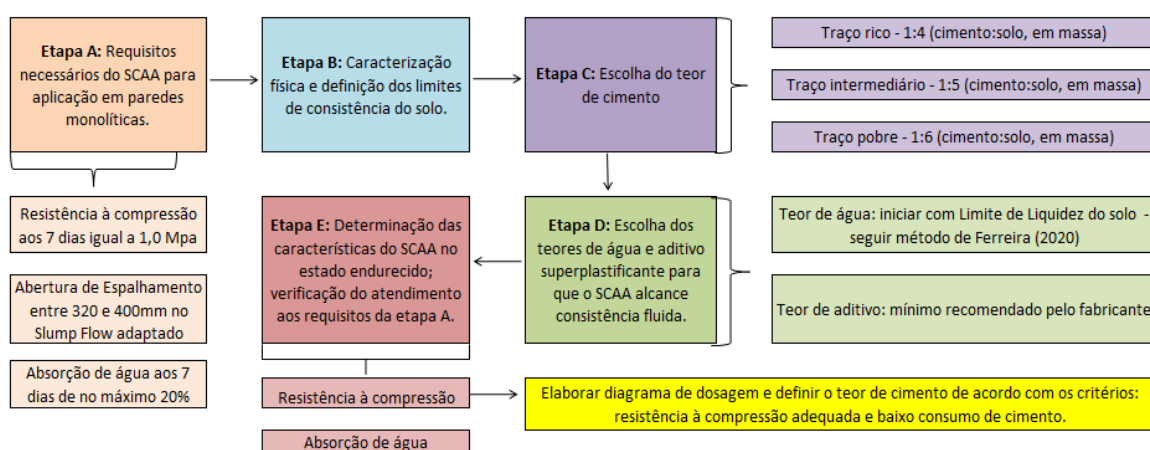
Fonte: Autora (2023)

A análise das Tabelas 20 e 21 evidencia o bom resultado das linhas de tendência encontradas para a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias tanto para o solo arenoso, quanto para o solo argiloso, haja vista que o desvio relativo para a maioria das comparações ficou na ordem de 0 a 25%, sendo poucas as que apresentaram valores superiores ao mencionado. Assim, o confronto entre valores teóricos e experimentais validam o diagrama de dosagem proposto.

4.4 Proposta de metodologia

O conhecimento adquirido sobre o comportamento do SCAA permitiu retroalimentar o fluxograma da proposta preliminar de metodologia de dosagem do SCAA, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20. Metodologia de dosagem para SCAA



Fonte: Autora (2023)

Na etapa C da Figura 16 era necessário estabelecer o intervalo entre as dosagens para definição dos traços rico, intermediário e pobre. Quando analisados os resultados da caracterização físico-mecânica do SCAA para solo argiloso, o traço 1:8 não alcançou resistência mínima de 1,0 MPa, devendo ser descartado. Para o solo arenoso, apesar do traço 1:8 ter alcançado a resistência mínima desejada, o resultado da absorção de água não atendeu à normativa. Dessa maneira, fica inviável – para ambos os tipos de solo – a utilização do traço 1:8 para aplicação em paredes monolíticas de SCAA, restando os traços 1:6, 1:5 e 1:4 – que serão adotados, respectivamente, como traço pobre, traço intermediário e traço rico, sendo o ponto de partida para a dosagem de cimento.

Na etapa D da Figura 16 era necessário estabelecer limites mínimos de relação água:solo e relação água:cimento e da relação cimento:aditivo para obter abertura de espalhamento entre 320 e 400mm. Foi observado que os teores de água e aditivo – quando comparados ao cimento - pouco influenciam nas características físico-mecânicas do SCAA.

Assim, a relação água:cimento não precisa de especificação e o teor de aditivo a ser utilizado pode ser o mínimo recomendado pelo fabricante. Para a relação água:solo deve ser mantida a metodologia de Ferreira (2020) que usa o Limite de Liquidez como ponto de partida para a determinação dessa variável de dosagem – já que usando sua metodologia obteve-se resultados compatíveis com a aplicação de SCAA em paredes monolíticas. Posteriormente, para melhora das características físico-mecânicas, pode-se ajustar o traço, aumentando o teor de aditivo e diminuindo o teor de água, sem perder a fluidez adequada da mistura de SCAA no estado fresco.

Na etapa E da Figura 16 era necessário estabelecer quais ensaios são necessários para corroborar o estudo de dosagem do SCAA. Foi visto que, por mais que os traços tenham alcançado os requisitos mínimos no que diz respeito à abertura de espalhamento e resistência à compressão, a capacidade de absorção de água com valor máximo de 20% (exigido pela normativa) não foi garantida, mesmo havendo melhora nos valores de absorção de 7 para 28 dias. Por isso, o ensaio de capacidade de absorção de água aos 7 dias com valor máximo de 20% deve ser considerado no estudo de dosagem. Já o ensaio de retração apresentou resultados compatíveis com a literatura para a aplicação de SCAA em paredes monolíticas. Então, apesar de ser necessário avaliar a retração para fins de caracterização, esta propriedade não precisa ser considerada no estudo de dosagem.

Diante do exposto, a proposta preliminar de metodologia de dosagem do SCAA se resume em: caracterizar fisicamente o solo para encontrar o Limite de Liquidez e consequente teor de água inicial para atingir a autoadensabilidade; definir dosagem de cimento considerando traços rico, intermediário e pobre; e incorporar aditivo superplastificante em teor mínimo indicado pelo fabricante. Após definições dos teores desses materiais eles devem ser preparados para o início dos ensaios. O solo deve ser destorroado, peneirado e armazenado em local adequado – longe de umidade – até que seja levado para secagem em estufa – que deve ser feita por no mínimo 24h antes do início de seu uso. É importante que o solo esteja em temperatura ambiente para que seja pesado para a preparação das misturas. O cimento deve ser armazenado em local seco, sem contato com o chão e permanecer bem fechado para que não receba umidade. A proporção dos

materiais deve ser rigorosamente medida e o processo de mistura deve seguir o estipulado na metodologia.

Para caracterização do SCAA no estado fresco, deve ser realizado o ensaio de Slump Flow adaptado assim que o processo de mistura for concluído. A base metálica deve estar úmida e o cone posicionado bem no meio da base; o cone é preenchido com o SCAA e levantado rapidamente. O valor numérico do Slump Flow é obtido através da média entre duas medidas perpendiculares do seu diâmetro de espalhamento e deve estar entre 360 e 420 mm.

Na sequência, deve-se realizar os ensaios de caracterização do SCAA no estado endurecido, sendo que a partir dos resultados experimentais do ensaio de compressão axial, elabora-se o diagrama de dosagem, a qual correlaciona matematicamente o teor de cimento e a resistência à compressão simples na idade experimentada. Por sua vez, esta equação permite estimar a resistência do SCAA variando a porcentagem de cimento incorporada na mistura. Assim, será viabilizado ajustar o traço para que alcance a resistência desejada no projeto com o menor consumo de cimento possível.

Como complementação, fica estabelecido que na etapa A – em que era necessário acrescentar critérios físico-mecânicos para garantir a aplicação do SCAA em paredes monolíticas – a inclusão do ensaio de capacidade de absorção de água aos 7 dias, tendo como critério absorção máxima de 20%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação a influência dos fatores tipo de solo, teor de cimento, teor de água e teor de aditivo nas características físico-mecânicas das misturas de solo-cimento autoadensável - SCAA - tem-se que:

- No estado fresco das misturas de SCAA, o teor de água e o teor de aditivo químico influenciam na fluidez do SCAA para ambos os tipos de solo. No entanto, o cimento exerce maior influência sobre o solo arenoso corroborando que nos solos granulares ocorrem com mais eficiência os mecanismos de repulsão eletrostática e estérica provocados pela ação do aditivo no cimento-água;
- Ainda sobre o estado fresco das misturas de SCAA, a metodologia de Ferreira (2020) foi eficaz na determinação da relação água:solo para que os traços de SCAA com solo arenoso e argiloso alcançassem abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm no ensaio de Slump Flow modificado – que é um dos requisitos mínimos necessários para alcance da autoadensabilidade;
- Para a característica física de capacidade de absorção de água, o cimento é o fator que exerce maior interferência para ambos os tipos de solo, sendo que quanto maior o consumo de cimento, menor será a absorção de água. Destaca-se que os SCAA com solo argiloso apresentaram valores de ordem de grandeza muito maiores que os traços com solo arenoso independente da idade de cura, o que reafirma que solos finos por apresentar grande área de superfície necessitará de mais água no estado fresco da mistura para alcançar autoadensabilidade e posterior aumento de capilaridade no estado endurecido;
- Já para a retração linear livre por secagem, independente do tipo de solo, a água exerce influência significativa nas primeiras 24h do SCAA, sendo que quanto mais água no estado fresco da mistura, maior será a sua retração. As misturas de SCAA com solo arenoso apresentaram retração menor do que as misturas com solo argiloso, isso porque o solo argiloso requer maior quantidade de água para atingir a fluidez necessária, que acabará evaporando no processo de cura do SCAA;

- Sobre a característica mecânica do SCAA, houve o efeito do cimento e da água no ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para ambos os tipos de solo – quanto mais cimento maior a resistência à compressão e quanto mais água menor a resistência à compressão. O aditivo químico só exerceu influência sobre a resistência axial em traços com solo arenoso - quanto maior o teor de aditivo, maior a resistência à compressão;

- Porém, independente do tipo de solo, o cimento foi o fator que exerceu maior importância na resistência à compressão do SCAA, bem como proporcionou o aumento significativo de resistência mecânica ao longo do tempo; sendo que o SCAA com solo arenoso apresentou melhor desempenho mecânico que os traços com solo argiloso, assim ratificando a eficiência da estabilização de solos granulares por matrizes cimentícias.

Em relação a existência de correlações entre os fatores da composição do SCAA e as suas características físico-mecânicas para previsibilidade do comportamento tem-se que:

- As características das misturas de SCAA mantiveram semelhante comportamento físico-mecânico, porém com alcance de desempenho diferente, o que reforça a necessidade do agrupamento dos solos por tipo de classificação granular e índices físicos para proposição de teores de água na dosagem do SCAA;

- Foi encontrada uma boa correlação entre o teor de cimento do SCAA e a resistência à compressão simples aos 7 e aos 28 dias para ambos os tipos de solo, o que possibilitou a previsão do seu comportamento através de uma equação polinomial;

- O diagrama de dosagem que correlaciona o fator cimento:solo com a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias para os solos arenoso e argiloso é uma ferramenta importante no auxílio da composição do SCAA, já que otimiza o teor de cimento para alcance de características físico-mecânicas desejadas;

- Foi possível propor um método preliminar de estudo de dosagem do SCAA para atender a aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações, sendo necessário posterior ajuste na dosagem com relação ao teor de água:aditivo para que suas características físico-mecânicas sejam melhoradas.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aumentar o número de corpos de prova para cada ensaio de caracterização do SCAA a fim de obter uma precisão maior nos resultados da análise estatística.
- Estudar SCAA com teores de cimento e variabilidade de solos arenoso e argiloso além dos adotados nesse trabalho para melhorar a confiabilidade das linhas de tendência encontradas, bem como ampliar o limite de aplicação do diagrama de dosagem para outros sistemas/soluções construtivos.
- Avaliar a durabilidade do material SCAA e incrementar a proposta de metodologia de dosagem com os resultados obtidos.
- Avaliar se o tipo de cimento utilizado influencia a proposta de metodologia.
- Fazer análise estatística avaliando a interação entre as variáveis de dosagem, a fim de entender melhor o comportamento do SCAA.

REFERÊNCIAS

- AIO, D. A.; SILVA, J. P. N.; MACHADO, A. F.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo da influência do uso do cimento ARI nas propriedades do solo-cimento auto-adensável. In: WORKSHOP CONCRETO: DURABILIDADE, QUALIDADE E NOVAS TECNOLOGIAS, 2, 2011, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 2011.
- ALCÂNTARA, M. A. M.; NUNES, S. C. B.; RIO, J. F. M. E.; LIMA, D. C. Rheology and mechanical aspects of a self-compacting soil-cement in the fresh state. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, e11876, 2017.
- AROOZ, F. R.; HALWATURA, R. U. Mud-concrete block (MCB): mix design & durability characteristics. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, p. 39-50, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Solo-cimento na habitação popular**. São Paulo: ABCP, 1985.
- _____. **ET-35: Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio**. São Paulo, 1986, 51p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6458: **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm** – Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017a.
- _____. NBR 6459: **Solo** - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017b.
- _____. NBR 7180: **Solo** – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. NBR 7181: **Solo** – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. NBR 7223: **Concreto** – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. NBR 8491: **Tijolo de solo-cimento** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.
- _____. NBR 12025: **Solo-cimento** — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.
- _____. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. NBR 13553: **Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural** — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012c.
- _____. NBR 13555: **Solo-cimento** — Determinação da absorção de água – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012d.
- _____. NBR 15823: **Concreto autoadensável**. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017c.
- _____. NBR 17014: **Taipa de pilão** – Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.
- BARBOZA, C. S. **Avaliação físico-mecânica do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2014.

BERTÉ, S. D. D. **Otimização e estudo do comportamento do solo-cimento autoadensável**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

BERTÉ, S. D. D.; ALCANTARA, M. A. M. Estudo do Comportamento do Solo-Cimento AutoAdensável. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 7, n. 2, p. 37-52, 2013.

CARSANA, M.; BERTOLINI, L. Fluidized soil– cement mixes for backfilling of flooded cavities. **Materials and Structures**, Rilem, v. 45, n. 1-2, p. 53-65, 2012.

CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia. **Cartilha para construção de paredes monolíticas em Solo-Cimento**. Rio de Janeiro, RJ: BNH/DEPEA, 44 p. 1985.

CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia. **Manual de Construção com Solo-Cimento**. Camaçari, BA. Convênio CEPED/BNH/ABCP, 147 p. 1984.

CLAVERIE, J. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento auto adensável**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2015.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D.; SILVA, R. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 727–735, 2012.

FIELD, A. *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Thousand Oaks, CA: Sage, 2013.

DOMONE, P. **Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method**. 2009.

FERNANDES, G. F. **Utilização do solo-cimento auto adensável na fabricação de blocos de alvenaria**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2017.

FERRARI, J.; KAUFMANN, F.; WINNEFELD, AND J. PLANK. **Interaction of Cement Model Systems with Superplasticizers Investigated by Atomic Force Microscopy, Zeta Potential, and Adsorption Measurements**. *J. Coll. Int. Sci.*, 347, 15–24.

FERREIRA, A. P. F. **Proposta de metodologia para determinação da autoadensabilidade do solo-cimento**. 2020. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2020.

HAO, X.; BALL, B. C.; CULLEY, J. L. B; CARTER, M. R.; PARKIN, G. W. Soil density and porosity. In: Carter, M. R.; Gregorich, E. G. **Soil sampling and methods of analysis**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p.743-759.

HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da EPUSP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo-SP. 22 p. 2003

HELSON, O.; BEAUCOUR, A.; ESLAMI, J.; NOUMOWE, A.; GOTTELAND, P. Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures: Soil clay content and formulation parameters. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 775-783, 2017.

- MARTINS, A. P. S.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; FILHO, R. D. T. Avaliação do desempenho ambiental de compósitos solo-cimento-fibras de sisal autoadensáveis. In: Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, 3, 2018. **Anais...** Coimbra: 2018.
- MARTINS, A. P. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO, F. R. D. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos solo-cimento autoadensáveis**; TerraBrasil 2012.
- MILANI, A. P. S.; BARBOZA, C. S. Contribuição ao estudo de propriedades do solocimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas. **Ambiente Construído**, v. 16, p. 143-153, 2016.
- MILANI, A. P. S.; FERREIRA, A. P. F. Criteria to assess the flow of cement-stabilised self-compacting earth. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 44, p. e58796-e58796, 2022.
- MILANI, A. P. S.; SILVA, C. I. Influence of superplasticiser on cement-stabilised selfcompacting Earth. **Proceedings [...]** – Ground Improvement, v. 172, p. 85-95, 2018.
- NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - ONU BR. **A Agenda 2030**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acessado em: 02/06/2019.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M.. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**.v. 1, n 1. p.5-15, 2003.
- OUELLET-PLAMONDON, C. M.; HABERT, G. Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 160-168, 2016.
- PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512-519, 2012.
- PAZ, J.G.P.; DIAS, F.G.R.; MILANI, A.P. Uso de Fibras Artificiais em Compósitos à Base de Solo-Cimento Autoadensável para Aplicação em Paredes de Edificações. In: AMAZON & PACIFIC GREEN MATERIALS CONGRESS AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS LAT-RILEM CONFERENCE, 6, 2016. **Anais...**Cali, Colombia: LatRilem, 2016. CD-ROM.
- PUERTAS, F.; SANTOS, H.; PALACIOS, M.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.. **Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes**. Advances in Cement Research, v. 17, n. 2, p. 77-89, 2005.
- SAMEH, S. H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 362-373, 2014.
- SEGANTINI, A.A.S. **Utilização de solo-cimento em estacas apiloadas para obras de pequeno porte**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas,1994.
- SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira – SP**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- 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 da ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v.2, p. 863-891.

SILVA, C. I. **Interação físico-química das misturas de solo-cimento com aditivo superplastificante a base de policarboxilatos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2016.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SIMIONI, F. C. **Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduos de construção civil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

SOUZA, R. S. **Estudo da viabilidade técnica do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes de vedação**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

SULLIVAN, G. M.; FEINN, R. Using effect size—or why the P value is not enough. **Journal of graduate medical education**, v. 4, n. 3, p. 279–282, 2012.

TOKUDOME, S. **Contribuição para o desenvolvimento do concreto auto-adensável**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VERALDO, A. C. **Análise do processo construtivo de taipa mecanizada: estudo de caso da sede do canteiro experimental da UFMS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2015.

WONGTANAKITCHAROEN, T.; NAAMAN, A. F. **Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers**. *Materials and Structures*, v. 40, n. 3, p. 289–300, 2007.

YIGIT, S.; MENDES, M. Which Effect Size Measure is Appropriate for One-Way and Two-Way ANOVA Models?: A Monte Carlo Simulation Study. **REVSTAT-Statistical Journal**, v. 16, n. 3, p. 295–313, 2018.