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 DETERMINAÇÃO DA AUTOADENSABILIDADE DO SOLO-CIMENTO

ANA PAULA FRANÇA FERREIRA

CAMPO GRANDE

2020

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 DETERMINAÇÃO DA AUTOADENSABILIDADE DO SOLO-CIMENTO

ANA PAULA FRANÇA FERREIRA

Trabalho de Conclusão Final de Curso do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de Sustentabilidade.

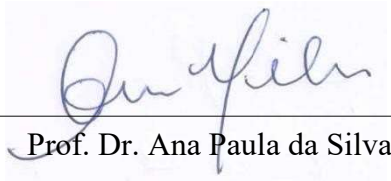
Orientador: Prof. Dr. Ana Paula da Silva Milani

CAMPO GRANDE

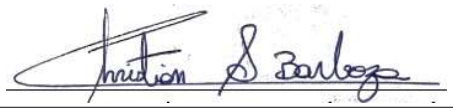
OUT / 2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

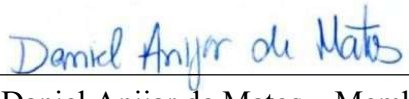
Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso defendida por **ANA PAULA FRANÇA FERREIRA**, aprovada pela Comissão Julgadora em 09 de outubro de 2020, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do titulo de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



Prof. Dr. Ana Paula da Silva Milani – Orientador



Prof. Dr. Christian Souza Barboza – Membro Titular



Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos – Membro Titular

Prof. Dr. Willy Alves de Oliveira Soler – Membro Titular

DEDICATÓRIA

Ao Luís Fernando Moreira Leão, melhor amigo, apaixonado por solos (in memoriam).

RESUMO

O solo-cimento autoadensável (SCAA) é composto pela mistura de solo, cimento, água e aditivo superplastificante e apresenta comportamento físico-mecânico adequado para a aplicação como material de construção. A falta de normas técnicas para este material torna o seu uso dificultoso, não permitindo a difusão com respaldo técnico para fabricantes e usuários. Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa é desenvolver critérios para avaliar a fluidez do SCAA para aplicação em paredes monolíticas de edificações. Para tal, foi realizada a caracterização física de variedade de solos; a dosagem das misturas de SCAA para alcance de resistência mecânica mínima; a seleção dos intervalos de fluidez das misturas de SCAA por meio do limite de liquidez dos solos e do ensaio de retração linear; e a aplicação dos ensaios físicos de Slump Test, Slump Flow e Flow Table no estado fresco das misturas de SCAA. Os resultados indicaram que os solos com características arenosas ou argilosas são compatíveis para a mistura com água+cimento+aditivo superplastificante e obtenção do material construtivo SCAA estável, sendo adequado para a determinação da autoadensabilidade do SCAA a aplicação do ensaio de Slump Flow adaptado e o parâmetro de 320 a 460mm para a abertura do diâmetro de espalhamento das misturas de SCAA.

Palavras-chaves: Terra. Autoadensável. Estado Fresco. Norma.

ABSTRACT

The self-compacting soil-cement (SCSC) is composed of the mixture of soil, cement, water and superplasticiser admixture and has a suitable physical-mechanical behavior for application as a construction material. The lack of specific standard for this material resulted in this research was to develop criteria to assess the fluidity of SCSC for application in building wall. For this purpose, were the dosage study of SCSC mixtures to achieve minimum mechanical strength; selecting the fluidity ranges of the SCSC mixtures by means of the liquid limit of soils and the linear shrinkage test, and the application of the physical tests, Slump Test, Slump Flow and Flow Table in the fresh state of SCSC mixtures. The results indicated that soils with sandy or clayey characteristics are compatible for the mixture with water+cement+superplasticiser admixture to obtain the stable construction material, which is suitable for determining the SCSC self-compaction, the application of the adapted Slump Flow test and the criteria of 320 to 460 mm for the SCSC mixtures spread diameter.

Keywords: Earth. Self-compacting. Fresh State. Standard.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação granulométrica dos solos 17
Tabela 2 - Pesquisas abordando os Limites de Atterberg e granulometria 19
Tabela 3 - Dados Técnicos do aditivo MasterGlenium ACE 409 26
Tabela 4 - Seleção dos principais ensaios a serem adotados 28
Tabela 5 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo arenoso 30
Tabela 6 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo siltoso 31
Tabela 7 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo argiloso 31
Tabela 8 - Caracterização dos solos 37
Tabela 9 - Resultado da dosagem – Solo arenoso 41
Tabela 10 - Resultado da dosagem – Solo siltoso 41
Tabela 11 - Resultado da dosagem – Solo argiloso 42
Tabela 12 – Média dos resultados do ensaio de retração 43
Tabela 13 – Resultados dos ensaios Slump Test, Slump Flow, Flow Table e resistência à compressão simples - Solo Arenoso 48
Tabela 14 – Resultados dos ensaios Slump Test, Slump Flow, Flow Table e resistência à compressão simples – Solo Argiloso 49
Tabela 15 – Solo Arenoso - ANOVA do Slump Test 63
Tabela 16 – Solo Arenoso - ANOVA do Slump Flow 63
Tabela 17 - Solo Arenoso - ANOVA do Flow Table 63
Tabela 18 - Solo Arenoso - ANOVA do Resistência a Compressão 63
Tabela 19 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Slump Test 64
Tabela 20 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Slump Flow 65
Tabela 21 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Flow Table 66
Tabela 22 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Resistência a Compressão 67
Tabela 23 - Solo Argiloso - ANOVA do Slump Test 69
Tabela 24 - Solo Argiloso - ANOVA do Slump Flow 69
Tabela 25 - Solo Argiloso - ANOVA do Flow Table 69
Tabela 26 - Solo Argiloso - ANOVA do Resistência a Compressão 69
Tabela 27 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Slump Test 70
Tabela 28 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Slump Flow 70
Tabela 29 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Flow Table 70
Tabela 30 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Resistência a Compressão 70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das técnicas de construção em terra 15
Figura 2 - Limites de consistência do solo 18
Figura 3 - Resumo dos ensaios aplicados nos principais estudos de SCAA 24
Figura 4 – Solos em estado natural 25
Figura 5 - Fluxograma esquemático da metodologia da pesquisa 27
Figura 6 – Execução do estudo de dosagem 30
Figura 7 - Caixa para ensaio da retração linear 32
Figura 8 – Cone de Abrams com dimensões reduzidas 33
Figura 9 - Coleta de dados - Slump Test (medidas em mm) 34
Figura 10 – Execução do ensaio Slump Test e Slump Flow 34
Figura 11 – Coleta de dados – Flow Table 35
Figura 12 – Execução do ensaio Flow Table 35
Figura 13 – Execução do ensaio de resistência à compressão 36
Figura 14 - Curva granulométrica - Solo arenoso 38
Figura 15 - Curva granulométrica - Solo siltoso 39
Figura 16 - Curva granulométrica – Solo argiloso 40
Figura 17 - MEV de siltes 42
Figura 18 - Intervalo de liquidez da amostra de solo arenoso 43
Figura 19 - Intervalo de liquidez da amostra de solo argiloso 44
Figura 20 - Exsudação de água na mistura 45
Figura 21 - Compilado dos resultados dos ensaios da Etapa 6 - Solo arenoso 47
Figura 22 - Compilado dos resultados dos ensaios da Etapa 6 - Solo argiloso 49
Figura 23 - Intervalo contido entre os intervalos de fluidez do solo arenoso e argiloso 51
Figura 24 – Gráfico dos resultados do ensaio de Resistência à Compressão 53
Figura 25 - Fluxograma proposta metodológica de determinação da autoadensabilidade do SCAA 56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ACI	American Concrete Institute
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BTC	Bloco de terra comprimida
CAA	Concreto autoadensável
CaO	Óxido de cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CP	Corpo de prova
CRATerre	Centre International de La Construction en Terre
CSA	Cimento sulfoaluminatos de cálcio
CSCN	Compósitos a base de cimento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de plasticidade
IF	Teor de água no intervalo de fluidez
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SCAA	Solo-cimento autoadensável
UFMS	Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 REFERENCIAL TEÓRICO 14
2.1 As técnicas de construção com terra 14
2.2 O solo como material construtivo e suas propriedades 16
2.3 Avanço do uso do solo fluido a partir de estabilizante e aditivo químico 19
2.4 Ensaios experimentais aplicados ao SCAA 21
3 MATERIAIS E MÉTODO 25
3.1 Materiais 25
3.1.1 Solos 25
3.1.2 Cimento 26
3.1.3 Aditivo 26
3.1.4 Água 26
3.2 Método 26
3.2.1 Análise e caracterização dos solos 27
3.2.2 Seleção dos principais ensaios 27
3.2.3 Estudo de dosagem 28
3.2.4 Seleção dos intervalos de fluidez do solo 31
3.2.5 Execução dos ensaios experimentais no SCAA 32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 37
4.1 Análise e caracterização dos solos 37
4.2 Estudo de dosagem 40
4.3 Seleção dos intervalos de fluidez do solo 43
4.4 Ensaios experimentais no SCAA 44
4.5 Proposta metodológica 54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 57
5.1 Sugestões para trabalhos futuros 57
REFERÊNCIAS 59
APÊNDICE A – Analise de Variância (ANOVA) do Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo arenoso 63
APÊNDICE B – Teste de Tukey para o Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo arenoso 64
APÊNDICE C – Analise de Variância (ANOVA) do Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo argiloso 69
APÊNDICE D – Teste de Tukey para o Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo argiloso 70

1 INTRODUÇÃO

De acordo com as Projeções e Estimativas da População do Brasil e das Unidades da Federação feita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 2010 a 2018 a população brasileira cresceu em mais de 13 milhões (BRASIL, 2019) e, a partir da metade da década de 1970, foi observado uma visível junção entre demografia e moradia, visto que os conceitos de habitação e população são fortemente relacionados, a população geralmente é agrupada em arranjos domiciliares e reside em unidades habitacionais (GIVISIEZ e OLIVEIRA, 2018; MYERS 1990).

Nesse contexto, o crescimento absoluto da população até o momento e o contínuo crescimento resultam em uma elevada demanda por moradias, "que corresponde à quantidade de moradias que deverão ser acrescidas ao estoque habitacional para acomodar o crescimento populacional futuro, projetado para determinado período" (GIVISIEZ e OLIVEIRA, 2018). Essa crescente demanda por habitações resulta na necessidade por eficiência e funcionalidade das mesmas, tanto em termos de desempenho relacionado a materiais e soluções técnicas, quanto a imagem arquitetônica, tendo como resultado o melhoramento do ciclo de vida da edificação e o aumento do padrão de vida do usuário (ARBIZZANI, 2012).

Torna-se necessário a definição de modelos técnicos durante a concepção do projeto, construção e manutenção do edifício a fim de otimizar as estruturas das edificações para consumir menos energia e gerar menos resíduos (ARBIZZANI, 2012). Isso indica que é importante realizar a escolha correta dos materiais de construção a fim de identificar as suas propriedades e garantir o conforto térmico no edifício (ZAKHAM *et al.*, 2018).

Na busca por alternativas de materiais construtivos mais eficientes para construção de moradias, é importante que a escolha dos materiais construtivos contribua para a redução do consumo de energia, visto que a energia utilizada para a execução e o transporte dos materiais é um fator preponderante para o baixo desempenho ambiental e do ciclo de vida da edificação (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012).

Neste contexto, surge o concreto autoadensável (CAA), composto por agregado graúdo e miúdo, estabilizante, aditivo superplastificante e água, considerado um concreto de auto desempenho que requer menos energia para a sua fabricação, pois possui a capacidade de preencher os espaços sem nenhuma intervenção mecânica, ou seja, este tipo de concreto flui pelas formas através do seu peso próprio, mantendo a homogeneidade e sem segregar. Este material é (ABNT, 2017a). Ou seja, o CAA possui alta capacidade de escoamento e menor

porosidade em relação ao concreto convencional, sendo uma boa solução em seções altamente armadas ou complexas (PEREIRA, 2010).

Análogo a este material de construção, porém adicionando o solo na mistura e excluindo os agregados, o solo-cimento autoadensável (SCAA) vem sendo estudado como alternativa de construção mais eficiente em relação ao desempenho ambiental. O SCAA é composto por solo, estabilizante cimentício, aditivo superplastificante e água, podendo conter fibras ou outras adições minerais (MILANI e SILVA, 2018). Sua consistência deve ser fluida a fim de se moldar sem a necessidade de adensamento mecânico (compactação, vibração ou prensagem) e não deve apresentar segregação ou exsudação na mistura para correta aplicação em elementos construtivos (ALCÂNTARA, 2004).

O solo como material de construção já foi estudado e comprovado quanto a sua eficácia, sendo que as vantagens do uso da terra em sistemas construtivos decorre em auxiliar na evapotranspiração da água melhor que o concreto, reduzir com os custos relacionados ao transporte, reduzir a geração de resíduos de construção (por poder ser reciclada sem prejuízo na qualidade do material), e, por fim, possuir grande capacidade de regular as temperaturas interiores dos ambientes (UDAWATTHA, GALABADA e HALWATURA, 2017; SAMEH, 2014).

De acordo com o American Concrete Institute (ACI), em sua normativa denominada ACI 229 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2013), outros termos podem ser usados para definir o SCAA como argamassa fluida, solo-cimento plástico, preenchimento fluido, preenchimento não hermético, preenchimento de densidade controlada, entre outros. Atualmente é aplicado em estacas moldadas in loco, revestimento de canais de irrigação, paredes de vedação, suporte de fundação, bases de pavimentos, suporte de tubulação, controle de erosão, preenchimento de tuneis, estruturas subterrâneas e minas desativadas.

Um dos pontos de partida para estudar o SCAA é o concreto autoadensável, sendo o processo de execução e a aplicação serem similares. Uma das atuais direções em que a pesquisa sobre CAA está orientada é a melhoria de suas propriedades, levando em consideração a aceitabilidade ambiental e sustentabilidade deste material. Isso é principalmente alcançado através do uso de misturas e adições minerais menos impactantes sobre o aspecto ambiental, como o solo, que é abordado nesta pesquisa.

De acordo com o estudo realizado por Pacheco-Torgal e Jalali (2012), o uso do solo como matéria-prima em construções não é considerado um recurso renovável, no entanto, deve-se reconhecer que é muito diferente da extração de matérias-primas convencionais onde, além da energia incorporada na extração, é utilizado transporte para leva-lo até o seu destino. A

vantagem ocorre porque, geralmente, o solo usado em sistemas construtivos como fundação e parede de edificações está localizado próximo ao ambiente de aplicação e imediatamente abaixo da camada orgânica do solo, poupando a poluição associada ao seu transporte e reduzindo a emissão de carbono decorrente de etapas de extração. Ainda se destaca, no contexto da sustentabilidade, o menor custo de energia embutida ao SCAA durante sua fabricação, pois a terra é um material mais acessível economicamente que os materiais tradicionais e o SCAA requer processos mecanizados de fácil apropriação para sua moldagem e adensamento na fabricação do produto final de construção.

No Brasil, o uso do solo é normatizado através das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a aplicação em alguns elementos construtivos, como por exemplo, em tijolos e blocos não estruturais, paredes monolíticas e sub-base e base para pavimentos (ABNT, 2013a; 2013b; 2012c), porém não há normatização brasileira ou internacional para o SCAA. Desta forma, os estudos aplicados ao SCAA são adaptações das normativas e experimentos utilizados no solo-cimento compactado, concreto autoadensável e argamassa cimentícia. Porém, é necessário padronizar os ensaios para que seja realizada uma correlação entre resultados de diferentes pesquisas.

Um dos pontos de partida para a produção do SCAA é a dosagem de aditivo e de água para o material solo atingir a consistência fluida desejada, ou seja, necessita realizar um estudo de dosagem para a determinação da autoadensabilidade do SCAA no estado fresco. Nesta frente de definição de critérios das condições ideais de fluidez do SCAA para aplicação como material de construção, Alcântara, Nunes e Rio (2014) encontraram valores para o ensaio de espalhamento do SCAA (Slump Flow) entre 207 e 333 mm; Arooz e Halwatura (2018) realizaram o mesmo ensaio em solos argilosos e obtiveram resultado de 510 mm, relatando ser ideal para a aplicação em blocos; enquanto Kanadasan *et al.* (2015) encontraram parâmetros entre 250 e 300 mm. Sheen et al. (2014) determinaram que o parâmetro ideal para o Slump Flow é 400 mm, sendo nessa pesquisa o cimento substituído por escória.

Observa-se que não existe uma padronização sobre os parâmetros de autoadensabilidade do SCAA, o que mostra a necessidade de um estudo para determiná-los. A falta de normativa torna o seu uso dificultoso, não permitindo a utilização do material de forma eficaz, podendo gerar consequências para fabricantes e usuários do produto. Deste modo, nota-se a importância deste estudo experimental, tendo como produto final a identificação de parâmetros para avaliá-lo e a contribuição com a disseminação do uso deste material com respaldo técnico-científico.

Diante deste entendimento, leva-se ao seguinte questionamento: Quais são os parâmetros mínimos para considerar o solo-cimento como autoadensável ou fluido para aplicação em paredes monolíticas de edificações?

Dessa forma, o **objetivo geral** desta pesquisa foi desenvolver critérios para avaliar a fluidez do solo-cimento autoadensável (SCAA) para aplicação em paredes monolíticas de edificações. Para complementar, o **objetivo específico** foi identificar os mais adequados ensaios físicos a serem aplicados em misturas de SCAA para sua caracterização no estado fresco.

Para atingir os objetivos propostos acima, este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, onde foi obtido em forma de revisão bibliográfica reunindo as pesquisas científicas mais relevantes relacionadas ao tema; no capítulo 3 foram descritos os materiais e métodos que permitiram responder a problemática e alcançar os objetivos já anunciados; posteriormente os resultados e discussões, as referências bibliográficas utilizadas no decorrer desta pesquisa cientifica e, por fim, os apêndices.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicia-se este estudo apresentando a evolução das técnicas de construção com terra e abordando o solo como material construtivo, seguido pelas propriedades físico-mecânicas e seu comportamento. Por fim, foi abordado o avanço do sistema solo+água com o uso do cimento e aditivos químicos e os ensaios laboratoriais existentes na literatura para caracterização e aplicação em elementos construtivos.

2.1 As técnicas de construção com terra

Acredita-se que um terço da humanidade vive em casas de terra e nos países em desenvolvimento essa proporção pode superar 50% da população, o que explica a associação com construções de baixo custo. As técnicas de construção com terra datam de cerca de 9.000 anos atrás (MINKE, 2005). Este tipo de construção pode ser encontrado na maioria dos períodos da história mundial, sendo que os blocos mais antigos encontrados datam de 7500 a.C. na bacia do Tigre (BERGE, 2009).

De acordo com Pacheco-Torgal e Jalali (2012), as construções em terra existem desde as primeiras sociedades agrícolas e atualmente a maioria delas está localizada em países menos desenvolvidos. Porém, esse tipo de construção também pode ser encontrado nos países desenvolvidos, onde uma crescente conscientização ambiental sobre a importância deste tipo de construção pode ser testemunhada atualmente.

Vários sistemas construtivos que possuem o solo (terra) como matéria prima são utilizados desde os primórdios, por exemplo: terra batida (taipa), terra ensacada, bloco de terra compactado (BTC), pau-a-pique, adobe, terra plástica, entre outros (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012).

A Associação CRATerre[1], no Tratado de Construção em Terra de 1989, realizou uma classificação das técnicas de construção baseadas em terra crua, conforme apresentado na Figura 1. Essa figura apresenta 18 sistemas divididos em 3 categorias: monolítica (A), alvenaria (B) e enchimento/revestimento de estrutura suporte (C) (HOUBEN e GUILLAUD, 1989).

[1] CRAterre é uma Associação e um laboratório de investigação da l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, que reúne investigadores, profissionais e professores, e trabalha com muitos parceiros, o que permite estabelecer ligações criativas entre investigação, ações de campo, formação e divulgação de conhecimentos (Traduzido a partir de http://craterre.org/).

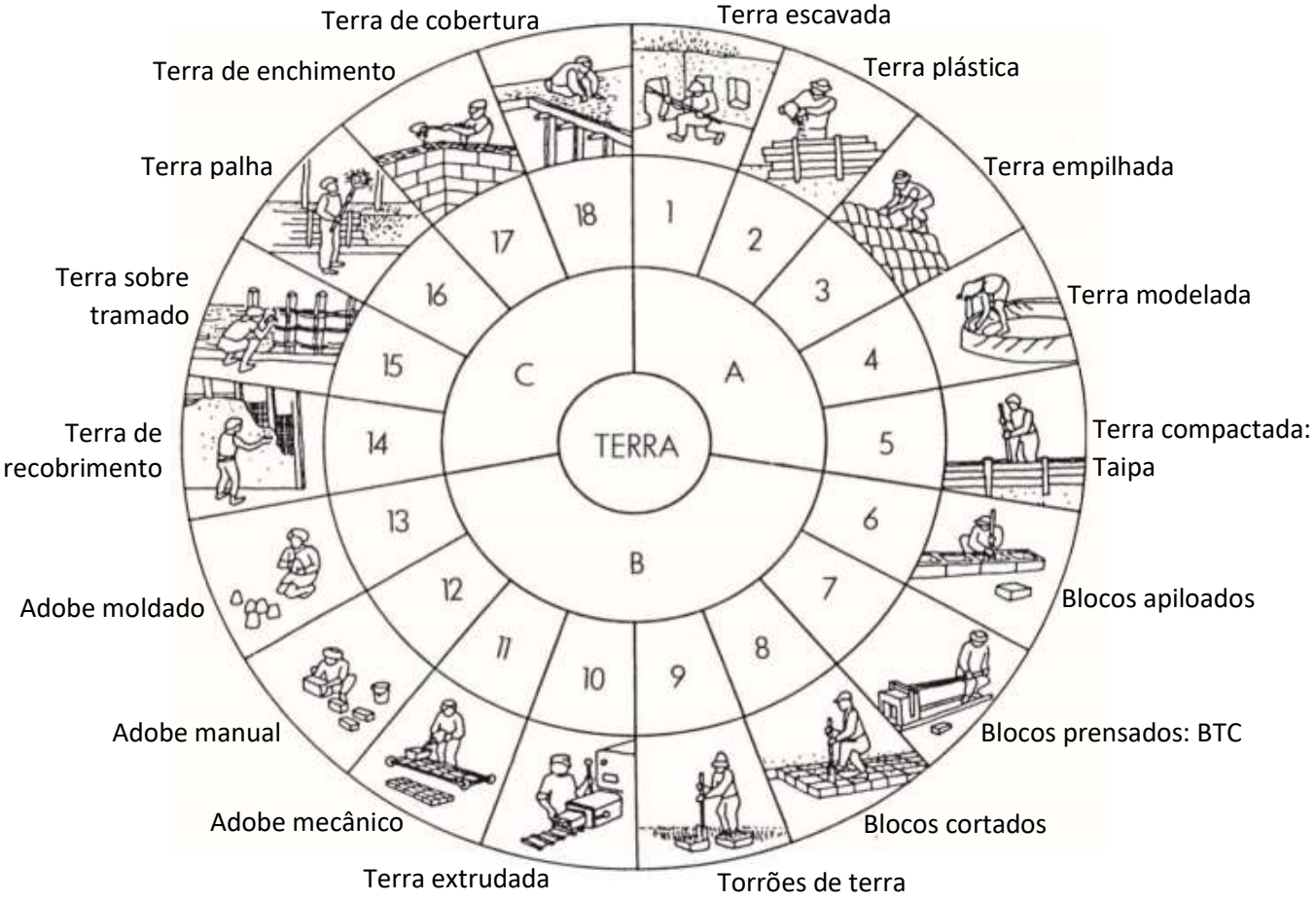


Figura 1 – Diagrama das técnicas de construção em terra
Fonte: Adaptado de HOUBEN e GUILLAUD (1989)

A categoria preponderante para aplicação do SCAA como elemento construtivo é o sistema construtivo monolítico, correspondendo uma estrutura contínua que funciona como um elemento único. Especificamente, o sistema n° 2 (terra plástica), consiste em terra no estado plástico/fluido aplicado dentro de um molde de cofragem a fim de elevar paredes ou construir pavimentos (FERREIRA, 2015). Este sistema foi bastante utilizado em construções do período posterior a segunda guerra mundial e se caracterizava por possuir grande problema de retração devido a elevada quantidade de água.

Porém, o sistema construtivo monolítico com terra plástica vem sendo novamente experimentado, mas dessa vez utilizando menor quantidade de água a partir da adição de estabilizante e aditivo químico (CORREIA e JORGE, 2006). As principais vantagens do sistema parede monolítica de SCAA são: a eliminação da compactação da terra dentro do sistema de fôrmas; e a menor quantidade de água na mistura de solo+estabilizante cimentício+água+aditivo superplastificante, o que irá controlar a separação dos componentes do solo por densidade e o aparecimento de fissuras de retração nas estruturas (FERREIRA, 2015).

2.2 O solo como material construtivo e suas propriedades

A arquitetura em terra é caracterizada pelo desenvolvimento sustentável, limitando o consumo de recursos não renováveis e conservando o meio ambiente. Este método geralmente utiliza de materiais locais, o que possibilita custos reduzidos de construção, manutenção e operação (SAMEH, 2014).

Ainda de acordo com o autor, as principais barreiras contra a promoção da arquitetura e construção com terra são a falta de consciência ambiental e, consequentemente, a falta de nicho de construções sustentáveis. Atualmente as técnicas deste tipo de construção estão sob forte desenvolvimento, isso se deve pelas preocupações ambientais, apelo social e menores impactos econômicos, e sob esta ótica, o solo se torna uma alternativa eficiente no setor da construção.

O solo em sua fase mineral, composto pelas frações de areia, silte e argila, é adequado para qualquer construção com terra, devendo-se excluir a parte orgânica geralmente presente na superfície (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012).

De acordo com Neves et al. (2010), o solo é definido como:

> todo material da crosta terrestre, proveniente da decomposição de rochas, constituído por elementos minerais e/ou orgânicos, que dependem da composição química e mineral da rocha de origem, das características do relevo, dos diferentes climas e do tempo de exposição às intempéries (Neves *et al.*, 2010, p. 6).

As frações dos solos recebem nomenclatura de acordo com as dimensões, sendo que a escala brasileira delimita em: argila, silte, areia e pedregulho (ABNT, 1995). Dessa forma, se faz necessário realizar o esclarecimento sobre a classificação dos solos e a influência destes materiais no comportamento dos mesmos.

A composição granulométrica ou classificação granulométrica dos solos é a "classificação de solos segundo as dimensões dos seus grãos ou partículas e suas diferentes percentagens de ocorrência" (ABNT, 1995). A forma de representar a composição granulométrica de um solo é através da curva de distribuição granulométrica, mostrando a relação entre a dimensão das partículas e suas quantidades (NEVES et al., 2010). A partir desta relação, pode-se realizar a classificação do solo.

A ABNT NBR 6502 (ABNT, 1995) define a classificação do solo de acordo com a dimensão das partículas, em que é resumido na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação granulométrica dos solos

Classificação	Dimensão das partículas (mm)	Observações
Argila	< 0,002	Solo de granulação fina, apresentando coesão e plasticidade
Silte	Entre 0,002 e 0,06	Este solo apresenta baixa resistência quando seco e possui quase ou nenhuma plasticidade.
Areia	Entre 0,06 e 2,0	Pode ser classificada como fina, média ou grossa, não é coesiva e não plástica
Pedregulho	Entre 2,0 e 60	Classificado como fino, médio ou grosso, quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalho ou seixo.

Fonte: ABNT (1995)

Tanto a estrutura morfológica dos grãos do solo quanto sua composição química influenciam as propriedades do solo como coesão e plasticidade. A argila presente no solo, por exemplo, é o elemento fundamental a contribuir com a plasticidade, inclusive ela pode ser adicionada para ajustar a consistência dos solos quando se fizer necessário para melhor aplicação em determinada técnica de construção com terra (CERNY, KOCIANOVA e DIEDERICHS, 2017).

Vários tipos de solos podem ser usados para compor o SCAA, porém é imprescindível que o solo possua a presença de finos para atingir a fluidez. Berté (2012) utilizou um solo predominantemente arenoso em sua pesquisa, contendo 32,3% de argila, 11,4% de silte e 56,3% de areia. Por sua vez, Ouellet-Plamondon e Habert (2016) utilizaram um solo com 55% de finos (argila + silte) e 45% de areia, sendo um solo de composição majoritária de argila.

Em um estudo realizado por Helson *et al.* (2017), foi estudada a influência da quantidade de cimento e argila em dosagens de solo-cimento autoadensável, sendo adicionado 0, 5, 10, 15, 25 e 50% de argila e 200 e 300 kg/m³ de cimento. Foi concluído que a porosidade da mistura de solo-cimento varia entre 28 e 60% em função das variáveis, indicando que quanto maior a quantidade de argila, maior a quantidade de água necessária para obter a mesma consistência.

Assim, a mistura deve ser suficientemente fluida para ser autoadensável, porém quando possui um alto teor de argila implicará também em um alto teor de água, pois a argila contém uma grande área específica decorrente da sua dimensão, dessa forma, retém mais água em sua estrutura, gerando uma elevada porosidade capilar e menor resistência a compressão (HELSON *et al.*, 2017).

Existe um limite mínimo de água para a fluidificação dos siltes e argilas presentes no solo para ocorrer cisalhamento entre as partículas, e este limite citado deve estar de acordo com o limite de liquidez (LL) do solo, ou seja, o LL é a quantidade de água necessária permitindo que os finos se tornem viscosos (MILANI e BARBOZA, 2016; MILANI e SILVA, 2018).

Cerny, Kocianova e Diederichs (2017) afirmam que o parâmetro mais importante a ser avaliado em uma mistura de solo fluido é o LL e o módulo de deformação, sendo a partir do LL que o solo pode ser classificado de acordo com a plasticidade e o módulo de deformação determina a capacidade de compressão do solo.

A plasticidade do solo é definida pela capacidade de moldagem do solo e pelo grau de umidade, determinados pelos ensaios de Atterberg, podendo o solo ser sólido, plástico ou líquido (CAPUTO, 1996). A Figura 2 representa os estados do solo de acordo com o grau de umidade, ou seja, os limites de consistência, em que LC o limite de contração, LP o limite de plasticidade e LL indica o Limite de Liquidez.

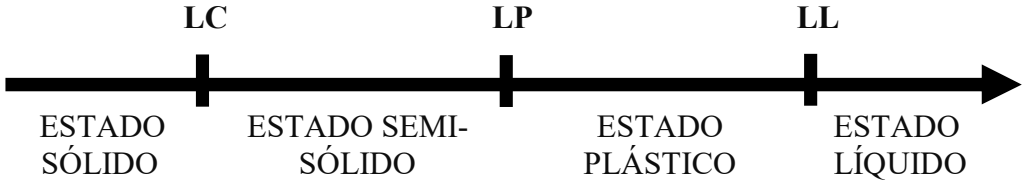


Figura 2 - Limites de consistência do solo
Fonte: Adaptado de CAPUTO (1996)

O LL, por definição, é o teor de umidade que permite que sulco de 1 centímetro realizado no Aparelho de Casagrande se feche com 25 golpes. Já o LP determina a porcentagem de umidade a qual o solo começa a fraturar, este ensaio é manual, diferente do primeiro. Por fim, o LC é o teor de umidade em que o solo não mais se contrai (CAPUTO, 1996). O tipo e a quantidade de argila presentes do solo influenciam no LL e LP, porém somente a quantidade de argila influencia no Índice de plasticidade (IP). O IP corresponde à diferença entre o LL e o LP, ou seja, é o teor de água necessário para o solo passar do estado plástico para o líquido, consistindo na capacidade do solo em sofrer uma deformação de forma irreversível e ainda resistir ao carregamento (MANIATIDIS e WALKER, 2003).

A Tabela 2 mostra os Limites de Atterberg e a granulometria de diferentes solos em pesquisas:

Tabela 2 - Pesquisas abordando os Limites de Atterberg e granulometria

Pesquisa	Limites de Atterberg			Granulometria		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Finos Argila + Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Berté (2012)	25,4	17,8	7,6	43,7	56,3	0
Martins (2014)	34	16,4	17,6	35	62	3
Milani e Barboza (2016)	45	27	18	23	77	0
Milani e Silva (2018)	41	18	23	58	42	0

Fonte: Adaptado de Berté (2012), Martins (2014), Milani e Barboza (2016) e Milani e Silva (2018)

Na pesquisa de Berté (2012) foi concluído que todas as misturas atingiram a resistência mínima exigida pela normatização de solo-cimento e que a trabalhabilidade ocorreu em função do fator água/cimento e água/cimento + solo. Martins (2014) realizou a dosagem e obteve uma relação água/solo ideal de 34,47% (valor próximo ao LL do solo) e concluiu que é o valor ideal para atingir a resistência prevista em um modelo computacional. Por sua vez, Milani e Barboza (2016) relatam que é importante considerar a relação água/solo para adquirir fluidez e características mecânicas mínimas para aplicação como material de construção, ainda ressaltam que a diminuição da água ao adicionar o aditivo superplastificante deve levar em conta os Limites de Atterberg do solo em questão. Por fim, Milani e Silva (2018) utilizam em sua pesquisa um solo que contém finos na maior proporção, sendo caracterizado como solo argiloso, e conclui que o comportamento físico-mecânico é compatível com as técnicas para solo-cimento autoadensável, utilizando 42% de água, ou seja, valor próximo ao LL do solo.

2.3 Avanço do uso do solo fluido a partir de estabilizante e aditivo químico

O avanço tecnológico no produto solo fluido vem por meio do uso de estabilizantes cimentícios e aditivos químicos. Assim, dentro do sistema SCAA, tem-se que a água presente na mistura atua como um agente de fluidificação, o estabilizante como um agente de viscosidade e o aditivo superplastificante acarreta maior mobilidade às massas e controle da ocorrência de segregação e exsudação (BERTÉ e ALCANTANA, 2013).

A estabilização cimentícia do solo fluido implica em alterar as suas características, melhorando a trabalhabilidade do solo no estado fresco, como também ajustar as propriedades do solo no estado endurecido para atender a certos requisitos mecânicos quando aplicados como material de construção (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; CERNY, KOCIANOVA e DIEDERICHS, 2017).

De acordo com Zakham *et al.* (2018), a inserção de agentes cimentícios no solo fluido deve corresponder a uma adição mínima a ser usada para o material específico, pois, de fato, o teor ótimo de estabilizante corresponde ao limite do investimento econômico e ambiental do

produto final SCAA. Assim, mesmo que o agente cimentício seja um material que aumente a energia incorporada ao SCAA na etapa de fabricação do elemento construtivo, este estabilizante pode ser equalizado no quesito uso e manutenção em uma análise de ciclo de vida do sistema construtivo de SCAA, visto que acarretará na maior durabilidade do SCAA quando aplicado em uma edificação.

O cimento Portland é o cimento mais utilizado para a estabilização do SCAA. No entanto, outros agentes cimentícios também podem ser utilizados associados ou em substituição ao cimento Portland, como o sulfoaluminatos de cálcio, silicato de sódio, cinza de casca de arroz, metacaulinita, CHIII (cal) e escória de alto forno.

Llajaruna (2017) utilizou o cimento CP V-ARI visando obter desforma rápida durante a fabricação de tijolos de SCAA. Claverie e Alcântara (2017) empregaram em sua pesquisa diferentes dosagens do cimento CP II-Z 32 combinados com cinza de casca de arroz e cal hidratada CH III, encontrando melhores resultados na resistência mecânica final do SCAA com a adição de 10% de cinza de casca de arroz, apesar de comprometer a trabalhabilidade da mistura.

Martins (2014) optou por incorporar o cimento CP II-F-32, cinza volante e metacaulinita em seu experimento para obtenção de SCAA com fibras de sisal, com o objetivo de reduzir a degradação dessas fibras naturais causada pelo hidróxido de cálcio gerado no processo de hidratação do cimento.

Buscando economia e redução do impacto ambiental, Ma, Cheng e Cheng (2016) fizeram a suplementação do composto cimentante com materiais que acarretam reações pozolânicas para melhor estabilizar o SCAA. Dessa forma, foi utilizada uma mistura de compósitos a base de cimento denominada CSCN, composta por 62,5% de cimento Portland, 12,5% de silicato de sódio e 25% de hidróxido de sódio e cloreto de cálcio.

Ouellet-Plamondon e Habert (2016) utilizaram em seu trabalho cimento sulfoaluminatos de cálcio (CSA) como agente cimentante do SCAA, tratando-se de um cimento comercial com ganho de resistência acelerada e menor impacto ambiental. O referido autor utilizou dosagens de 5% em relação a massa de solo, atingindo bons resultados de trabalhabilidade e resistência à compressão axial superior a 1,0 MPa.

Quanto ao aditivo superplastificante, de acordo com Milani e Silva (2018), para misturas de SCAA é imprescindível o seu uso, pois possui a finalidade de diminuir a quantidade de água do SCAA, permitindo boa fluidez no seu estado fresco e, consequentemente, menor porosidade e maiores resistências mecânicas do SCAA endurecido.

O funcionamento dos superplastificantes a base de lignossulfonatos, melanina e naftalenosulfonatos mostrou-se eficaz para o SCAA no estudo de Cristelo et al, (2012). Estes autores utilizaram o aditivo Rheobuild 1000, produzido pela BASF®, cujo funcionamento se dá através da repulsão eletrostática nas partículas do cimento, aumentando assim a fluidez e reduzindo a água da mistura.

Os superplastificantes à base de policarboxilatos (PC) são eficazes para aplicação no SCAA e atuam por mecanismos de repulsão eletrostática e estérica nas partículas de cimento. Diversos autores utilizaram aditivos de mesma base, por exemplo: ViscoFlow 20 (CLAVERIE e ALCÂNTARA, 2017), Plastol 4100 e Master Glenium 51 (MILANI e BARBOZA, 2016), Glenium 51 (MARTINS, 2014), Viscocrete 3082 (OUELLET-PLAMONDON e HABERT, 2016), Viscocrete CB 3535 (LLAJARUNA, 2017; BERTÉ e ALCÂNTARA, 2013).

Os resultados da pesquisa realizada por Milani e Silva (2018) mostraram que, independente do solo utilizado, a adição de aditivo superplastificante à base de policarboxilatos nas misturas de SCAA proporciona fluidez, mobilidade, controle de segregação e de exsudação na mistura, sendo ideal a utilização na faixa de 0,8 a 1,6% e mínima relação água/cimento.

Um estudo realizado por Helson *et al.* (2017), em que não se utiliza superplastificante na mistura SCAA, concluíram que para obter uma consistência fluida do solo necessitou um elevado teor de água para adquirir a fluidez desejada, resultando em uma grande quantidade de ar aprisionado e, consequentemente, alta porosidade e baixa densidade.

2.4 Ensaios experimentais aplicados ao SCAA

Os autores que serão apresentados nesta seção realizaram pesquisas que resultaram na autoadensabilidade do solo-cimento, sendo utilizado diferentes composições, dosagens e tipos de materiais na mistura.

i. Alcântara, Nunes e Rio (2014) utilizaram solo residual da região de Porto (Portugal), cimento Portland CEM I, superplastificante de ação estérica e eletrostática e água, sendo para aplicação em argamassas e concretos autoadensáveis;
ii. Arooz e Halwatura (2018) utilizaram solo arenoso, cimento Portland não especificado e água, sendo para aplicação em blocos de alvenaria;
iii. Her-Yung (2009) utilizou solo siltoso, cinzas volantes, escória, cimento Portland CEM I, superplastificante não especificado e água, sendo para aplicação em concreto autoadensável com agregado leve;

iv. Sheen et al. (2014) utilizaram solo areno-argiloso, agregado, escória, cimento Portland CEM I e água, a fim de utilizar a escória para substituir o cimento, e;

v. Ouellet-Plamondon e Habert (2016) utilizaram solo com 55% de finos, cimento de sulfoaluminatos de cálcio (CSA) superplastificante a base de policarboxilato e água, sendo para aplicação em concreto de argila autoadensável.

Alcântara, Nunes e Rio (2014) realizaram ensaios no estado fresco do SCAA, o qual procuraram avaliar o desempenho do material em escoamento livre por meio do Teste Slump Flow, e o escoamento confinado por meio do ensaio V-funil. Os ensaios no estado endurecido também foram realizados a fim de avaliar a resistência a flexão e a compressão simples do SCAA. Os resultados obtidos por estes pesquisadores foram diâmetros de espalhamento do SCAA entre 207 e 333 mm para o Slump Flow e o tempo de escoamento de 1,53s a 3,43s para o V-Funil. Quanto aos ensaios no estado endurecido, obtiveram entre 1,239 MPa e 3,181 MPa e 2,704 MPa e 6,492 MPa para resistência a flexão e compressão aos 28 dias, respectivamente. As faixas de resistência desta pesquisa se justificam pela variação de dosagem realizada para avaliar a influência dos agentes fluidificantes (água e superplastificante) e de viscosidade (cimento e solo). Ainda, Alcântara, Nunes e Rio (2014) observaram que o diâmetro do espalhamento referente ao ensaio Slump Flow variou conforme a quantidade de água, cimento e superplastificante na mistura, demonstrando e confirmando ser a água e o superplastificante os agentes fluidificantes e o solo o agente de coesão. Outra consideração dos referidos autores foi sobre a superfície de espalhamento do SCAA, em que se apresentaram homogêneas, sem a presença de ninhos de concentração, irregularidades na altura ou na distribuição do material e, também, sem apresentar halos d'água que seriam indicativos de segregação.

Na pesquisa dos autores Arooz e Halwatura (2018) foram realizados os ensaios de Slump Flow, Flow Table e Slump Test, no estado fresco do SCAA; e o ensaio de compressão simples e o Teste de erosão acelerada, no estado endurecido do SCAA. Os resultados obtidos para o Slump Flow foi o diâmetro de 510 mm, para o Flow Table foi o espalhamento de 500 mm e para o Slump Test foi a altura de 173 mm. No estado endurecido encontrou-se o valor de 8 MPa para a resistência a compressão aos 28 dias, e para o Teste de erosão acelerada foi determinado que a durabilidade satisfaz a exigências estabelecidas pela norma adotada no estudo. Por sua vez, Arooz e Halwatua (2018) afirmam ser o espalhamento de 500 mm o ideal para obter um SCAA, e dessa forma, utilizam deste ponto de partida para encontrar a melhor dosagem. Após verificar a quantidade ideal de água para atingir este critério, foram variadas as quantidades de finos, areia e cascalho, para atingir a maior resistência a compressão do SCAA. Os referidos autores concluíram que a porcentagem ideal é de 4% de cimento, menos de 10%

de finos, 55 a 60% de areia, 30 a 35% de cascalho e 18 a 20% de água, visto que a elevação do percentual de finos, diminuiu a resistência a compressão do SCAA.

Her-Yung (2009) realizou ensaios de penetração de cloreto, resistividade elétrica e solução de sulfeto de sódio no SCAA, por se tratar de solo retirado de reservatórios. Porém, anterior a estes ensaios foram realizados os ensaios de Slump Test, Slump Flow e resistência à compressão simples, resultando, respectivamente, nos valores de espalhamento do SCAA em 260 mm a 270 mm e 510 mm a 580 mm; e resistência mecânica entre 2 a 15 MPa, aos 7 dias.

Os ensaios de Slump Flow, Slump Test, Tube Flow e resistência a compressão simples aos 28 dias foram realizados por Sheen *et al.* (2014) para caracterização do SCAA, obtendo resultados de espalhamento entre 605 mm e 864 mm, 250 mm e 290 mm, 240 mm e 300mm e 0,42 MPa e 0,81 MPa, respectivamente. Estes mesmos autores citam que o ideal para os três primeiros ensaios no estado fresco, de acordo com a orientação da ACI sobre Materiais controlados de baixa resistência (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2013) são os valores de 400 mm, 200 mm e 200 mm, respectivamente. Sheen *et al.* (2014) definiram as relações entre água/ligante a partir de alguns ensaios de trabalhabilidade a fim de atender entre 200 mm e 300 mm de espalhamento, onde foi definido usar 3,4%; 3,6% e 3,8% como ponto de partida para avaliar a quantidade de cimento e escória que seriam adicionadas.

Ouellet-Plamondon e Habert (2016) aplicaram o ensaio de Slump Test no estado fresco do SCAA, a fim de obter os parâmetros para o cálculo da tensão de escoamento, e paralelamente aplicou o ensaio de compressão simples no estado endurecido do SCAA. A tensão de escoamento variou conforme a adição de CSA e superplastificante, atingindo entre 0 Pa e 1400 Pa. O ensaio de resistência a compressão atingiu resistência de 1,5 MPa a 6 MPa, de acordo com o teor de CSA incorporado. Ouellet-Plamondon e Habert (2016) tiveram como ponto de partida para o estudo de dosagem a variável trabalhabilidade e, consequentemente, a tensão de escoamento (sendo esta calculada a partir da trabalhabilidade), em que descrevem ser ideal este parâmetro estar entre 200 Pa e 500 Pa. Em relação a resistência a compressão, o critério de avaliação das misturas de SCAA é atingir 1 MPa em 24h, para permitir a retirada das fôrmas quando for moldada uma peça.

Na Figura 3 segue um resumo dos principais ensaios apresentados acima, sendo constatado que não existe um parâmetro a ser seguido entre os ensaios mencionados para a produção específica do SCAA, a qual cada pesquisador estabelece um valor ideal ou um critério de acordo com as seguintes situações: tipos de materiais utilizados no estudo de dosagem do SCAA, caracterização do SCAA a partir de analogias com ensaios para concretos autoadensáveis e argamassas cimentícias, definição do SCAA a partir do potencial e limitações

do seu uso e aplicação em sistemas construtivos. Isso corrobora com a falta de diretrizes para os ensaios de caracterização do SCAA e por consequência a dificuldade de padronização para atestar a autoadensabilidade do solo-cimento.

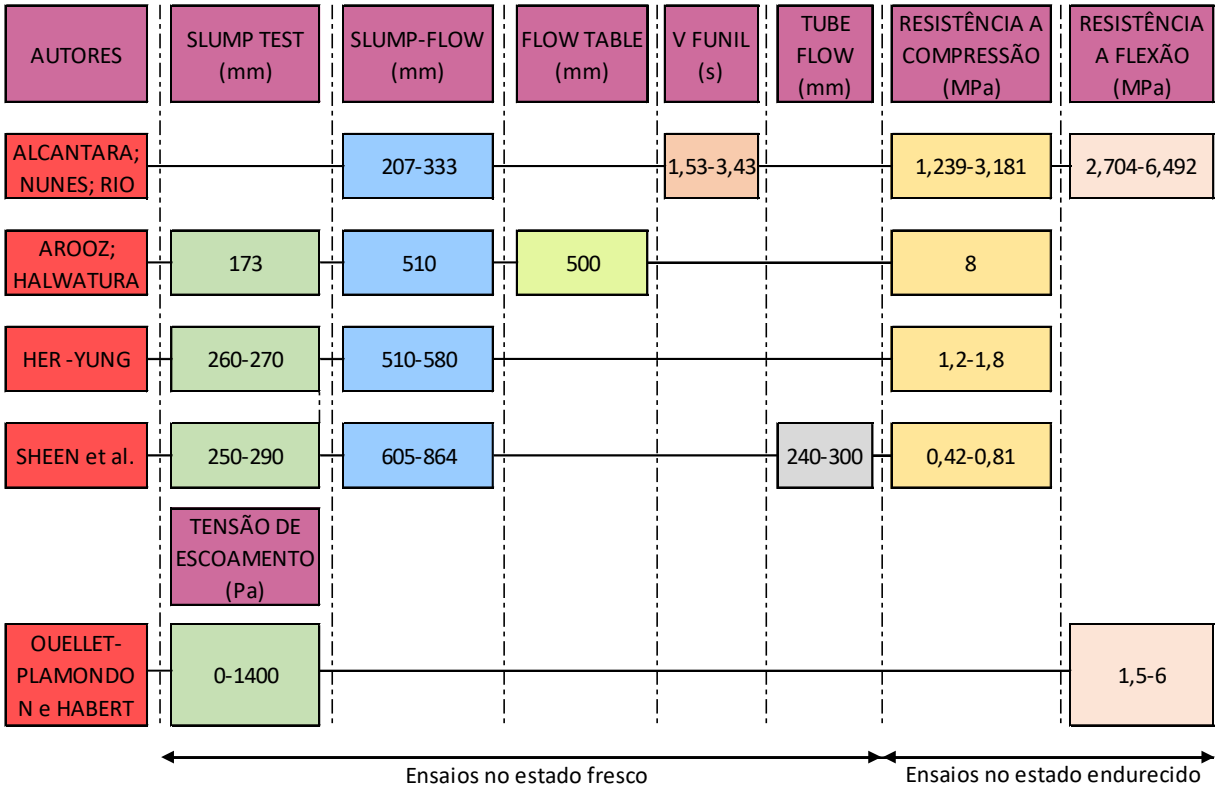


Figura 3 - Resumo dos ensaios aplicados nos principais estudos de SCAA
Fonte: Próprio autor (2020), a partir de ALCÂNTARA, NUNES e RIO (2014); AROOZ e HALWATURA (2018) HER-YUNG (2009); SHEEN et al. (2014) e OUELLET-PLAMONDON e HABERT (2016)

.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo são apresentados os materiais e procedimentos, os quais foram seguidos para atingir os objetivos. Os resultados obtidos dos ensaios experimentais foram coletados e tabulados para posterior parametrização com o propósito de alcançar critérios que permitam avaliar a autoadensabilidade do solo-cimento.

3.1 Materiais

3.1.1 Solos

Os solos empregados na pesquisa foram extraídos da cidade de Campo Grande/MS, intitulados conforme a predominância de partículas: solo arenoso, solo siltoso e solo argiloso, com a expectativa de analisar a influência das características de cada tipo de solo nos resultados da autoadensabilidade. A Figura 4 contém imagens dos solos em estado natural.

a) Solo arenoso

b) Solo siltoso

c) Solo argiloso

Figura 4 – Solos em estado natural

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland CP II Z 32 da marca Itaú, sendo o cimento considerado de aplicação geral. O tipo de cimento escolhido não influencia no processo de análise dos dados, visto que não será um teor variável para análise do SCAA desta pesquisa.

3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado é de composição química a base de policarboxilato, denominado MasterGlenium ACE 409 do fabricante BASF S.A (Tabela 3). Foi adotado pela disponibilidade no mercado local e eficácia na aplicação em concreto autoadensável e solo-cimento autoadensável, atuando como dispersante do material aglomerante e proporcionando a redução de água incorporada.

3.1.4 Água

Utilizou-se da água de abastecimento urbano da cidade de Campo Grande/MS, fornecida pela empresa concessionária de água e esgoto Águas Guariroba (Tabela 3).

Tabela 3 - Dados Técnicos do aditivo e da Água de abastecimento urbano

Aditivo MasterGlenium ACE 409	
Característica	Valor
pH	5,95
Densidade (g/cm³)	1,068
Teor de Sólidos (%)	31,56
Dosagem (%)	0,2 a 1,2% em relação ao peso do cimento
Água de abastecimento urbano	
Característica	Valor (mínimo / médio / máximo)
Turbidez (uT)	<1 / <1 / 2,7
Cloro residual livre	< 0,2 / 0,7 / 2,2
Cor aparente	<10 / <10 / 19
pH	4,8 / 6,9 / 8,3
Coliformes	Ausente / Ausente / Presente

Fonte: Certificado de análise BASF S.A. e da Águas Guariroba

3.2 Método

A presente pesquisa ocorreu em seis etapas: (1) Análise e caracterização dos solos, (2) Pesquisas bibliográficas selecionando os principais ensaios aplicados ao SCAA, (3) Dosagem do SCAA para definição de traço referência, (4) seleção dos intervalos de fluidez para cada solo, (5) Realização dos ensaios experimentais nas misturas de SCAA e, por fim, (6) Análise estatística para obter as faixas de tolerância de liquidez do SCAA e as correspondentes correlações entre os ensaios laboratoriais. A seguir o fluxograma da metodologia é esquematizado na Figura 5.

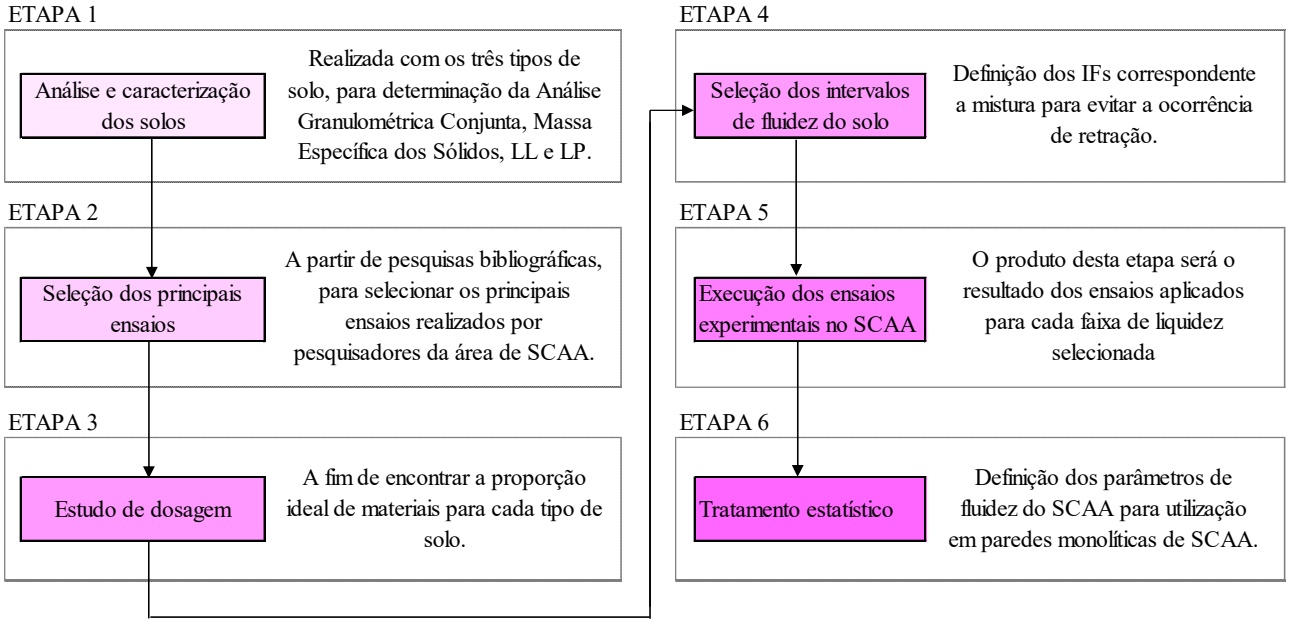


Figura 5 - Fluxograma esquemático da metodologia da pesquisa

3.2.1 Análise e caracterização dos solos

Para realizar a caracterização dos solos escolhidos, foi executado o estudo de Análise Granulométrica Conjunta (granulometria e sedimentação), regulamentado pela ANBT NBR 7181/2018, pois os solos possuem em sua composição grande parcela de materiais finos e se fez necessário caracterizá-los. Posteriormente, foi realizado o ensaio de massa específica dos sólidos, conforme a ABNT NM 6458/2016 necessário para o procedimento de cálculo que determina a curva granulométrica e, por fim, foram realizados o Limite de Liquidez (ABNT, 2016b) e de Plasticidade (ABNT, 2016c).

De acordo com as características dos solos coletados, foi realizada a classificação de acordo com a AASHTO, em que utiliza a porcentagem passante nas peneiras (obtido no ensaio de granulometria), LL e LP para nomear os tipos de solos.

3.2.2 Seleção dos principais ensaios

Foram realizadas pesquisas bibliográficas via Portal Periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a fim de selecionar os principais ensaios laboratoriais realizados por pesquisadores na área de SCAA. A primeira seleção dos artigos foi realizada a partir do filtro de pesquisa limitando o período entre 2007 e 2017, utilizando os termos “soil* cement* and self* compacting*”, a pesquisa totalizou 56 artigos. A segunda seleção foi a partir da leitura completa dos artigos, em que foram selecionadas apenas

10 pesquisas relevantes, consistindo na definição de quais ensaios foram adotados para seguir com os estudos (Tabela 4).

Tabela 4 - Seleção dos principais ensaios a serem adotados

Ensaio	Finalidade
Slump Test	Determinação da medida de assentamento/abatimento do material no estado fresco (ABNT, 1998).
Slump Flow	Determinação e avaliação da fluidez no estado fresco, em fluxo livre, sob ação do seu peso próprio (ABNT, 2017b).
Flow Table	Especificação do índice de consistência da argamassa em estado fresco (ABNT, 2016e), a fim de determinar a relação entre água e materiais secos.
Resistência à Compressão Simples	Ensaio no estado endurecido, a fim de determinar o quanto o material resiste quando submetido a compressão (ABNT, 2012b).

Fonte: (ABNT, 1998), (ABNT, 2017b), (ABNT, 2016e) e (ABNT, 2012b).

3.2.3 Estudo de dosagem

Foi realizado o estudo de dosagem para escolha do traço referência de SCAA para cada tipo de solo e posterior aplicação das demais etapas do método de pesquisa. Dessa forma, foram adotados percentuais de aditivos e proporção de solo/cimento com base na experiência de moldagem de prismas de SCAA no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC da UFMS e estudos de dosagens que tinham como objetivo aplicação do SCAA em paredes monolíticas, como por exemplo em Barboza (2014), Milani e Barboza (2016) e Milani e Silva (2018).

Levou-se em conta alguns fatores preponderantes para a escolha do traço referência: adotou-se inicialmente o espalhamento entre 660 a 750 mm, pois de acordo com a ABNT NBR 15823-2/2017 este é o intervalo exigido para a aplicação do concreto autoadensável em paredes monolíticas de concreto, sistema construtivo análogo à parede monolítica de SCAA; o segundo critério foi que a resistência aos 7 dias deveria ser maior que 1 MPa, visto que esta é uma exigência da ABNT NBR 13553/2012 para paredes monolíticas de solo-cimento compactado e; por fim, seria escolhido a dosagem que tivesse maior quantidade de solo e menor quantidade de aditivo. Esses critérios foram usados como ponto de partida, visto que ainda não existem procedimentos normatizados para o SCAA.

Primeiramente o solo foi seco ao ar e peneirado (Figura 6a), posteriormente, partiu-se do traço 1:8 em massa com 0,8 e 1,2% de aditivo em relação a quantidade de cimento, para todos os solos. O solo e o cimento foram pesados nas devidas proporções e misturados de forma manual (Figura 6b). Após homogeneizados, este material era adicionado aos poucos no

misturador (mostrado na Figura 6c) juntamente com uma quantidade de água inicial, a fim de facilitar a mistura com o equipamento.

Finalizada a adição dos secos e água parcial, foi adicionado o aditivo com a última parcela de água. A quantidade de água adicionada deve estar de acordo com o valor de espalhamento a ser atingido no ensaio de Slump Flow (ABNT, 2017b), ou seja, se o espalhamento estiver fora do limite aceitável para o ensaio, essa mistura deveria retornar ao misturador e a quantidade de água seria ajustada. O ensaio citado compreende em preencher um molde (chamado Cone de Abrams) apoiado sobre uma placa, conforme mostrado na Figura 6d, com a mistura a ser avaliada, de forma continua e uniforme e sem adensar, conforme prescrições da mesma norma. Ao fim do preenchimento, retirar o funil, de forma vertical, com velocidade constante e uniforme, e medir o diâmetro de espalhamento.

Ao final deste procedimento, quando atingiu-se o valor espalhamento adotado, os corpos de prova eram moldados e curados conforme a ABNT NBR 12024/2012. Para cada tipo de solo foram moldados 18 corpos de prova (cp), com dimensões de ϕ50x100 mm (Figura 6e), sendo que para cada traço do estudo de dosagem foram moldados 6 cp, sendo 3 para 0,8% de aditivo e 3 para 1,2% de aditivo. Após 24h, os corpos de prova foram desmoldados e levados a cura úmida até atingir a idade de 7 dias para aplicação do ensaio de resistência a compressão axial, conforme ABNT NBR 12025/2012 (Figura 6f).

a) Solo seco ao ar

b) Pesagem dos materiais

c) Misturador utilizado

d) Execução do Espalhamento

e) Moldagem dos corpos de prova e capeamento

f) Ensaio de resistência a compressão

Figura 6 – Execução do estudo de dosagem

Em misturas em que a resistência à compressão não atingiu no mínimo 1 MPa, foi diminuída a quantidade de solo e repetido o processo; em casos em que a resistência a compressão passou de 1MPa, a quantidade de solo foi aumentada, visto que uma maior quantidade de solo em relação ao cimento representa uma menor resistência à compressão. Com isso, a mistura obteve uma quantidade mínima de cimento e máxima de solo para atingir a resistência mínima e fluidez desejada. Este estudo de dosagem para definição do traço referência das misturas de SCAA para cada tipo de solo está demonstrado nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo arenoso

Quantidade de material utilizado		Traço 1:8		Traço 1:10		Traço 1:12	
Solo	% de aditivo	0,8	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2
Arenoso	Massa de água (kg)	5,00	5,86	4,64	4,30	7,66	4,00
	Massa de cimento (kg)	2,00	2,00	1,50	1,50	1,75	1,00
	Massa de solo (kg)	16,00	16,00	15,00	15,00	21,00	12,00
	Massa de aditivo (g)	16,00	24,00	12,00	18,00	14,00	12,00

Tabela 6 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo siltoso

Quantidade de material utilizado		Traço 1:4		Traço 1:6		Traço 1:8	
Solo	% de aditivo	0,8	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2
Siltoso	Massa de água (kg)	7,34	7,51	6,22	6,00	6,60	6,44
	Massa de cimento (kg)	3,00	3,00	2,50	2,50	2,50	2,50
	Massa de solo (kg)	12,00	12,00	15,00	15,00	20,00	20,00
	Massa de aditivo (g)	24,00	36,00	20,00	30,00	30,00	30,00

Tabela 7 – Quantidade de material utilizado na dosagem – Solo argiloso

Quantidade de material utilizado		Traço 1:6		Traço 1:8	
Solo	% de aditivo	0,8	1,2	0,8	1,2
Argiloso	Massa de água (kg)	9,36	8,02	7,24	6,74
	Massa de cimento (kg)	2,50	2,50	2,00	1,50
	Massa de solo (kg)	15,00	15,00	16,00	12,00
	Massa de aditivo (g)	20,00	30,00	16,00	18,00

3.2.4 Seleção dos intervalos de fluidez do solo

Esta pesquisa tem como ponto de partida o Limite de Liquidez (LL), pois segundo Milani e Silva (2018) para a ocorrência de cisalhamento entre as partículas de solo tem-se o limite mínimo de água necessário para a fluidificação dos siltes e das argilas; e esse limite encontra-se dentro dos conceitos de limite de liquidez do solo, sendo o LL a água necessária para que o material fino do solo se comporte como líquido viscoso. De acordo com Pinto (2006), a água é responsável pela movimentação dos grãos do solo, pois os átomos das moléculas de água encontram-se em permanente agitação. Dessa forma, nesta etapa da pesquisa foi avaliada a influência da dosagem de água no processo de fluidez e de retração por secagem dos solos selecionados. O alcance de melhores resistência mecânicas não faz parte do escopo deste trabalho e, portanto, não será alterado o percentual de cimento e aditivo superplastificante nas misturas de SCAA.

Para esta etapa foi utilizado o método descrito por Neves *et al.* (2010) para avaliar a retração linear de um determinado solo. Foi inserida a mistura de solo, com a porcentagem de água que se deseja avaliar e o superplastificante, segundo a dosagem realizada em etapa anterior, dentro de uma caixa de madeira com desmoldante, de medidas internas de 60 cm x 8,5

cm x 2,5cm (conforme mostrado na Figura 7). Após 7 dias em ambiente fechado e protegido de sol e chuva, foram somados os valores de retração de todos os lados da caixa, correspondendo a retração total da mistura avaliada (NEVES *et al.*, 2010).

Figura 7 - Caixa para ensaio da retração linear

A retração total da mistura avaliada, de acordo com Neves *et al.* (2010), deve ser menor ou igual a 20 mm e não deve haver fendas e/ou fissuras. Dessa forma, este limite corresponde a mistura ideal para evitar a ocorrência de retração do material quando aplicado para construção de paredes monolíticas, sendo esta a finalidade definida para a aplicação do SCAA deste estudo.

Essa análise realizada resultou na definição do intervalo de fluidez (IF) para cada tipo de solo analisado, assim, selecionando as porcentagens de água a serem adicionadas às misturas para que se mantenha a fluidez do SCAA no estado fresco com ocorrência de retração durante a secagem dentro do limite estabelecido pelas diretrizes apresentadas em Neves *et al.* (2010) para o sistema construtivo de paredes monolíticas.

Para cada tipo de solo foi aplicado o ensaio de retração linear conforme descrição anterior. Os teores de aditivo e de cimento nas misturas foram adicionados com base no traço referência estudado na etapa de dosagem; e a quantidade de água incorporada foi a partir do LL de cada solo, sendo os teores de água nas misturas posteriores adicionadas a cada 2%, até o limite da mistura apresentar fissuração no processo de secagem.

Exemplificando o processo, se utilizado um solo com LL de 30%, seria realizado o ensaio com variadas quantidades de água adicionada em 30, 32, 34 e 36%, assim por diante, até o limite de fissuração.

3.2.5 Execução dos ensaios experimentais no SCAA

Conforme definição da Etapa 2 - Seleção dos principais ensaios, foram executados os ensaios físico-mecânicos para cada mistura de SCAA determinada na Etapa 4 – Seleção dos intervalos de fluidez dos solos.

Para obter uma quantidade de dados significativos e possibilitar a análise quantitativa dos efeitos do teor de água na propriedade trabalhabilidade da mistura SCAA, o fator de adição de água dentro do intervalo de fluidez do solo foi de 1%, ou seja, se definido o intervalo de fluidez de 25 a 30% na Etapa 4 para determinado solo, seria realizado os ensaios experimentais nas misturas referência de SCAA com adição das porcentagens de água de 25, 26, 27, 28, 29 e 30%. Os ensaios foram realizados de acordo com as suas respectivas normas técnicas.

3.2.5.1 Slump Test

O ensaio de Slump Test seguiu as diretrizes da ABNT NBR NM 67/1998 para execução. Foi utilizado um molde chamado Cone de Abrams, porém com dimensões reduzidas, mostradas na Figura 9.

Kantro (1980) desenvolveu o método do Slump com dimensões reduzidas, chamado mini-Slump, a fim de avaliar pastas de cimento com a presença de aditivos superplastificante. Este método, segundo Monte (2003) é adotado em pesquisas nacionais e internacionais, pois pode ser feita com quantidade reduzida de material, chegando aos mesmos resultados encontrados no Slump Test. Por sua vez, Tan, Bernal e Provis (2017) investigaram a influência do mini-Slump na trabalhabilidade de pastas cimentícias e a conclusão foi obtida a partir da comparação dos resultados do mini-Slump com valores previstos em modelagem numérica. Segundo os autores, o método mostrou-se aplicável, reprodutível e possui potencial para possibilitar uma melhor observação sobre o comportamento da mistura.

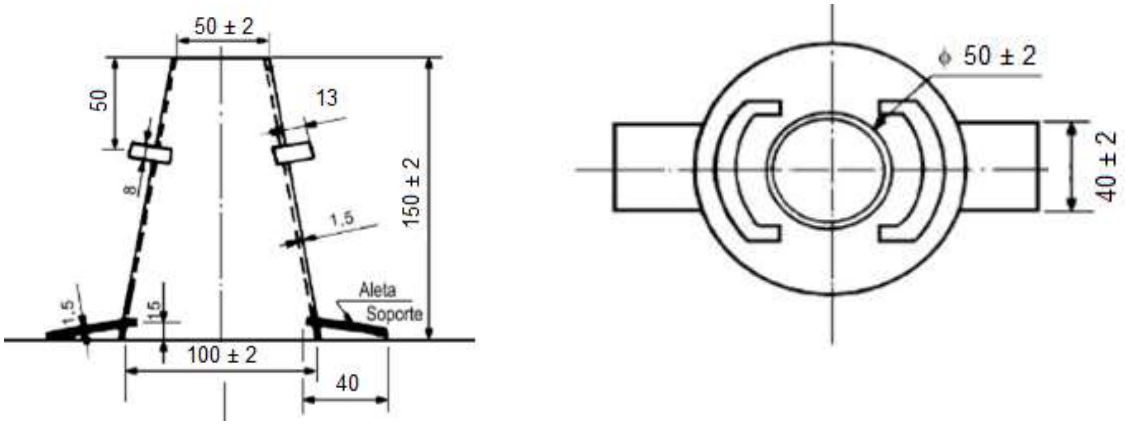


Figura 8 – Cone de Abrams com dimensões reduzidas
Fonte: Adaptado de ABNT (1998)

O molde deve ser preenchido e nivelado com a mistura a ser ensaiada e, durante o preenchimento do molde, os pés devem ser posicionados sobre as aletas, para mantê-lo estável. Após finalizada esta etapa, o molde deve ser retirado e imediatamente medido diferença entre

a altura do molde e a altura do eixo da mistura, essa relação corresponde ao abatimento, devendo ser arredondado aos 5mm mais próximos, conforme indicado na Figura 9.

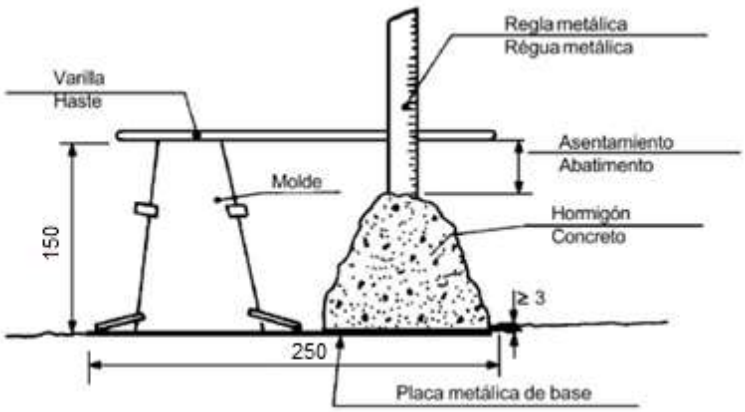


Figura 9 - Coleta de dados - Slump Test (medidas em mm)
Fonte: ABNT (1998)

3.2.5.2 Slump Flow

Este ensaio é regido pela ABNT NBR 15823-2/2017, em que o mesmo cone de Abrams citado acima deve ser preenchido e nivelado. Ao fim da operação, o molde deve ser retirado completamente e, quando a mistura alcançar a situação de aparente repouso, tirar duas medidas perpendiculares do espalhamento. O resultado é a média das duas medidas coletadas e será realizado concomitantemente com o Slump Test.

Figura 10 – Execução do ensaio Slump Test e Slump Flow

3.2.5.3 Flow Table (mesa de fluxo ou índice de consistência da argamassa)

Este ensaio foi executado de acordo com a ABNT NBR 13276/2016 e 7215/2019, consistindo em preparar a mistura e preencher o molde centralizado sobre a mesa de fluxo (Figura 11 e 12).

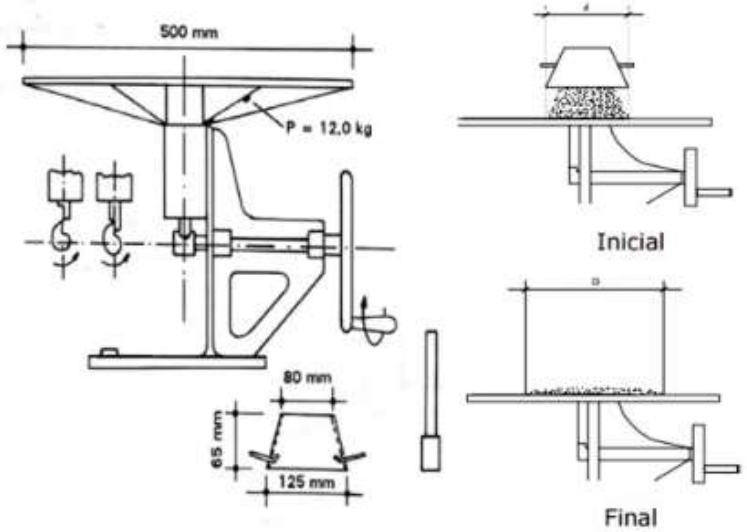


Figura 11 – Coleta de dados – Flow Table
Fonte: ABNT (2019)

O molde deve ser retirado e a manivela acionada de modo que a mesa suba e caia 30 vezes em 30s, de maneira uniforme. Imediatamente, após a última caída da mesa, medir com o paquímetro o espalhamento da argamassa em três pontos diferentes. O resultado deste ensaio é a média dos três valores do diâmetro de espalhamento da mistura.

a) Mesa de fluxo utilizada b) Mistura espalhada sobre a mesa de fluxo
Figura 12 – Execução do ensaio Flow Table

3.2.5.4 Resistência à Compressão

Este ensaio é regido pela ABNT NBR 12025/2012, em que são moldados corpos de prova (cps) com a mistura a ser ensaiada e, após 24h, os mesmos são desmoldados e levados a cura até atingir a idade de 28 dias. Após a cura, a medida transversal de cada cp deve ser registrada e posteriormente posicionado sobre uma prensa (Figura 13), uma carga deve ser aplicada sobre o corpo de prova a fim de registrar a máxima carga alcançada antes da ruptura. A tensão de ruptura a compressão (que é o valor que se deseja obter) é resultado da divisão da carga pela seção transversal do corpo de prova.

a) Corpos de prova capeados e medidos b) Aplicação de carga no corpo de prova

Figura 13 – Execução do ensaio de resistência à compressão

3.2.6 Tratamento estatístico

Por fim, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, por meio da análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey, com o auxílio do *software* R-Studio. De acordo com Vieira (2006), a ANOVA permite verificar se as médias dos tratamentos são estatisticamente iguais, a forma de avaliar é observando o *valor F*, quanto mais distante estiver de 1,0 significa se o que está sendo comparado é diferente e, em contrapartida, quanto mais próximo estiver de 1,0, indica se as médias podem ser iguais.

A ANOVA não especifica em quais grupos a diferença é significativa, para isso é necessário realizar o Teste de Tukey e verificar o *valor p*, em que se for maior que 0,05 significa que as médias deste tratamento podem ser iguais. Por sua vez, quanto menor o *valor p*, mais confiável que as médias que estão sendo comparadas é diferente.

Dessa forma, foram alcançados os parâmetros com intervalos de valores aceitáveis para utilização do SCAA na fabricação de paredes monolíticas para edificações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados e análises realizados, organizando-se primeiramente pela caracterização dos materiais, ensaios no estado fresco, ensaios no estado endurecido e análise estatística dos dados coletados.

4.1 Análise e caracterização dos solos

A Tabela 8 contém o resultado da caracterização dos solos utilizados neste trabalho.

Tabela 8 - Caracterização dos solos

Características dos solos		**Solo arenoso**	**Solo siltoso**	**Solo argiloso**
Distribuição Granulométrica	Areia Grossa (0,60 – 2,00 mm)	1,00	4,53	1,90
	Areia Média (0,20 – 0,60 mm)	41,00	16,10	12,70
	Areia Fina (0,06 – 0,20 mm)	36,45	26,29	12,53
	Silte (0,002 – 0,06 mm)	7,83	25,03	19,95
	Argila (< 0,002 mm)	13,73	28,05	52,90
	Material que passa na peneira 4,8mm (%)	100	100	100
	Material que passa na peneira 0,075mm (%)	24,00	66,75	76,22
Índices físicos	Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,84	2,82	3,77
	Limite de Liquidez (%)	NL	51,08	54,86
	Limite de Plasticidade (%)	NP	38,61	30,96
	Índice de Plasticidade (%)	NP	12,47	23,90
Classificação	Classificação AASHTO	A-2-4 Areia siltosa ou argilosa	A-7-5 Solo Argiloso	A-7-5 Solo Argiloso

Hao *et al.* (2008) definem que a massa específica de todas as partículas que compõem o solo é em função da sua mineralogia e composição, por sua vez, os minerais comumente encontrados nos solos variam de 2,6 a 2,75 g/cm³, o que se deve a presença de quartzo, feldspatos e silicatos coloidais que predominam em solos minerais. No entanto, é possível encontrar densidades superiores a 2,75 g/cm³, sendo o caso do solo argiloso desta pesquisa, que pode ser devido a existência de quantidades maiores de minerais considerados de alta densidade, como magnetita, zircão, turmalina e hornblenda.

Quanto ao LL e LP, o solo arenoso resultou em “não apresentando limite de liquidez” (NL) e “não plástico” (NP), respectivamente. Ou seja, não foi possível alcançar o fechamento da ranhura com mais de 25 golpes e nem obter o cilindro com 3mm de diâmetro, conforme exigido em seus respectivos ensaios. O solo com quantidade elevada de areia implica em baixa coesão, não permitindo obter resultados numéricos neste tipo de ensaios. Entretanto, segundo

Barboza (2014), é um solo com grande potencial para utilização na construção civil, chegando a uma resistência adequada para aplicação em estruturas de vedação.

Por sua vez, o solo siltoso possui LL de 51,08%, LP 38,61% e IP 12,47%, por fim, o solo argiloso possui LL 54,86%, LP 30,96% e IP 23,9. Solos com elevada quantidade de argilominerais implica em um maior LL, resultando em uma maior necessidade de água na mistura de solo-cimento para alcançar a autoadensabilidade. Quanto maior for o IP, o solo estará mais sujeito às variações dimensionais, devido ao inchamento do solo quando em estado úmido e de sua retração quando seco (NEVES e FARIA, 2011). Porém, Ma, Cheng e Cheng (2014) utilizaram um solo com 20% de areia e 80% de finos, LL de 42,36%, LP de 24,27% e IP 18,09%, resultando em uma trabalhabilidade considerada adequada e resistência superior 4,0 MPa para solo-cimento autoadensável com adição de cinzas volantes.

Com base na composição granulométrica, conclui-se que o solo arenoso, mostrado na Figura 14, é composto em sua grande parte por areia média, 41% pelo sistema ABNT, e a segunda fração de maior predominância na composição do solo é a fração de areia fina, com 36,45%, pelo sistema ABNT.

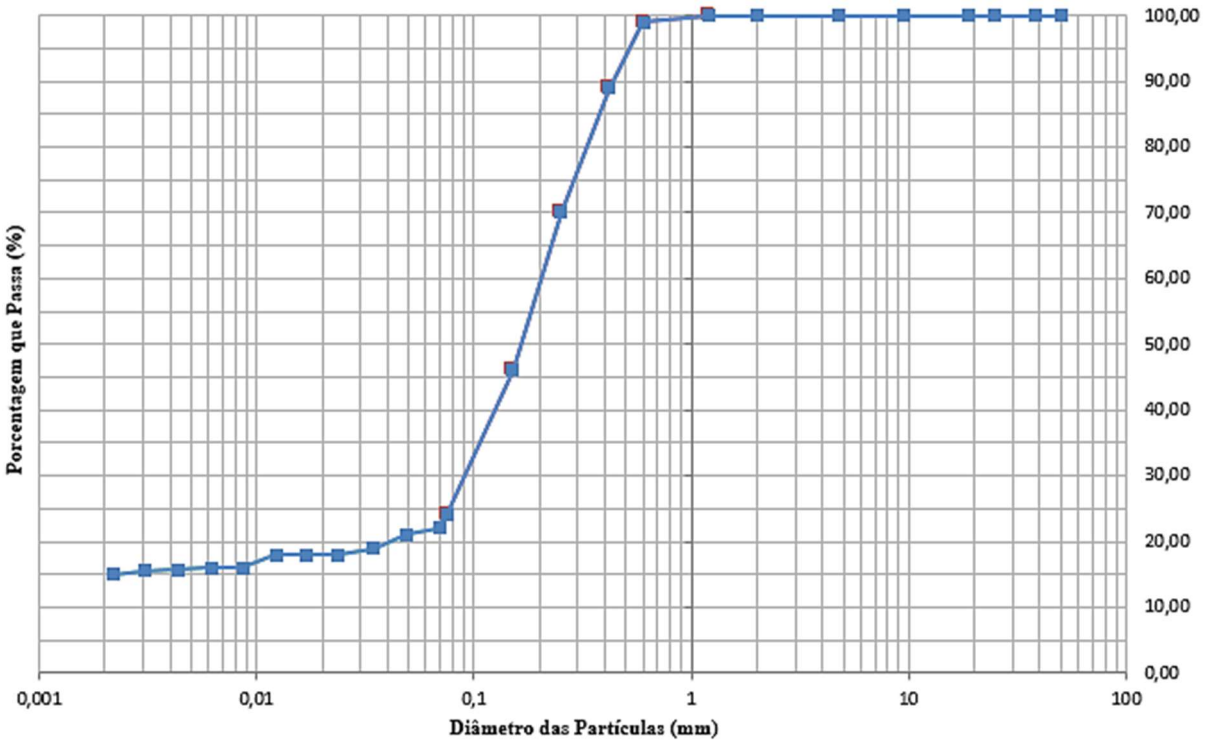


Figura 14 - Curva granulométrica - Solo arenoso

Na Figura 15, contém a curva granulométrica do solo siltoso, em que é composto em sua grande parte por argila, 28,05% pelo sistema de classificação granulométrica da ABNT, e a segunda fração de maior predominância na composição do solo é a fração de silte, com 25,03%, pelo mesmo sistema. Com isso, foi observado que apesar de não estar em quantidade

majoritária e ser classificado como argiloso, as características de instabilidade da partícula silte predominam em relação a propriedade do conjunto do solo analisado. Conforme Barbosa e Tolêdo Filho (1997), siltes são sólidos de forma achatada ou poliédrica que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade e propiciam a diminuição do atrito interno devido ao rearranjo das partículas ao sofrer compactação, o que causa a instabilidade de solos com presença siltosa.

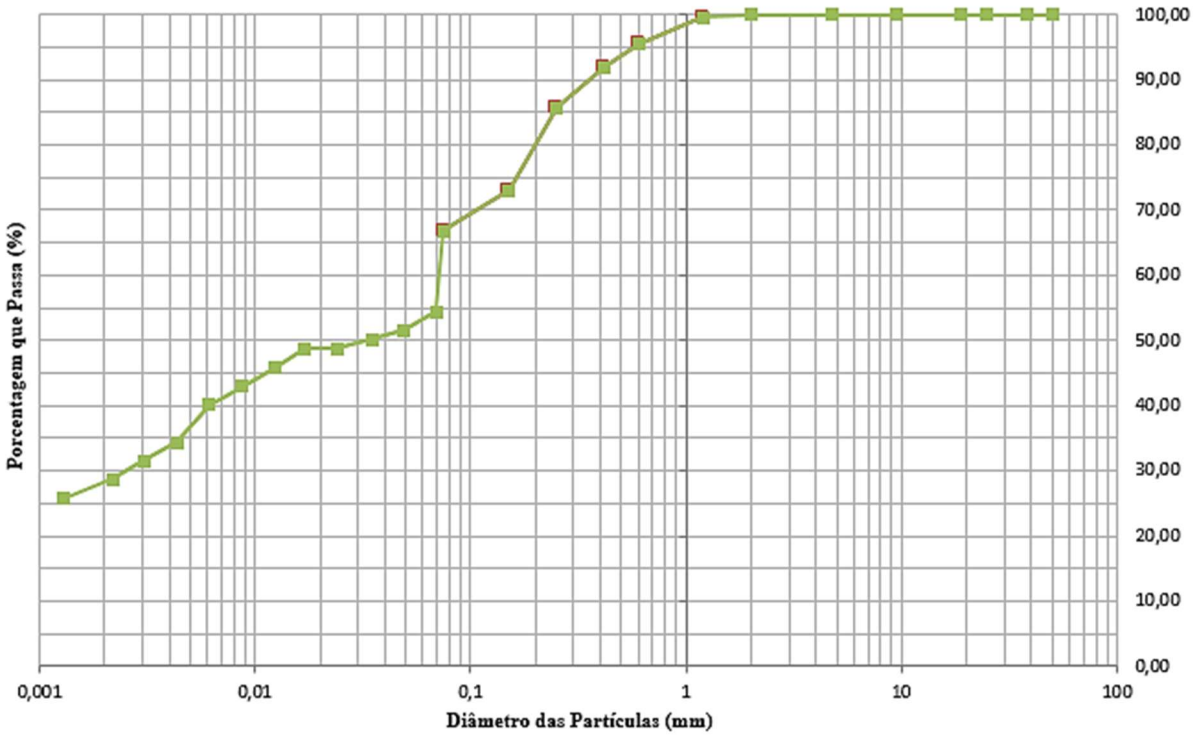


Figura 15 - Curva granulométrica - Solo siltoso

Por fim, na Figura 16, o solo argiloso é composto em sua grande parte por argila, 52,91% pelo sistema ABNT, e a segunda fração de maior predominância na composição do solo é a fração de silte, com 19,95%, pelo sistema ABNT.

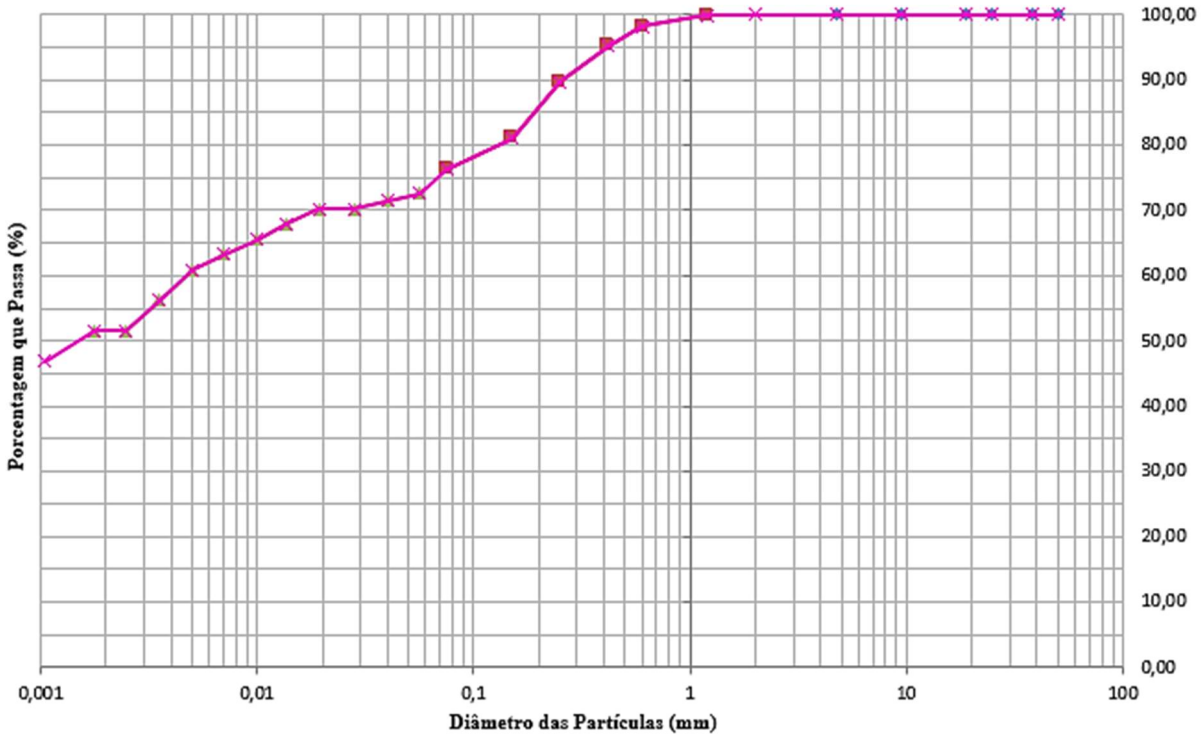


Figura 16 - Curva granulométrica – Solo argiloso

A granulometria do solo implica diretamente na quantidade necessária de água na mistura de SCAA, bem como nas propriedades físico-mecânicas do material nos estados fresco e endurecido. Para atingir a consistência autocompactável dos solos argilosos, o baixo tamanho das partículas deste tipo de solo requer um maior teor de água quando comparado a solos arenosos, isso resulta em uma maior quantidade de poros e, consequentemente, limita consideravelmente as propriedades mecânicas do material final (HELSON *et al.*, 2017; LUNARDI, 1997).

Maniatidis e Walker (2003) em um trabalho de revisão de estudos sobre a terra como material de sistemas construtivos reuniram diferentes proporções granulométricas e limites dos índices físicos aplicados, no entanto concluíram que não existe solos completamente ideais em relação a todos os aspectos físicos. Obter o melhor desempenho do material de construção terra é aliar as propriedades do solo com as condições da técnica construtiva.

4.2 Estudo de dosagem

Os resultados determinados nesta etapa para o solo arenoso, estão apresentados a seguir, na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado da dosagem – Solo arenoso

Resultados da dosagem		Traço 1:8						Traço 1:10						Traço 1:12					
Solo	% de aditivo	0,8			1,2			0,8			1,2			0,8			1,2		
Arenoso	Resistência a compressão a 7 dias (MPa)	1,187	0,932	1,227	1,051	0,595	1,009	0,667	0,800	0,845	0,634	0,672	0,695	0,668	0,595	0,704	0,608	0,629	0,673
		1,115			0,885			0,771			0,667			0,656			0,636		
	Espalhamento (mm)	750			690			710			710			660			750		

Para dar prosseguimento nos ensaios mostrados na Etapa 5 com o solo arenoso, foi escolhido o traço 1:8 (cimento:solo) com 0,8% de aditivo, sendo este o que atingiu o espalhamento dentro do intervalo admitido de 660 a 750mm, a resistência igual ou maior que 1MPa aos 7 dias e menor quantidade de aditivo.

A seguir, serão apresentados os resultados determinados para o solo siltoso (Tabela 10).

Tabela 10 - Resultado da dosagem – Solo siltoso

Resultados da dosagem		Traço 1:4						Traço 1:6						Traço 1:8					
Solo	% de aditivo	0,8			1,2			0,8			1,2			0,8			1,2		
Siltoso	Resistência a compressão a 7 dias (MPa)	0,317	0,256	0,236	0,459	0,423	0,470	0,472	0,482	0,442	0,212	0,255	0,260	0,153	0,213	0,201	0,105	0,110	0,112
		0,465			0,451			0,269			0,242			0,189			0,109		
	Espalhamento (mm)	670			690			730			700			680			680		

Para o solo siltoso, não foi possível alcançar a resistência mínima de 1MPa aos 7 dias. Se tratando de morfologia, na pesquisa de Silva *et al.* (2017) foi utilizado um solo com 96,98% de finos, com predominância do silte, correspondendo a 67,48%. A partir da micrografia obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), indicado na Figura 17, foi possível concluir que este tipo de solo apresenta uma superfície com fraturas intergranulares, com textura rugosa e grande quantidade de poros e, devido a sua grande área superficial, necessita de uma elevada quantidade de água para fluidificar.

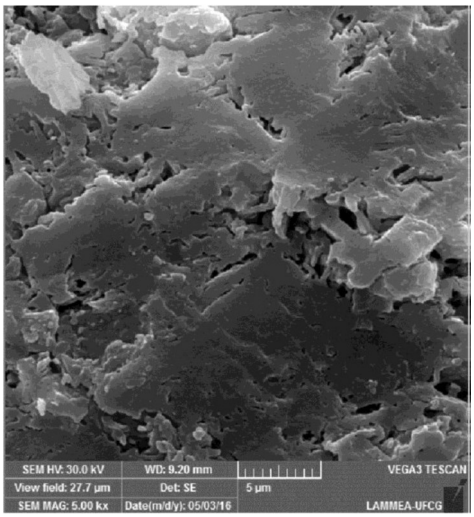


Figura 17 - MEV de siltes
Fonte: Silva *et al.* (2017)

De acordo com Silveira (2006), apesar do silte ser similar a areia quanto a forma e composição mineral, os poros entre as partículas são menores e mais numerosos, deste modo retém mais água. Outro fator preponderante de ter baixa resistência, é devido ao silte possuir baixa ou nenhuma plasticidade e viscosidade, com isso, não pode ser compactado em uma massa coesa como a argila, formando fissuras pela falta de plasticidade.

Diante destas constatações, não foi possível utilizar o solo intitulado siltoso para seguir com esta pesquisa. Por fim, a Tabela 11 contém os resultados determinados para o solo argiloso.

Tabela 11 - Resultado da dosagem – Solo argiloso

Resultados da dosagem		Traço 1:6						Traço 1:8					
Solo	% de aditivo	0,8			1,2			0,8			1,2		
Argiloso	Resistência a compressão a 7 dias (MPa)	0,896	0,820	0,784	1,354	1,029	1,359	0,586	0,499	0,451	0,433	0,475	0,514
		0,834			1,247			0,512			0,474		
	Espalhamento (mm)	730			670			670			680		

Para o solo argiloso, foi escolhido o traço 1:6 (cimento:solo) com 1,2% de aditivo, sendo este o que atingiu o espalhamento dentro do intervalo admitido de 660 a 750mm, a resistência igual ou maior que 1MPa aos 7 dias e menor quantidade de aditivo.

Devido a superfície específica da argila ser maior, resultante da dimensão das partículas serem menores comparadas a areia, necessita de uma maior quantidade de água para fluidificar (PINTO, 2006). Dessa forma, comparado ao solo arenoso, o solo argiloso precisou de uma maior quantidade de cimento para atingir a resistência necessária.

4.3 Seleção dos intervalos de fluidez do solo

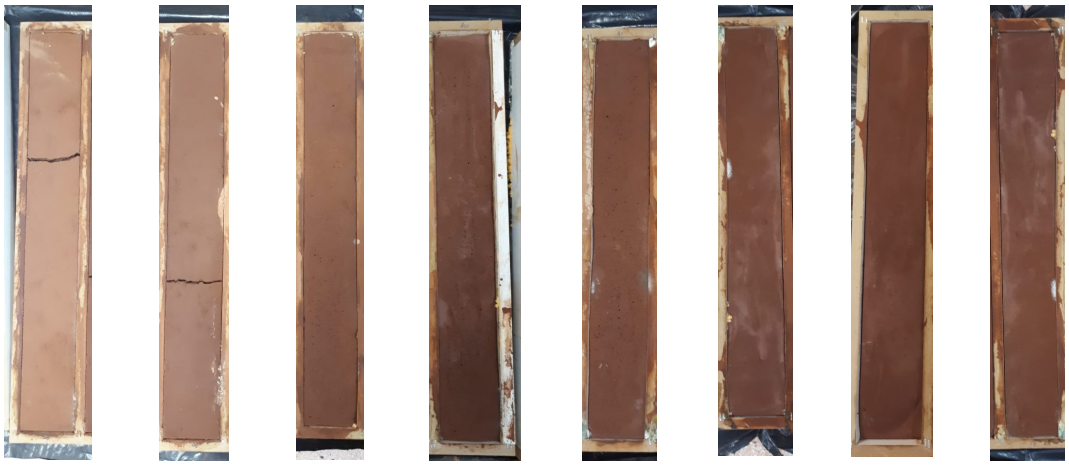
Os resultados do ensaio de retração estão mostrados na Tabela 12:

Tabela 12 – Média dos resultados do ensaio de retração

Solo	Dosagem (em massa)	Amostra	IF (%) Teor de água	Fissura (S/N)	Fenda (S/N)	Retração (mm)
Arenoso	1:8:0,8% (cimento:solo: aditivo químico)	Are1	20	N	S	7
		Are2	22	N	S	7
		Are3	24	S	N	6
		Are4	26	N	N	3
		Are5	28	N	N	3
		Are6	30	N	N	2
		Are7	32	N	N	4
		Are8	34	N	N	2
Argiloso	1:6:1,2% (cimento:solo: aditivo químico)	Arg1	52	N	N	31
		Arg2	54	N	N	19
		Arg3	56	N	N	28
		Arg4	58	N	N	5

N – Não e S - Sim

Quanto ao solo arenoso, nas amostras Are1 e Are2, devido à baixa quantidade de água, apresentou fenda a 2/3 da amostra e retraiu 7 mm. Na amostra Are3, apareceram fissuras ao longo de toda a amostra e retraiu 6mm e Are8 ao toque estava levemente úmida ainda aos 7 dias. As demais amostras, não apresentaram fenda e nem fissura e apresentaram uma retração menor que 20 mm, limite aceitável para o ensaio. Dessa forma, o intervalo de fluidez (IF) para o solo arenoso que será utilizado para prosseguir com a pesquisa foi entre 24% e 34%. As imagens das amostras ao final do ensaio estão apresentadas na Figura 18.



Are1 Are2 Are3 Are4 Are5 Are6 Are7 Are8

Figura 18 - Intervalo de liquidez da amostra de solo arenoso

Por sua vez, o solo argiloso possui LL igual a 54,86%, porém, foi realizado o ensaio com 52% para avaliar a influência da água em 2% anterior ao LL. Em nenhuma das amostras ocorreu retração e/ou fissura, porém a retração em Arg1 e Arg3 foi acima do limite de 20 mm e somente na amostra Arg2 a retração esteve dentro do estipulado, coincidindo com o valor do LL. Na amostra Arg4, a quantidade de água adicionada foi muito elevada e a água segregou do restante do material, ficando sobre a superfície, dessa forma, o ensaio não foi prosseguido com outras quantidades de água adicionada e essa amostra foi descartada, pois o material ainda se encontrava em estado completamente úmido aos 7 dias e, por essa razão, a amostra retraiu consideravelmente pouco, comparado com o restante das amostras. A seguir, na Figura 19 contém imagem das amostras após passados os 7 dias.

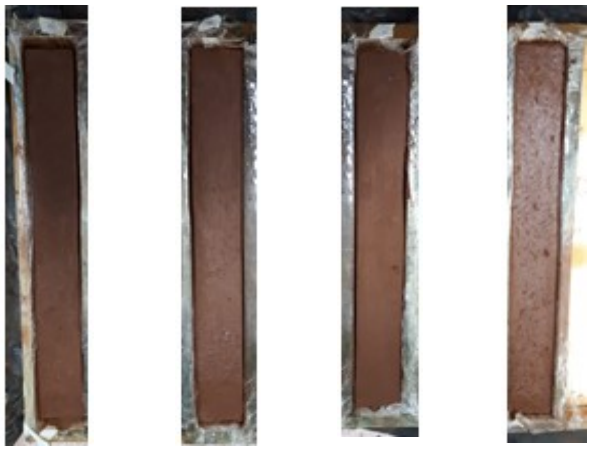


Figura 19 - Intervalo de liquidez da amostra de solo argiloso

Em suma, para prosseguir com a pesquisa, para o solo argiloso foi adotado o intervalo de fluidez (IF) de 52% a 56%, pois somente com 54% de teor de água não seria possível obter uma sequência de valores para o tratamento estatístico a ser realizado em uma próxima etapa.

4.4 Ensaios experimentais no SCAA

A seguir, nas Tabelas 13 e 14 e Figuras 21 e 22 foram apresentados os resultados do ensaio Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência à Compressão aos 28 dias em função do teor de água do intervalo de fluidez (IF) dos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Independentemente do tipo de solo, a execução das misturas de SCAA para os ensaios experimentais permitiu observar o comportamento das amostras no estado plástico e, posteriormente, no estado fluido, mostrando o aumento da fluidez tanto quanto foi o aumento de adição do teor de água na mistura. Assim, para ambos os solos, foi observado comportamento

físico semelhante das aberturas de espalhamento das misturas de SCAA entre os ensaios de Flow Table, Slump Test e Slump Flow (Figuras 21 e 22) conforme o aumento do teor de água no intervalo de fluidez, sendo representados pelos altos valores de coeficientes de correlação (R^2 f maiores 0,75).

Na Figura 21, observou-se para o solo arenoso um aumento crescente significativo dos valores do diâmetro de espalhamento da mistura de SCAA no ensaio de Slump Test no IF de 24 a 26%. Isso se deve ao fato da consistência da mistura estar relativamente seca e, portanto, a trabalhabilidade se tornar menor. No IF de 27 a 34%, as misturas se mostraram mais estáveis, não influenciada pelo teor de água adicionado e a abertura de espalhamento permaneceu sem alteração numérica, pois este ensaio requer o arredondamento normativo dos resultados para os 5mm mais próximos.

Os demais ensaios de fluidez aplicados no solo arenoso apresentaram o aumento dos valores do diâmetro de espalhamento da mistura de SCAA conforme o aumento de adição de água (Figura 21). No IF de 30 a 34%, o aumento do valor do diâmetro de espalhamento da mistura de SCAA no ensaio de Slump Flow conforme o aumento do teor de água foi relativamente menor quando comparado ao IF de 24 a 29%, tendendo à instabilidade do espalhamento da mistura devido ao excesso de água e ocorrência de exsudação. Ou seja, no ensaio Slump Flow para as misturas de SCAA com solo arenoso, nas adições de água acima de 30% pôde-se observar a separação da água excedente da mistura de SCAA, indicadas pela linha pontilhada (Figura 20), acarretando numa interferência não significativa na abertura de espalhamento dessas misturas (Tabela 13).

a) 24 % de adição de água b) 26 % de adição de água c) 30 % de adição de água

Figura 20 - Exsudação de água na mistura

Já para o ensaio Flow Table (Figura 21), os resultados tenderam para uma reta linear crescente no IF de 24 a 34%, ou seja, um aumento significativo de abertura de espalhamento

das misturas de SCAA com solo arenoso conforme o aumento do teor água até o IF de 31%. Também foi observado a constância do valor do diâmetro de espalhamento a partir do IF de 32%, comportamento este semelhante ao observado no ensaio de Slump Flow (Tabela 13).

Para as misturas de SCAA com o solo argiloso (Figura 22), os valores do diâmetro de espalhamento no ensaio de Slump Test permaneceram estáveis, apresentando constância de espalhamento no IF de 52 a 56% e mesmo comportamento das misturas de SCAA com o solo arenoso no intervalo de 27 a 34%, visto que nestas faixas, independente do tipo de solo, as misturas de SCAA se encontram no estado de limite de liquidez do referido solo. Porém, no IF 55 a 56%, devido ao excesso de água, obteve-se uma pequena elevação no espalhamento da mistura de SCAA com solo argiloso, no entanto não significativa (Figura 22).

Para os ensaios de Slump Flow e Flow Table aplicados nas misturas de SCAA com o solo argiloso, os valores do diâmetro de espalhamento das misturas de SCAA aumentaram tanto quanto foi o aumento do teor de água adicionado (Figura 22). Houve um aumento significativo do valor do diâmetro de espalhamento no ensaio Slump Flow na IF de 52 a 54%, no entanto foi relativamente maior quando comparado ao IF de 55 a 56%, a qual neste intervalo as misturas de SCAA mostraram instabilidade na abertura de espalhamento por ocorrência de exsudação, e por esta razão não interferindo significativamente nos valores de diâmetro de espalhamento dessas misturas (Tabela 14).

No ensaio Flow Table, os resultados das misturas de SCAA com solo argiloso tenderam para uma reta linear crescente (Figura 22), mostrando aumento significativo da abertura de espalhamento conforme aumento do teor de água no IF de 54% (Tabela 14). Isso indica que a fluidez do SCAA com solo argiloso está intimamente ligada ao Limite de liquidez do solo da mistura.

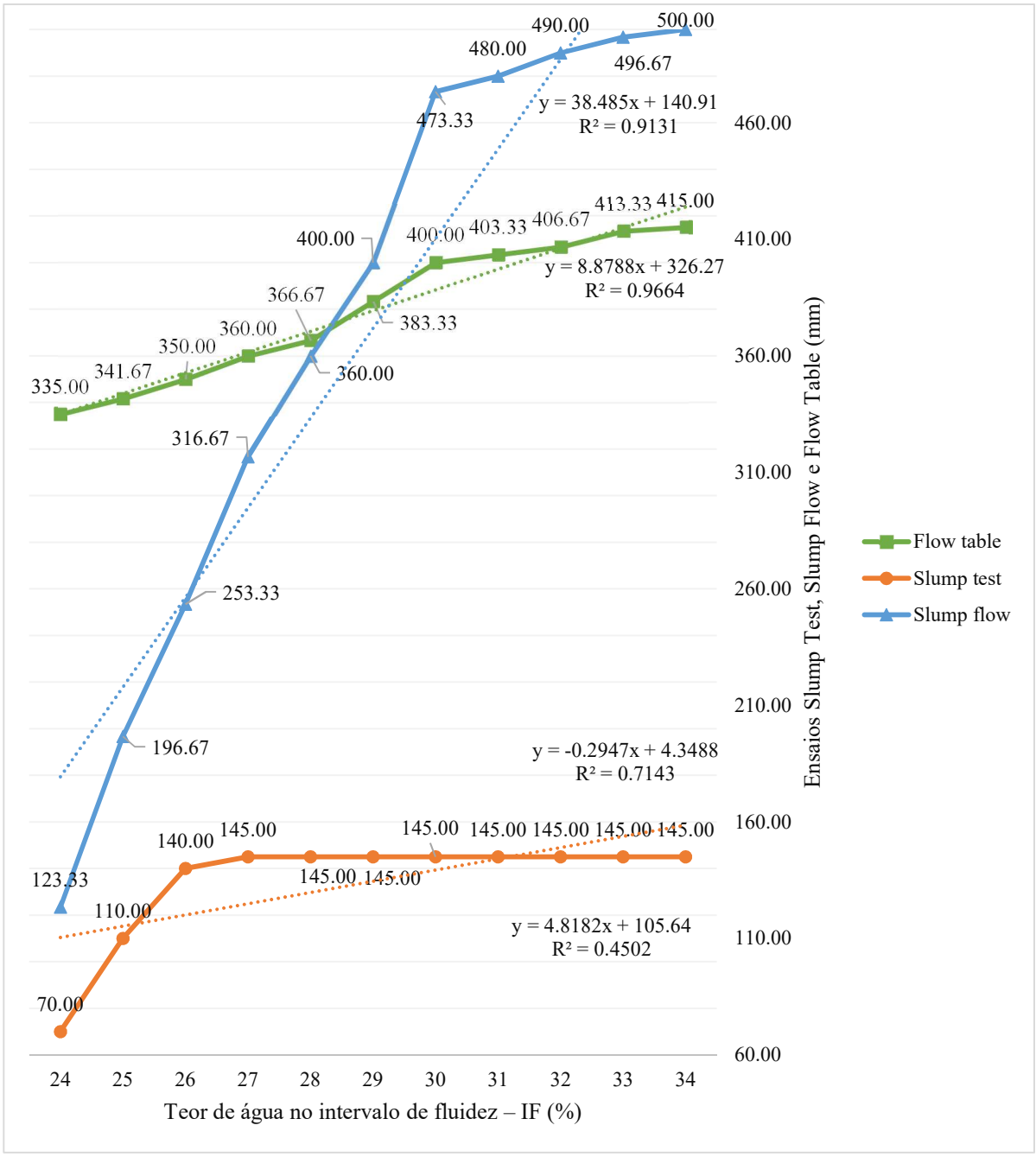


Figura 21 - Compilado dos resultados dos ensaios da Etapa 6 - Solo arenoso

Tabela 13 – Resultados dos ensaios Slump Test, Slump Flow, Flow Table e resistência à compressão simples - Solo Arenoso

Ensaios		**Teor de água do intervalo de fluidez – IF (%)**										
		24	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
Slump Test	Média (mm)	70	110	140	145	145	145	145	145	145	145	145
	DPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Teste Tukey	a	b	c	d	d	d	d	d	d	d	d
Slump Flow	Média (mm)	123,33	196,67	253,33	316,67	360	400	473,33	480	490	496,67	500
	DPM	5,77	5,77	5,77	5,77	10	10	5,77	10	0	0	10
	CV	0,05	0,029	0,023	0,02	0,03	0,03	0,012	0,02	0	0	0,02
	Teste Tukey	a	b	c	d	e	f	g	gh	gh	h	h
Flow Table	Média (mm)	335	241,67	350	360	366,67	383,33	400	403,33	406,67	413,333	415
	DPM	13,23	2,89	0	0	2,89	5,77	10	5,77	5,77	2,89	15
	CV	0,04	0,01	0	0	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,04
	Teste Tukey	a	ab	abc	bcd	cde	ef	fg	fg	g	g	g
Resistência a compressão 28dias	Média (MPa)	5,39	3,91	3,17	2,65	2,07	2,00	1,99	1,90	1,80	1,78	1,75
	DPM	0,30	0,17	1,50	0,14	0,32	0,18	0,11	0,08	0,10	0,20	0,08
	CV	0,06	0,04	0,47	0,05	0,16	0,09	0,05	0,04	0,05	0,11	0,04
	Teste Tukey	a	b	bc	bc	c	c	c	c	c	c	c

DPM – Desvio Padrão Médio ; CV – Coeficiente de Variação (%); Para o Teste de Tukey, na mesma linha as letras minúsculas iguais não diferem entre si.

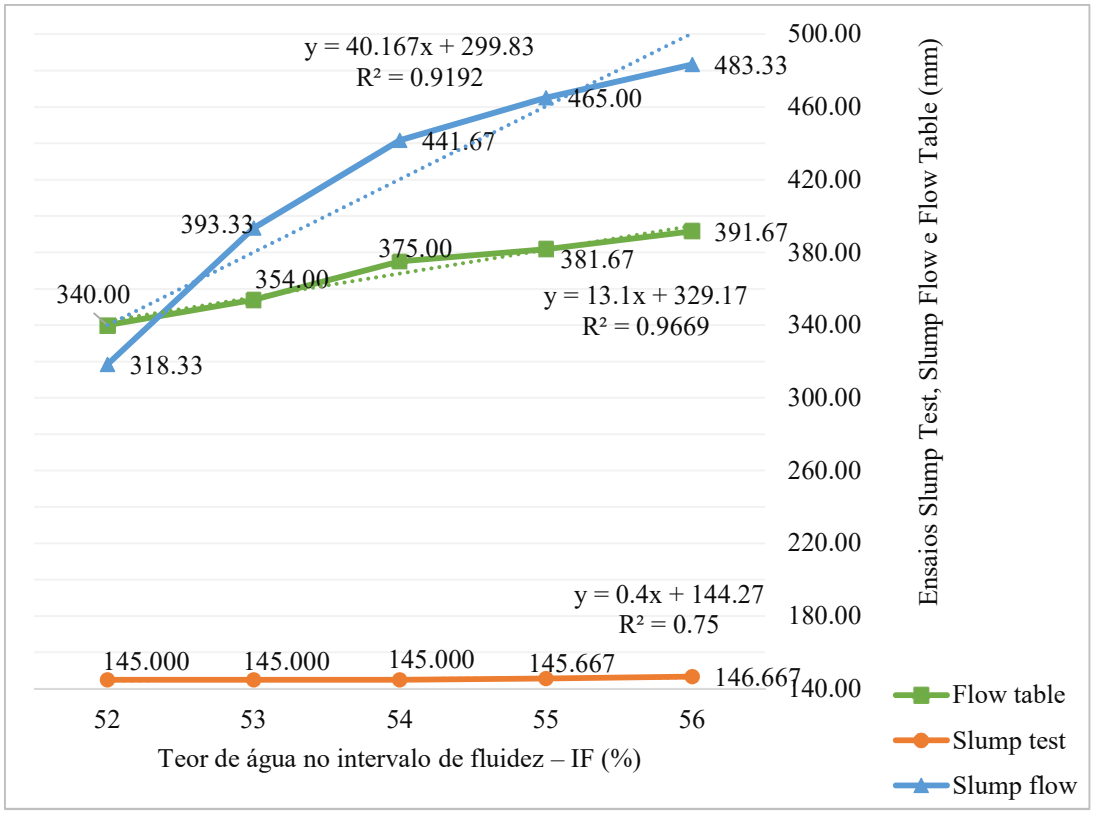


Figura 22 - Compilado dos resultados dos ensaios da Etapa 6 - Solo argiloso

Tabela 14 – Resultados dos ensaios Slump Test, Slump Flow, Flow Table e resistência à compressão simples – Solo Argiloso

Ensaios		**Teor de água do intervalo de fluidez – IF (%)**				
		52	**53**	**54**	**55**	**56**
Slump Test	Média (mm)	145	145	145	145,67	146,67
	DPM	0	0	0	0,58	2,89
	CV	0	0	0	0	0,02
	Teste Tukey	a	a	a	a	a
Slump Flow	Média (mm)	318,33	393,33	441,67	465	483,33
	DPM	7,64	5,77	7,64	5	7,64
	CV	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
	Teste Tukey	a	b	c	d	d
Flow Table	Média (mm)	340	354	375	381,67	391,67
	DPM	5	1,73	10	2,89	7,64
	CV	0,01	0	0,03	0,01	0,02
	Teste Tukey	a	a	b	b	b
Resistência a compressão 28d (MPa)	Média (mm)	0,98	1,01	1,04	1,04	1,02
	DPM	0,04	0,06	1,11	0,02	0,04
	CV	0,05	0,06	0,10	0,02	0,04
	Teste Tukey	a	a	a	a	a

DPM – Desvio Padrão Médio e CV – Coeficiente de Variação (%); Para o Teste de Tukey, na mesma linha as letras minúsculas iguais não diferem entre si.

Na análise estatística para as misturas de SCAA com solo arenoso (Apêndices A e B), foi possível observar que as médias dos resultados do Slump Flow para os IF de 30 a 34% não diferiram significativamente, ou seja, os valores do diâmetro de espalhamento acima de 467,56mm (correspondendo ao 473,33mm – DPM) não devem ser considerados, pois não são estatisticamente confiáveis.

Já para as misturas de SCAA com solo argiloso (Apêndices C e D), foi verificado que as médias dos resultados para o Slump Flow no IF de 55 a 56% não diferiram significativamente entre si, ou seja, os valores do diâmetro de espalhamento acima de 460mm (correspondendo ao 465mm -DPM), também não devem ser estatisticamente considerados.

Estas constatações estatísticas indicam que, no ensaio de Slump Flow, os valores do diâmetro de espalhamento máximos adequados para as misturas de SCAA com o solo arenoso e o solo argiloso são, respectivamente, 467,56mm e 460mm (Figura 23). Pode-se confirmar tal comportamento de forma qualitativa, onde nos mesmos intervalos de fluidez de cada solo (IF de 30 a 34% para SCAA com solo arenoso e IF de 55 a 56% para SCAA com solo argiloso) foram observadas a instabilidade das misturas de SCAA por ocorrência de segregação e/ou exsudação.

Observando os procedimentos realizados no ensaio Slump Test, a altura de queda da mistura SCAA com solo arenoso permaneceu invariável acima do IF de 27%, e a partir deste ponto pode ser considerado o início da constância do valor do diâmetro de espalhamento de 145mm no ensaio Slump Test, ou seja, quando considerado este ensaio, com 27% de adição de água, este solo arenoso apresenta a mesma fluidez do restante das adições posteriores. O mesmo comportamento foi observado para as misturas de SCAA com solo argiloso, ou seja, independente da continuidade de adição de água nas misturas, o início da constância do valor do diâmetro de espalhamento de 145mm ocorreu no IF de 52%. Isto mostra qualitativamente que o IF de 27% para o solo arenoso é o início para ocorrer a fluidez das misturas de SCAA.

Neste mesmo IF de 27%, o ensaio de Slump Flow para as misturas de SCAA com solo arenoso apresentou o valor do diâmetro de espalhamento de 316,67mm, sendo equivalente ao solo argiloso com valor do diâmetro de espalhamento de 318,33mm, no IF de 52%. Então, entende-se que para iniciar a autoadensabilidade no ensaio de Slump Flow, os valores do diâmetro de espalhamento mínimos adequados para as misturas de SCAA com o solo arenoso e o solo argiloso são, respectivamente, 316,67mm e 318,33mm (Figura 23).

Contudo, pode-se afirmar que a influência do limite de liquidez (LL) nos solos argilosos para atingir a autoadensabilidade do sistema SCAA é mais perceptível do que nos solos arenosos, visto que em solos com características arenosas há uma dificuldade de encontrar nos

ensaios de índices físicos o valor específico do limite de liquidez e/ou limite de plasticidade. Os limites máximos e mínimos de abertura de espalhamento determinados para as misturas de SCAA com solo argiloso ficaram dentro do intervalo de fluidez de 52 a 55%, o que é uma faixa de autoadensabilidade com proximidade ao LL do solo argiloso de 54,86%. Isto corrobora as afirmações de Milani e Silva (2018) sobre o sistema SCAA alcançar boa fluidez sem segregação e exsudação, a qual está intimamente limitada pela quantidade de argilominerais presentes no solo, ou seja, pelo limite de liquidez do solo.

Diante desta análise, independentemente do tipo de solo, para aplicação do ensaio de Slump Flow nas misturas de SCAA deve-se considerar o intervalo ideal da abertura do diâmetro de espalhamento de 318,33 a 460mm, assim garantindo a ocorrência da fluidez necessária da mistura de SCAA sem segregação e exsudação (Figura 23). Por convenção, a fim de facilitar a compreensão da adoção dos parâmetros, foi utilizado o arredondamento para a dezena mais próxima, dessa forma, a abertura ideal do diâmetro de espalhamento passa a ser entre 320 a 460mm.

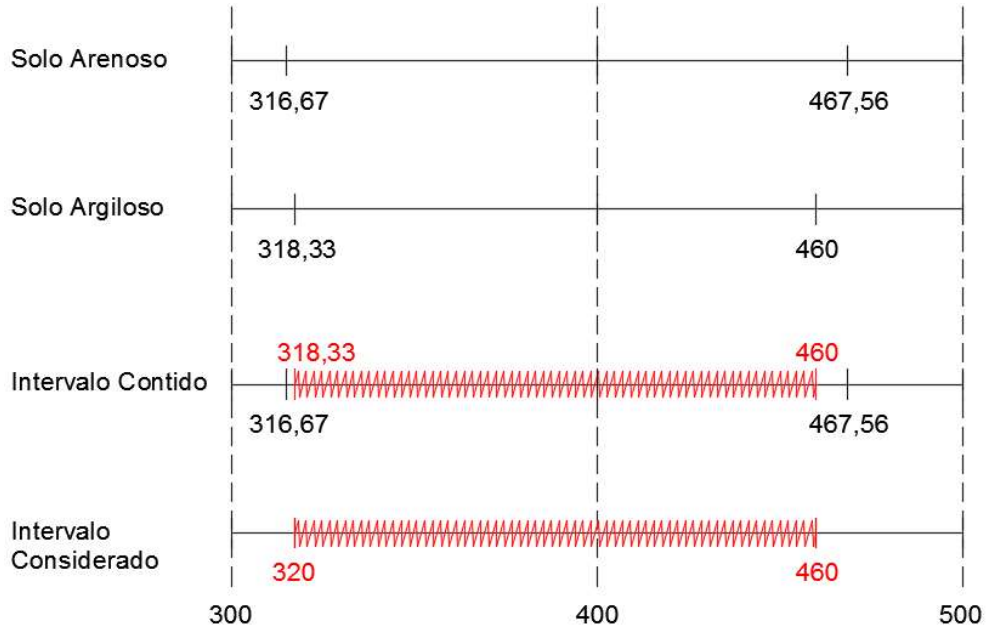


Figura 23 - Intervalo contido entre os intervalos de fluidez do solo arenoso e argiloso

Apesar do comportamento reológico semelhante das misturas de SCAA em ambos ensaios de flow, a qual foi representado pelos altos valores de coeficientes de correlação (Figuras 21 e 22), ao aplicar o Teste de Tukey nos valores obtidos no ensaio Flow Table, tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso, não foi constatado uma classificação estatística que permitisse a construção do intervalo confiável com limites máximo e mínimo de abertura de espalhamento para este ensaio.

Acredita-se que o Flow Table não é adequado para avaliar o SCAA devido aos procedimentos metodológicos do ensaio. Segundo Roussel *et al.* (2005) e Bauer *et al.* (2014), a tensão de escoamento de pastas e argamassas cimentícias convencionais é maior quando comparado a uma matriz cimentícia com consistência plástica, ou seja, o Flow da mistura está associado à capacidade de deformação que o material possui e é diretamente influenciada pela quantidade de água e sua tensão de superfície. De forma análoga, as misturas de SCAA no estado fresco apresenta resistência ao cisalhamento praticamente nula; no entanto, ao se aplicar os golpes estabelecidos no Flow Table, a tensão de escoamento do SCAA foi alterada em uma proporcionalidade diferente entre os solos, visto que a deformação de cada tipo de solo está condicionada as quantidades e morfologia das suas partículas. Assim, não foi possível obter uma correlação direta entre as aberturas de espalhamento dos solos arenoso e argiloso dentro do ensaio Flow Table.

Diante dessas relações entre os ensaios experimentais aplicados no estado fresco das misturas de SCAA, o ensaio Slump Test não é adequado para mensurar a fluidez das misturas de SCAA, porém foi importante a sua utilização em conjunto com o Slump Flow para corroboração dos limites máximo e mínimo de fluidez das misturas de SCAA. Por sua vez, considerando o modelo de Bingham para descrever o comportamento fresco de suspensões cimentícias, a abertura de espalhamento tende ao infinito para um fluido viscoso sem tensão de escoamento e, portanto, o Slump Flow com o cone de Abrams reduzido representou este comportamento reológico independentemente do tipo de solo ensaiado, podendo ser considerado o ensaio físico mais adequado para se avaliar a fluidez das misturas de SCAA, além de ser considerado de simples execução e eficaz obtenção da medida de diâmetro de espalhamento in situ.

Quanto ao ensaio mecânico, a Figura 24 apresenta os resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias das misturas de SCAA com os solos arenoso e argiloso.

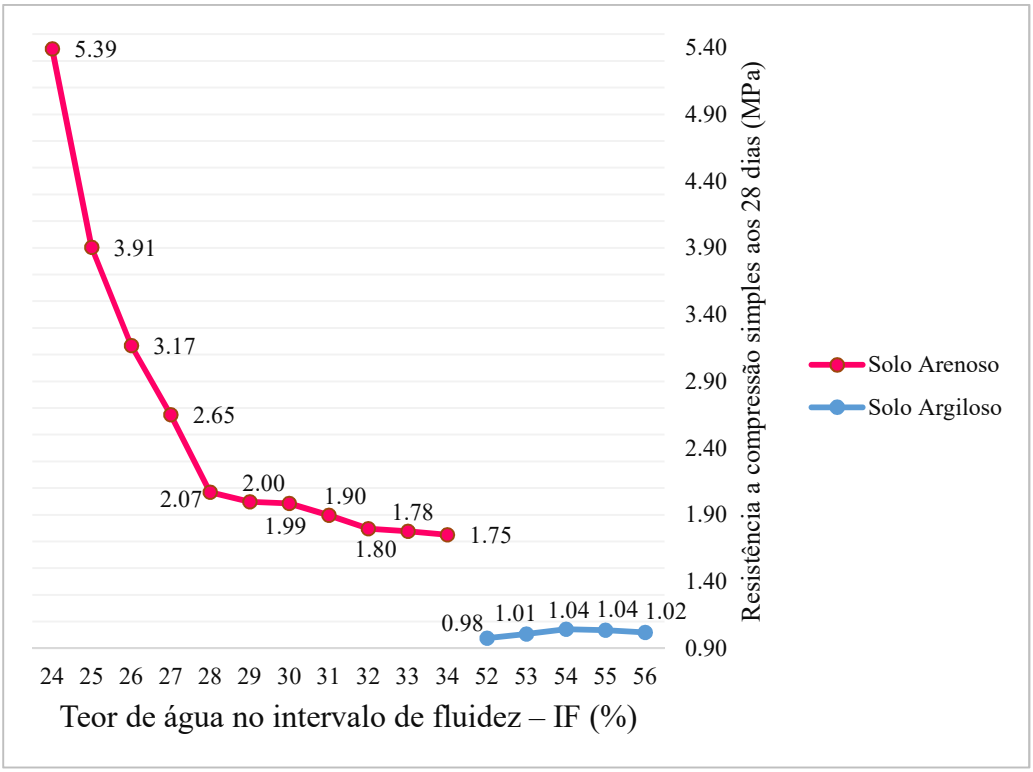


Figura 24 – Gráfico dos resultados do ensaio de Resistência à Compressão

Os valores de resistência à compressão simples das misturas de SCAA com o solo arenoso diminuíram conforme o aumento de teor de água incorporada, sendo que a adição de 27% de água resultou em uma queda significativa de resistência e os demais acréscimos de teor de água não acarretaram diferenças significativas entre os valores de resistência à compressão simples das misturas de SCAA com solo arenoso (Tabela 13). Isto mostra a conformidade da proposta do parâmetro de autoadensabilidade das misturas de SCAA, visto que ao adotar o limite mínimo de abertura de espalhamento do ensaio de Flow Table em 320 mm foi justamente o ponto em que a mistura de SCAA com solo arenoso saiu do estado plástico e iniciou sua liquidez, ou seja, no IF de 24 a 27% as misturas de SCAA com solo arenoso apresentavam maior coesão devido ao seu estado fresco se encontrar no limiar entre plasticidade e fluidificação, assim resultando no significativo maior valor de resistência a compressão simples diante as demais misturas de SCAA com solo arenoso. Já para as misturas de SCAA com o solo argiloso, nenhum dos resultados de resistência à compressão simples apresentaram diferença significativa entre si (Tabela 14).

Destaca-se o 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 (Figura 24). Conforme Barbosa e Tolêdo Filho (1997), as argilas, também denominadas de argilominerais, possuem o formato lamelar ou alongada e são consideradas

quimicamente ativas. Devido ao diâmetro ser inferior a 0,05mm, possuem uma grande superfície específica e alto grau de plasticidade, o que dificulta a estabilização químico-mecânica deste tipo de solo. Por sua vez, partículas de quartzo, devido ao seu formato ser arredondado, interagem melhor com o cimento e se tornam mais fáceis de estabilizar, corroborando o comportamento apresentado pelas misturas de SCAA com os solos arenoso e argiloso.

Ainda, segundo Milani e Silva (2018), a presença de água, cimento e aditivo químico superplastificante no sistema SCAA no estado fresco da mistura resulta na ocorrência das interações físico-químicas, reduzindo a tensão de superfície da água e provocando a dispersão das partículas sólidas do solo por meio de forças de repulsão eletrostática e estérica. Porém, é um material de construção estável quanto as interações físico-químicas, ou seja, o aditivo químico superplastificante não exerce influência nas reações cimentantes em idades avançadas do sistema SCAA. Assim, confirma-se a maior importância do agente cimentante para o ganho de resistência mecânica do SCAA do que atuação da água no processo de estabilização mecânica, visto que, independente do tipo do solo, não houve diferenças significativas entre os valores de resistência à compressão simples das misturas de SCAA conforme o aumento do teor de água (Tabelas 13 e 14). É considerável afirmar que o aumento gradual de água apresente maior influência no comportamento físico no sistema SCAA endurecido sob os aspectos das propriedades de porosidade, de permeabilidade e capacidade de absorção de água (BALAJI; MANI; VENKATARAMA REDDY, 2017).

4.5 Proposta metodológica

Na Figura 25 contém um fluxograma esquemático com a proposta metodológica para determinação da autoadensabilidade do SCAA, em que inicialmente deve ser adotado uma dosagem inicial de solo + cimento Portland + aditivo superplastificante como ponto de partida para as próximas etapas.

Posteriormente, deve ser determinado o LL do solo a ser utilizado conforme a ABNT NBR 6459/2016, se o solo possuir o LL definido, ou seja, se for possível realizar o fechamento da ranhura no Aparelho de Casagrande com mais de 25 golpes e obter um resultado numérico, este LL deve ser utilizado como teor de água ideal para a mistura de SCAA e o ensaio de Slump Flow deve ser aplicado. Por sua vez, caso o ensaio de LL não atinja um valor numérico, deve ser aplicado o ensaio de retração da caixa na mistura de SCAA para obter o IF, conforme instruído por Neves *et al.* (2010), sendo este o intervalo de fluidez em que o material retraiu

menos/ou 20mm e não apresentou fenda e/ou fissura. A seguir, o ensaio de Slump Flow nas misturas de SCAA deve ser executado com o teor de água a cada 1% dentro do IF obtido na etapa anterior.

O ensaio de Slump Flow deve ser realizado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 15823/2017, devendo ser adaptado o cone de Abrams para as dimensões de ϕmenor=50mm, ϕmaior=100mm e altura=150mm.

Para a dosagem adotada inicialmente ser considerada ideal para utilização em paredes monolíticas de solo-cimento autoadensável, o valor de abertura de espalhamento no ensaio de Slump Flow deve estar entre 320 e 460mm e a mistura de SCAA deve atingir o valor de resistência a compressão simples de 1MPa, aos 7 dias de idade.

Caso a mistura de SCAA no ensaio de Slump Flow não alcance o valor de espalhamento entre 320 a 460mm, deve ser modificado o teor de água em 1% de proximidade ao LL do solo ou ao IF do SCAA, ou seja, deve ser adicionado 1% de água na mistura inicial caso o resultado seja menor que 320mm ou retirado 1% de água caso seja maior que 460mm. Realizado esse ajuste, a aplicação do Slump Flow nas misturas de SCAA deve ser repetido até atingir o critério estabelecido neste ensaio. Depois, deve ser realizado o ensaio de resistência a compressão simples aos 7 dias e atingir o valor mínimo de 1MPa. Caso se atinja essa resistência mecânica, a dosagem está adequada para a utilização em paredes monolíticas de SCAA. Se não, a dosagem do SCAA deve ser modificada, aumentando o consumo de cimento e/ou de aditivo superplastificante e retornar para a etapa de definição do LL do solo; a fim de repetir o ensaio de retração da caixa com a nova dosagem para o solo que não possua LL definido, ou aplicar diretamente o ensaio de Slump Flow e continuar com os mesmos procedimentos do fluxograma.

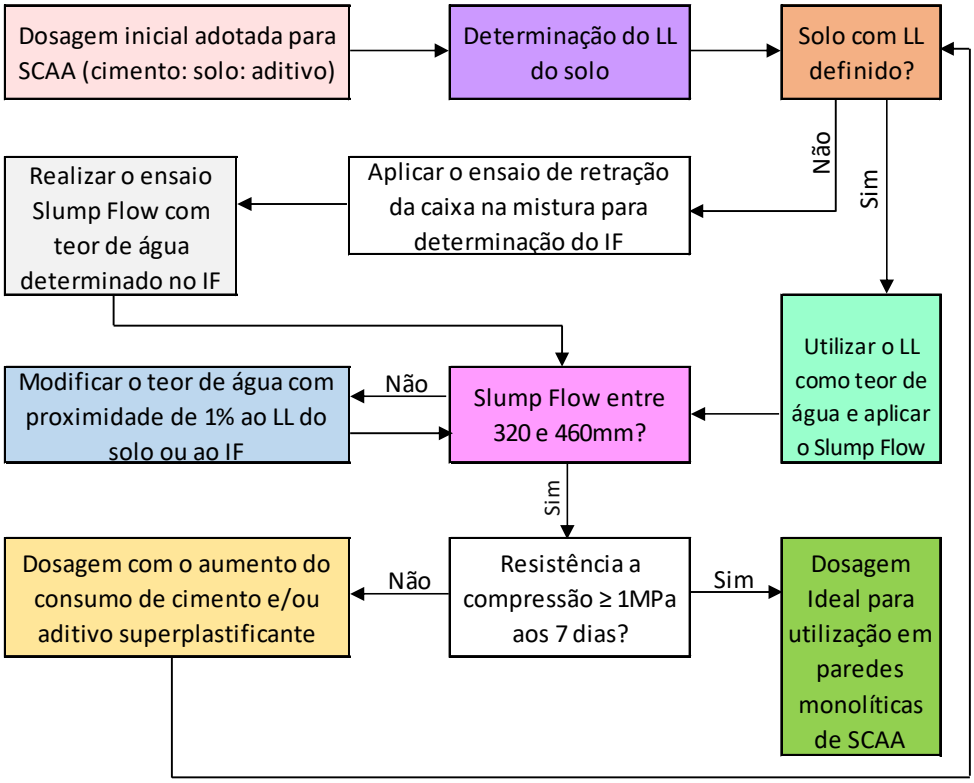


Figura 25 - Fluxograma proposta metodológica de determinação da autoadensabilidade do SCAA

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os solos tropicais caracterizados como argiloso ou arenoso, cuja granulometria tenha 100% das partículas menores que 4,8mm, foram considerados adequados para a mistura com Água + Cimento Portland + Aditivo Superplastificante e obtenção do material construtivo solo-cimento autoadensável (SCAA) para aplicação em paredes monolíticas de edificações. O solo caracterizado siltoso resultou em um solo instável e com dificuldades para estabilização químico-mecânica na presença de água+cimento+aditivo superplastificante em teores que alcance a autoadensabilidade da mistura SCAA;
- Para o estudo de dosagem da mistura solo-cimento autoadensável (SCAA) é ideal a utilização do parâmetro limite de liquidez do solo (LL) como ponto de partida na determinação do teor ótimo de água do material SCAA. Por outro lado, solos que não apresentam limites de liquidez bem definidos é recomendável realizar o ensaio experimental de retração linear da caixa e selecionar como ponto de partida o teor de água dentro do intervalo de fluidez; ou seja, aquele intervalo de adição de água ao SCAA, no qual a caixa foi preenchida com a mistura sem a necessidade de adensamento por compactação ou vibração, e após o endurecimento não ocorreu fendas e fissuras e a retração foi inferior a 20 mm;
- Os ensaios experimentais e a análise estatística aplicados para o estudo da fluidez do SCAA apresentaram boa correlação entre os solos arenoso e argiloso a partir do Slump Flow, assim demonstrando ser o ensaio mais adequado para a determinação dos critérios de autoadensabilidade do SCAA;
- Para as misturas de solo+água+cimento+aditivo superplastificante serem consideradas como um material autoadensável, sem ocorrência de segregação e exsudação, é recomendado realizar o ensaio Slump Flow, adaptando o cone de Abrams para as dimensões de ϕmenor=50mm, ϕmaior=100mm e altura=150mm; e considerar como parâmetro de autoadensabilidade que as misturas de SCAA apresentem valor de abertura do diâmetro de espalhamento de 320 a 460mm durante a realização deste ensaio.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Encontrar uma correlação entre o Cone de Abrams sugerido e o Cone de Abrams padronizado, a fim de projetar o intervalo de autoadensabilidade do SCAA encontrado nesta pesquisa;
- Verificar a influência do tipo e teor de aditivo químico na autoadensabilidade e desempenho físico-mecânico do SCAA;

- Avaliar o desempenho físico-mecânico ao longo do tempo e a durabilidade das misturas de SCAA para melhor respaldo técnico-científico durante a aplicação em elementos construtivos de edificações.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, M. A. M. **Bétons auto-plaçants et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Institut National des Sciences Appliquées – INSA, Toulouse, 2004.

ALCÂNTARA, M. A. M.; NUNES, S. C. B.; RIO, J. F. M. E. Estudo do solo-cimento-autoadensável produzido com solos da região do Porto-PT. parte I: Caracterização de propriedades mecânicas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, p. 37-51, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. ACI 229: **Report on Controlled Low-Strength Materials**. Farmington Hills, 2013.

ARBIZZANI, E. Filiera produttiva e tecnologie innovative per l'abitare. **Techne**, v. 4, p. 138-144, 2012.

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 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, 2016a.

_____. NBR 6459: **Solo** - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. NBR 6502: **Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 7180. **Solo** – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. NBR 7181: **Solo** – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.

_____. NBR 7215: **Cimento Portland** - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 10833: **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica** — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. NBR 12024: **Solo-cimento** — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. 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 12254: **Solo-cimento — Execução de base de solo-cimento** — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013b.

_____. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016e.

_____. NBR 13553: **Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural** — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012c.

_____. NBR 15823: **Concreto autoadensável**. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. 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, 2017b.

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

BALAJI, N. C.; MANI, M.; VENKATARAMA REDDY, B. V. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. **Proceedings […]**, v. 170, n. 1, p. 40–54, 2017.

BARBOSA, N. P.; TOLÊDO FILHO, R. D. **Construção com terra crua**. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap. 4, p.113-43.

BARBOZA, C. S. **Avaliação fisico-mecânica do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2014.

BERGE, B. **The ecology of building materials**. 2 ed. Amsterdan: Elsevier, 2009.

BERTÉ, S. D. D. **Otimização e estudo do comportamento do solo-cimento auto-adensável**. 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.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Projeções da População do Brasil e Unidades da Federação**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?utm_source=projecao&utm_medium=popclock&utm_campaign=projecao-2018&t=resultados>. Rio de Janeiro, 2019.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Fundamentos, 1996.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944.

CERNY, V.; KOCIANOVA, M.; DIEDERICHS, U. Modification of Soils for Excavation Work and Underlayer. **Procedia Engineering**, v. 195, p. 252-258, 2017.

CLAVERIE, J.; ALCÂNTARA, M. A. M. Influência da cinza de casca de arroz e da cal hidratada na resistência mecânica do solo-cimento auto-adensável endurecido. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, p. 206-217, 2017.

CORREIA, M.; JORGE, V. O. **Terra: Forma de Construir**: Arquitectura-Antropologia-Arqueologia. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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.

FERREIRA, L. M. R. F. **Arquitetura de terra**: das técnicas construtivas ao desenvolvimento de competências. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2015.

GIVISIEZ, G. H. N.; OLIVEIRA, E. L. **Demanda futura por moradias demografia habitação e mercado**. Niterói: Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, 2018.

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.

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.

HER-YUNG, W. Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2332-2337, 2009.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth construction. A comprehensive Guide**. London: Intermediate Technology Publicarions, 1989.

KANADASAN, J.; FAUZI, A. F. A.; RAZAK, H. A.; SELLIAH, P.; SUBRAMANIAM, V.; YUSOFF, S. Feasibility Studies of Palm Oil Mill Waste Aggregates for the Construction Industry. **Materials**, v. 8, p. 6508-6530, 2015.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, p. 95-102, 1980.

LLAJARUNA, M. A. V. **Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduo de construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

LUNARDI, P. Ground improvement by means of jet-grouting. **Proceeding […]**, p. 65-85, 1997.

MA, C.; CHEN, L.; CHEN, B. Experimental Study of Effect of Fly Ash on Self-Compacting Rammed Earth Construction Stabilized with Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, p. 1-10, 2016.

MANIATIDIS, V.; WALKER, P. A Review of Rammed Earth Construction. **Proceedings […]**, Yazd, Iran, 2003.

MARTINS, A. P. de S. M. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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

MILANI, A. P. S.; SILVA, C. I. Influence of superplasticiser on cement-stabilised self-compacting Earth. **Proceedings […]** – Ground Improvement, v. 172, p. 85-95, 2018.

MINKE, G. **Manual de construccion en tierra**: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. 2 ed. Uruguay: Fin de Siglo, 2005.

MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MYERS, S. Seclusion: A Last Resort Measure. **Perspectives in Psychiatric Care**, v. 26, p. 24-28, 1990.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B. **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra** - Práticas de campo. Rede Ibero-americana PROTERRA, 2010.

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.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROUSSEL, N.; STEFANI, C.; LEROY, R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. **Cement and Concrete Research,** v.35, p. 817-822, 2005.

SILVA, A. L.; LUNA, C. B. B.; CHAVES, A. C.; NEVES, G. A. Caracterização tecnológica de novos depósitos de argilas da região sul do Amapá visando aplicações na indústria Cerâmica. **Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SAMEH, S. H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 362-373, 2014.

SHEEN, Y.; HUANG, L.; WANG, H.; LE, D. Experimental study and strength formulation of soil-based controlled low-strength material containing stainless steel reducing slag. **Construction and Building Material**s, v. 54, p. 1-9, 2014.

TAN, Z.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. Reproducible mini-Slump Test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, v. 6, p. 1-11, 2017.

TEERAWATTANASUK, C; VOOTTIPRUEX, P. Influence of Clay and Silt Proportions on Cement-Treated Fine-Grained Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 420-428, 2014.

UDAWATTHA, C.; GALABADA, H.; HALWATURA, R. Mud concrete paving block for pedestrian pavements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 249–262, 2017.

VIEIRA, S. **Análise de Variância (ANOVA)**. São Paulo: Atlâas, 2006.

ZAKHAM, N.; RHAFFARI, Y. EL; AMMARI, A.; CHERRAJ, M.; BOUABID, H.; GUERAOUI, K.; SAMAOUALI, A.; MZERD, A. **Influence of cement content on the thermal properties of compressed earth blocks (CEB) in the dry state**. MATEC Web of Conferences, v. 149, p. 1-5, 2018.

APÊNDICE A – Analise de Variância (ANOVA) do Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo arenoso

Tabela 15 – Solo Arenoso - ANOVA do Slump Test

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	10	17018	1702	1.668e+29	2e-16
Resíduo	22	0	0	-	-

Tabela 16 – Solo Arenoso - ANOVA do Slump Flow

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	10	535291	53529	981.4	<2e-16
Resíduo	22	1200	55	-	-

Tabela 17 - Solo Arenoso - ANOVA do Flow Table

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	10	26918	2691.8	47.38	1.52e-12
Resíduo	22	1250	56.8	-	-

Tabela 18 - Solo Arenoso - ANOVA do Resistência a Compressão

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	10	40.12	4.012	16.93	4.06e-08
Resíduo	22	5.21	0.237	-	-

APÊNDICE B – Teste de Tukey para o Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo arenoso

Tabela 19 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Slump Test

Intervalo de Fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
25-24	4.000000e+01	4.000000e+01	4.000000e+01	0.0000000
26-24	7.000000e+01	7.000000e+01	7.000000e+01	0.0000000
27-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
28-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
29-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
30-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
31-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
32-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
33-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
34-24	7.500000e+01	7.500000e+01	7.500000e+01	0.0000000
26-25	3.000000e+01	3.000000e+01	3.000000e+01	0.0000000
27-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
28-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
29-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
30-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
31-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
32-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
33-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
34-25	3.500000e+01	3.500000e+01	3.500000e+01	0.0000000
27-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
28-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
29-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
30-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
31-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
32-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
33-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
34-26	5.000000e+00	5.000000e+00	5.000000e+00	0.0000000
28-27	-8.526513e-14	-3.801296e-13	2.095993e-13	0.9916250
29-27	-8.526513e-14	-3.801296e-13	2.095993e-13	0.9916250
30-27	-5.684342e-14	-3.517078e-13	2.380210e-13	0.9996946
31-27	-5.684342e-14	-3.517078e-13	2.380210e-13	0.9996946
32-27	-5.684342e-14	-3.517078e-13	2.380210e-13	0.9996946
33-27	-8.526513e-14	-3.801296e-13	2.095993e-13	0.9916250
34-27	-5.684342e-14	-3.517078e-13	2.380210e-13	0.9996946
29-28	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
30-28	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
31-28	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
32-28	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
33-28	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
34-28	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
30-29	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
31-29	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
32-29	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
33-29	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
34-29	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995
31-30	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000

32-30	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
33-30	-2.842171e-14	-3.232861e-13	2.664427e-13	0.9999995
34-30	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
32-31	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
33-31	-2.842171e-14	-3.232861e-13	2.664427e-13	0.9999995
34-31	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
33-32	-2.842171e-14	-3.232861e-13	2.664427e-13	0.9999995
34-32	0.000000e+00	-2.948644e-13	2.948644e-13	1.0000000
34-33	2.842171e-14	-2.664427e-13	3.232861e-13	0.9999995

Tabela 20 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Slump Flow

Intervalo de Fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
25-24	73.333333	51.776401	94.89027	0.0000000
26-24	130.000000	108.443068	151.55693	0.0000000
27-24	193.333333	171.776401	214.89027	0.0000000
28-24	236.666667	215.109735	258.22360	0.0000000
29-24	276.666667	255.109735	298.22360	0.0000000
30-24	350.000000	328.443068	371.55693	0.0000000
31-24	356.666667	335.109735	378.22360	0.0000000
32-24	366.666667	345.109735	388.22360	0.0000000
33-24	373.333333	351.776401	394.89027	0.0000000
34-24	376.666667	355.109735	398.22360	0.0000000
26-25	56.666.667	35.109.735	7.822.360	0.0000002
27-25	120.000.000	98.443.068	14.155.693	0.0000000
28-25	163.333.333	141.776.401	18.489.027	0.0000000
29-25	203.333.333	181.776.401	22.489.027	0.0000000
30-25	276.666.667	255.109.735	29.822.360	0.0000000
31-25	283.333.333	261.776.401	30.489.027	0.0000000
32-25	293.333.333	271.776.401	31.489.027	0.0000000
33-25	300.000.000	278.443.068	32.155.693	0.0000000
34-25	303.333.333	281.776.401	32.489.027	0.0000000
27-26	63.333.333	41.776.401	8.489.027	0.0000000
28-26	106.666.667	85.109.735	12.822.360	0.0000000
29-26	146.666.667	125.109.735	16.822.360	0.0000000
30-26	220.000.000	198.443.068	24.155.693	0.0000000
31-26	226.666.667	205.109.735	24.822.360	0.0000000
32-26	236.666.667	215.109.735	25.822.360	0.0000000
33-26	243.333.333	221.776.401	26.489.027	0.0000000
34-26	246.666.667	225.109.735	26.822.360	0.0000000
28-27	43.333.333	21.776.401	6.489.027	0.0000151
29-27	83.333.333	61.776.401	10.489.027	0.0000000
30-27	156.666.667	135.109.735	17.822.360	0.0000000
31-27	163.333.333	141.776.401	18.489.027	0.0000000
32-27	173.333.333	151.776.401	19.489.027	0.0000000
33-27	180.000.000	158.443.068	20.155.693	0.0000000
34-27	183.333.333	161.776.401	20.489.027	0.0000000
29-28	40.000.000	18.443.068	6.155.693	0.0000504
30-28	113.333.333	91.776.401	13.489.027	0.0000000

31-28	120.000.000	98.443.068	14.155.693	0.0000000
32-28	130.000.000	108.443.068	15.155.693	0.0000000
33-28	136.666.667	115.109.735	15.822.360	0.0000000
34-28	140.000.000	118.443.068	16.155.693	0.0000000
30-29	73.333.333	51.776.401	9.489.027	0.0000000
31-29	80.000.000	58.443.068	10.155.693	0.0000000
32-29	90.000.000	68.443.068	11.155.693	0.0000000
33-29	96.666.667	75.109.735	11.822.360	0.0000000
34-29	100.000.000	78.443.068	12.155.693	0.0000000
31-30	6.666.667	-14.890.265	2.822.360	0.9863206
32-30	16.666.667	-4.890.265	3.822.360	0.2349566
33-30	23.333.333	1.776.401	4.489.027	0.0266287
34-30	26.666.667	5.109.735	4.822.360	0.0077523
32-31	10.000.000	-11.556.932	3.155.693	0.8403559
33-31	16.666.667	-4.890.265	3.822.360	0.2349566
34-31	20.000.000	-1.556.932	4.155.693	0.0847755
33-32	6.666.667	-14.890.265	2.822.360	0.9863206
34-32	10.000.000	-11.556.932	3.155.693	0.8403559
34-33	3.333.333	-18.223.599	2.489.027	0.9999578

Tabela 21 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Flow Table

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
25-24	6.666.667	-15.334.785	2.866.812	0.9881901
26-24	15.000.000	-7.001.452	3.700.145	0.3885816
27-24	25.000.000	2.998.548	4.700.145	0.0174279
28-24	31.666.667	9.665.215	5.366.812	0.0014740
29-24	48.333.333	26.331.882	7.033.478	0.0000037
30-24	65.000.000	42.998.548	8.700.145	0.0000000
31-24	68.333.333	46.331.882	9.033.478	0.0000000
32-24	71.666.667	49.665.215	9.366.812	0.0000000
33-24	78.333.333	56.331.882	10.033.478	0.0000000
34-24	80.000.000	57.998.548	10.200.145	0.0000000
26-25	8.333.333	-13.668.118	3.033.478	0.9473892
27-25	18.333.333	-3.668.118	4.033.478	0.1614908
28-25	25.000.000	2.998.548	4.700.145	0.0174279
29-25	41.666.667	19.665.215	6.366.812	0.0000373
30-25	58.333.333	36.331.882	8.033.478	0.0000002
31-25	61.666.667	39.665.215	8.366.812	0.0000001
32-25	65.000.000	42.998.548	8.700.145	0.0000000
33-25	71.666.667	49.665.215	9.366.812	0.0000000
34-25	73.333.333	51.331.882	9.533.478	0.0000000
27-26	10.000.000	-12.001.452	3.200.145	0.8555220
28-26	16.666.667	-5.334.785	3.866.812	0.2576251
29-26	33.333.333	11.331.882	5.533.478	0.0007900
30-26	50.000.000	27.998.548	7.200.145	0.0000021
31-26	53.333.333	31.331.882	7.533.478	0.0000007
32-26	56.666.667	34.665.215	7.866.812	0.0000003
33-26	63.333.333	41.331.882	8.533.478	0.0000000

34-26	65.000.000	42.998.548	8.700.145	0.0000000
28-27	6.666.667	-15.334.785	2.866.812	0.9881901
29-27	23.333.333	1.331.882	4.533.478	0.0315503
30-27	40.000.000	17.998.548	6.200.145	0.0000678
31-27	43.333.333	21.331.882	6.533.478	0.0000207
32-27	46.666.667	24.665.215	6.866.812	0.0000065
33-27	53.333.333	31.331.882	7.533.478	0.0000007
34-27	55.000.000	32.998.548	7.700.145	0.0000004
29-28	16.666.667	-5.334.785	3.866.812	0.2576251
30-28	33.333.333	11.331.882	5.533.478	0.0007900
31-28	36.666.667	14.665.215	5.866.812	0.0002290
32-28	40.000.000	17.998.548	6.200.145	0.0000678
33-28	46.666.667	24.665.215	6.866.812	0.0000065
34-28	48.333.333	26.331.882	7.033.478	0.0000037
30-29	16.666.667	-5.334.785	3.866.812	0.2576251
31-29	20.000.000	-2.001.452	4.200.145	0.0967821
32-29	23.333.333	1.331.882	4.533.478	0.0315503
33-29	30.000.000	7.998.548	5.200.145	0.0027513
34-29	31.666.667	9.665.215	5.366.812	0.0014740
31-30	3.333.333	-18.668.118	2.533.478	0.9999650
32-30	6.666.667	-15.334.785	2.866.812	0.9881901
33-30	13.333.333	-8.668.118	3.533.478	0.5476946
34-30	15.000.000	-7.001.452	3.700.145	0.3885816
32-31	3.333.333	-18.668.118	2.533.478	0.9999650
33-31	10.000.000	-12.001.452	3.200.145	0.8555220
34-31	11.666.667	-10.334.785	3.366.812	0.7138362
33-32	6.666.667	-15.334.785	2.866.812	0.9881901
34-32	8.333.333	-13.668.118	3.033.478	0.9473892
34-33	1.666.667	-20.334.785	2.366.812	10000000

Tabela 22 – Solo Arenoso - Teste de Tukey para os valores de Resistência à Compressão

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
25-24	-148.600.000	-2.906.821	-0.065178945	0.0353176
26-24	-222.400.000	-3.644.821	-0.803178945	0.0005230
27-24	-274.033.333	-4.161.154	-1.319.512.279	0.0000284
28-24	-332.166.667	-4.742.488	-1.900.845.612	0.0000013
29-24	-339.333.333	-4.814.154	-1.972.512.279	0.0000009
30-24	-340.566.667	-4.826.488	-1.984.845.612	0.0000009
31-24	-349.500.000	-4.915.821	-2.074.178.945	0.0000006
32-24	-359.600.000	-5.016.821	-2.175.178.945	0.0000003
33-24	-361.300.000	-5.033.821	-2.192.178.945	0.0000003
34-24	-364.000.000	-5.060.821	-2.219.178.945	0.0000003
26-25	-0.73800000	-2.158.821	0.682821055	0.7363913
27-25	-125.433.333	-2.675.154	0.166487721	0.1160514
28-25	-183.566.667	-3.256.488	-0.414845612	0.0049519
29-25	-190.733.333	-3.328.154	-0.486512279	0.0032736
30-25	-191.966.667	-3.340.488	-0.498845612	0.0030480
31-25	-200.900.000	-3.429.821	-0.588178945	0.0018161

32-25	-211.000.000	-3.530.821	-0.689178945	0.0010111
33-25	-212.700.000	-3.547.821	-0.706178945	0.0009163
34-25	-215.400.000	-3.574.821	-0.733178945	0.0007837
27-26	-0.51633333	-1.937.154	0.904487721	0.9593224
28-26	-109.766.667	-2.518.488	0.323154388	0.2357833
29-26	-116.933.333	-2.590.154	0.251487721	0.1725523
30-26	-118.166.667	-2.602.488	0.239154388	0.1631732
31-26	-127.100.000	-2.691.821	0.149821055	0.1070512
32-26	-137.200.000	-2.792.821	0.048821055	0.0644875
33-26	-138.900.000	-2.809.821	0.031821055	0.0590568
34-26	-141.600.000	-2.836.821	0.004821055	0.0512846
28-27	-0.58133333	-2.002.154	0.839487721	0.9172510
29-27	-0.65300000	-2.073.821	0.767821055	0.8474019
30-27	-0.66533333	-2.086.154	0.755487721	0.8329945
31-27	-0.75466667	-2.175.488	0.666154388	0.7119826
32-27	-0.85566667	-2.276.488	0.565154388	0.5560701
33-27	-0.87266667	-2.293.488	0.548154388	0.5296792
34-27	-0.89966667	-2.320.488	0.521154388	0.4883744
29-28	-0.07166667	-1.492.488	1.349.154.388	1.0000000
30-28	-0.08400000	-1.504.821	1.336.821.055	1.0000000
31-28	-0.17333333	-1.594.154	1.247.487.721	0.9999954
32-28	-0.27433333	-1.695.154	1.146.487.721	0.9996904
33-28	-0.29133333	-1.712.154	1.129.487.721	0.9994784
34-28	-0.31833333	-1.739.154	1.102.487.721	0.9988936
30-29	-0.01233333	-1.433.154	1.408.487.721	1.0000000
31-29	-0.10166667	-1.522.488	1.319.154.388	1.0000000
32-29	-0.20266667	-1.623.488	1.218.154.388	0.9999800
33-29	-0.21966667	-1.640.488	1.201.154.388	0.9999579
34-29	-0.24666667	-1.667.488	1.174.154.388	0.9998793
31-30	-0.08933333	-1.510.154	1.331.487.721	1.0000000
32-30	-0.19033333	-1.611.154	1.230.487.721	0.9999888
33-30	-0.20733333	-1.628.154	1.213.487.721	0.9999753
34-30	-0.23433333	-1.655.154	1.186.487.721	0.9999240
32-31	-0.10100000	-1.521.821	1.319.821.055	1.0000000
33-31	-0.11800000	-1.538.821	1.302.821.055	0.9999999
34-31	-0.14500000	-1.565.821	1.275.821.055	0.9999992
33-32	-0.01700000	-1.437.821	1.403.821.055	1.0000000
34-32	-0.04400000	-1.464.821	1.376.821.055	1.0000000
34-33	-0.02700000	-1.447.821	1.393.821.055	1.0000000

APÊNDICE C – Analise de Variância (ANOVA) do Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo argiloso

Tabela 23 - Solo Argiloso - ANOVA do Slump Test

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	4	6.40	1.600	0.923	0,488
Resíduo	10	17.33	1.733	-	-

Tabela 24 - Solo Argiloso - ANOVA do Slump Flow

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	4	52657	13164	282.1	3.12e-10
Resíduo	10	467	47	-	-

Tabela 25 - Solo Argiloso - ANOVA do Flow Table

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	4	5324	1331.1	34.19	8.31e-06
Resíduo	10	389	38.9	-	-

Tabela 26 - Solo Argiloso - ANOVA do Resistência a Compressão

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	Valor F	Valor P
LL	4	0.00804	0.002011	0.529	0.717
Resíduo	10	0.03801	0.003801	-	-

APÊNDICE D – Teste de Tukey para o Slump Test, Slump Flow, Flow Table e Resistência a Compressão, para o solo argiloso

Tabela 27 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Slump Test

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
53-52	0.000000e+00	-3.955389	3.955389	1.0000000
54-52	-1.136868e-13	-3.752411	3.752411	1.0000000
55-52	6.666667e-01	-3.288722	4.622055	0.9788156
56-52	1.666667e+00	-2.288722	5.622055	0.6486194
54-53	-1.136868e-13	-3.309315	3.309315	1.0000000
55-53	6.666667e-01	-2.871140	4.204474	0.9684135
56-53	1.666667e+00	-1.871140	5.204474	0.5563109
55-54	6.666667e-01	-2.642649	3.975982	0.9600840
56-54	1.666667e+00	-1.642649	4.975982	0.4976429
56-55	1.000000e+00	-2.537807	4.537807	0.8788305

Tabela 28 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Slump Flow

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
53-52	7.500.000	5.664.322.055	9.335.678	0.0000008
54-52	12.333.333	10.497.655.389	14.169.011	0.0000000
55-52	14.666.667	12.830.988.722	16.502.345	0.0000000
56-52	16.500.000	14.664.322.055	18.335.678	0.0000000
54-53	4.833.333	2.997.655.389	6.669.011	0.0000444
55-53	7.166.667	5.330.988.722	9.002.345	0.0000012
56-53	9.000.000	7.164.322.055	10.835.678	0.0000001
55-54	2.333.333	497.655.389	4.169.011	0.0126427
56-54	4.166.667	2.330.988.722	6.002.345	0.0001610
56-55	1.833.333	-0.02344611	3.669.011	0.0503273

Tabela 29 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Flow Table

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
53-52	14.000.000	-27.669.432	3.076.694	0.1151588
54-52	35.000.000	182.330.568	5.176.694	0.0003249
55-52	41.666.667	248.997.235	5.843.361	0.0000738
56-52	51.666.667	348.997.235	6.843.361	0.0000108
54-53	21.000.000	42.330.568	3.776.694	0.0138754
55-53	27.666.667	108.997.235	4.443.361	0.0020757
56-53	37.666.667	208.997.235	5.443.361	0.0001758
55-54	6.666.667	-101.002.765	2.343.361	0.6925374
56-54	16.666.667	-0.1002765	3.343.361	0.0515509
56-55	10.000.000	-67.669.432	2.676.694	0.3476569

Tabela 30 – Solo Argiloso - Teste de Tukey para os valores de Resistência à Compressão

Intervalo de fluidez	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor P
53-52	0.030979081	-0.1346933	0.1966514	0.9692656
54-52	0.065267759	-0.1004046	0.2309401	0.6992152
55-52	0.058979081	-0.1066933	0.2246514	0.7666498
56-52	0.041636751	-0.1240356	0.2073091	0.9161746
54-53	0.034288677	-0.1313837	0.1999610	0.9561721
55-53	0.028000000	-0.1376724	0.1936724	0.9786046
56-53	0.010657670	-0.1550147	0.1763300	0.9994695
55-54	-0.006288677	-0.1719610	0.1593837	0.9999345
56-54	-0.023631008	-0.1893034	0.1420413	0.9885307
56-55	-0.017342330	-0.1830147	0.1483300	0.9964528