

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JEROME CLAVERIE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ E DA CAL NAS
PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO AUTO-ADENSÁVEL**

Ilha Solteira
2015

JEROME CLAVERIE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ E DA CAL NAS
PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO AUTO-ADENSÁVEL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus
de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a
obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil
Área de Conhecimento: Estruturas

Prof. Dr. MARCO ANTONIO DE MORAIS ALCANTARA
Orientador

Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON DA SILVA SEGANTINI
Co-orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C617e Claverie, Jérôme.
Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento auto-adensável / Jérôme Claverie. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2015

Orientador: Marco Antonio de Morais Alcantara
Co-orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini
Inclui bibliografia

1. Solo-cimento. 2. Auto-adensável . 3. Cinza de casca de arroz. 4. Cal. 5. Reologia.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento auto-adensável

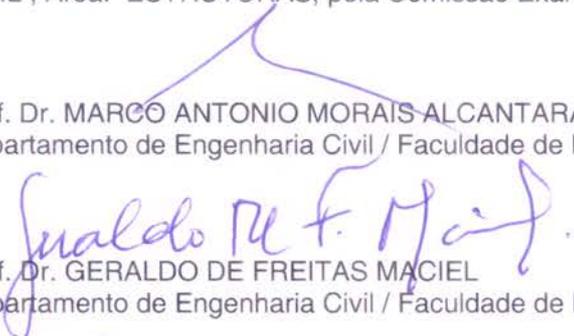
AUTOR: JÉRÔME CLAVERIE

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GILBERTO CARBONARI
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Estadual de Londrina

Data da realização: 31 de julho de 2015.

DEDICATORIA

Aos meus pais, Bernard e Christine, a meu irmão Bertrand, e a minha namorada Katriny, dedico esse trabalho pelo amor, pela atenção e pelo carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelo cuidado e pela oportunidade de viver experiências como essa.

Aos meus pais Bernard e Christine, meu irmão Bertrand, e toda a minha família por sempre ter sido uma fonte de amor e pelas lembranças de muitos momentos passados juntos.

A minha namorada Katriny e aos pais dela Rogerio e Rousy, por todo o amor, pelo cuidado e por ser minha segunda família no Brasil.

A minha igreja e família em Cristo da IBC de Ilha Solteira que nunca esquecerei.

Ao meu Professor e Orientador Marco Antonio de Moraes Alcântara, por toda a atenção, as conversas, por ter me orientado e sempre confiado nas minhas capacidades.

Ao Professor Antonio Anderson Segantini pela co-orientação e contribuições no trabalho.

Ao Professor Geraldo de Freitas Maciel pela contribuição especial no trabalho.

Ao Ze Carlos por toda a afeição, pela ajuda, e pela amizade eterna que criamos.

Ao Anderson pela ajuda voluntaria a esse trabalho.

Ao Gilson pela ajuda técnica, ao Ademir, e a todos os técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil de Ilha Solteira.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil e da UNESP de Ilha Solteira por ter me recebido da melhor maneira.

RESUMO

Este trabalho de pesquisa apresenta um estudo sobre a influência da Cinza de Casca de Arroz – CCA e da cal no comportamento do Solo Cimento Auto-Adensável – SCAA no estado fresco e endurecido, e um estudo preliminar sobre a reologia do SCAA e sua relação com o fator água/cimento. Foram adotadas 18 misturas de SCAA, variando-se as quantidades de água, cimento, CCA, cal e superplastificante, utilizando parâmetros adequados como base de estudo. A proposta principal visa analisar a ação de materiais pozolânicos e hidráulicos na mistura de SCAA, nas condições de trabalhabilidade no estado fresco, e na evolução de sua resistência ao longo do tempo. No estado fresco, foram realizados ensaios de espalhamento “slump flow”, ensaio do Funil e ensaios de segregação por peneiramento; no estado endurecido, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram submetidos a ensaios de resistência à compressão mecânica e absorção de água aos 7, 28, 56 e 84 dias. Observou-se que, no estado fresco, para o maior teor de cimento adotado no estudo, a mistura mostrou uma diminuição de trabalhabilidade com a adição de CCA. No estado endurecido, foi observado uma diminuição da absorção e um crescimento da resistência mecânica à compressão com os teores de cimento, de CCA, de cal, e dos dois conjuntamente. A ação benéfica da CCA na resistência mecânica a compressão aumentou, em geral, com o teor de cimento na mistura, e através do tempo a partir de 28 dias de cura. Uma diminuição desta ação é visível a partir de 84 dias de cura. Foram alcançados, aos 28 dias de cura, tensões limites de 7,99 MPa para as misturas sem adições, e de 11,45 MPa com adjunção de 10% de CCA em relação com a massa de cimento. O estudo adicional que foi realizado durante essa pesquisa teve como proposta a análise do comportamento reológico do SCAA fresco para três das 18 misturas desenvolvidas no estudo principal, apresentando fatores água/cimento diferentes. O estudo adicional preliminar ateve-se à determinação do modelo reológico – representativo do comportamento do material fresco – e dos parâmetros reológicos – tensão limite de escoamento e viscosidade do material. Também foram evidenciadas correlações entre as medições reométricas e os resultados obtidos durante os ensaios de espalhamento, e do Funil.

Palavras-chave: Solo-cimento. Cinza. Casca de arroz. Cal. Auto-adensável. Reologia.

ABSTRACT

This paper presents a study about the influence of Rice Husk Ash – RHA and lime on the behaviour of Self-Compacting Soil Cement – SCSC at fresh and hardened state, and a preliminary study about the rheology of SCSC and its relationship with the water-cement ratio. 18 mixes were made by varying the amounts of water, cement, RHA, lime and superplasticizer, using appropriate parameters as a baseline. The main proposal aims to analyze the action of pozzolans and hydraulic materials in the SCSC mixtures, on workability conditions at fresh state, and on compressive strength over time. Slump Flow, Funnel and Segregation tests were performed at fresh state. At hardened state, cylindrical specimens of 50 mm diameter and 100 mm height, were subjected to unconfined compression test and water absorption test after 7, 28, 56 and 84 days. It was observed that, at fresh state, for the higher cement content adopted in this study, the mixture showed a decrease in workability with the addition of RHA. At hardened state, the material showed a decrease in absorption and an increase in compressive strength with cement, RHA and lime contents, and with the addition of RHA and lime together. The beneficial action of CCA on the strength of SCSC increased, on average, with the cement content in the mix, and through time from 28 days of curing. A decrease of that action is visible at 84 days of curing. After 28 days of curing, ultimate tensile strength of 7.99 MPa for mixes without additions, and 11.45 MPa with ratio CCA:cement of 1:10. In the additional study related in this paper, the rheological behavior of fresh SCAA developed in the study was analyzed. Three mixes, without addition, were chosen within the 18 mixes of the main study with the purpose of observing the water-cement ratio influence. The additional study adhered to the determination of the rheological model – representing the behavior of the fresh material – and the rheological parameters – yield stress and viscosity of the material. Correlations between the rheometric measurements and the results obtained during the Slump Flow and Funnel tests were also observed.

Keywords: Soil-cement. Ash. Rice husk. Lime. Self-compacting. Rheology.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – água/cimento

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CP – Cimento Portland

CPs – Corpos de Provas

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DSM – Deep Soil Mixing

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EP – Estudo Principal

EA – Estudo Adicional

HRB – Highway Research Board

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SCAA – Solo Cimento Auto-Adensável

SCP – Solo-Cimento Plástico

SCC – Solo-Cimento Compactado

UNESP – Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	<i>Objetivo do Estudo Principal (EP)</i>	11
1.1.2	<i>Objetivo do Estudo Adicional (EA)</i>	11
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	12
2.1	Definição do Solo-Cimento Auto-Adensável.....	12
2.2	Histórico das pesquisas e aplicações.....	12
2.3	Requisitos de desempenho.....	16
2.4	Atividade físico-química das argilas com o cimento e a cal.....	17
2.5	Atividade físico-química da Cinza de Casca de Arroz na mistura de SCAA.....	19
2.6	Principais conceitos de reologia.....	20
2.6.1	<i>Introdução à reologia</i>	20
2.6.2	<i>Classificação dos modelos reológicos</i>	23
2.6.3	<i>Geometria de medição reométrica rotacional</i>	26
3	MATERIAIS E METODOS.....	28
3.1	Materiais.....	28
3.1.1	<i>Solo</i>	28
3.1.2	<i>Cimento</i>	29
3.1.3	<i>Água</i>	29
3.1.4	<i>Areia</i>	29
3.1.5	<i>Aditivo</i>	30
3.1.6	<i>Cinza de casca de arroz</i>	30
3.1.7	<i>Cal</i>	31
3.2	Método experimental do Estudo Principal.....	32
3.2.1	<i>Procedimento experimental</i>	32

3.2.2	<i>Ensaaios no estado fresco</i>	35
3.2.3	<i>Ensaaios do material no estado endurecido</i>	38
3.3	Estudo Adicional.....	39
3.3.1	<i>Método experimental</i>	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESTUDO PRINCIPAL	42
4.1	Resultados dos ensaios no estado fresco.....	43
4.1.1	<i>Apresentação dos resultados</i>	43
4.1.2	<i>Estudo do comportamento</i>	45
4.2	Resultados dos ensaios no estado endurecido.....	54
4.2.1	<i>Apresentação dos resultados</i>	54
4.2.2	<i>Estudo do comportamento</i>	58
5	RESULTADOS E DISCUSSOES DO ESTUDO ADICIONAL.....	68
6	CONCLUSOES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.1	Conclusões do Estudo Principal	71
6.2	Conclusões do Estudo Adicional	72
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
7.1	Sugestões para melhorar a precisão dos ensaios no estado fresco.....	73
7.2	Sugestões de pesquisa	74
	ANEXO	79
	ANEXO A – Caracterização do Solo Podzólico Vermelho Amarelo	80
	ANEXO B – Caracterização da areia	83
	ANEXO C – Resultados reométricos	85
	APÊNDICE A – Outras correlações.....	90

1 INTRODUÇÃO

Em um mundo onde os recursos são limitados, a construção civil está em perpétua pesquisa de soluções sustentáveis. O desempenho de materiais de construção alternativos e de baixo impacto ambiental se tornou uma linha de pesquisa considerável na Engenharia Civil. A interação entre os produtos cimentantes e os materiais mineralógicos naturais está na base de um novo tema de pesquisa. Assim, solos argilosos podem ser usados em meio cimentício pelos seus efeitos pozolânicos, ou ainda como carga inerte para preencher, em parte, a porosidade aberta (BOUALLA; BENAOUA, 2011).

Muitas pesquisas com o solo-cimento já foram feitas, porém, ainda não se chegou a um traço ideal e ainda está longe de se alcançar o traço perfeito deste material. Isto se deve, principalmente, ao fato do solo ser um material muito diverso, pois cada solo possui suas características e particularidades, o que difere de outros materiais como o concreto, por exemplo, que, confeccionados com controle tecnológico, garantem as propriedades desejadas para cada fim (BERTE, 2012).

O solo cimento estudado nessa pesquisa difere do solo cimento compactado utilizado na construção. O Solo-Cimento Auto-Adensável – SCAA tem uma trabalhabilidade permitindo um adensamento pelo seu próprio peso e tem um interesse particular na estabilização dos solos e nas fundações.

Nessa pesquisa, são avaliadas as características do SCAA, a partir dos resultados de ensaios no estado fresco e endurecido, observando as influências dos principais componentes que são a água, o cimento e o aditivo superplastificante e particularmente a influência da adição de CCA e cal, comparando com traços de referência. Nesse propósito, em um primeiro momento, foram executados ensaios do Funil, de espalhamento “slump flow”, de segregação, de resistência à compressão mecânica e de absorção de água. Em um segundo momento, foi avaliado o comportamento reológico do SCAA fresco para três fatores água/cimento diferentes. Foram assim executados ensaios de reometria, de espalhamento e do Funil visando determinar suas inter-relações.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo do Estudo Principal (EP)*

a) Objetivo principal

No EP, 18 misturas de SCAA foram realizadas com materiais e meios tecnológicos comumente utilizados na indústria da construção, no intuito de se aproximar das condições de uma obra padrão. Em primeiro lugar, o material foi avaliado no estado fresco de maneira a poder qualificar suas propriedades de auto-adensamento, e de poder discutir o papel dos diferentes componentes nestas propriedades. Em segundo lugar, o desempenho no estado endurecido foi analisado através de diversos tempos de cura, expondo assim as suas qualidades em termos de durabilidade, e também, discutindo as variações destas.

b) Objetivos específicos

Analisar a influência dos teores de água, cimento, cinza de casca de arroz, cal e superplastificante no desempenho das misturas de SCAA.

Assim serão realizados:

- os ensaios do Funil, de espalhamento e de segregação com o material no estado fresco para garantir o caráter auto-adensável do material;
- os ensaios de resistência à compressão mecânica e de absorção de água, com o material no estado endurecido aos 7, 28, 56 e 84 dias.

1.1.2 *Objetivo do Estudo Adicional (EA)*

O objetivo do EA é de estudar o comportamento reológico de 3 misturas de SCAA fresco a partir dos resultados dos ensaios de reometria, de espalhamento e do Funil.

Será determinada a classe reológica do material, analisada a influência do fator água/cimento no desempenho das misturas, e evidenciadas correlações entre as medidas reométricas e os ensaios de espalhamento e do Funil.

Os resultados obtidos nesses dois estudos serão interpretados e explicados se apoiando no conhecimento apresentado na revisão bibliográfica.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Uma revisão bibliográfica completa e detalhada sobre o solo-cimento foi realizada em Berte (2012). Aqui será proposta uma revisão específica do SCAA, dando uma noção das aplicações possíveis para esse material e dos resultados que foram obtidos em outras pesquisas. Também serão introduzidos conceitos permitindo o entendimento do comportamento do SCAA e das questões a serem abordadas quanto ao estudo desse material.

2.1 Definição do Solo-Cimento Auto-Adensável

Segundo Alcântara (1995), o solo-cimento é um material de construção resultante do processo de estabilização de solos com cimento, onde o cimento atua como o estabilizante químico, por meio da hidratação, preenchendo os vazios do solo e formando com ele uma matriz.

Segantini e Alcantara (2010) apresenta um Solo-Cimento Plástico – SCP concebido de maneira a se compactar sob o efeito de vibrações tal um concreto convencional. Esse modo de uso difere do Solo Cimento Compactado – SCC, que necessita uma energia de compactação e permite uma utilização na produção de estacas moldadas “in loco”. De acordo com Segantini e Alcantara (2010), para a dosagem do solo-cimento plástico, os teores de cimento devem ser, em peso, 4% acima daqueles sugeridos para o SCC, em condições de massa específica máxima.

O SCAA é uma forma particular de solo-cimento, cuja particularidade reside na ausência de energia no processo de adensamento. Essa característica induz uma fluidez suficiente e um controle de eventos, tal como segregação ou exsudação, necessitando teores de cimento ainda acima do SCP.

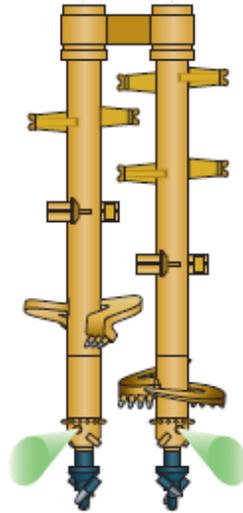
2.2 Histórico das pesquisas e aplicações

Segundo Horpibulsuk, Rachan e Suddepong (2011), uma das técnicas mais eficaz de estabilização do solo é aquela chamada de Deep Soil Mixing – DSM. Esse método, largamente utilizado em geotécnica, tanto para o reforço quanto para a impermeabilização dos solos. Segundo Keller (2015), existem duas categorias de métodos de DSM: o solo pode ser misturado mecanicamente, ou com um caldo de aglomerante ou com um aglomerante não hidratado. A escolha do método é feita em função da natureza do solo e da quantidade de água presente

nesse, de maneira a garantir a hidratação do aglomerante. A injeção a alta pressão pode também ser utilizada para melhorar a qualidade da mistura.

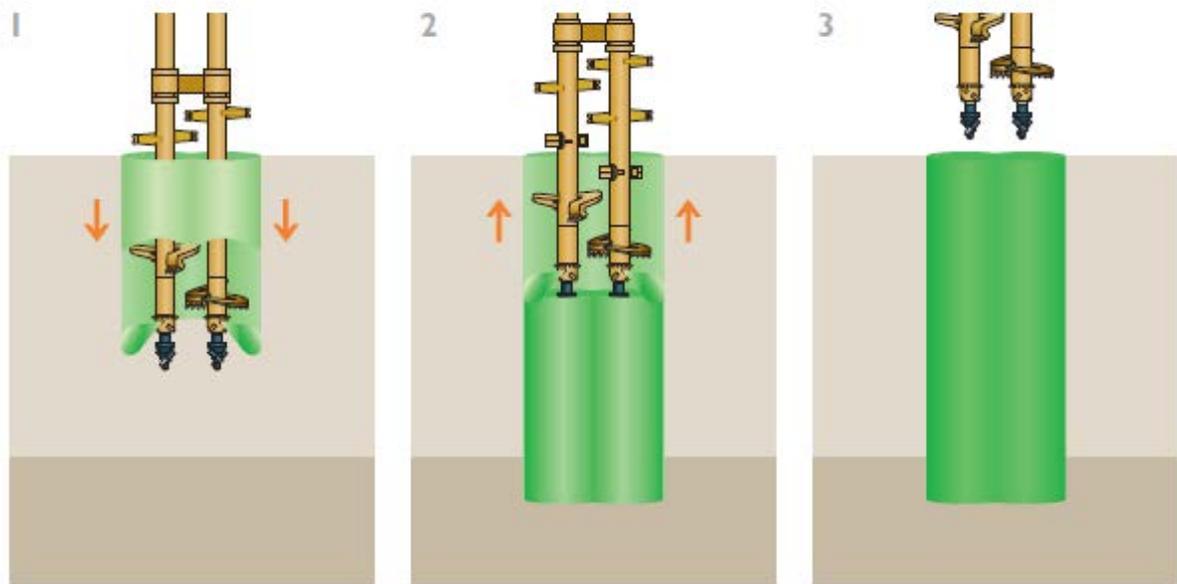
Ferramenta especial é utilizada para a mistura do solo com o aglomerante é ilustrada pela Figura 1. Esta é constituída de um tubo central, de pás transversais e de uma ponta de foragem. Os diâmetros das colunas realizadas podem variar de 0,40 m a 2,40 m. A ferramenta, submetida a movimentos sucessivos de descida e subida, garante a homogeneidade da mistura do caldo com o solo como ilustrado na Figura 2. O traço e o volume do caldo injetado dependem dos resultados desejados quanto aos critérios de resistência à compressão e de impermeabilidade. A sustentação dos momentos de flexão das colunas de DSM pode ser garantida pela adição de armaduras logo após a realização dessas.

Figura 1 – Ferramenta de mistura



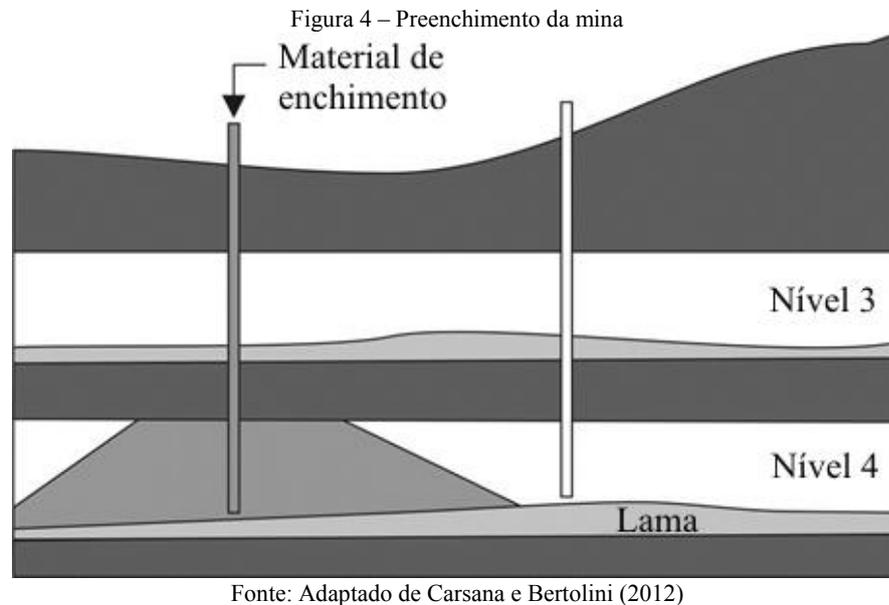
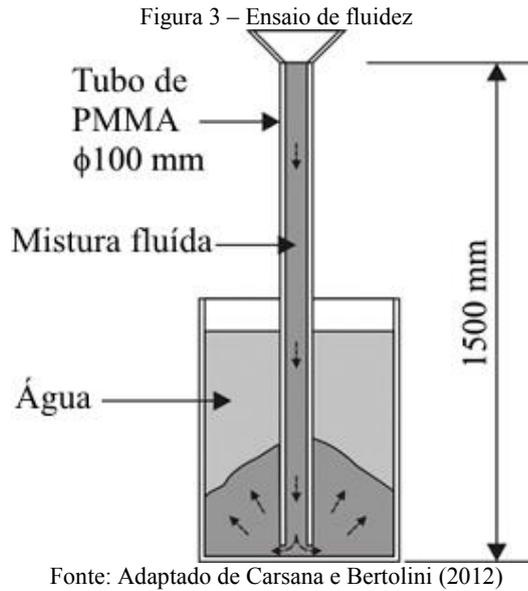
Fonte: Keller (2015)

Figura 2 – Processo de criação das colunas de DSM



Fonte: Keller (2015)

Carsana e Bertolini (2012) desenvolveram um lodo de solo-cimento como material de preenchimento das cavidades de uma mina de gipsita desativa e inundada por água sulfatada. Várias misturas foram realizadas com consistências diferentes a fim de determinar as propriedades reológicas adequadas para a realização do preenchimento. Testes específicos foram propostos para garantir a fluidez da mistura fresca: o ensaio de espalhamento “slump flow” para medir a consistência da mistura, e um ensaio de fluidez, como ilustrado na Figura 3, foram realizados para verificar a capacidade do fluido a preencher as cavidades da mina. Ensaio de resistência à compressão axial foram realizados em prismas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, e no material imerso na água durante o ensaio de fluidez e na solução sulfatada presente nas cavidades da mina. Após o estudo experimental, um trabalho in situ foi efetuado para preencher aproximadamente 6000 m^3 do nível mais baixo da mina, localizado entre 18 e 25 m abaixo do nível do solo como mostra a Figura 4. Uma fábrica foi desenvolvida para produzir 250 m^3 de solo-cimento auto-adensável por dia. Os controles feitos, durante e no final daquele trabalho, mostraram que a mistura preencheu com sucesso todas as câmaras da mina.



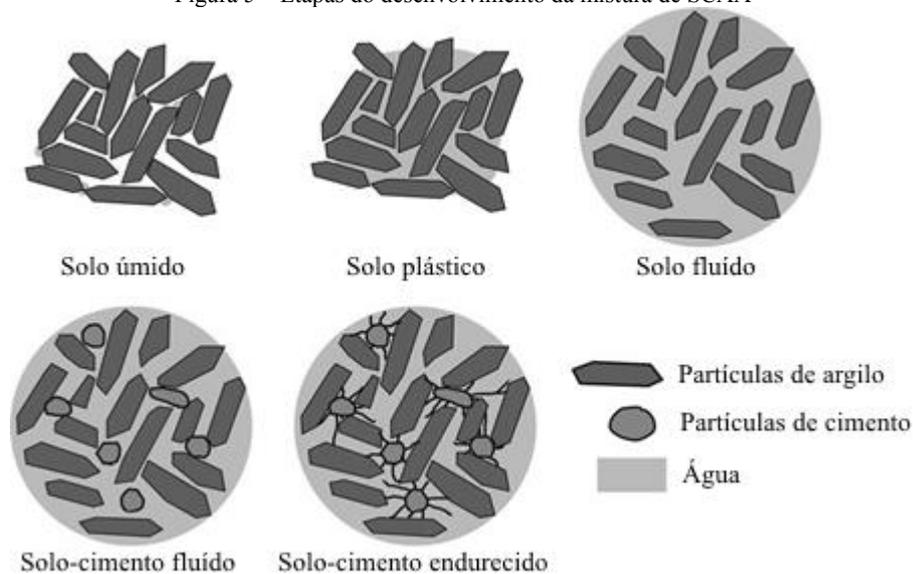
Berte (2012) realizou um estudo sobre a otimização e o comportamento do SCAA utilizando um solo Podzólico Vermelho Amarelo, muito comum na região Oeste do Estado de São Paulo e em diversas outras regiões do Centro Sul do Brasil. Esse trabalho permitiu-se ter uma abordagem geral do papel dos finos desse solo e do cimento frente à água. Trata-se dos fenômenos de coesão, de dispersão das partículas de solo, de fluidez, de homogeneidade, de exsudação e de segregação que são próprios a um comportamento auto-adensável. Berte (2012) ainda apresentou parâmetros do comportamento do SCAA de modo a se orientar estudos de otimização. Estes parâmetros descrevem o comportamento no estado fresco e no estado endurecido.

2.3 Requisitos de desempenho

A mecânica fundamental das propriedades do solo argiloso misturado com cimento foi investigada por vários pesquisadores. Essas investigações geralmente focam na influência do teor de água e de cimento nas propriedades mecânicas da mistura.

O principal requisito de desempenho do SCAA é a condição de fluidez da mistura fresca. Por isso, a quantidade de água incorporada tem um papel primordial no desenvolvimento desse material. O teor de água utilizado deve refletir o compromisso entre o auto-adensamento do material e sua resistência. De fato, Horpibulsuk, Miura e Nagaraj (2003) apresentou o parâmetro água-cimento como o parâmetro de referência para o valor da resistência mecânica, sendo o teor de água alto o suficiente para que este tivesse relação com a quantidade de vazios no solo. Para Horpibulsuk, Rachan e Suddeepong (2011), embora o teor de água da argila reflita a microestrutura da argila mole, o teor de cimento influencia o nível de ligação do referido tecido. A Figura 5 ilustra bem essa afirmação.

Figura 5 – Etapas do desenvolvimento da mistura de SCAA



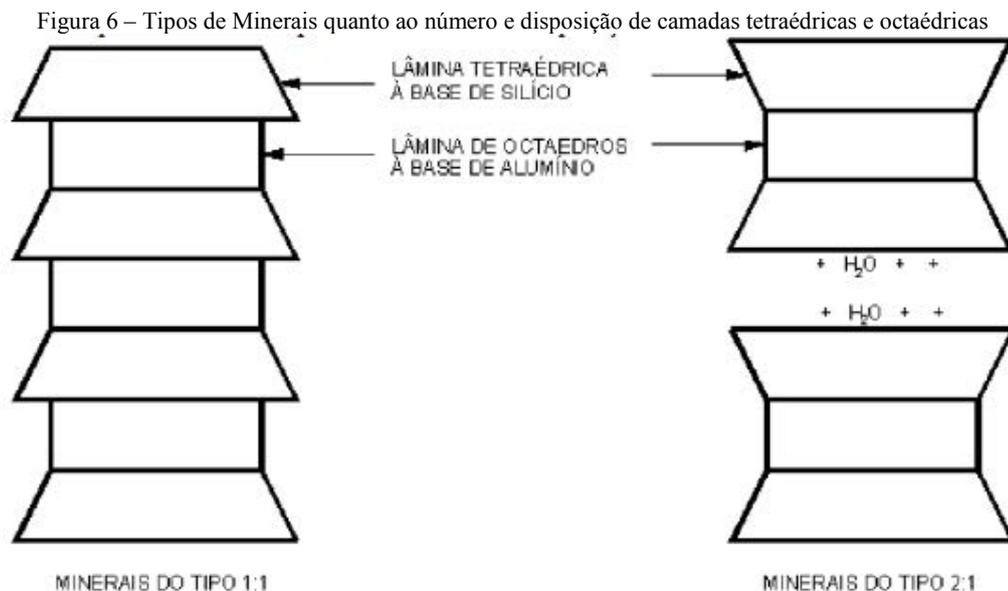
Fonte: Adaptado de Carsana e Bertolini (2012)

Essa abordagem do material difere totalmente daquela usada para o SCC, onde a estrutura do solo e a energia de compactação predominam sobre o parâmetro água-cimento, quanto ao volume de vazios e, assim, à resistência mecânica.

2.4 Atividade físico-química das argilas com o cimento e a cal

A atividade físico-química da mistura de solo-cimento como na mistura de solo-cal é um fator muito importante do processo de homogeneização. Essa pode gerar fenômeno de floculação ou de dispersão das partículas.

As argilas se compõem principalmente de alumino-silicatos que se apresentam sobre duas formas mineralógicas: “1:1” e “2:1”. A Figura 6 ilustra esses dois tipos de minerais: “1:1” para uma camada tetraédrica e uma octaédrica, e “2:1” para duas camadas tetraédricas e uma octaédrica. Segundo Pinto (2000), os argilo-minerais do tipo “1:1”, como por exemplo, para a Caulinita e a Halóisita, abundantes em solos tropicais, observa-se um maior empacotamento devido a uma superfície de exposição baixa e praticamente não apresentam cargas insatisfeitas. Os argilo-minerais do tipo “2:1” “constituem-se na forma mais reativa, predominante em solos de regiões temperadas ou com baixo grau de intemperismo, sendo exemplos destes as Montmorilonitas, a Clorita e a Vermiculita que, em função de possuírem cargas superficiais nas lâminas de silício, se tornam mais sujeitas à interação com elementos ativos do meio, principalmente, íons positivos e água (SEGANTINI; ALCANTARA, 2010).



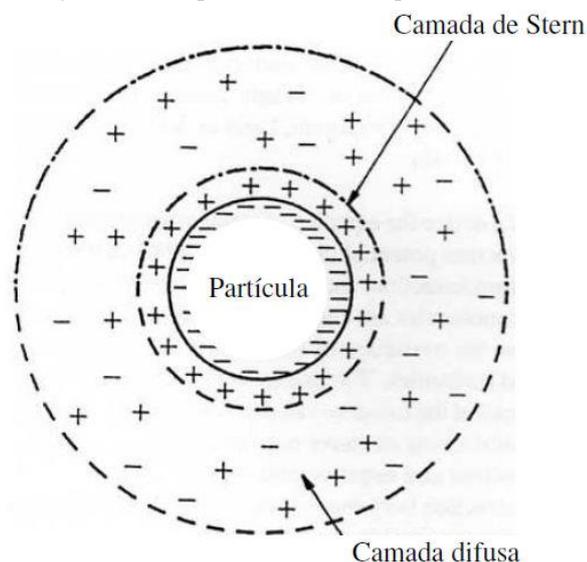
Fonte: Segantina e Alcantara (2010)

Em meio aquoso, o cimento libera cátions Ca^{2+} . Segundo Segantini e Alcantara (2010), os grãos finos de solo apresentam cargas elétricas em sua superfície que são satisfeitas, normalmente,

por íons álcalis Na^+ ou K^+ . O fenômeno de floculação acontece pela troca desses por íons Ca^{2+} ou Mg^{2+} por causa de uma maior condição de seletividade no complexo de trocas conhecido como CTC – Capacidade de Troca Catiônica (NOBREGA, 1985). Segundo Lima (1981), a substituição do íon Ca^{2+} , em lugar do íon Na^+ ou K^+ , gera uma compressão da dupla camada difusa devido à ocorrência da introdução de um cátion mais forte gerando uma condição ideal à floculação das partículas em função da menor repulsão entre os grãos e da atração gravitacional entre eles e, ao contrário, uma saturação do solo por cátions de menor valência, como, por exemplo, o Na^+ ou o K^+ , dá origem à dispersão dos grãos do solo.

O modelo de Gouy-Chapman-Stern, ilustrado na Figura 7, apresenta uma camada compacta obedecendo ao modelo de Helmholtz e uma camada difusa de tipo Gouy-Chapman. A carga superficial da partícula é compensada por íons presente na solução para conservar a eletroneutralidade. A camada difusa tende a diminuir quando íons de valência menores como o Na^+ ou o K^+ , satisfazendo inicialmente as cargas das partículas, são trocados por íons Ca^{2+} , gerando assim uma diminuição de potencial entre as duas camadas e um fenômeno de floculação entre as partículas.

Figura 7 – Exemplo de modelo de dupla camada difusa



Fonte: Kim (1995)

Boualla e Benaouda (2011) explica que esse fenômeno de troca catiônica impede o processo de hidratação do cimento mudando a composição da solução intersticial. Ainda segundo Boualla e Benaouda (2011), a quantidade de íons Ca^{2+} absorvida aumenta com a superfície específica

da argila e com a basicidade da solução. O gradiente de concentração de cálcio entre a solução intersticial e a solução externa vai gerar uma difusão dos íons Ca^{2+} no ambiente, diminuindo assim a quantidade de íons disponível para a reação de hidratação.

Segundo Segantini e Alcantara (2010), as reações mais importantes ao longo prazo, ocorrendo entre os elementos de solo e de cal em solução são as reações pozolânicas, sendo viáveis pelo alto nível de alcalinidade trazido pela cal, permitindo atingir pH próximos de 12,4 e disponibilizar mais facilmente os elementos Sílica e Alumina, responsáveis pela reação pozolânica com a $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

2.5 Atividade físico-química da Cinza de Casca de Arroz na mistura de SCAA

A CCA – Cinza de Casca de Arroz, como material pozolânico, pode ser classificado segundo normas. A NBR 12653 (ABNT, 1992) classifica os materiais pozolânicos segundo três classes: N, C e E.

Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais obedecendo aos requisitos aplicáveis na NBR 12653 (ABNT, 1992). Os da Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas, obedecendo também aos requisitos nesta Norma. Por último o material da Classe E é qualquer pozolana, cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na mesma norma.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Exigências químicas para as pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ % mín.	70	70	50
SO_3 % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT (1992)

Tabela 2 – Exigências físicas para as pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	75	75	75
- com a cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: 12653 (1992)

Assume-se que, adicionando ao cimento um material pozolânico, cujos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão presentes em estado amorfo ou com sua estrutura cristalina fraca, em presença de água e à temperatura ambiente, estes óxidos reagem com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland, formando, assim, compostos que possuem propriedades aglomerantes. A atividade pozolânica é definida pela finura da cinza usada, pela fração amorfa dos óxidos presentes e por um alto teor de sílica.

Por tanto, Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009) observaram, a partir da microestrutura e dos resultados dos ensaios de resistência, que a reatividade pozolânica da cinza volante é mínima no solo-cimento, diferentemente dos resultados obtidos na tecnologia do concreto, concluindo que isso pudesse ser devido a uma menor quantidade de Ca(OH)_2 . Ainda segundo Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009), o papel da cinza na estabilização do SCAA é de dispersar os grandes grupos de solo-cimento em grupos menores, gerando assim um crescimento das superfícies em reação com a água e, conseqüentemente, dos produtos cimentantes.

2.6 Principais conceitos de reologia

2.6.1 Introdução à reologia

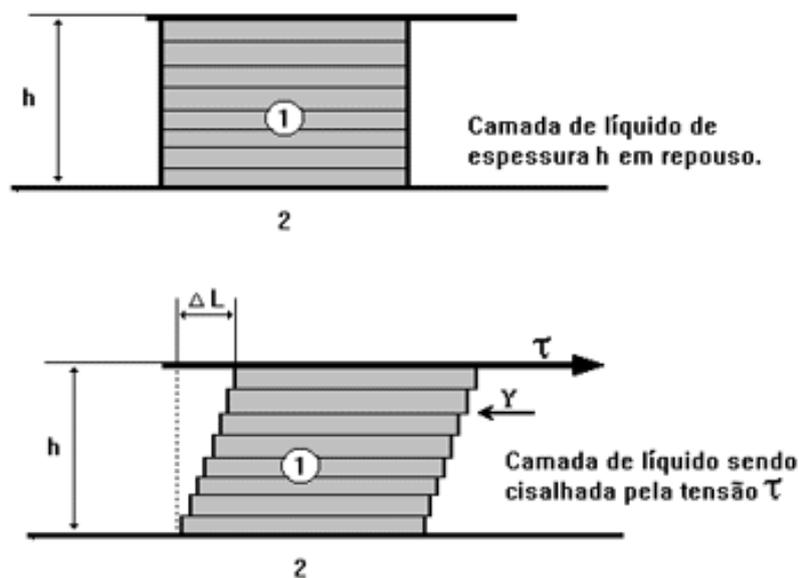
O estudo de reologia do SCAA faz-se necessário, uma vez que seus indicadores podem explicar ou esclarecer o caráter auto-adensável do material.

A reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de uma tensão (BOM, 2011). Segundo Bom (2011), os sólidos ideais deformam-se elasticamente. Isso significa que eles voltam ao estado inicial quando a tensão aplicada é retirada. Os fluidos reais – líquidos ou gases, deformam-se irreversivelmente ou plasticamente, provocando o fluxo. A energia de

deformação é dissipada no fluxo, na forma de calor, e de forma irreversível. A vasta maioria dos materiais apresentam comportamentos intermediários entre os fluidos e os sólidos ideais e são chamados de “viscoelásticos”.

A Figura 8 representa a deformação de uma camada de líquido submetida a uma tensão de cisalhamento. A deformação do corpo é o resultado do escorregamento dos segmentos da camada principal entre si. A resistência ao movimento é chamada de viscosidade.

Figura 8 – Diagrama de cisalhamento de uma amostra submetida a uma tensão de cisalhamento



Fonte: Bom (2011)

Onde:

1. Corpo sólido tracionado e deformado
2. Base fixa

$\tau =$ tensão de cisalhamento (N/m^2)

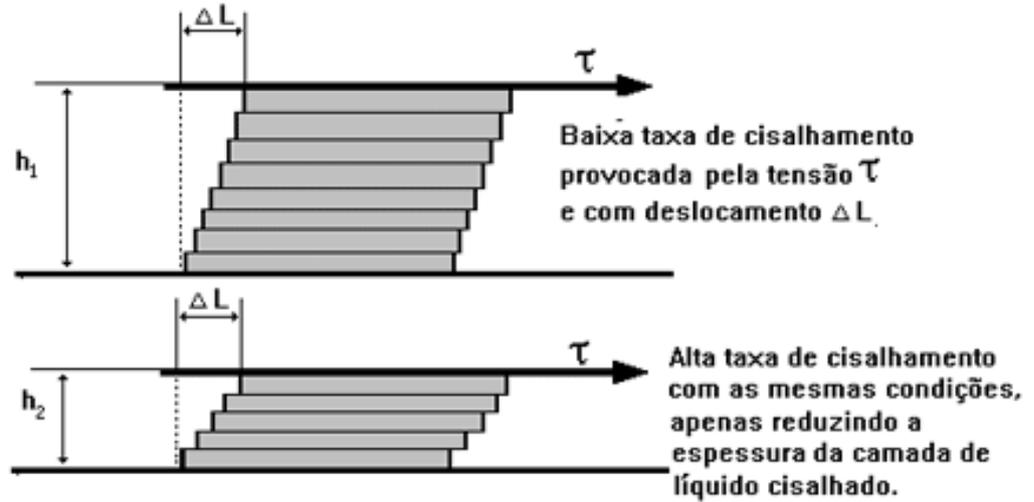
$h =$ altura do sólido (cm)

$\Delta L =$ deformação do corpo como resultado da tensão de cisalhamento (cm)

$Y =$ tensão de resistência ao fluxo (N/m^2)

A taxa de deformação mede o escorregamento das camadas do fluido umas sobre as outras. Ela é o gradiente de velocidade, perpendicular à direção do cisalhamento, descrevendo a variação da velocidade de escoamento na espessura h . Nos dois casos ilustrados na Figura 9, a tensão de cisalhamento é a mesma, mas h_1 sendo maior que h_2 , a taxa de cisalhamento no primeiro caso é menor que no segundo caso.

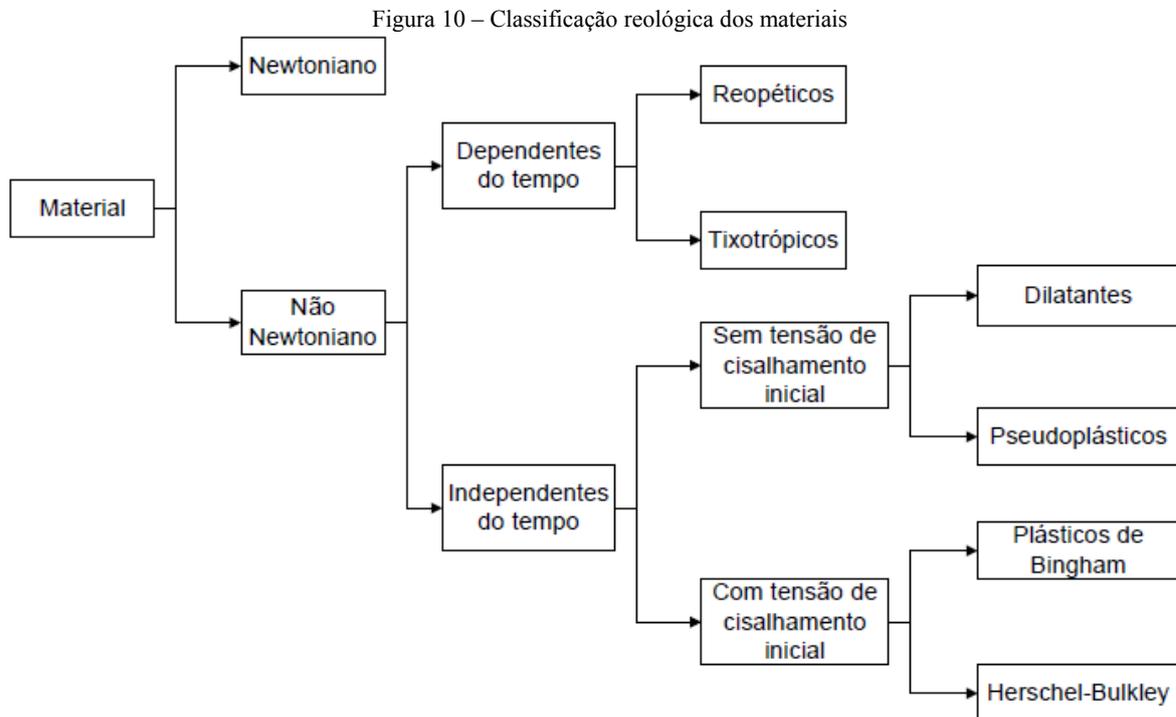
Figura 9 – Variação da taxa de deformação com a variação da espessura da camada de líquido



Fonte: Bom (2011)

2.6.2 Classificação dos modelos reológicos

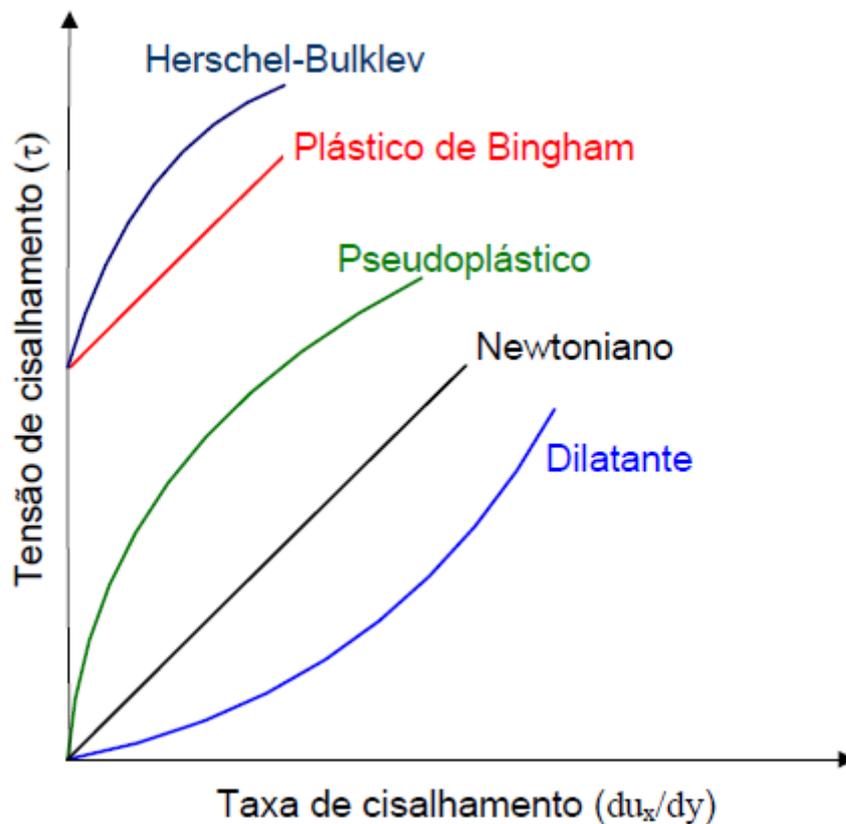
Segundo Segantini e Alcantara (2010), os principais modelos de comportamentos reológicos encontrados são os seguintes: Herschel-Bulkley, plástico de Bingham, pseudoplástico, newtoniano e dilatante. A Figura 10 apresenta uma classificação reológica geral dos materiais.



Fonte: Segantini e Alcantara (2010)

A Figura 11 apresenta o comportamento da curva da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento – curvas de fluxos, para os modelos: newtoniano, plástico de Bingham, pseudoplástico, Herschel-Bulkley e dilatante.

Figura 11 – Comportamento dos materiais segundo o modelo reológico



Fonte: Segantini e Alcantara (2010)

De acordo com Bom (2011), os comportamentos dos materiais segundo o modelo reológico são os seguintes:

- Newtoniano: a viscosidade se mantém constante com a variação da taxa de cisalhamento;
- Pseudoplástico: apresentam um decréscimo de viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento;
- Dilatante: sua viscosidade aumenta quando a taxa de cisalhamento é aumentada;
- Plástico de Bingham: se caracteriza como um comportamento newtoniano, porém, o fluxo só ocorre depois de vencer uma determinada tensão limite de escoamento;
- Herschel-Bulkley: se diferencia do plástico de Bingham em função da não-linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Para um fluido newtoniano, no caso de um escoamento laminar na direção x , ortogonal a y , a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação e a viscosidade dinâmica μ ($kg/s/m$ ou $Pa.s$) é a constante de proporcionalidade. Assim:

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y} = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Onde:

τ_{xy} = Tensão de cisalhamento (N/m^2)

$\dot{\gamma} = \partial u_x / \partial y$ = Taxa de deformação (hz ou s^{-1})

As argamassas apresentam, de maneira geral, um comportamento não newtoniano com presença de tensão limite de escoamento a partir da qual ocorrerá o escoamento do material. Abaixo dessa tensão, o material se comporta como um sólido. A tensão limite de escoamento é função da composição da argamassa e, por conseguinte, do nível de fluidez. No caso de um material auto-adensável, procura-se minimizar essa tensão, controlando o fator a/c para limitar o fenômeno de exsudação, prejudicial pela durabilidade do material. Em função da composição da mistura, os modelos descrevendo da melhor forma o comportamento de uma argamassa, tem sido os modelos plástico de Bingham e de Herschel-Bulkley.

No modelo Herschel-Bulkley, a tensão de cisalhamento τ se expressa segundo a lei seguinte:

$$\tau = \tau_0 + k_n \cdot \dot{\gamma}^n$$

Onde:

τ_0 = Tensão limite de escoamento (N/m^2)

$\dot{\gamma}$ = Taxa de deformação (hz ou s^{-1})

k_n = índice de consistência ($Pa.s$)

Quando n é inferior a 1, o fluido exibe um comportamento pseudoplástico. Para $n > 1$, o fluido exibe um comportamento dilatante, e para $n = 1$, o fluido se comporta segundo o modelo plástico de Bingham, cuja lei se expressa da maneira seguinte:

$$\tau = \tau_0 + \mu_B \cdot \dot{\gamma}$$

Onde:

μ_B = Viscosidade plástica ($Pa.s$)

2.6.3 Geometria de medição reométrica rotacional

Segundo Oliveira (2013), no caso de argamassas apresentando partículas de tamanho médio como areias, a palheta do Vane é indicada para o ensaio de reometria. No caso de pastas de cimento, com partículas de menos diâmetro, a geometria Couette pode ser usada. Nesse caso, a tensão de cisalhamento medida é a tensão orthoradial entre a superfície externa do cilindro e o fluido.

A palheta do Vane se caracteriza por uma superfície plana de medição. A tensão de cisalhamento inicial medida é a tensão normal do fluido na palheta. Quando a velocidade de rotação vai aumentando, se forma uma área confinada entre as palhetas. Segundo Estelle e Lanos (2012), se assume então que o material é cisalhado ao longo de uma superfície cilíndrica definida pelas dimensões da palheta do Vane, a expressão da tensão de cisalhamento, desprezando os efeitos de borda, é a seguinte:

$$\tau = \frac{2M}{\pi h D^2}$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (N/m²)

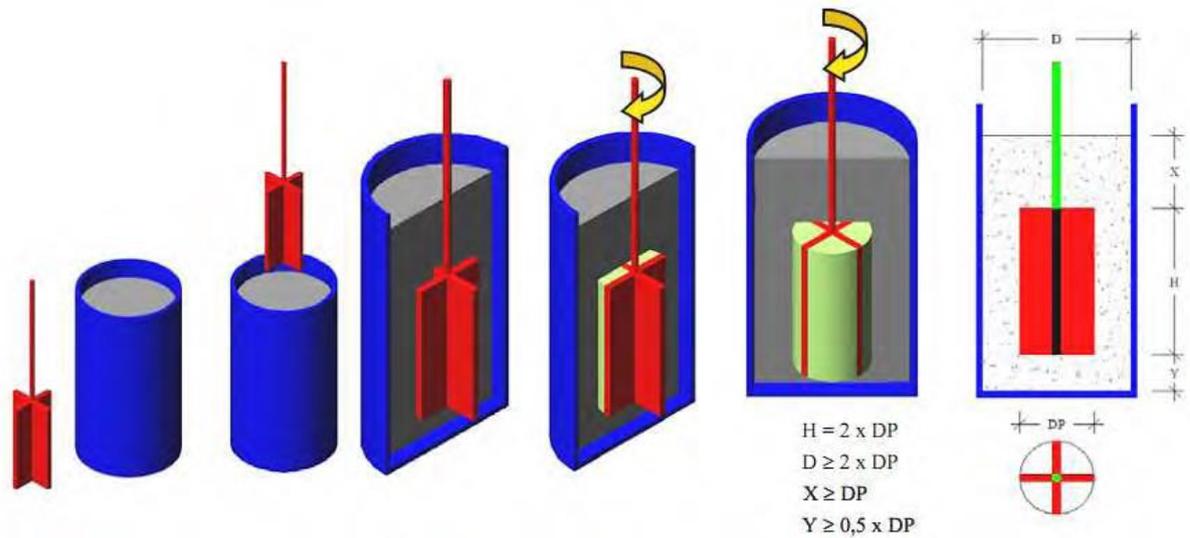
h = altura da palheta (m)

D = diâmetro da palheta (m)

M = torque no eixo de rotação da palheta (N.m)

Na realização do ensaio, deve-se inserir no material a palheta respeitando-se as limitações dimensionais conforme a Figura 12 (HOPPE FILHO et al., 2006).

Figura 12 – Representação esquemática da geometria Vane



Fonte: Hoppe Filho et al. (2006)

3 MATERIAIS E METODOS

3.1 Materiais

Aqui será dada uma especificação de todos os materiais utilizados na concepção do SCAA e também será feita uma descrição do material final.

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é um Argisolo, de acordo com a classificação de solos apresentada pela EMBRAPA (2006), bastante utilizado nas pesquisas desenvolvidas na UNESP de Ilha Solteira – SP. Segundo a HRB (1945), trata-se de um solo A₄. Ele é facilmente encontrado na região Oeste do Estado de São Paulo e também em diversas outras regiões do Centro Sul do Brasil e este foi um dos motivos de optar-se por estudá-lo. Outro motivo que levou à escolha deste solo é o fato deste apresentar uma granulometria que possui grãos de argila, silte, areia fina e areia média, cuja importância para o solo-cimento está na distribuição dessas partículas que podem favorecer a homogeneidade, a densidade e, conseqüentemente, a resistência mecânica das misturas.

Foi efetuada a caracterização do solo no Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira, conforme o Anexo A, seguindo as orientações das seguintes normas:

- NBR 6457 (ABNT, 1986) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- NBR 6508 (ABNT, 1984) – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.
- NBR 7181 (ABNT, 1988) – Solo – Análise Granulométrica – Método de Ensaio.
- NBR 6459 (ABNT, 1984) – Solo – Determinação do limite de liquidez.
- NBR 7180 (ABNT, 1984) – Solo – Determinação do limite de plasticidade.

A Tabela 3 apresenta as porcentagens das diferentes frações granulométricas do solo utilizado nessa pesquisa utilizando a classificação dada pela NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 3 – Frações granulométricas do solo

Fração	Porcentagem (%)
Argila	32,3
Silte	11,4
Areia Fina	54,7
Areia média	1,6

Fonte: Berte (2012)

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-Z 32. Trata-se de um cimento composto, com adição de pozolana que varia de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, podendo ser aplicado em todas as fases da construção. Esse cimento é regulamentado pela NBR 11578 (ABNT, 1991). Além de ser um produto de grande disseminação, ele se encontra facilmente no mercado, motivo pelo qual foi utilizado nessa pesquisa, que buscou trabalhar em condições corriqueiras, tanto ponto de vista dos materiais usados como das técnicas de fabricação. Essa escolha tem como consequência uma interferência menor da CCA que no caso de cimentos como o CP I ou o CP V-ARI, que não contem adições.

3.1.3 Água

Foi utilizada água da torneira do Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira em todos os experimentos.

3.1.4 Areia

A areia utilizada nessa pesquisa vem da cidade de Castilho, SP, sua caracterização granulométrica foi realizada segundo a norma NBR 7217 (ABNT, 1987) presente no Anexo B. Do mesmo jeito que para o solo, a Tabela 4 mostra a distribuição granulométrica dessa areia.

Tabela 4 – Frações granulométricas da areia

Fração	Porcentagem (%)
Areia Fina	47,5
Areia Média	48
Areia Grossa	4,5

Fonte: do Próprio autor

3.1.5 Aditivo

Foi optado por utilizar um aditivo superplastificante redutor de água nas misturas da pesquisa em função do objetivo era confeccionar misturas fluidas e para isso havia a necessidade de se adicionar maior quantidade de água nas mesmas. Porém, sabe-se que a água pode interferir diretamente nas misturas, prejudicando propriedades como a resistência mecânica, a absorção de água e causando retrações nas peças. Com a inserção de um aditivo superplastificante nas misturas, pôde-se reduzir a quantidade de água, gerando fluidez nas mesmas sem prejudicar tais propriedades. O aditivo ViscoFlow 20 utilizado é um superplastificante redutor de água para concreto, que possui efeitos de repulsão estérica e adsorção eletrostática.

Trata-se de aditivo líquido de pega normal especialmente desenvolvido para o aumento significativo da manutenção da trabalhabilidade sem retardo de pega adicional a base de policarboxilatos (SIKA, 2012). Esse produto atende aos requisitos da norma NBR 11768 (ABNT, 2011) nos tipos SP-I N – 0,3 à 1,05% sobre o peso de aglomerantes, e SP-II N – 1,1 à 2,5% sobre o peso de aglomerantes.

Algumas das características desse aditivo são apresentadas a seguir:

- Compatível com outros aditivos;
- Manutenção da trabalhabilidade por tempos prolongados;
- Conservação da fluidez sem retardo adicional e subsequente aceleração do desenvolvimento das resistências;
- Consistência e plasticidade constantes do concreto por horas;

3.1.6 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada para esse estudo é a SILCCA NOBRE SCI, produzida pela empresa SVA SILICA VERDE DO ARROZ LTDA de Alegrete, RS. Ela se classifica como pozolana de Classe N, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992).

A composição dessa cinza é apresentada na Tabela 5:

Tabela 5 – Composição da cinza de casca de arroz

Substância	Sílica Amorfa (SiO ₂)	Sílica Cristalina (SiO ₂)	Óxido de sódio (Na ₂ O)	Carbono total (C)	Umidade (H ₂ O)
Composição química (%)	≥ 90,0	≤ 2	≤ 1,5	≤ 6,0	≤ 3,0

Fonte: SVA (2013)

Seguindo, algumas características físico-químicas dessa cinza especificadas em SVA (2013):

- Diâmetro médio: <8,0 µm.
- Resíduo na peneira 45 µm: ≤10,0%.
- pH: ≤10,0.
- Perda ao Fogo: ≤ 3,5%.
- Massa específica aparente: 550 – 600 kg/m³.
- Solubilidade: Insolúvel em água; Solúvel em HF e KOH ou NaOH.
- Área específica B.E.T.: 20.000 m²/kg.

3.1.7 Cal

A cal utilizada nessa pesquisa é a Cal Hidratada CH III Itaú, produzida pela empresa Votorantim Cimentos. Segundo Votorantim Cimentos (2014), a referida cal dolomítica, indicada para a preparação de argamassas por sua ação aglomerante e plastificante, atende aos requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003). As exigências químicas e físicas foram expostas nas Tabelas Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Exigências químicas da cal

Compostos	Anidrido carbônico (CO ₂)	Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)	Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t +MgO _t)
Limites	≤ 15 %	≤ 15 %	≥ 88 %

Fonte: ABNT (2013)

Tabela 7 – Exigências físicas da cal

Retido acumulado na peneira de 0,600 mm	Retido acumulado na peneira de 0,075 mm	Retenção de água	Incorporação de areia	Plasticidade
≤ 0,5 %	≤ 15 %	≥ 70 %	≥ 2,2 %	≥ 110 %

Fonte: ABNT (2013)

3.2 Método experimental do Estudo Principal

O EP contou com 18 misturas e teve o intuito de avaliar a influência da água, do cimento, da CCA, da cal e do superplastificante no comportamento do SCAA. Por isso foram executados ensaios no estado fresco e endurecido no Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira – SP.

3.2.1 Procedimento experimental

Para realizar o EP, os traços das 18 misturas foram determinados empiricamente, e a partir dos resultados dos trabalhos de Berte (2012) e Alcantara e Claverie (2014), de forma a mostrar um caráter prévio auto-adensável. Para estabelecer esses traços, parâmetros constantes e variáveis foram escolhidos.

Alcantara e Claverie (2014) mostrou que para um teor de areia substituído de 10%, as misturas mostraram melhores desempenhos de escoamento livre, escoamento confinado, segregação e homogeneidade. Esse teor foi conservado no presente estudo.

A conservação do parâmetro água/materiais secos fixo, sendo a quantidade de solo+areia fixa, permitiu interpretar os efeitos dos teores de cimento, de cinza e de cal na mistura sem afeitar de maneira considerável a trabalhabilidade do material. De fato, Berte (2012) demonstrou que o parâmetro água/cimento+solo tem uma maior influência na trabalhabilidade que o parâmetro água/cimento, indicando assim que é possível melhorar a resistência mecânica e a absorção, sem prejudicar muito as condições de trabalhabilidade. Pelo mesmo motivo, foi fixado parâmetro aditivo/cimento+solo de maneira a compensar a adição de cimento, admitindo que o superplastificante atue com as espécies químicas presentes no cimento, e no solo – álcalis.

Os teores de CCA e de cal em relação ao cimento foram definidos e permitem demonstrar a influência da pozolanidade da CCA e do caráter hidráulico da cal na matriz cimentícia, já que o teor de cimento varia nas três diferentes séries.

As composições do estudo estão reunidas na Tabela 8:

Tabela 8 – Composições do estudo

Mistura	Água/Mat. Secos*	Aditivo/Solo+Cimento	Cimento/Solo+Areia	CCA/Cimento	Cal/Cimento
1	30,0%	0,4%	26,7%	0%	0%
2				5,0%	0%
3				7,5%	0%
4				10,0%	0%
5				0%	5,0%
6				5,0%	5,0%
7			30,0%	0%	0%
8				5,0%	0%
9				7,5%	0%
10				10,0%	0%
11				0%	5,0%
12				5,0%	5,0%
13			33,3%	0%	0%
14				5,0%	0%
15				7,5%	0%
16				10,0%	0%
17				0%	5,0%
18				5,0%	5,0%

*Solo, areia, cimento, CCA, cal

Fonte: do Próprio autor

Esse estudo contou com 18 misturas e teve o intuito de observar as propriedades do material fresco e endurecido, definindo os teores de cimento, água, CCA, cal e aditivo superplastificante, de maneira a identificar a influência destes no comportamento do SCAA, juntamente com os fatores que interferem nas propriedades deste material. Todas elas foram realizadas a partir de 15000 gramas de solo substituído a 10% por areia, variando-se as quantidades de cimento, água, CCA, cal e aditivo superplastificante nas composições.

O procedimento de homogeneização das misturas foi o seguinte:

- 1) era passado água no fundo da betoneira de maneira a manter uma mesma umidade para duas misturas feitas no mesmo dia.
- 2) eram colocados os materiais secos nessa ordem: solo, cimento, areia, CCA, cal, efetuando-se a mistura destes componentes por 1 minuto como mostra a Figura 13.
- 3) adicionava-se a água e deixava-se bater o material por mais 1 minuto.
- 4) desligava-se a betoneira e, com o auxílio de uma espátula de pedreiro, raspava-se o fundo da betoneira para evitar a segregação dos materiais observada na Figura 14.
- 5) adicionava-se o aditivo e continuava a homogeneização por mais 1 minuto como ilustrado na Figura 15.
- 6) deixava-se a mistura repousar 30 segundos, depois batia-se por mais 30 segundos.
- 7) iniciavam-se, então, os ensaios do material no estado fresco.
- 8) batia-se a mistura durante 1 minuto entre cada ensaio.

Figura 13 – Mistura dos materiais secos



Fonte: do Próprio autor

Figura 14 – Mistura depois da adição de água



Fonte: do Próprio autor

Figura 15 – Mistura depois da adição de superplastificante



Fonte : do Próprio autor

3.2.2 *Ensaio no estado fresco*

a) Ensaio de Espalhamento

O Ensaio de Espalhamento foi executado conforme as prescrições das normas para concreto auto-adensável NBR NM 68 (ABNT, 1998). Este ensaio é indicado para avaliação da trabalhabilidade de misturas auto-adensáveis ou fluídas e é utilizado para medir a capacidade do concreto auto-adensável fluir livremente sem segregar. Para a realização desse, foram utilizados um tronco de cone e uma mesa metálica, de modo que não se absorvesse água nem provocasse atrito com a mistura. Para o caso de concretos auto-adensáveis, a medida de fluidez que deve ser obtida é o diâmetro do círculo formado pelo concreto, cujo valor do diâmetro do espalhamento mínimo deve ser de 350 milímetros. Para o SCAA, desta pesquisa, o ensaio de espalhamento, foi efetuado de modo similar ao Cone de Abrams proposto por Kantro (1980), com algumas adaptações, verificando assim as condições de coesão, de trabalhabilidade e de fluidez das misturas de SCAA. O ensaio consistiu em preencher o cone com a mistura e depois levantá-lo, deixando a pasta se espalhar livremente numa mesa metálica e em seguida era medido o valor do espalhamento. O procedimento desse ensaio está ilustrado nas Figura 16, Figura 17 e Figura 18. O valor do espalhamento foi considerado como a média entre os dois diâmetros finais perpendiculares, procurando seguir os protocolos de auto-adensamento para concretos. Os aspectos de homogeneidade foram considerados de modo visual, observando, de forma qualitativa, o aspecto circular da superfície, assim como a presença de franjas ou vestígios de exsudação no contorno do círculo. De modo a medir-se o espalhamento da massa homogeneizada, foi escolhido medir a parte consistente da mistura espalhada tirando-se a parte aquosa devida ao fenômeno de exsudação. Também foi escolhido manter a superfície da mesa utilizada úmida, de maneira a padronizar o ensaio.

Figura 16 – Ensaio de espalhamento pronto



Fonte: do Próprio autor

Figura 17 – Retirada do cone



Fonte: do Próprio autor

Figura 18 – Espalhamento resultante



Fonte: do Próprio autor

b) Ensaio do Funil

Por meio do Ensaio do Funil, feito para averiguar a fluidez do material, analisou-se o fluxo de queda do material através da vazão mássica expressada em g/s. Este ensaio consistiu em preencher o funil até um ponto determinado – mais ou menos 1600 g da mistura e, em seguida, registrar o tempo de escoamento, similar ao Ensaio de Determinação de Fluidez das pastas de cimentos prescritos pela NBR 7681 (ABNT, 1983) e NBR 7682 (ABNT, 1983). Quanto maior for o tempo de escoamento, menor a fluidez da mistura.

Berte (2012) observou que o bocal de saída do Funil de Marsh – abertura de 8 mm, era inadequado para esta pesquisa, uma vez que as misturas de SCAA eram mais densas e viscosas do que as caldas de concretos (grautes). Dessa forma, optou-se por utilizar um funil fabricado a partir de garrafa pet, com abertura de passagem de 22 mm, como o ensaio sendo similar ao do Funil de Marsh, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 – Preparação ao ensaio do Funil



Fonte: do Próprio autor

c) Ensaio de segregação

Não havendo um protocolo conhecido para o caso do SCAA, o ensaio para verificar a segregação foi feito conforme o ensaio de peneiramento, com a utilização de peneiras 2,38 mm e 4,76 mm, onde, colocava-se o conjunto (peneiras + fundo) na balança, tarava-a e despejava-se uma quantidade de 3000 ± 100 g de mistura na peneira, para assim, verificar a quantidade de material que ficava retido nas peneiras em relação ao total de mistura despejado, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Pesagem da quantidade retida nas peneiras



Fonte: do Próprio autor

3.2.3 *Ensaio do material no estado endurecido*

Os ensaios realizados no estado endurecido foram os seguintes: Resistência à Compressão Axial e Diametral e Absorção de Água aos 7, 28, 56 e 84 dias. Foi também realizada a medida da massa específica aparente dos CPs aos 28 dias. Esses ensaios foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 10 centímetros de altura e 5 centímetros de diâmetro como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Corpos-de-prova utilizados para os ensaios ao estado endurecido



Fonte: do Próprio autor

d) Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Diametral

Os corpos de provas que foram submetidos ao Ensaio de Compressão Mecânica ficaram em câmara úmida durante 7, 28, 56 e 84 dias para cura, dentro de um saco plástico. Para cada mistura e data de cura, após ter sido lixados, foram submetidos 5 CPs ao ensaio de compressão axial e 3 CPs ao ensaio de compressão diametral.

Com o objetivo de se estimar os valores das resistências mecânicas, foram executados ensaios de resistência à compressão axial e diametral seguindo as orientações da NBR 12025 (ABNT, 2012), através do equipamento EMIC DL30000.

e) Ensaio de Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram realizados em 3 CPs das 18 misturas aos 7, 28, 56 e 84 dias. Após o período de cura em câmara úmida, os CPs foram levados à estufa de 60°C durante 24h. Foram pesados para obter-se a massa seca m_s e, depois, imergidos totalmente. Depois de mais 24h, os CPs foram pesados para determinar a massa úmida m_u .

O valor da absorção de água, expresso em porcentagem, é determinado pela fórmula seguinte:

$$A = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$

f) Massa específica aparente

Aos 28 dias, os 5 CPs submetidos ao ensaio de compressão axial, após ter sido lixados, foram medidos com um paquímetro e pesados para calcular suas massas específicas aparentes.

3.3 Estudo Adicional

O EA teve como objetivo a análise do comportamento reológico das misturas 1, 7 e 13 do EP e fatores a/c de 1,42, 1,30 e 1,20 respectivamente. Por isso, foram realizados ensaios reométricos no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria do Departamento de Engenharia Civil da UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira – SP.

3.3.1 Método experimental

O processo de homogeneização das misturas foi o mesmo que para o EP. Num primeiro tempo foram executados, para cada mistura, os ensaios de espalhamento “slump flow” e do Funil. Num segundo tempo, uma amostra da mistura era transportada do Laboratório Central de Engenharia Civil para o Laboratório de Hidrologia e Hidrometria para realizar o ensaio de reometria. Para observar a variação das propriedades reológicas da mistura no tempo, o ensaio foi repetido 15 minutos depois da primeira medida, mas a forte viscosidade da mistura não permitiu realizar repetições além dessa, nem de repetir os ensaios de espalhamento e do Funil. A repetição do ensaio foi realizada numa segunda amostra de SCAA que continuou sendo batida constantemente para limitar a pega do cimento e conservar as características do material fresco.

O reômetro utilizado foi o Reômetro R/S da empresa Brookfield Engineering apresentado na Figura 22. Para a medição foi escolhida a geometria Vane de diâmetro 20 mm e de altura 40 mm ilustrada na Figura 23, sabendo que esse material apresenta partículas finas e médias incluindo partículas arenosas. O copo utilizado, apresentado na Figura 24, tem um diâmetro interno de 40 mm, duas vezes maior que o diâmetro das palhetas, como recomendado em Hoppe Filho et al (2006) Figura 12.

Figura 22 – Reômetro R/S Brookfield equipado



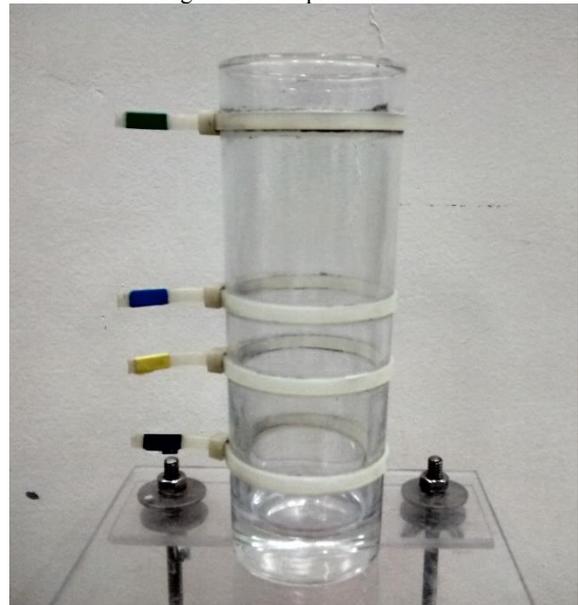
Fonte: do Próprio autor

Figura 23 – Geometrias cilíndricas e Vane



Fonte: do Próprio autor

Figura 24 – Copo de ensaio



Fonte: do Próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESTUDO PRINCIPAL

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados do EP com os valores obtidos nos ensaios feitos com o material no estado fresco e no estado endurecido, apresentando seus valores em tabelas. São também apresentados gráficos com as correlações entre dosagens dos materiais envolvidos, resultados de ensaios e propriedades das misturas.

A Tabela 9 apresenta as quantidades de água, aditivo e cimento usados, assim como os fatores água/cimento e as relações aditivo/cimento para as 18 composições do estudo. Pode-se observar na Tabela 9 uma diminuição do fator água/cimento e da relação aditivo/cimento apesar do aumento dos teores de água e aditivo, porque não se compensou a adição de cimento para cada uma das três séries de 6 misturas. Será interessante interpretar as mudanças das condições de trabalhabilidade a partir daqueles valores. Para um mesmo teor de cimento, os fatores água/cimento variaram pouco. Assim será adotada uma média para a interpretação dos resultados.

Tabela 9 – Fatores de água, cimento e aditivo nas composições

Mistura	Água (g)	Aditivo (g)	Cimento (g)	Água /Cimento	Água /Cimento médio	Aditivo/Cimento (%)
1	5700	70	4000	1,42	1,44	1,75
2	5760	70	4000	1,44		1,75
3	5790	70	4000	1,45		1,75
4	5820	70	4000	1,45		1,75
5	5760	70	4000	1,44		1,75
6	5820	70	4000	1,45		1,75
7	5850	72	4500	1,30	1,32	1,6
8	5918	72	4500	1,32		1,6
9	5951	72	4500	1,32		1,6
10	5985	72	4500	1,33		1,6
11	5918	72	4500	1,33		1,6
12	5985	72	4500	1,32		1,6
13	6000	74	5000	1,20	1,22	1,48
14	6075	74	5000	1,21		1,48
15	6112	74	5000	1,22		1,48
16	6150	74	5000	1,23		1,48
17	6075	74	5000	1,21		1,48
18	6150	74	5000	1,23		1,48

Fonte: do Próprio autor

4.1 Resultados dos ensaios no estado fresco

4.1.1 Apresentação dos resultados

Nessa parte serão apresentados os resultados e será realizada uma primeira observação.

a) Ensaio de espalhamento

A Tabela 10 apresenta os resultados alcançados no ensaio de espalhamento, em termos de diâmetro médio.

Tabela 10 – Diâmetros médios ao ensaio de espalhamento (cm)

Mistura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diâmetro Médio(cm)	34,5	37,0	37,5	35,5	43,0	53,5	40,0	34,0	59,5
Desvio padrão	0,5	1,0	1,5	0,5	3,0	0,0	4,0	0,0	2,5
Mistura	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Diâmetro Médio(cm)	47,0	40,0	40,5	40,0	41,0	39,5	30,5	40,5	38,0
Desvio padrão	1,0	0,0	0,5	0,0	1,0	0,0	0,5	0,5	1,0

Fonte: do Próprio autor

A escolha de manter a mesma relação água/materiais secos aumentando o teor de cimento permitiu interpretar a influência do fator a/c na trabalhabilidade da mistura para cada uma das três séries – $a/c = 1,22$, $a/c = 1,34$ e $a/c = 1,44$. Pode-se esperar uma diminuição dos diâmetros de espalhamento quando aumenta a quantidade de cimento na mistura. Aqui, essa interpretação não é possível em razão da homogeneidade dos resultados apesar de alguns valores extremos para as misturas 6 e 9. A faixa de valores de a/c não permitiu observar a diminuição do diâmetro de espalhamento com a diminuição desse fator.

O que esses resultados mais mostram é o efeito estabilizador do cimento. De fato, observa-se que na série apresentando o maior teor de cimento – misturas 13 a 18, os desvios padrões entre os dois diâmetros medidos são os menores induzindo uma maior homogeneidade das misturas.

A Figura 25 apresenta as superfícies formadas no ensaio de espalhamento, para as misturas com um fator $a/c = 1,34$. Podemos assim apreciar as diferentes condições de fluidez e de consistência das misturas. Certas misturas apresentam franjas de água da circunferência do círculo formada traduzindo o fenômeno de exsudação na mistura. Observam-se, nesse caso, duas fases distintas. Um desvio padrão grande é sinônimo de uma mistura cujo espalhamento não se faz de maneira

homogênea. As misturas 7, 9 e 10 ilustram, pela forma, e pelas franjas aparentes, um problema de homogeneidade. Ao contrário, as misturas 8, 11 e 12 mostram uma mistura homogênea pela forma dos círculos obtidos e também pelo pouco de exsudação presente, particularmente na mistura 8. A baixa homogeneidade de certas misturas é devida ao baixo tempo de mistura adotado nesse estudo. Um tempo e uma energia de mistura maior permitiriam a obtenção de misturas mais homogêneas e estáveis criando um contato mais íntimo entre as partículas de argila, de cimento e água. Contudo, o propósito desse estudo é de mostrar que é possível obter um material de homogeneidade considerável com recursos materiais básicos e pouco tempo de mistura.

Figura 25 – Superfícies de espalhamento obtidas para 30% de cimento



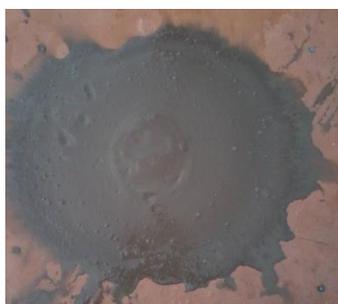
Mistura 7



Mistura 8



Mistura 9



Mistura 10



Mistura 11



Mistura 12

Fonte: do Próprio autor

b) Ensaio do Funil

A Tabela 11 apresenta os resultados alcançados no ensaio do Funil, em termos de vazão mássica em g/s. Semelhantemente ao ensaio de espalhamento, exceto dois valores acima de 500 g/s para as misturas 5 e 13, pôde-se observar uma certa homogeneidade dos resultados. Na globalidade dos resultados, encontra-se um crescimento da vazão mássica no Funil com o diâmetro de espalhamento das misturas. De fato, esses dois ensaios permitem interpretar as condições de fluidez e de inércia do material.

Tabela 11 – Vazões mássicas das misturas no Funil (g/s)

Mistura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão mássica (g/s)	474	355	424	388	537	426	488	402	465
Mistura	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Vazão mássica (g/s)	491	439	432	557	429	375	325	483	449

Fonte: do Próprio autor

c) Ensaio de segregação

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos ao ensaio de segregação por peneiramento nas peneiras de 4,76 mm e 2,38 mm em termos de retenção em %. Observa-se uma grande variação entre os resultados alcançados no peneiramento a 4,76 mm, onde encontra-se uma certa correlação entre os resultados da peneira de 4,76 mm e da peneira de 2,38 mm. Uma diminuição da retenção na peneira de 4,76 mm se reflete na peneira de 2,38 mm. Pode-se ver também uma variação menor dos resultados na peneira de 2,38 mm, os resultados são mais homogêneos com exceção da mistura 13 que apresenta um valor extremo. Essa homogeneidade mostra uma ordem de valor do diâmetro dos menores floculos em presença em todas as misturas.

Tabela 12 – Retenções no ensaio de peneiramento (%)

Mistura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Retenção # 4,76 mm (%)	50,6	49,8	22,2	50,9	8,1	16,2	21,6	31,0	16,3
Retenção # 2,38 mm (%)	95,4	94,4	83,2	92,5	70,3	74,1	77,4	84,6	73,4
Mistura	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Retenção # 4,76 mm (%)	16,3	31,7	30,1	8,1	19,8	42,9	63,5	20,5	22,0
Retenção # 2,38 mm (%)	75,6	85,4	85,2	58,7	76,0	89,6	95,8	74,2	80,2

Fonte: do Próprio autor

A homogeneidade dos resultados obtidos para os ensaios no estado fresco pode ser explicada pela compensação do teor de cimento trazendo uma maior consistência nas misturas pelo teor de aditivo, envolvendo condições de fluidez maiores. A trabalhabilidade das misturas fica assim muito parecida.

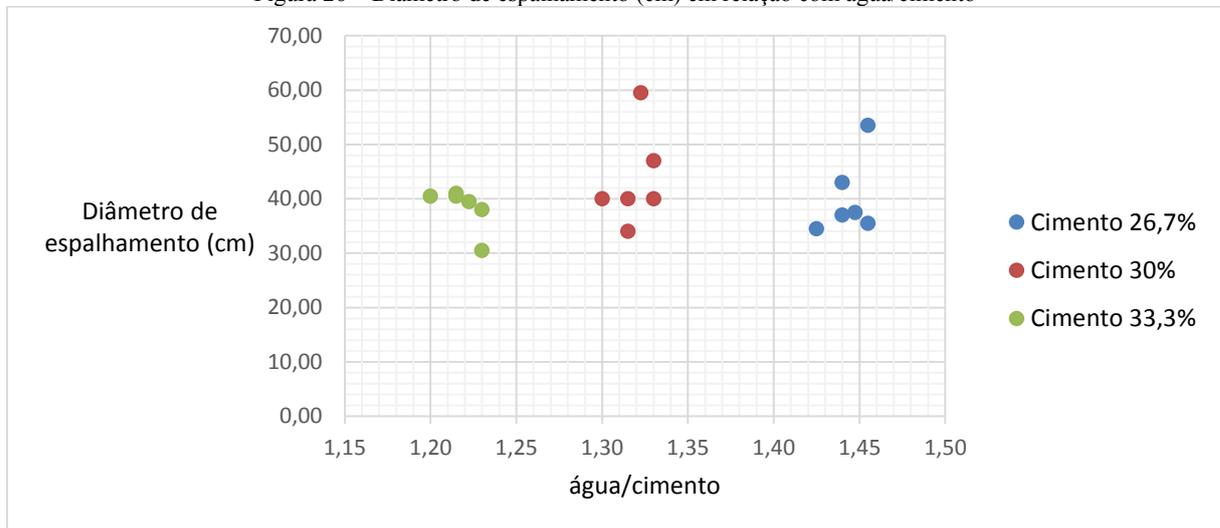
4.1.2 Estudo do comportamento

Nessa parte serão apresentados gráficos que ilustram correlações entre os parâmetros de dosagem escolhidos e os resultados dos ensaios no estado fresco.

a) Ensaio de espalhamento

A partir dos resultados no ensaio de espalhamento, tentou-se relacionar o diâmetro médio obtido com a relação água/cimento. A Figura 26 mostra, que na média, o aumento do teor de cimento contribuiu a uma redução da dispersão do diâmetro de espalhamento característico. Não se observa, portanto, mudanças significativas em razão da adição de aditivo crescendo com a adição de cimento e da faixa de valores do fator a/c nas quais o estudo foi realizado. A Figura 26 mostra também o papel estabilizador do cimento que contribui à consistência da mistura fresca e à redução da distância entre as partículas. Assim tem-se, pelo menor fator água/cimento, uma dispersão menor dos resultados.

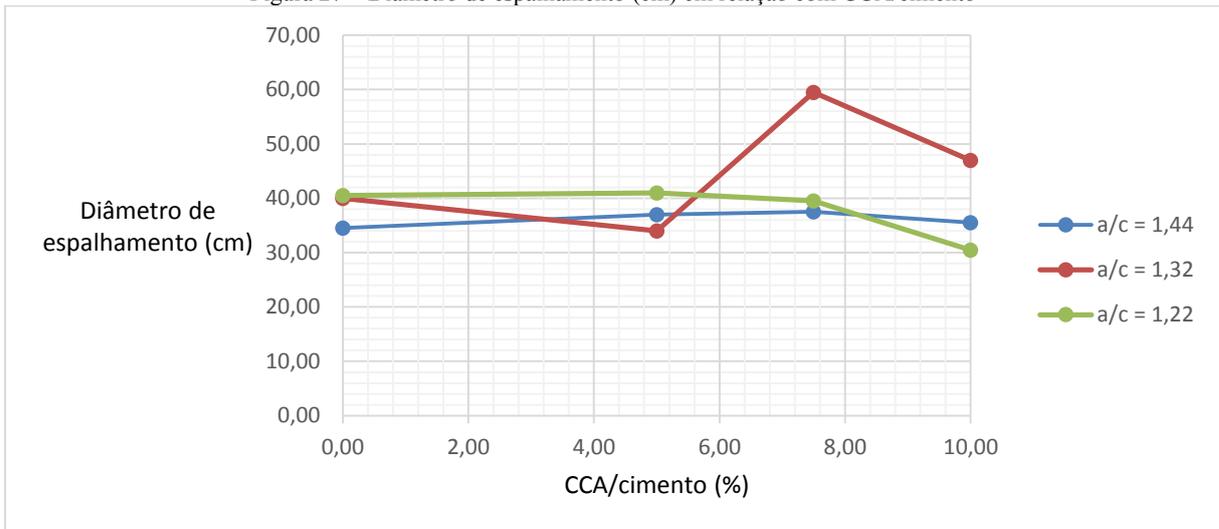
Figura 26 – Diâmetro de espalhamento (cm) em relação com água/cimento



Fonte: do Próprio autor

A Figura 27 ilustra o papel da CCA nos resultados do ensaio de espalhamento. Exceto um valor extremo, tem-se uma homogeneidade dos resultados e não se observa mudança significativa do comportamento da mistura para esse ensaio. Nota-se um espalhamento incoerente de 59,5 cm que pode ser devido as más condições, dentro do material, ou externas, no momento da homogeneização da mistura. Pode porém notar-se uma clara diminuição do diâmetro de espalhamento com a adição de CCA para um fator a/c = 1,22. A maior dispersão dos resultados por teores de CCA maiores, relativos a uma diminuição da estabilidade da mistura fresca, permite evidenciar as afirmações de Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009) relativo ao papel dispersivo das cinzas no solo-cimento.

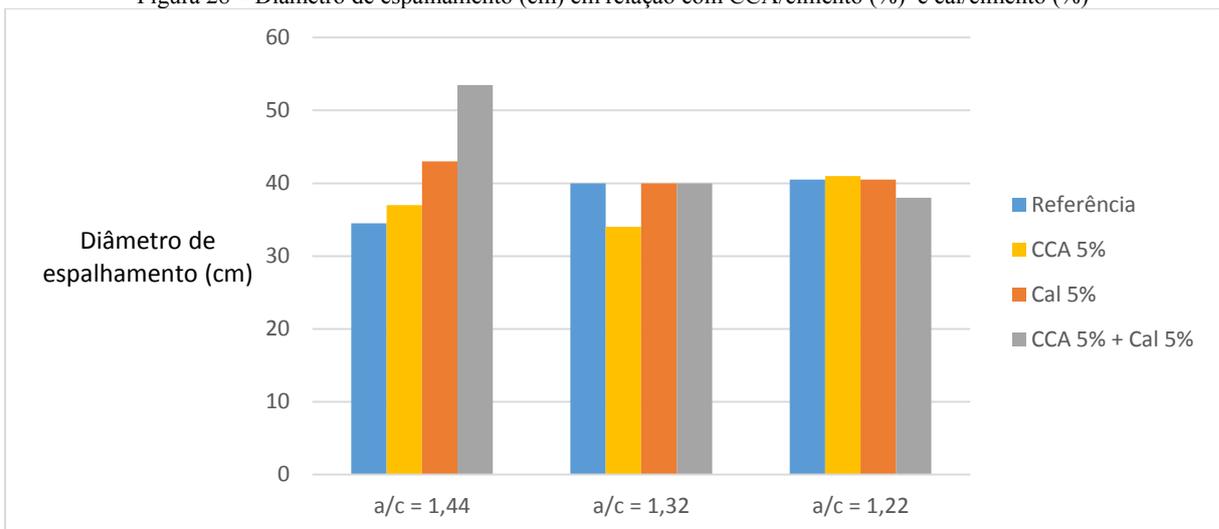
Figura 27 – Diâmetro de espalhamento (cm) em relação com CCA/cimento



Fonte: do Próprio autor

A Figura 28 apresenta a variação do diâmetro médio obtido no ensaio de espalhamento com relação aos teores de CCA, de cal e da adição dos dois nas mesmas proporções – 5%, isso para cada fator a/c . O que se observa na Figura 28 é ainda o papel estabilizador do cimento. Nota-se pelo teor de cimento menor um crescimento do diâmetro médio primeiro com 5% de CCA em relação com a mistura de referência, depois com 5% de cal e finalmente com a adição de 5% de CCA e 5% de cal. Pelos teores maiores de cimento, observam-se resultados muito próximos para cada caso. Deve existir um teor a partir do qual o cimento teria então um papel preponderante no comportamento das misturas.

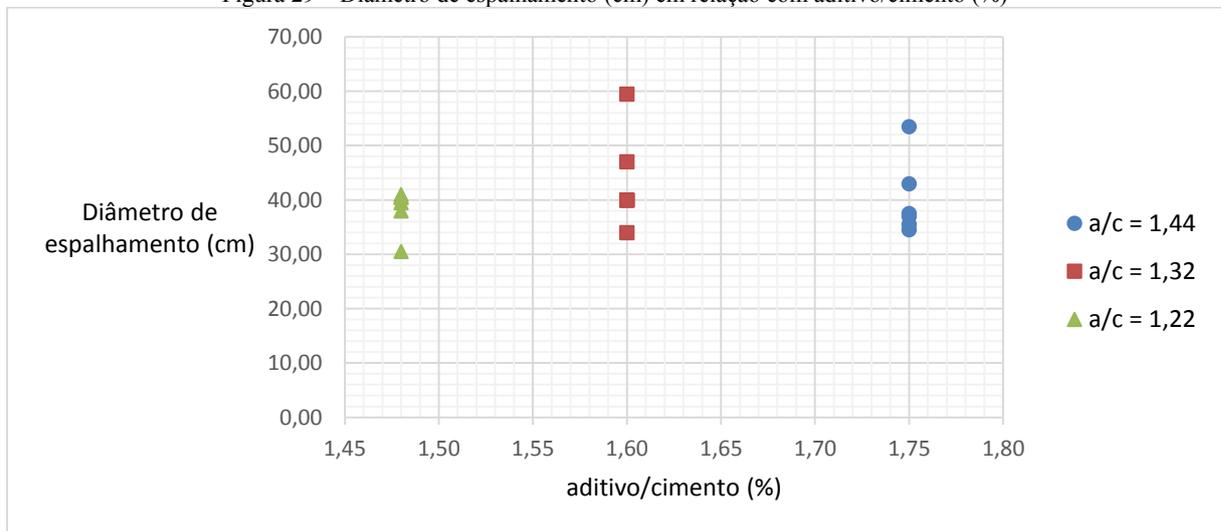
Figura 28 – Diâmetro de espalhamento (cm) em relação com CCA/cimento (%) e cal/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

A Figura 29 mostra o efeito da adição de superplastificante no diâmetro de espalhamento. Lembra-se que o teor de aditivo aumenta com a adição de cimento, sendo fixa a relação aditivo/solo+cimento, permitindo assim compensar a diminuição de fluidez da mistura. Segundo os resultados, tem-se um aumento médio e uma dispersão dos resultados devido um valor incoerente também ilustrado na Figura 27 para um teor de 1,60% de aditivo em relação ao cimento. A Figura 25 ilustra as superfícies de espalhamento obtidas por esse teor de aditivo e mostra a diversidade dos comportamentos das misturas. Tirando esse valor extremo, é possível interpretar o aumento do diâmetro de espalhamento com o teor de aditivo, o que corrobora com os resultados de estudos realizados anteriormente, embora essa variação seja dificilmente perceptível nas faixas de teores de aditivo utilizado.

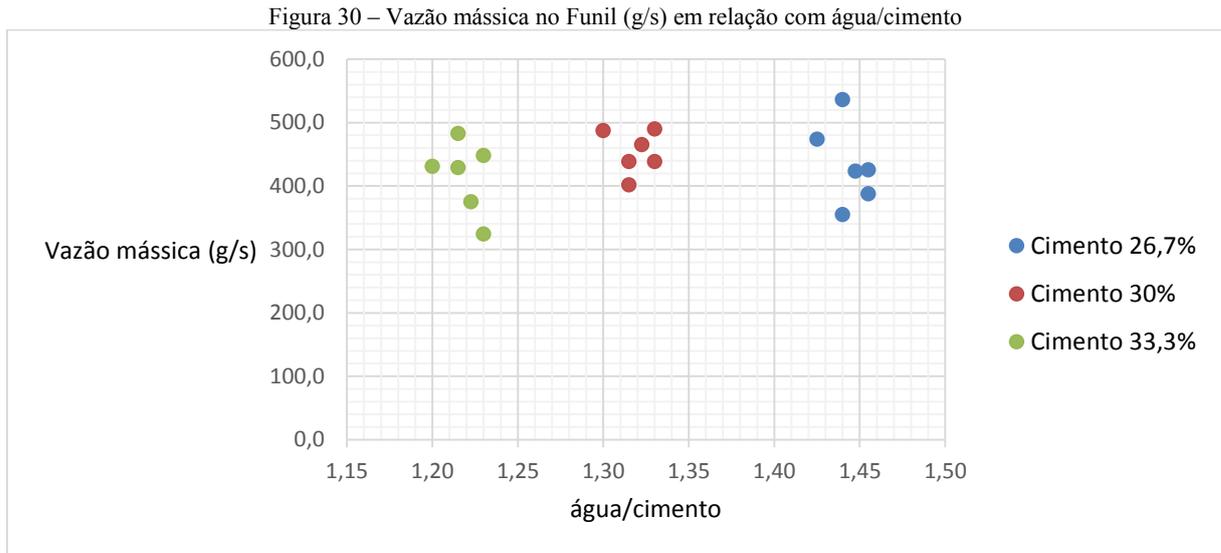
Figura 29 – Diâmetro de espalhamento (cm) em relação com aditivo/cimento (%)



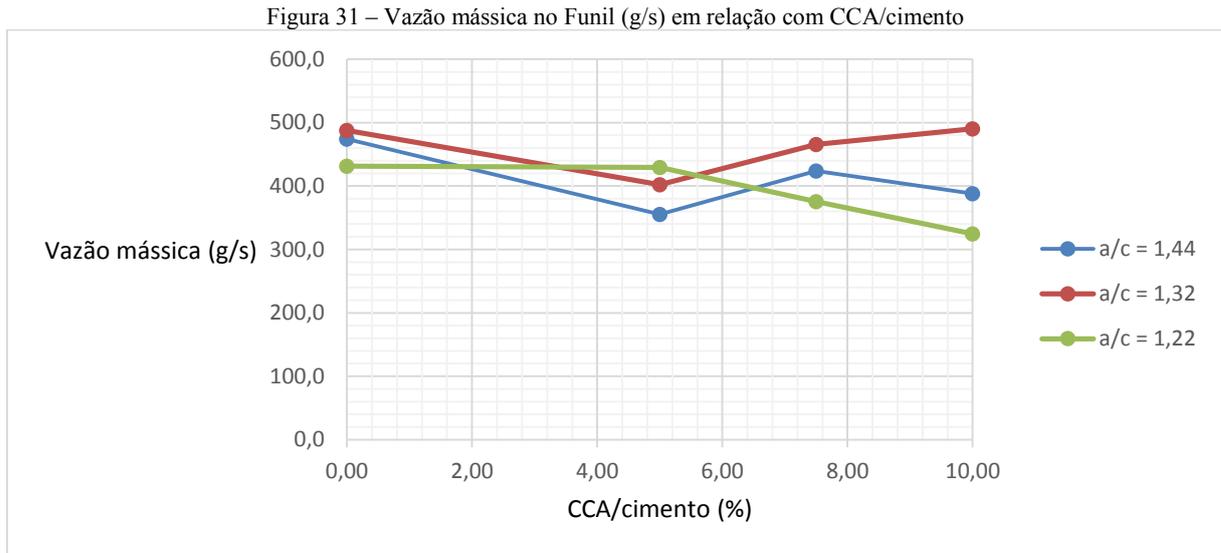
Fonte: do Próprio autor

b) Ensaio do Funil

As propriedades de fluidez, de inércia e o atrito entre as partículas presentes na mistura foram observadas através do ensaio do Funil. A Figura 30 mostra que a vazão mássica não muda significativamente com a relação água/cimento. Isso pode ser devido ao fato da escolha de se fixar os parâmetros água/materiais secos e aditivo/cimento+solo, na tentativa de conservar condições de trabalhabilidade semelhantes entre as misturas.

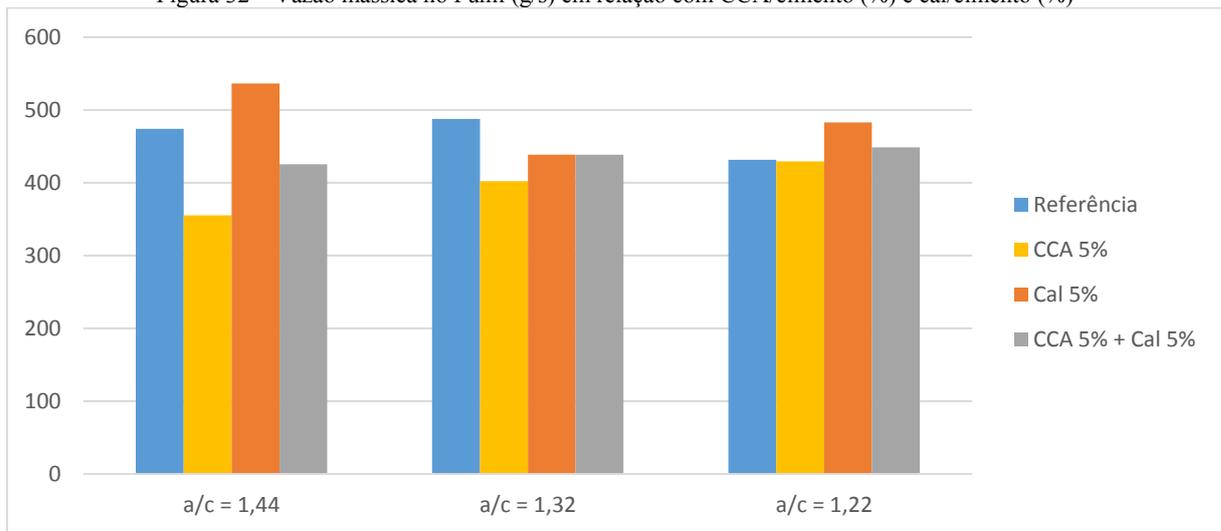


A Figura 31 ilustra a variação da vazão no Funil em relação à CCA/cimento. Apesar da grande proximidade dos resultados, e principalmente para teores de CCA menores, não se tem correlação óbvia. Pode-se, contudo, observar uma diminuição da vazão com o crescimento do teor de CCA para o menor fator $a/c = 1,22$. Essa observação se relaciona com o que foi visto na Figura 27 com os resultados do ensaio de espalhamento onde um comportamento muito parecido foi evidenciado por esse fator a/c . Pode-se então falar que existiria um valor do fator a/c a partir do qual o aumento do teor de CCA teria uma influência clara na trabalhabilidade do SCAA. Um teor de cimento abaixo deste valor, seria tal que a água não conseguiria atender a demanda requerida pela superfície específica e compensar o fenômeno de dispersão induzido pela CCA, disponibilizando mais partículas de cimento para a reação de hidratação. Por outro lado, observa-se, da mesma forma que foi visto na Figura 27 para o diâmetro de espalhamento, uma maior dispersão dos resultados, que vem reforçar as afirmações de Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009) quanto ao papel dispersivo das cinzas no solo-cimento, induzindo uma diminuição da estabilidade da mistura.



A Figura 32 apresenta a variação da vazão mássica obtida no ensaio do Funil com relação aos teores de CCA, de cal e da adição dos dois nas mesmas proporções, isso para cada teor de cimento. Embora nenhuma correlação clara pode ser feita quanto ao papel da cal e da CCA nos resultados obtidos, observa-se da mesma maneira que para o ensaio de espalhamento, uma aproximação dos resultados com o aumento do teor de cimento. Pode ver-se, globalmente, uma vazão maior para as misturas de referência em relação com as outras que devem apresentar um atrito maior pela adição de cal e/ou de CCA. Contudo tem-se uma exceção pela mistura apresentando 5% de cal e 26,7% de cimento onde tem-se a maior vazão mássica obtida. A relação água/materiais secos sendo fixada, obtém-se uma relação água/cimento menor pelo menor teor de cimento. O teor de água pode ser grande demais para que a cal tenha um papel plastificante eficaz, não tendo, portanto, o papel esperado na aderência da argamassa.

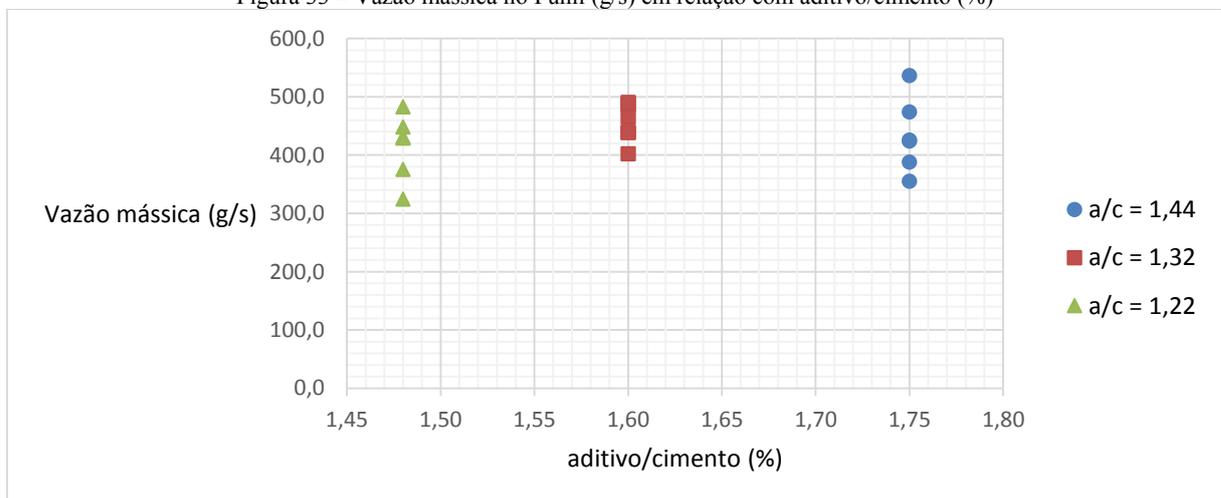
Figura 32 – Vazão mássica no Funil (g/s) em relação com CCA/cimento (%) e cal/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

Observa-se na Figura 33 um crescimento muito leve da vazão mássica com a relação aditivo/cimento. Pode-se falar que a faixa dos valores da relação aditivo/cimento estudadas é muito pequena e não permite ver um crescimento importante da fluidez com o teor de aditivo. Esse sendo, para cada uma das três séries estudadas, compensado pelo teor de cimento na tentativa de obter condições de trabalhabilidade semelhantes.

Figura 33 – Vazão mássica no Funil (g/s) em relação com aditivo/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

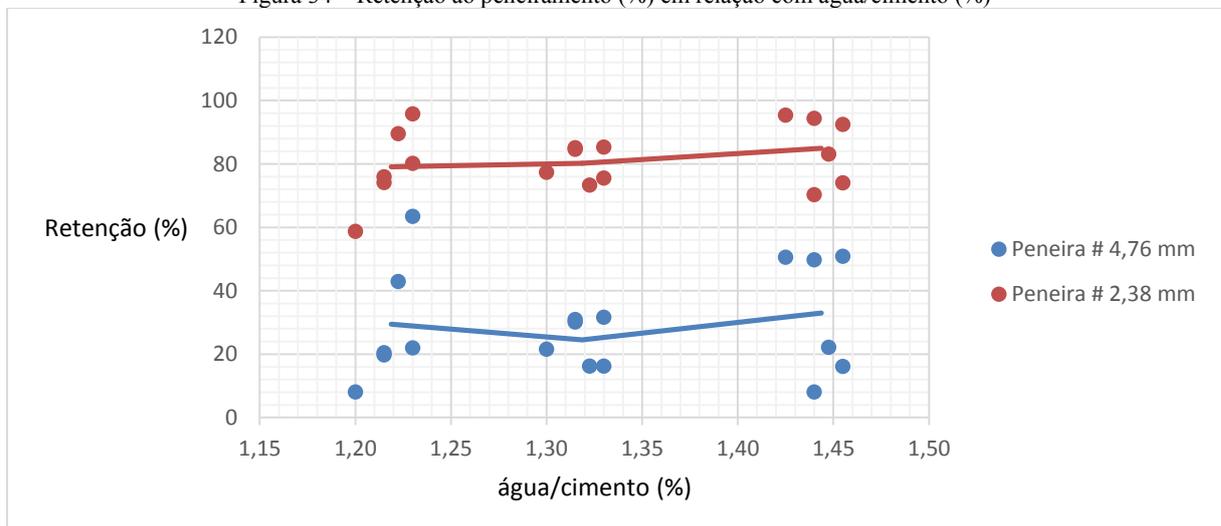
Os resultados apresentados nas Figura 30 e Figura 33 mostram o papel indispensável do superplastificante na obtenção de um material auto-adensável, porque adicionando somente 1 g de aditivo por 250 g de cimento e com uma relação água/cimento diminuindo, consegue-se manter condições de trabalhabilidade semelhantes. O trabalho de Berte (2012) mostrou um crescimento do diâmetro médio e da vazão mássica no Funil com o fator água/cimento. Pode-

se falar que o aumento do teor de aditivo compensa a redução do fator água/cimento quanto à fluidez das misturas, mesmo tendo uma diminuição da relação aditivo/cimento. As observações experimentais, durante o processo de homogeneização, estão em consonância com os resultados porque mostraram uma mudança significativa da consistência da mistura, após adição do superplastificante.

c) *Ensaio de segregação*

A homogeneidade, a presença de grânulos e a consistência da mistura foram observadas a partir dos resultados do ensaio de segregação por peneiramento. Uma retenção traduz a presença de segregação na mistura, entre uma parte aquosa e grânulos sólidos. A Figura 34 mostra a evolução da retenção nas peneiras de 4,76 e 2,38 mm com relação ao fator água/cimento. Pode-se observar, na média, um aumento da retenção com esse fator. A água tendo um papel dispersivo, um teor de água alto em relação com o teor de cimento vai aumentar a granulação na mistura. O cimento, ao contrário tem o papel de dar consistência e homogeneidade a essa. Entretanto, a dispersão dos resultados não permite afirmar essa conclusão quanto à variação da retenção ao peneiramento.

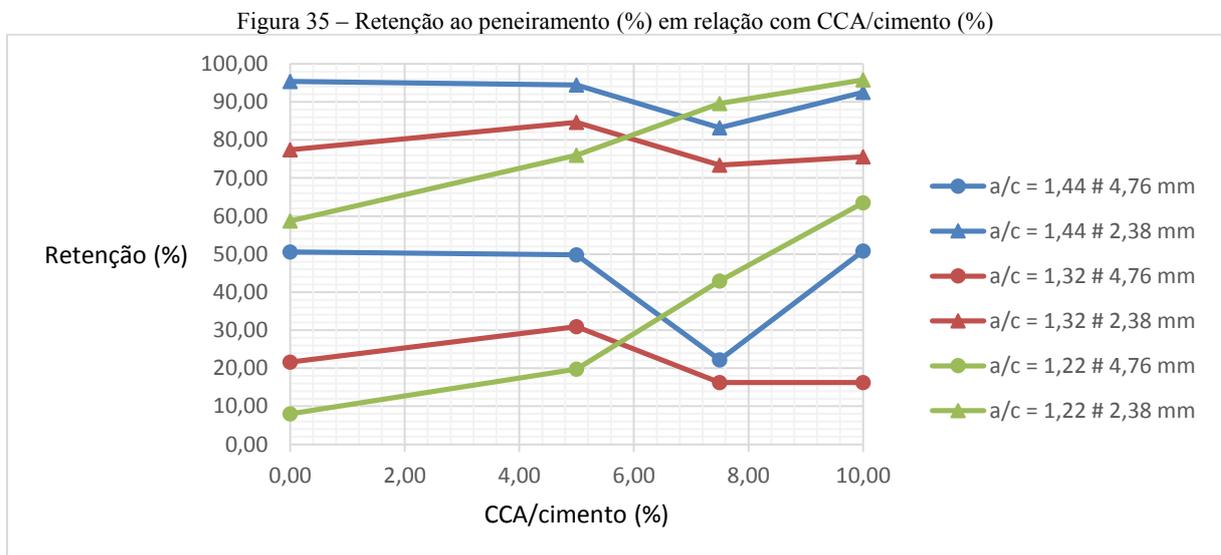
Figura 34 – Retenção ao peneiramento (%) em relação com água/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

A Figura 35 mostra a evolução da retenção nas peneiras de 4,76 mm e 2,38 mm em função da relação CCA/cimento. Pode notar-se que os resultados obtidos à peneira de 4,76 mm são muito mais espalhados que os da peneira 2,38 mm. Isso significa que as quantidades de parte mais finas das composições são próximas umas das outras. Tem-se uma correlação clara entre os

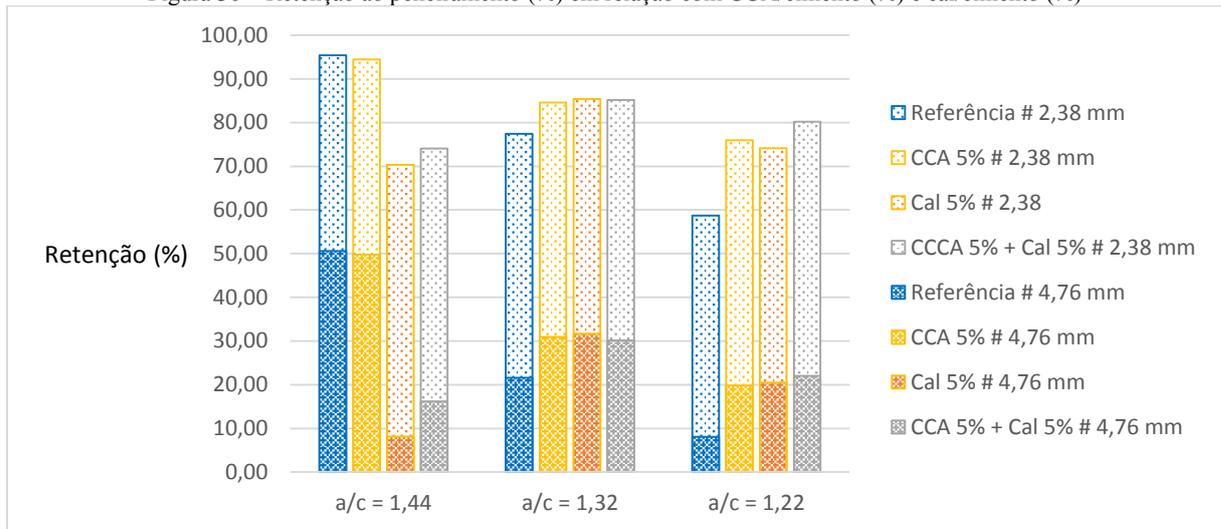
resultados obtidos à peneira de 4,76 mm e a aquela de 2,38 mm com um crescimento como já foi observado na Tabela 10. Podemos ver que para $a/c = 1,44$ e $a/c = 1,32$ as curvas por tem uma evolução similar para as duas aberturas de peneira e percebe-se uma evolução diferente para $a/c = 1,22$. As curvas obtidas para $a/c = 1,22$ de cimento mostram um crescimento da retenção com o teor de CCA, principalmente pela peneira de abertura 4,76 mm. Existiria então, um fator a/c a partir do qual a adição de CCA criaria um aumento considerável da superfície específica e das partículas em contato com a água, gerando assim uma diminuição da fluidez da mistura. Esse comportamento diferente da mistura para o maior fator $a/c = 1,22$ é relacionado com o que foi observado nas Figura 27 e Figura 31 para a evolução do diâmetro de espalhamento e a vazão mássica.



Fonte: do Próprio autor

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos no ensaio de peneiramento com relação aos teores de CCA, de cal e da adição dos dois nas mesmas proporções, para cada teor de cimento. Pode-se observar que a retenção quando a mistura não tem adição nem de CCA, nem de cal tende a diminuir com o teor de cimento, tanto na peneira de 4,76 mm como na peneira de 2,38 mm o que concorda com os resultados obtidos na Figura 35. A mesma observação pode ser feita para as misturas contendo 5% de CCA. Por tanto, se percebe uma evolução diferente dos resultados com a adição de cal 5% e de CCA 5%. Parece ter, por um fator $a/c = 1,32$, um valor máximo da retenção pelas misturas com adição de cal só e de cal com CCA.

Figura 36 – Retenção ao peneiramento (%) em relação com CCA/cimento (%) e cal/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

4.2 Resultados dos ensaios no estado endurecido

4.2.1 Apresentação dos resultados

Nessa parte serão apresentados os resultados e será realizada uma primeira observação da massa específica aparente dos CPs aos 28 dias e dos resultados obtidos aos ensaios de absorção e de resistência aos 7, 28, 56 e 84 dias.

As massas específicas obtidas aos 28 dias apresentadas na Tabela 13 são muito próximas e não permitem interpretar sobre a influência dos componentes. A média obtida é de $1,84 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 13 – Massas específicas aparentes aos 28 dias (g/cm^3)

Mistura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Massas específicas aparentes aos 28 dias (g/cm^3)	1,81	1,81	1,82	1,83	1,84	1,84	1,84	1,84	1,85
Desvio padrão	0,03	0,02	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03
Mistura	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massas específicas aparentes aos 28 dias (g/cm^3)	1,84	1,87	1,87	1,83	1,83	1,82	1,85	1,82	1,83
Desvio padrão	0,05	0,02	0,06	0,02	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03

Fonte: do Próprio autor

a) Ensaio de absorção

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de absorção aos 7, 28, 56 e 84 dias em termo de %. Pode-se observar uma diminuição dessa ao longo do tempo e com a adição de cimento. Essa diminuição reflete a reação de hidratação, a criação de espécies cimentantes trazendo uma redução da rede porosa. Constata-se um desvio padrão muito variável entre os resultados com um valor extremo de 3,17 % para a mistura 5 aos 84 dias e ultrapassando 1% para 29 resultados exprimindo uma diferença importante entre os resultados para uma mesma série de CPs. Isso pode mostrar o caráter aleatório do material, em função das condições de homogeneização, de localização das partículas uma com as outras, mudando a rede dos poros. Lembra-se que a absorção de água dá uma indicação somente nos poros abertos do material. Então ela dá uma indicação parcial da quantidade de poros presente nele.

Tabela 14 – Absorções aos 7, 28, 56 e 84 dias

Mistura	Absorção 7 dias (%)	Desvio padrão	Absorção 28 dias (%)	Desvio padrão	Absorção 56 dias (%)	Desvio padrão	Absorção 84 dias (%)	Desvio padrão
1	23,80	1,05	20,80	1,13	18,94	0,55	14,15	1,11
2	23,68	0,30	21,25	0,44	19,35	0,16	12,40	1,00
3	22,21	1,08	15,90	0,52	17,64	1,24	13,61	0,89
4	20,25	0,70	18,21	1,56	15,56	0,16	10,80	2,15
5	20,92	0,49	21,86	0,44	16,46	1,98	11,57	3,17
6	20,92	0,49	19,47	1,40	18,00	1,59	10,88	0,42
7	20,80	0,24	18,49	1,39	14,79	2,26	10,37	1,99
8	21,08	0,67	17,39	1,02	13,40	0,95	7,96	1,13
9	20,76	1,06	16,29	1,46	11,56	0,91	9,49	2,42
10	20,50	1,20	15,95	0,74	9,88	1,20	8,60	0,90
11	21,48	0,53	16,72	1,33	12,12	1,29	9,05	2,21
12	21,29	0,35	14,24	1,31	10,32	0,56	7,71	0,80
13	21,37	0,98	14,25	1,84	12,29	0,19	8,79	0,49
14	20,29	0,30	15,76	0,16	13,60	0,59	9,72	0,33
15	16,69	0,86	16,69	0,44	13,16	0,16	9,40	0,36
16	18,52	1,11	18,52	0,24	14,22	0,81	10,17	0,77
17	21,59	0,75	21,59	0,35	14,00	0,59	10,00	0,50
18	20,13	1,22	20,13	0,24	13,59	0,90	9,71	0,85

Fonte: do Próprio autor

b) Ensaios de resistência à compressão mecânica

A Tabela 15 repertoria os resultados do ensaio de resistência ao ensaio de compressão axial realizado em 5 CPs para cada mistura aos 7, 28, 56 e 84 dias em termo de MPa. Da mesma maneira que se tem uma diminuição da absorção ao longo do tempo e com a adição de cimento, a resistência aumenta com esses parâmetros. A partir dos 28 dias, a CCA começa ter um papel relevante na resistência axial das amostras. Assim, o maior valor alcançado nessa pesquisa aos 28 dias foi de 11,45 MPa pela mistura 16, com um fator a/c = 1,23 e 10% de CCA adicionada. A cal, de maneira mínima, parece também ter um papel positivo na resistência do material endurecido. Pode-se ver que as misturas desse estudo apresentam valores de resistência muito superior ao mínimo de 2 MPa aos 28 dias prescrito pela NBR 8491 (ABNT, 1984) porque o mínimo alcançado foi de 4,42 MPa por 28 dias e de 3,32 aos 7 dias. Observa-se que por um teor de 30% de cimento com um fator água/cimento de 1,20, Berte (2012) alcançou 7,51 MPa que foi a resistência máxima atingida. Aqui pelo mesmo teor de cimento, com um fator água/cimento de 1,30, a mistura 7 alcança 7,01 MPa, o que é coerente.

Tabela 15 – Resistência à compressão axial aos 7, 28, 56 e 84 dias

Mistura	Resistência compressão axial 7 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão axial 28 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão axial 56 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão axial 84 dias (MPa)	Desvio padrão
1	3,81	0,31	4,42	0,62	8,51	0,55	8,58	0,66
2	3,79	0,24	5,17	0,46	9,40	0,50	7,32	1,23
3	3,68	0,15	5,62	0,61	9,92	0,39	9,51	0,44
4	3,82	0,24	6,68	0,53	10,22	0,30	9,76	1,12
5	3,59	0,27	5,37	0,55	7,80	0,67	6,73	0,90
6	3,32	0,25	5,62	0,79	8,72	0,76	8,70	1,51
7	4,28	0,40	7,01	0,97	6,79	1,13	8,15	0,96
8	4,04	0,37	7,63	0,44	8,29	0,99	9,67	0,54
9	5,09	0,12	7,69	0,62	9,23	0,78	9,97	1,52
10	4,99	0,23	7,77	0,61	8,98	0,71	9,23	1,26
11	3,65	0,47	8,58	1,02	8,18	0,65	8,85	0,50
12	3,82	0,54	8,69	0,44	9,34	0,68	11,74	0,69
13	4,98	0,86	7,99	0,69	7,85	0,89	9,16	1,27
14	5,20	0,51	9,51	0,54	8,67	1,34	9,78	0,98
15	6,11	0,27	11,28	0,79	10,93	1,45	11,74	0,44
16	5,81	0,39	11,45	1,06	13,36	0,68	13,21	0,88
17	5,26	0,26	9,26	0,67	9,95	0,62	9,32	0,85
18	5,24	0,40	10,35	0,16	10,51	0,89	10,60	0,80

Fonte: do Próprio autor

A Tabela 16 repertoria os resultados do ensaio de resistência ao ensaio de compressão diametral aos 7, 28, 56 e 84 dias em termo de MPa. As observações feitas quanto à variação da resistência axial do material valem também aqui para a resistência diametral, constata-se de maneira geral um crescimento dessa com teor de cimento, o teor de CCA e o tempo embora as variações pareçam menores.

Tabela 16 – Resistência à compressão diametral aos 7, 28, 56 e 84 dias

Mistura	Resistência compressão diametral 7 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão diametral 28 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão diametral 56 dias (MPa)	Desvio padrão	Resistência compressão diametral 84 dias (MPa)	Desvio padrão
1	0,71	0,11	0,84	0,05	1,21	0,09	1,48	0,05
2	0,73	0,04	0,91	0,04	1,31	0,06	1,45	0,10
3	0,72	0,05	1,02	0,04	1,28	0,10	1,49	0,03
4	0,73	0,02	1,19	0,13	1,27	0,11	1,61	0,24
5	0,55	0,06	0,87	0,12	1,20	0,02	1,19	0,13
6	0,52	0,03	0,97	0,06	1,26	0,05	1,09	0,08
7	0,74	0,08	1,12	0,20	1,15	0,13	1,08	0,07
8	0,71	0,14	1,13	0,24	1,34	0,21	1,32	0,13
9	0,84	0,10	1,29	0,04	1,49	0,12	1,40	0,20
10	0,88	0,07	1,18	0,10	1,58	0,10	1,42	0,07
11	0,73	0,06	1,17	0,12	1,23	0,10	1,32	0,27
12	0,79	0,02	1,36	0,08	1,37	0,06	1,17	0,07
13	0,85	0,15	1,02	0,10	1,32	0,07	1,24	0,06
14	0,99	0,10	1,39	0,06	1,50	0,08	1,45	0,31
15	1,08	0,11	1,49	0,04	1,61	0,20	1,75	0,07
16	1,05	0,12	1,48	0,17	1,65	0,15	1,39	0,13
17	0,98	0,11	1,33	0,06	1,52	0,17	1,25	0,03
18	0,96	0,13	1,42	0,09	1,56	0,18	1,31	0,17

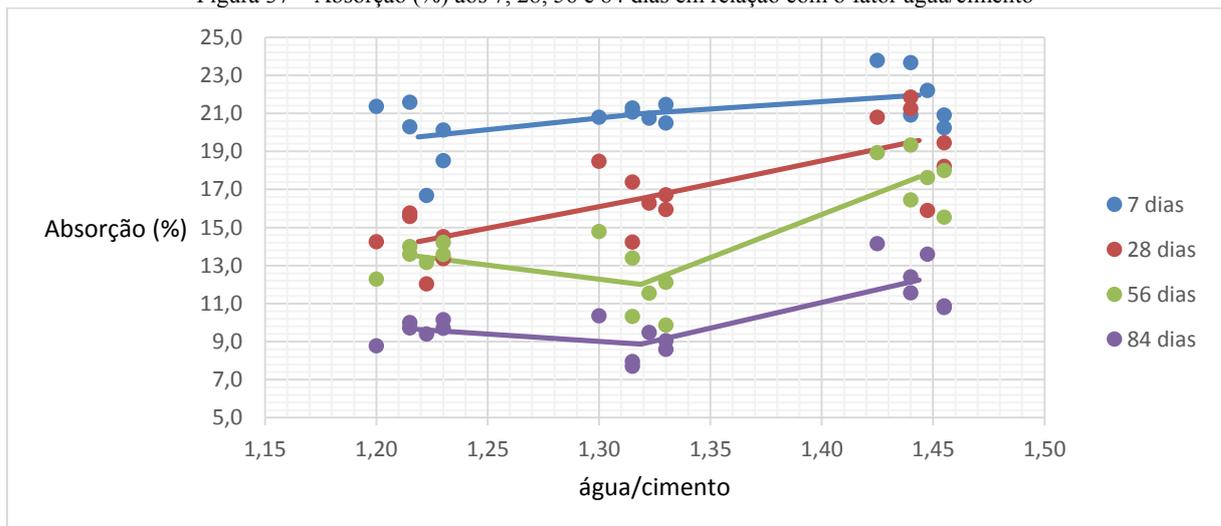
Fonte: do Próprio autor

4.2.2 Estudo do comportamento

a) Ensaio de absorção

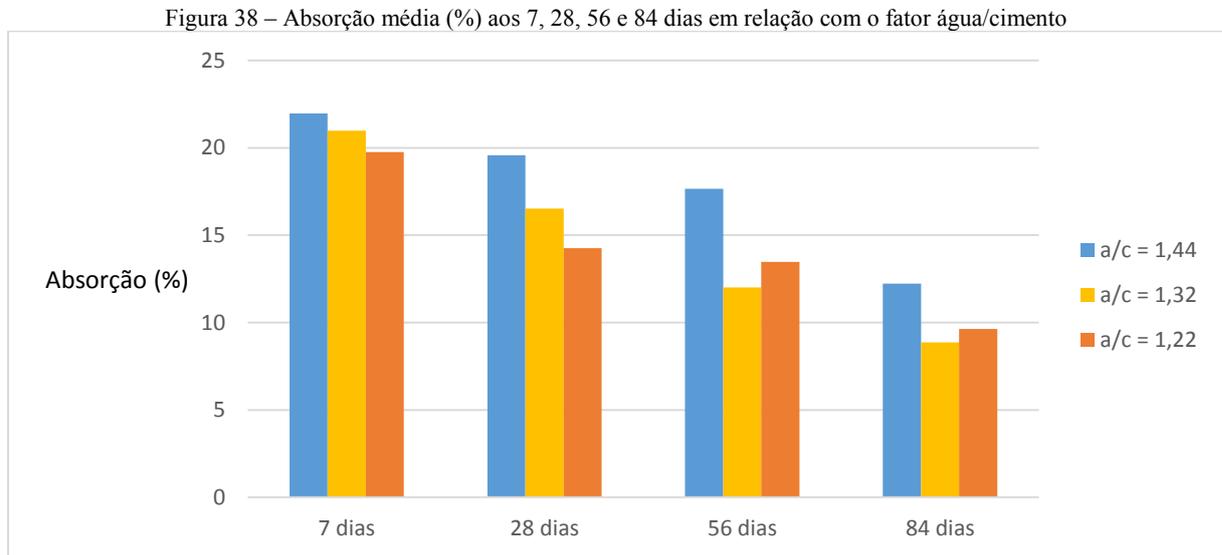
A Figura 37 apresenta a evolução da absorção em relação com o fator água/cimento aos 7, 28, 56 e 84 dias. Pode-se observar um crescimento da absorção com o fator água/cimento. Esse resultado é esperado em razão da porosidade trazida pela água na mistura, sendo um problema importante na mistura de SCAA e levando ao uso de superplastificante para utilizar uma quantidade de água menor. Os resultados mostram que o fator a/c e o tempo são dois parâmetros influenciando na absorção do SCCA seco. Em relação ao tempo, tem-se uma redução da absorção relacionada à reação de hidratação atuando no material e nota-se que para um fator água /cimento menor essa diminuição da absorção entre 7 e 28 dias é maior que para fatores a/c maiores. De fato, a reação de hidratação é mais rápida para fatores água/cimento menores. A diminuição da absorção em função da diminuição do fator a/c é linear em toda a faixa de valores de a/c aos 7 e 28 dias, com uma variação maior aos 28 dias. Essa diminuição existe também para os 56 e 84 dias de curas, em especial para os casos de relações a/c dados por 1,44 e 1,32 e a absorção se estabiliza para com os valores relações dados por 1,32 e 1,22. Tem-se, de maneira geral, uma menor dispersão dos grupos de resultados para idade maior e para fatores a/c menores, ilustrando o papel estabilizador do cimento dando resultados mais precisos.

Figura 37 – Absorção (%) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com o fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

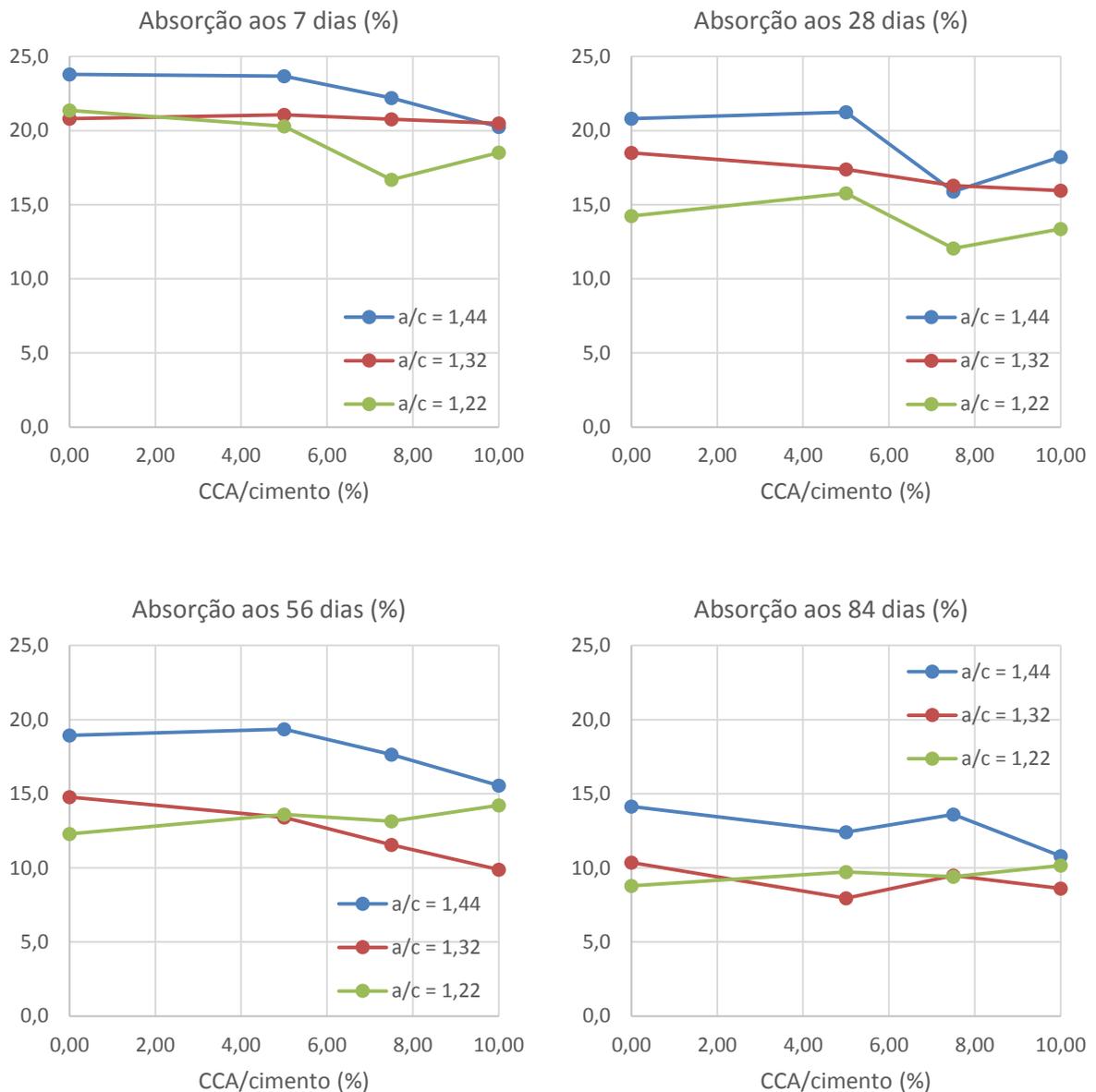
A Figura 38 apresenta a correlação entre a absorção média em relação com o teor de cimento aos 7, 28, 56 e 84 dias. Observa-se, de maneira geral, conforme as observações feitas na Figura 37, uma redução da absorção com o teor de cimento (%) e com o tempo, o que parece normal em razão da atuação da hidratação do material.



Fonte: do Próprio autor

A Figura 39 ilustra a relação entre a absorção e a relação CCA/cimento ao longo do tempo para as diferentes misturas. Tem-se de maneira geral uma diminuição da absorção com o teor de CCA e principalmente a partir de 5%. Como já foi observado na Figura 37, as misturas tendo um fator $a/c = 1,32$ mostram uma diminuição constante da absorção através do tempo. Na totalidade dos resultados, pode-se falar que a misturas cujo fator a/c é maior, mostram uma redução maior da absorção com a CCA. Quando o fator a/c diminui, e para idades maiores, a adição de CCA tem menos influência na absorção do SCAA seco, o cimento tendo um papel ainda maior na rede estrutural do material. O fator responsável da diminuição da porosidade e da absorção pode ser, nas primeiras idades, a localização das partículas de CCA. Porém, nas idades maiores, a reação pozolânica prevalece na redução da rede porosa. Por outro lado, uma floculação pode aparecer com a adição de CCA e aumentar assim a porosidade do material. O que pode explicar a não-linearidade dos resultados obtidos.

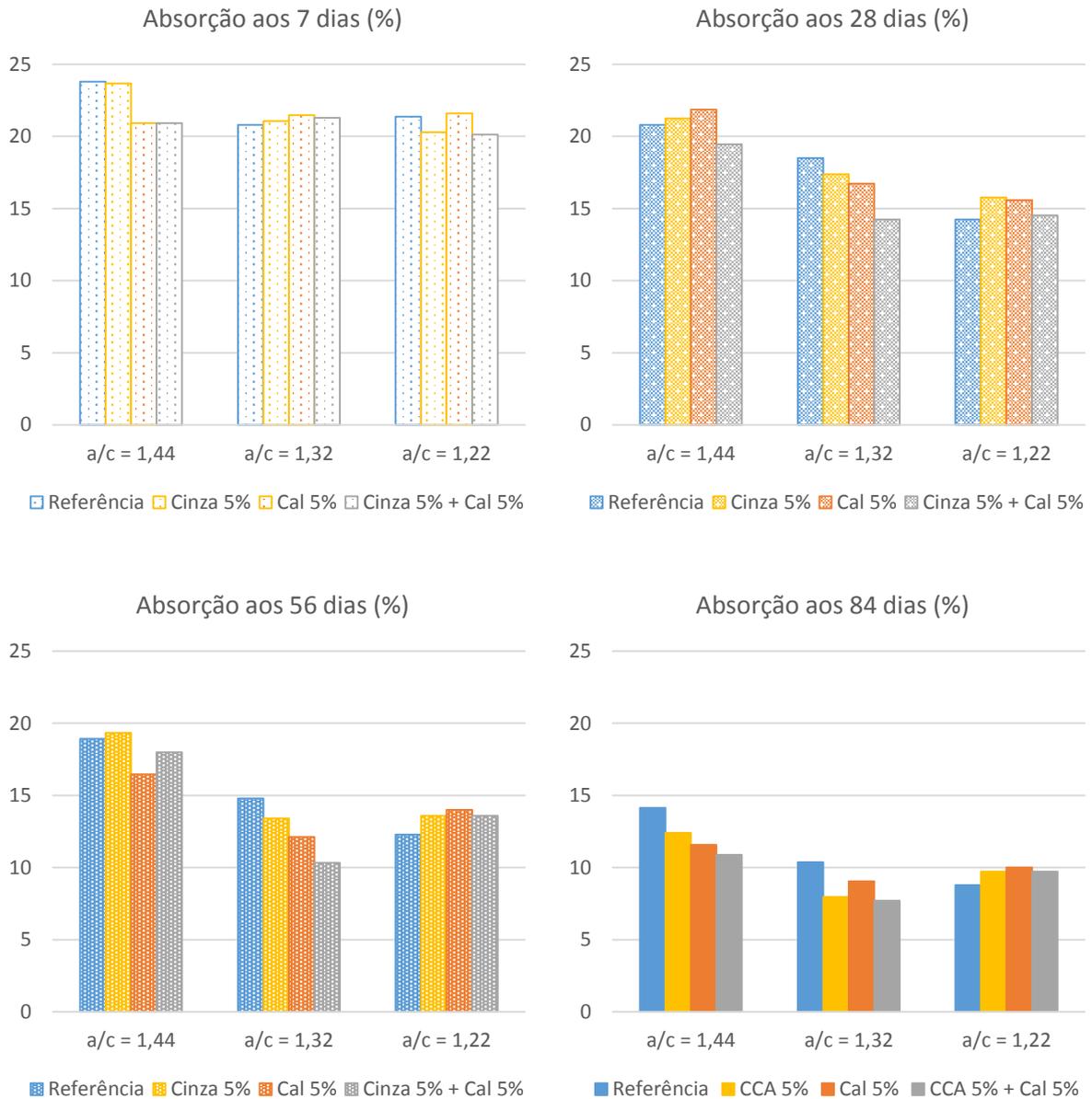
Figura 39 – Absorção (%) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com CCA/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

A Figura 40 apresenta a variação da absorção em relação com as adições de CCA, de cal, e dos dois nas mesmas proporções – 5%, isso para cada fator a/c. Observa-se de maneira geral uma diminuição da absorção com a adição desses dois materiais e principalmente quando a relação a/c cresce. Aos 7 dias de cura, observa-se uma grande dispersão dos resultados, principalmente para a/c = 1,44, que poderia acontecer em razão da grande diferença na estrutura das amostras nas baixas idades e apresentando um teor de cimento menor.

Figura 40 – Absorção média (%) em relação com a adição (%) de CCA, de cal e dos dois juntamente



Fonte: do Próprio autor

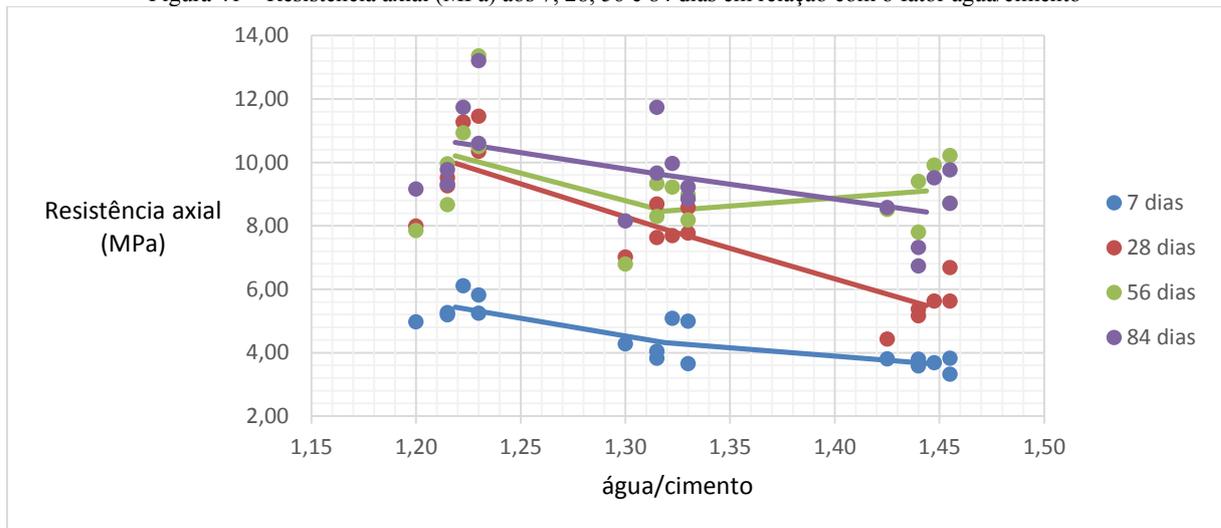
b) Ensaios de resistência à compressão axial

As **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 42 traduzem a influência do teor de cimento e do fator água/cimento na resistência axial do material. Observa-se, de maneira geral um crescimento da resistência, com a diminuição do fator água/cimento no tempo. Para $a/c = 1,44$, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que a resistência continua aumentando significativamente no tempo em comparação com os fatores menores, traduzindo uma reação de hidratação atuando mais tempo em razão de uma quantidade de água maior em

relação com o cimento. Por enquanto observa-se um valor médio maior para 56 dias que para 84 dias por $a/c = 1,44$. A diferença de resistência entre as misturas aos 7 dias e às outras idades, vai aumentando com a diminuição do fator a/c .

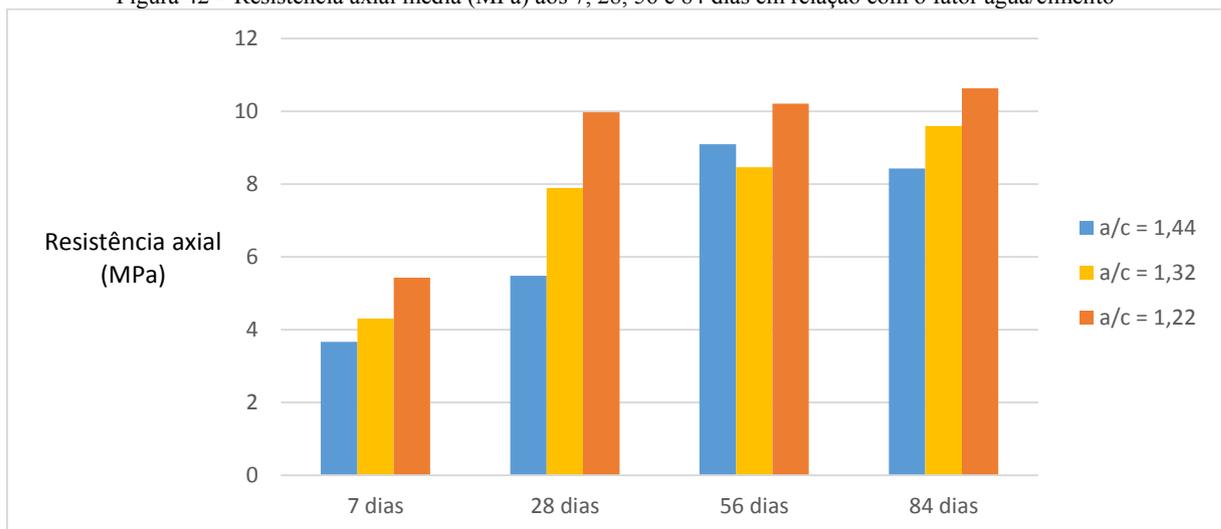
No entanto, a partir de 28 dias, a diferença da resistência axial entre os diferentes tempo de cura, tende a diminuir com fatores a/c menores. De fato, a reação de hidratação, primordial na formação da rede estrutural do material, e diretamente relacionada com a resistência mecânica, ocorre mais rápido por fatores a/c menores.

Figura 41 – Resistência axial (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com o fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

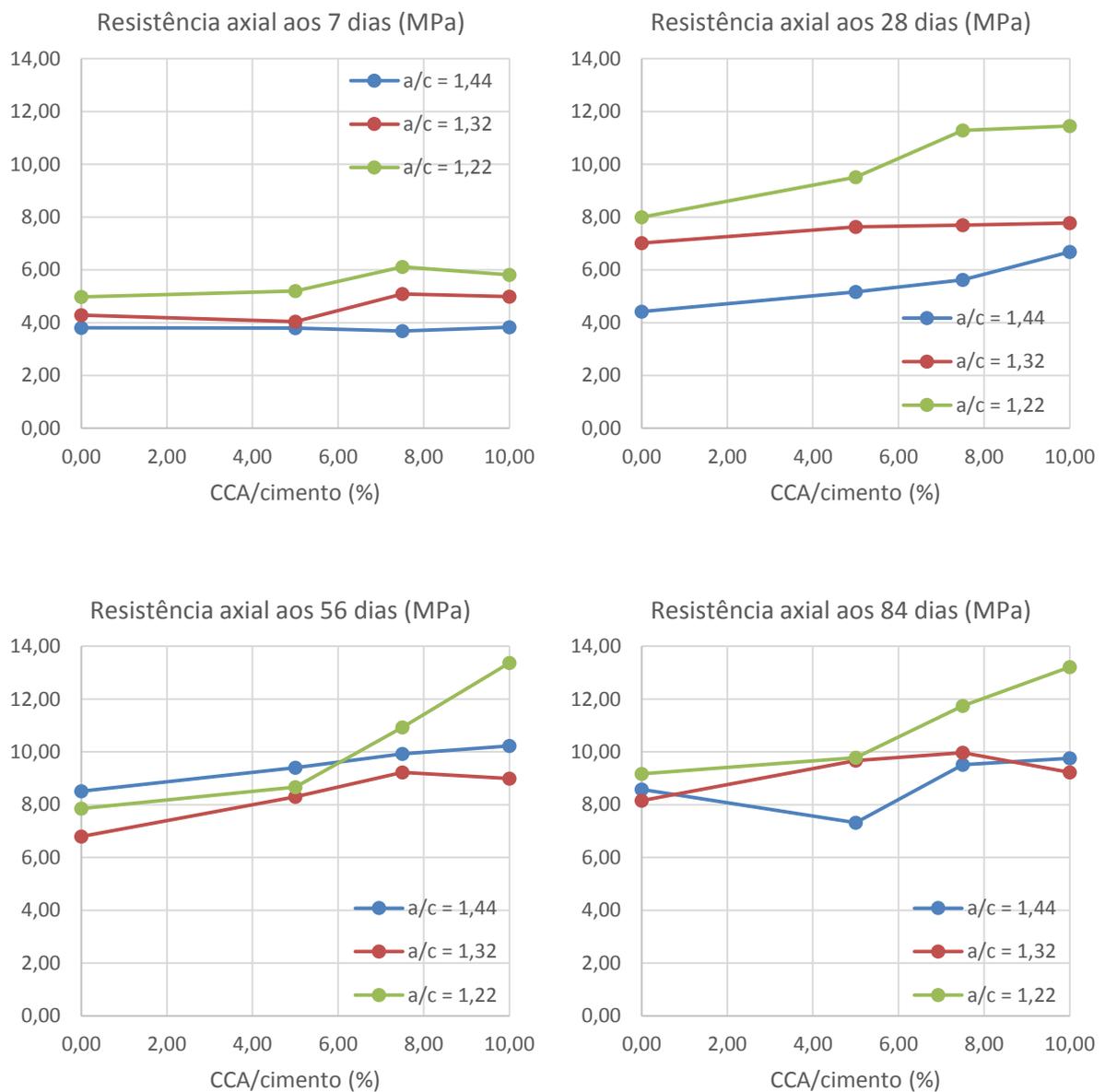
Figura 42 – Resistência axial média (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com o fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

A Figura 43 ilustra a influência do teor de CCA na resistência axial do material. Pode-se falar de maneira geral que a CCA tem um papel positivo na resistência axial ao longo do tempo e que sua influência é maior por fatores a/c menores. Pode-se notar particularmente, a maior resistência obtida nessa pesquisa, de 13,36 MPa, para $a/c = 1,22$, com um teor de 10% de CCA aos 56 dias. Traduzindo os benefícios da atividade pozolânica da CCA na mistura de SCAA. Essa observação mostra que mesmo não tendo influência na absorção para fatores a/c menores e idades maiores, como foi visto Figura 39, a CCA tem um papel positivo na resistência axial do SCAA endurecido em função desses dois parâmetros.

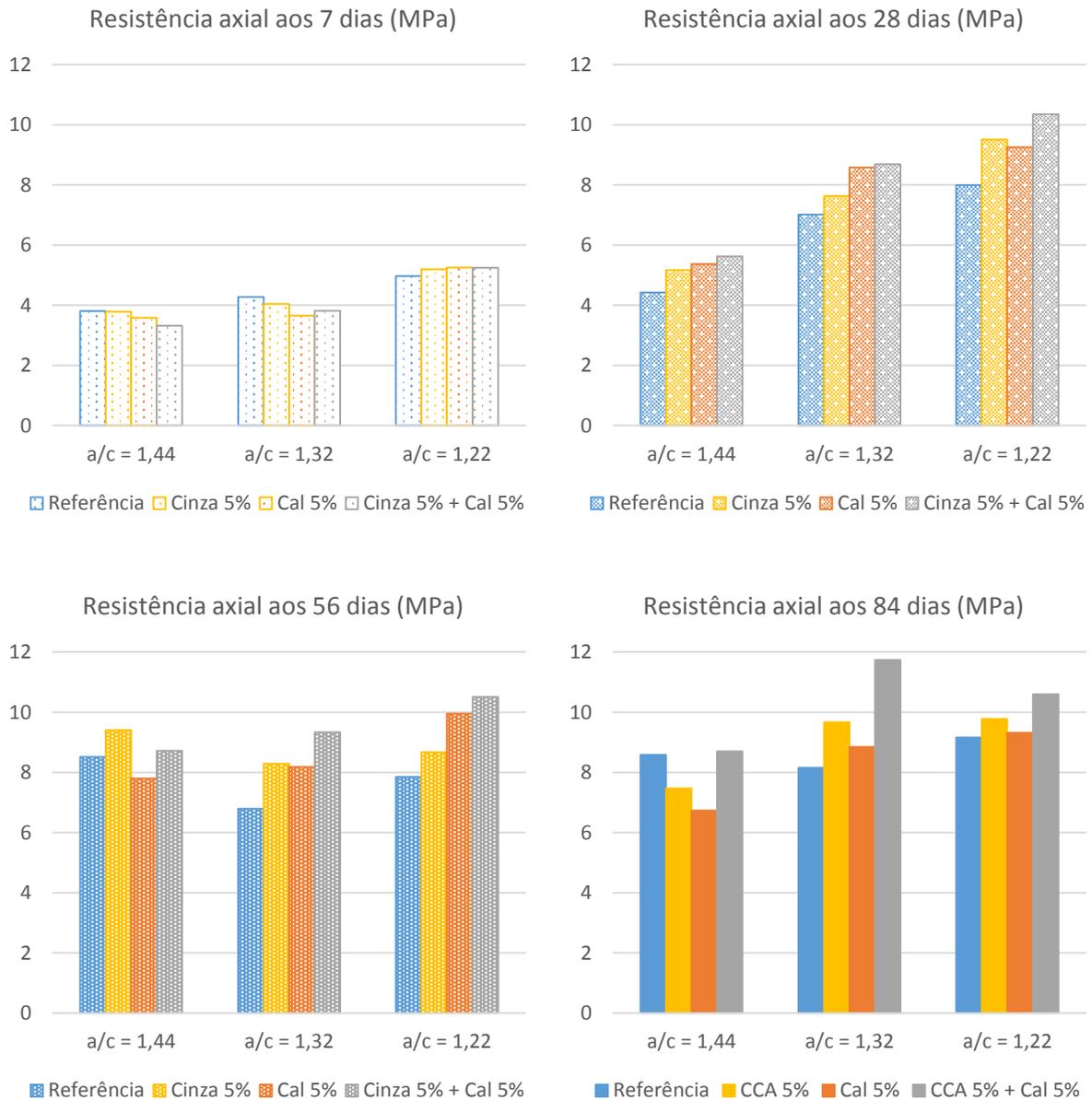
Figura 43 – Resistência axial (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com CCA/cimento (%)



Fonte: do Próprio autor

A Figura 44 apresenta a variação da resistência axial em relação com os teores de CCA, de cal, e da adição dos dois nas mesmas proporções, isso para cada teor de cimento. Tem-se em média, a partir de 28 dias, uma ação positiva da adição de CCA e de cal na resistência axial das amostras e ainda mais pela adição dos dois elementos. Essa influência é tanto mais importante quanto a amostra apresenta um teor de cimento maior – a partir de $a/c = 1,32$.

Figura 44 – Resistência axial média (MPa) em relação com a adição (%) de CCA, de cal e dos dois juntamente

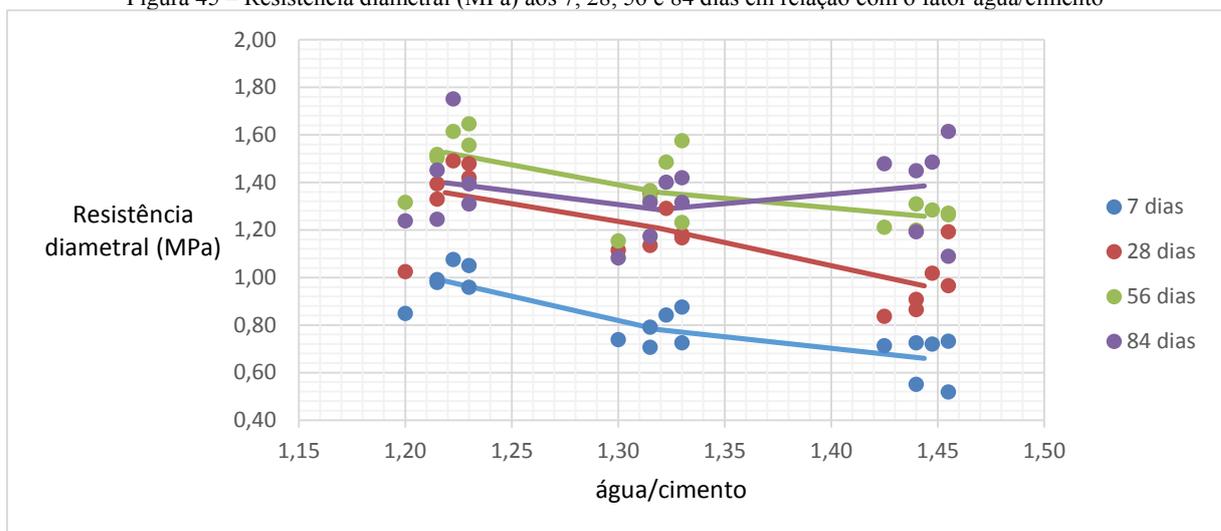


Fonte: do Próprio autor

c) Ensaios de resistência à compressão diametral

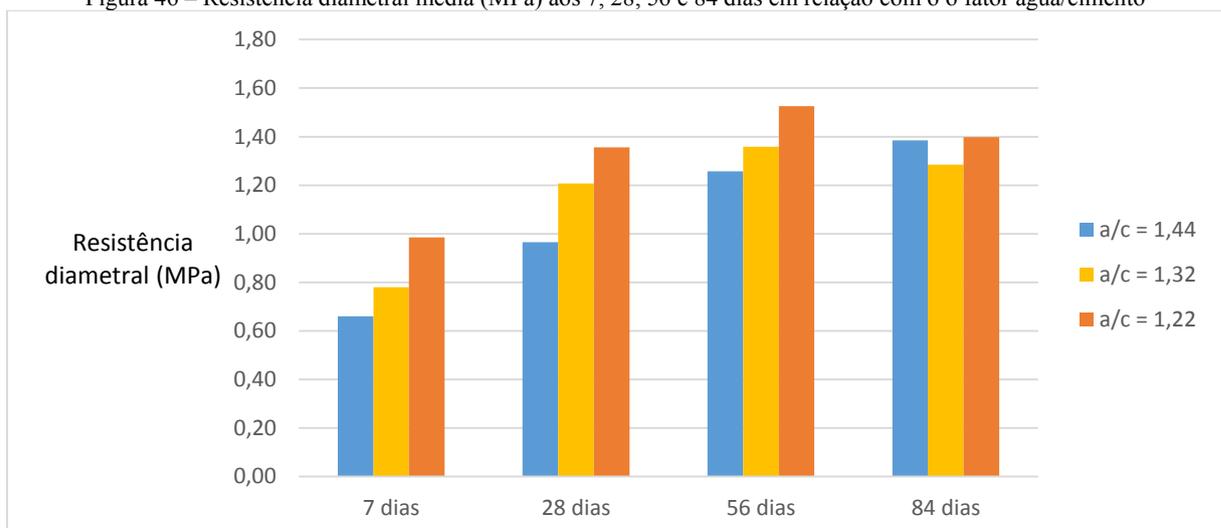
As Figura 45 e Figura 46 mostram a influência do fator água/cimento e do teor de cimento na resistência diametral do material. Observa-se na Figura 45, analogicamente com as resistências diametraes, que a resistência aumenta mais no tempo para fatores água/cimento maiores. Esse resultado está esperado pelo fato que a reação de hidratação continua se operando mais tempo com teores de água maior em relação com o cimento. Percebe-se na Figura 46, contrariamente ao que foi observado na Figura 42 para a resistência axial, que não haja diminuição da influência do cimento na resistência diametral para idades maiores.

Figura 45 – Resistência diametral (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com o fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

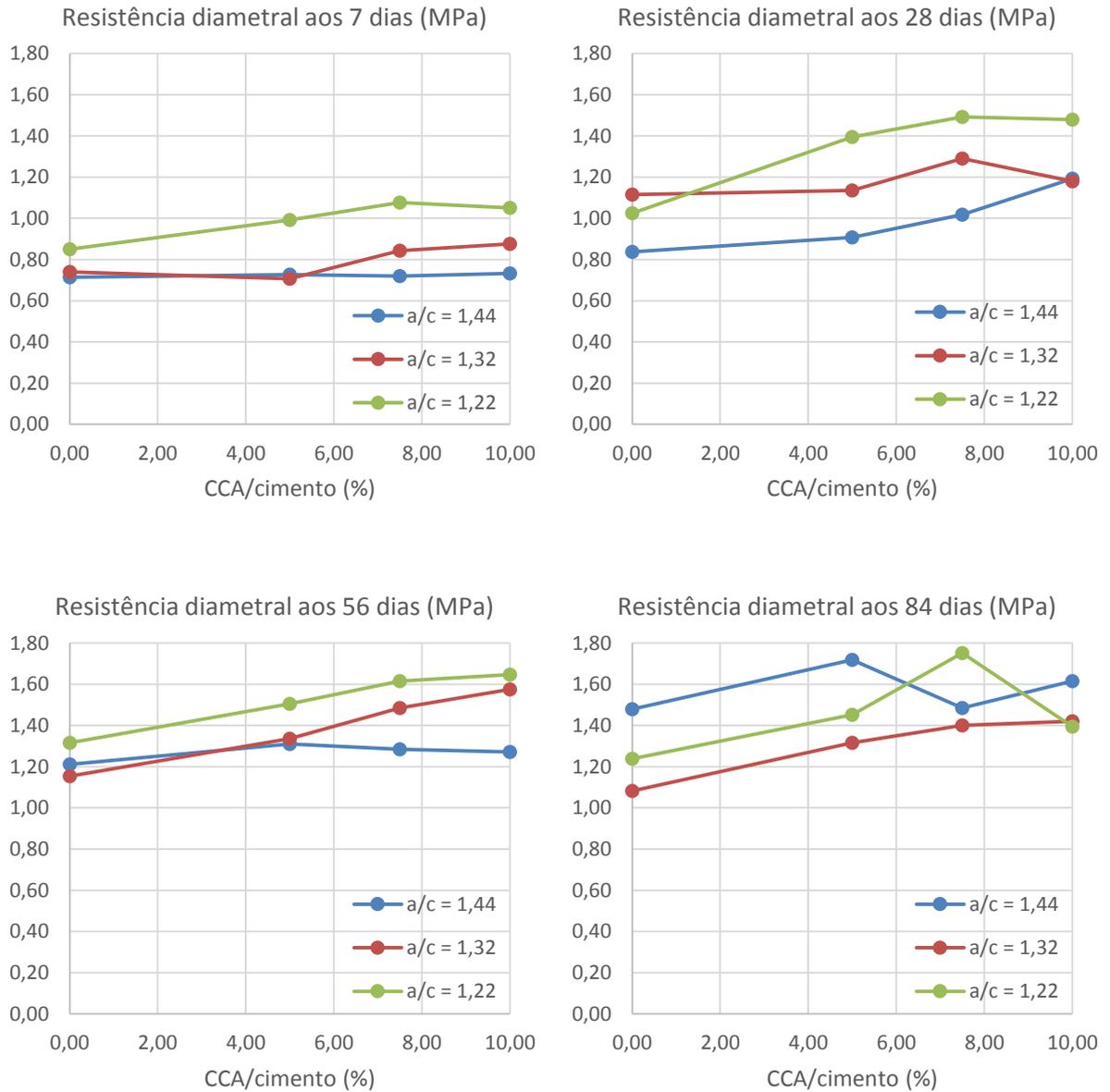
Figura 46 – Resistência diametral média (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com o o fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

A Figura 47 ilustra a influência do teor de CCA na resistência diametral do material. Pode-se verificar, da mesma maneira que para a resistência axial, a ação positiva da CCA na resistência axial ao longo do tempo e que sua influência é maior para teores de cimento maiores.

Figura 47 – Resistência diametral (MPa) aos 7, 28, 56 e 84 dias em relação com CCA/cimento (%)

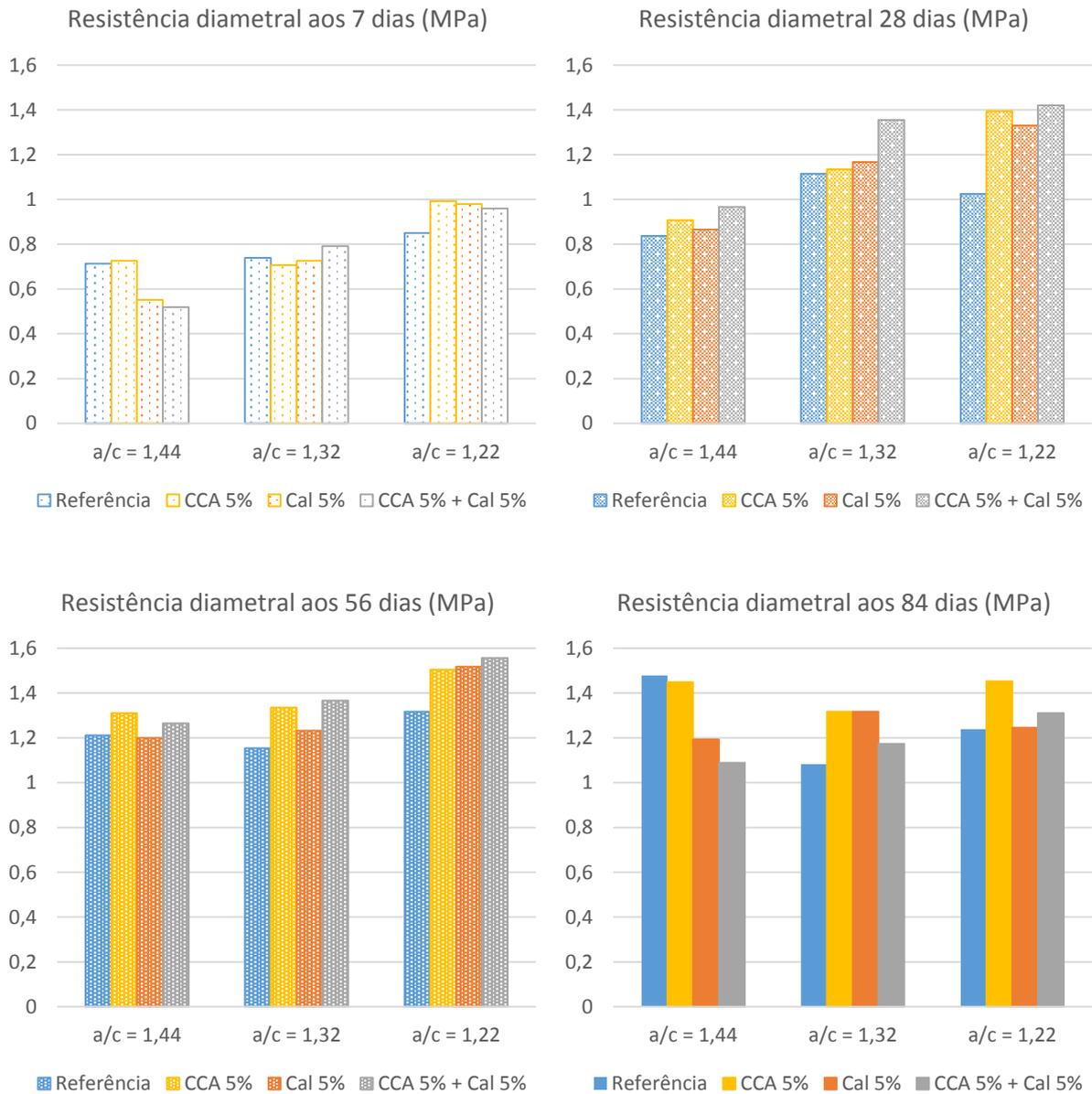


Fonte: do Próprio autor

A Figura 48 mostra a variação da resistência diametral em relação aos teores de CCA, de cal e da adição dos dois nas mesmas proporções, isso para cada teor de cimento. Percebe-se, de maneira mínima, aquela observada na Figura 44 para a resistência axial, uma ação benéfica da adição de CCA e de cal, e dos dois conjuntamente, na resistência axial das amostras. Observa-

se geralmente que o teor de cimento e a idade agem positivamente na atuação da CCA e da cal na resistência diametral do material. Esse crescimento da resistência diametral se observa para relações a/c igual ou abaixo de 1,22, é importante a partir de 28 dias e se estabiliza aos 84 dias de cura.

Figura 48 – Resistência diametral média (MPa) em relação com a adição (%) de CCA, de cal e dos dois juntamente



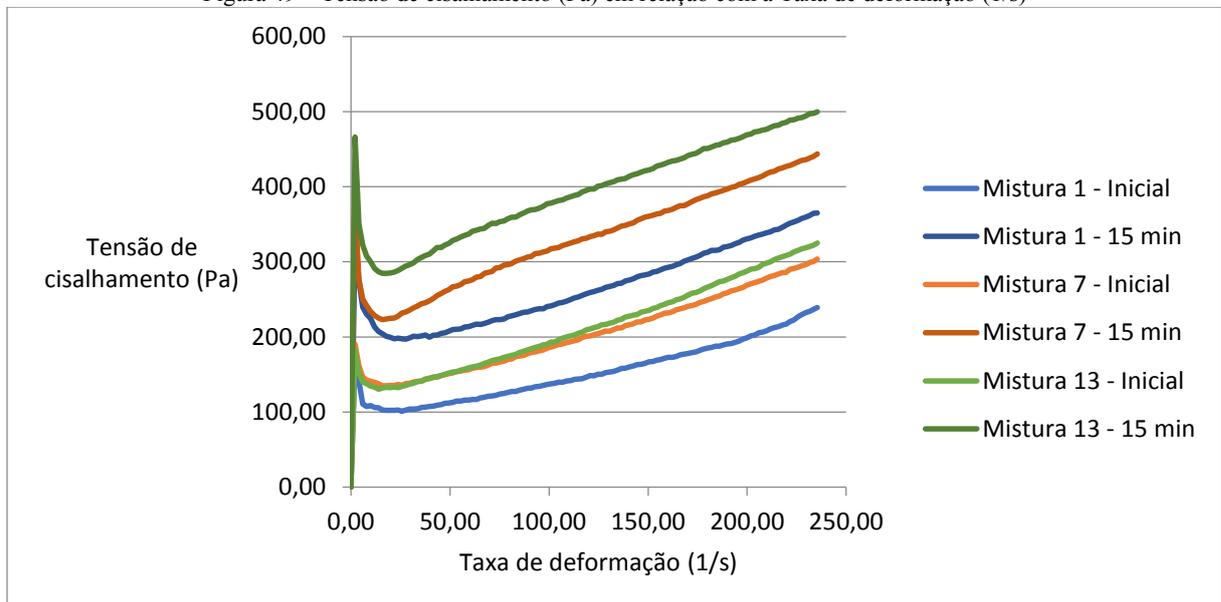
Fonte: do Próprio autor

Outras correlações foram ilustradas no Anexo D.

5 RESULTADOS E DISCUSSOES DO ESTUDO ADICIONAL

A aquisição de dados, realizado durante o ensaio reométrico, permitiu a obtenção das curvas de fluxo, relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. A Figura 49 apresenta as curvas obtidas para cada mistura logo após os ensaios de espalhamento e do Funil, 15 minutos depois do primeiro ensaio reométrico. Para todas as curvas obtidas, observa-se um pico desde o início da aquisição dos dados. Não se pode afirmar, à primeira vista, se isto foi devido a um problema de instabilidade ou se foi em decorrência de algum fenômeno que seja função do tipo de material. Coussot, Leonov e Piau (1993) apresentaram um fenômeno com a mesma característica. No caso de se afirmar quanto ao modelo do SCAA fresco, considera-se necessário a realização de mais ensaios. Entretanto, para realizar uma primeira análise desse material, e sob reserva de controle, foi admitido como hipótese que seu comportamento se aparenta ao modelo de Bingham. Assim, foi filtrada a parte inicial da taxa de deformação e admitido que o fluido foi estudado numa determinada faixa, correspondendo à parte linear das curvas de fluxo. O Anexo C ilustra os resultados dessa filtragem a partir dos quais foram determinados os valores da viscosidade plástica e da tensão limite de escoamento para cada curva apresentada na Tabela 17.

Figura 49 – Tensão de cisalhamento (Pa) em relação com a Taxa de deformação (1/s)



Fonte: do Próprio autor

Tabela 17 – Resultados do Estudo Adicional

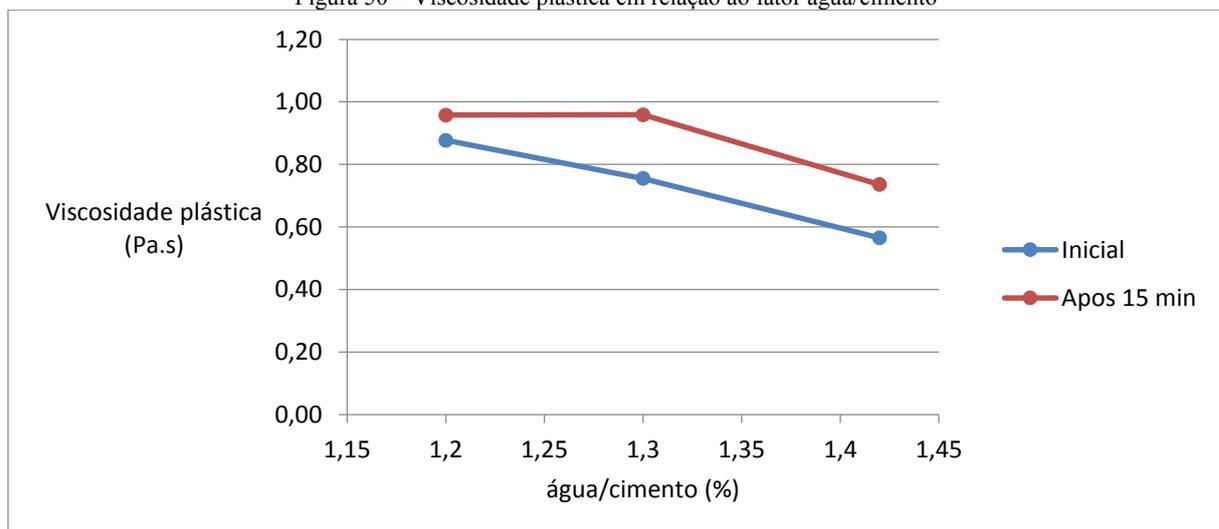
Mistura	Fator a/c	Diâmetro médio (cm)	Vazão mássica (g/s)	Viscosidade plástica (Pa.s)		Tensão limite de escoamento (Pa)	
				Inicial	Após 15 min	Inicial	Após 15 min
1	1,42	28	273	0,57	0,74	85,69	177,98
7	1,30	26,5	210	0,76	0,96	114,76	216,39
13	1,20	25	244	0,88	0,96	109,07	278,14

Fonte: do Próprio autor

Pode-se observar que, apesar de ter sido utilizado o mesmo método experimental, os valores dos diâmetros de espalhamento e das vazões mássicas diminuíram com os resultados do EP. Apesar do solo ter sido recolhido no mesmo lugar, e apresentando as mesmas características químicas, é possível que as condições de granulometria ou de umidade desse tenham influenciado de maneira considerável os resultados, impedindo relacioná-los com aqueles obtidos anteriormente.

Uma primeira leitura dos resultados obtidos permite observar, de maneira geral, um crescimento da viscosidade e da tensão limite de escoamento com a diminuição do fator a/c. Observa-se, no entanto, algumas exceções: uma para a viscosidade plástica medida após 15 minutos de repouso e uma para a tensão limite medida no ensaio inicial, as duas entre as misturas 7 e 13. A Figura 50 ilustra a variação da viscosidade plástica da mistura fresca em relação com o fator a/c.

Figura 50 – Viscosidade plástica em relação ao fator água/cimento



Fonte: do Próprio autor

Com relação à tensão limite de escoamento, pode-se falar que ela varia com o tempo de repouso da mistura, dificilmente controlável porque variando com o tempo de deslocamento da amostra e de preparação do ensaio. Ela é então representativa da coesão e da solidificação da mistura

fluida quando as ligações interparticulares não são quebradas pelo movimento. As exceções observadas podem ser a consequência da mistura 7 tendo tido um tempo de repouso maior que a 13 permitindo então à mistura se estruturar mais.

Com relação à viscosidade plástica, observamos que os resultados obtidos para as misturas 7 e 13 são iguais após 15 minutos de repouso. Existiria então, um tempo e um valor do fator a/c , a partir do quais a variação de viscosidade seria mínima ou quase nula com a adição de cimento. No entanto, os poucos resultados recolhidos nesse estudo não permitem confirmar essa hipótese.

O valor da vazão mássica obtida pela mistura 7 mostrou um valor incoerente com a evolução do diâmetro médio de espalhamento. No entanto, sabendo a correlação existente entre esses dois parâmetros – ilustrada no Anexo D, pode-se admitir que eles variam sensivelmente da mesma maneira com a viscosidade plástica e com o fator a/c .

6 CONCLUSOES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões do Estudo Principal

Com base nos resultados apresentados no EP e considerando a relação água/materiais secos fixa, pode-se concluir que:

As condições de trabalhabilidade do material são definidas principalmente pelo fator água/cimento. No entanto, o estudo mostrou que o superplastificante tem uma função primordial na fluidificação da mistura porque uma adição em baixa quantidade permite compensar a viscosidade trazida pela adição de cimento e a diminuição do fator água/cimento. Na faixa de valores do estudo, não foi observado correlações concludentes entre a adição de CCA e de cal e a trabalhabilidade do material. Foi contudo constatado uma diminuição da vazão mássica com o crescimento do teor de CCA para o menor fator $a/c = 1,22$.

A homogeneidade da mistura e a presença de segregação nas misturas de SCAA foi analisada ao ensaio de segregação por peneiramento, mostrando uma redução da segregação com a diminuição do fator água/cimento, exibindo assim o papel do cimento na homogeneização e na desgranulação da mistura. Para $a/c = 1,44$ e $a/c = 1,32$, não foram determinadas correlações entre o teor de CCA na mistura e a segregação por peneiramento. Porém, para $a/c = 1,22$, observou-se um crescimento da retenção na peneira, traduzindo um valor mínimo de cimento a partir do qual a adição de CCA tem uma real influência na consistência da mistura podendo ser devido a uma quantidade de água insuficiente para satisfazer a superfície específica da mistura seca. As misturas com cal e misturas de cal e CCA parecem apresentar um teor de cimento para o qual a retenção ao peneiramento é maior – 30%. Isso pode ser a consequência de uma coesão favorável entre as partículas dos materiais em presença na mistura fresca.

A CCA tem um papel determinante na resistência à compressão mecânica do SCAA através do tempo a partir dos 28 dias de maneira geral e a partir de 7 dias para os fatores a/c menores – $a/c = 1,22$ e $a/c = 1,32$, mas diminui aos 84 dias. Essa influência aumenta globalmente com o teor de cimento e com a idade do material até pelo menos 56 dias, e poderia evidenciar a presença de sua atividade pozolânica. Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009) tinham observado que a reatividade pozolânica da cinza volante utilizada era mínima no solo-cimento. Neste trabalho, a CCA apresentando características pozolânicas muito boas, poderia ter criado atividade pozolânica no material responsável pelo crescimento da sua resistência mecânica.

Foi observado que mesmo que a CCA atue de maneira positiva na resistência mecânica do material endurecido em função do teor de cimento – fatores a/c menores, e da idade, essa afirmação não se aplica para a absorção, onde, ao contrário, a CCA atua mais para fatores a/c maiores e idades menores.

As adições de cal e de cal com CCA mostram também uma influência benéfica na resistência à compressão mecânica do SCAA. A adição dos dois elementos mostrou resultados melhores que a adição somente de um deles. A ação positiva desses elementos aumenta com a idade do material e evidencia o papel desses na reação pozolânica atuando no material.

6.2 Conclusões do Estudo Adicional

Sem poder oferecer uma análise muito fina, os poucos ensaios realizados permitiram ter uma ideia do comportamento reológico da mistura fresca de SCAA. A mistura mostrou uma perda de fluidez no tempo e com a diminuição do fator água/cimento.

Sem poder afirmar quanto ao modelo reológico descrevendo o comportamento do SCAA fresco, uma análise foi feita a partir da hipótese que esse seja Binghamiano. No entanto, para afirmar ou negar essa hipótese, serão necessário mais ensaios. Uma correlação linear entre a viscosidade plástica e o fator a/c foi determinada justo após homogeneização da mistura, e um valor máximo de 0,96 Pa.s foi atingido para $a/c = 1,20$ e $a/c = 1,30$ após 15 minutos de repouso. Apesar dos resultados serem poucos, pode-se afirmar, de maneira geral, que houve um aumento da viscosidade e da tensão limite de escoamento com o tempo e com a diminuição do fator a/c.

Correlações foram também observadas entre a viscosidade plástica e o diâmetro de espalhamento e a vazão mássica, permitindo assim validar a utilização de tais ensaios, apesar de mostrar uma precisão menor e de não aportar uma caracterização física intrínseca do material.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Sugestões para melhorar a precisão dos ensaios no estado fresco

Os ensaios no estado fresco efetuados durante essa pesquisa oferecem uma precisão limitada, sabendo que o SCAA é um material muito sensível por causa da atividade físico-química das espécies em presença na mistura. Para aumentar a precisão dos ensaios é sugerido o uso de um funil de tamanho maior permitindo um tempo de medição mais longo. No intuito de realizar ensaios de espalhamento mais preciso, é importante sempre secar a superfície de espalhamento utilizada, porque a quantidade de água nessa superfície não pode ser controlada, pode variar entre dois ensaios e influenciar o ensaio seguinte. Um ensaio parecido ao ensaio de fluidez realizado em Carsana e Bertolini (2012) é ilustrado na Figura 3, e poderia ser feito para observar a capacidade da mistura a se adensar. Esse teste permitiria a determinação de uma fluidez ótima para garantir um preenchimento total de uma forma determinada em meio aquoso ou não. Teria que considerar a pressão de confinamento impedindo a saída do material do tubo e a qualidade do material endurecido.

O tempo de mistura tem uma grande influência na homogeneidade do material fresco. Apesar do tempo de mistura ter sido suficiente para observar uma boa homogeneidade e consistência no ensaio de espalhamento, em vários casos foi observado um fenômeno de exsudação na superfície do material espalhado. O intuito desse estudo foi de realizar misturas rapidamente e permitir apreciar a velocidade de homogeneização do material sem perder a fluidez original por evaporação de água. Portanto, existe um caráter aleatório no momento de avaliar o material fresco, e esse aumenta quando o tempo de mistura é diminuído. De fato, o posicionamento das partículas uma com as outras não se realiza da mesma maneira cada vez, a mistura podendo incluir grumos e aglomerado de partículas. A diferença de homogeneidade entre duas misturas, independentemente do traço, vai diminuído com o tempo de homogeneização até atingir uma homogeneidade quase perfeita. Tem-se então, dois aspectos a considerar no momento para definir o tempo de homogeneização do material: a viabilidade prática e a limitação da perda de água por evaporação, e a obtenção de um material homogêneo o suficiente para limitar o caráter aleatório nas observações e medidas do material fresco.

Um maior controle da granulometria da mistura permitiria garantir a homogeneidade dessa e melhorar a precisão dos ensaios no estado fresco. O solo argiloso apresenta, além de partículas arenosas e finas, conglomerados de partículas argilosas floculadas por causa do fenômeno de troca iônica. A presença desses conglomerados, mais ou menos numerosos para cada amostra

de solo, faz variar sua granulometria e a homogeneidade da mistura final. Um peneiramento do solo, antes de misturar, minimizaria esse problema.

7.2 Sugestões de pesquisa

A partir dessa pesquisa, propõem-se várias sugestões de assunto de pesquisa:

- Realizar uma avaliação mais completa do comportamento reológico do SCAA;
- Confeccionar estacas e carregá-las para avaliar o comportamento do material in situ;
- Confeccionar estacas de SCAA armado;
- Observar a estrutura microscópica do SCAA endurecido e fluido;
- Filmar os ensaios de espalhamento “slump flow” e do Funil para analisar o escoamento do material fresco com mais precisão.

REFERENCIAS

ALCANTARA, M. A. M.; CLAVERIE, J. Estudo do solo-cimento autoadensável a partir da incorporação de agregado miúdo como parte da composição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2014. v. 1.

ALCANTARA, M. A. M. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira-SP.** 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502:** rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457:** amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459:** solo - determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508:** grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7175:** cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:** solo - determinação do limite de plasticidade - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181:** solo - análise granulométrica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7217:** agregados - determinação da composição granulométrica Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7681:** calda de cimento para injeção - especificação. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7682:** calda de cimento para injeção - determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8491:** tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1984. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11578:** cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 68**: concreto – determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de graff. Rio de Janeiro, 1998. 10 p.

BERTE, S. D. D. **Otimização do solo-cimento auto-adensável**. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91444/berTE_sdd_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 ago. 2015.

BOM, R. P. Reologia e modificadores reológicos. **Revista H&C**, São Paulo, v. 11, n. 75, p. 2., 2012. Disponível em: <http://www.freedom.inf.br/artigos_tecnicos/hc56/ricardopedro.asp>. Acesso em: 14 abr. 2015.

BOUALLA, N.; BENAOUA, E. H. Comportement des argiles dans un milieu basique. **ScienceLib**, v. 3, n. 110708, 2011. Disponível em: <http://www.sciencelib.fr/IMG/pdf/Comportement_des_argiles_dans_un_milieu_basique.pdf>. Acesso em: 25 set. 2015.

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

COUSSOT, P.; LEONOV A. I.; PIAU, J. M. Rheology of concentrated dispersed systems in a low molecular weight matrix. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Amsterdam, v. 46, n. 2-3, p. 179-217, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006, 306 p.

ESTELLE, P.; LANOS, C. High torque vane rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements. **Applied Rheology**, Lappersdorf, v. 22, p.12881, 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00673458/document>>. Acesso em: 12 mar. 2015.

HOPPE FILHO, J. et al. Técnicas de caracterização reológica de argamassas. e-Mat - **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Porto, v. 3, n. 2, p. 103-120, nov. 2006.

HORPBILSUK, S.; MIURA N.; NAGARAJ, T. S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abram's law as a basis. **Geotechnique Journal**, Bangalore, v. 53, n. 4, p. 439–444, 2003.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; RAKSACHON, Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 49, n. 1, p. 85-98, 2009.

HORPIBULSUK S.; RACHAN R.; SUDDEEPPONG, A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. **Construction & Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 4, p. 1521-1531, 2011.

HRB. Report of committee on classification of materials for subgrades and granular type roads. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL MEETING HELD AT SKIRVIN HOTEL, 25, 1946, Oklahoma. **Proceedings of the...** Oklahoma: Highway Research Board, 1946. p. 376-384. (Highway Research Board, 25)

KELLER. **Deep Soil Mixing (DSM), Amélioration des sols mous par la méthode DSM**. Disponível em: <<http://www.keller-france.com/techniques/brochures/Deep%20Soil%20Mixing%20DSM.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2015.

KANTRO, D. L. Influence of water reducing admixtures on properties of cement pastes – a miniature slump test. **ASTM Standards and Engineering Library Journal**, New York, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KIM, Y. H. **Coagulants and flocculants: theory and practice**. Littleton: Tall Oaks Publishing, 1995. 85 p.

LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização de solos, em particular a estabilização solo-cal**. 1981. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

NOBREGA, M. T. **As reações dos argilo-minerais com a cal**. São Paulo: ABCP, 1985. v. 14, p. 57-78. (Boletim Técnico).

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88851/oliveira_co_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 ago. 2015.

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

SIKA. Ficha do produto Sika ViscoFlow 20. 2014. Disponível em:
<http://bra.sika.com/dms/getdocument.get/08502c14-6b8b-3bd5-bb35-d17b2cf7e571/sika_viscoflow_20.pdf>. Acesso em: 21 set. 2015.

SVA. FISPQ SILCCA NOBRE SCI. 2013. Disponível em: <
<http://www.pileconobre.com.br/doc/FISPQ.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2015.

VOTORANTIM CIMENTOS. Ficha Técnica

Cal Hidratada CHIII Itaú. 2014. Disponível em:

<<http://www.mapadaobra.com.br/archives/FT%20CH%20III.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2015.

ANEXO

ANEXO A – Caracterização do Solo Podzólico Vermelho Amarelo

ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA

Classificação:	
Sondagem	Amostra: SOLO PODZÓLICO VERMELHO AMARELO
Profundidade: (m)	Data:
Local:	Operador:
Registro:	Obs:

SEDIMENTAÇÃO

Umidade %		Dados Gerais	
Cápsula	M84	Solo Umido (g):	70,71
(S + A + T) (g)	87,74	Solo Seco (g):	66,39
(S + T) (g)	84,10	ps (g/cm ³):	2,78
(S) (g)	55,99	Solo Seco Retido - # 200 (g):	27,79
(A) (g)	3,64	Densímetro:	1
(T) (g)	28,11	Defloculante:	Hexametáfosfato de Sódio
w (%)	8,6	Am Total (Pen.Grosso)	66,39

T (°C)	Tempo (min)	Leitura	Correção	Leitura Corrig.	Viscosid. $\mu s(10^4)$	ρ_w (g/cm ³)	Alt. Queda (cm)	Diâmetro ϕ (mm)	Porc. %
				0,00				0,076	59,2
20,0	1	22,0	-3,4	18,60	10,29	0,9982	14,5	0,0506	43,7
20,0	2	20,6	-3,4	17,20	10,29	0,9982	14,8	0,0362	40,4
20,0	4	19,9	-3,4	16,50	10,29	0,9982	14,9	0,0256	38,8
20,0	8	19,4	-3,4	16,00	10,29	0,9982	15,0	0,0182	37,6
20,0	15	19,0	-3,4	15,60	10,29	0,9982	15,1	0,0133	36,7
20,0	30	18,7	-3,4	15,30	10,29	0,9982	15,1	0,0094	36,0
20,0	60	18,0	-3,4	14,60	10,29	0,9982	15,3	0,0067	34,3
20,5	120	17,0	-3,3	13,70	10,03	0,9980	15,5	0,0047	32,2
21,5	240	16,2	-3,1	13,10	9,80	0,9978	15,6	0,0033	30,8
24,0	480	15,0	-2,6	12,40	9,34	0,9973	15,7	0,0023	29,1

PENEIRAMENTO

Peneiramento Grosso				Peneiramento Fino			
Peneira Nº	Diâmetro ϕ (mm)	Massa Retida	Porc. % < ϕ	Peneira Nº	Diâmetro ϕ (mm)	Massa Retida	Porc. % < ϕ
	50	0,00	100,0	10	2,0	0,00	100,0
	38	0,00	100,0	20	0,800	0,14	99,8
	25	0,00	100,0	40	0,420	1,09	98,4
	19	0,00	100,0	60	0,250	5,44	91,8
	13,5	0,00	100,0	100	0,150	15,19	77,1
	9,5	0,00	100,0	140	0,104	21,60	67,5
	4,8	0,00	100,0	200	0,075	27,73	58,2
	10	2,0	100,0	Prato	-	-	-

Fração	Intervalo de Diâmetros - mm	Peneiras
Pedregulho	4,8 < ϕ < 76	Grosso: 19 < ϕ < 76
		Fino: 4,8 < ϕ < 19
Areia	0,05 < ϕ < 4,8	Grossa: 2,0 < ϕ < 4,8
		Média: 0,42 < ϕ < 2,0
		Fina: 0,05 < ϕ < 0,42
Silt	0,005 < ϕ < 0,05	-
Argila	ϕ < 0,005	-

Porcentagem de Ocorrência	
Fração	Subdivisão (%)
Pedregulho	-
	0,0
Areia	Grossa
	Média
	Fina
Silt	11,4
Argila	32,3

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Classificação:	
Pogo:	Amostra: SOLO PODZÓLICO VERMELHO AMARELO
Profundidade: (m)	Data: 13/07/2011
Local:	Operador: Mário / Glison
Registro:	Obs:

LIMITE DE LIQUIDEZ

Cápsula Nº	P19	P27	P28	P30	P32		
Amostra Úmida + Tara (g)	24,82	24,84	23,88	25,07	25,62		
Amostra Seca + Tara (g)	22,81	22,72	21,64	22,73	23,02		
Água (g)	2,01	2,12	2,24	2,34	2,60	0,00	0,00
Solo (g)	8,59	8,50	8,60	8,27	8,65	0,00	0,00
Tara (g)	14,22	14,22	13,04	14,46	14,37	0,00	0,00
Umidade %	23,4	24,9	25,0	28,3	30,1	0,00	0,00
Número de Golpes	36	27	22	15	11		

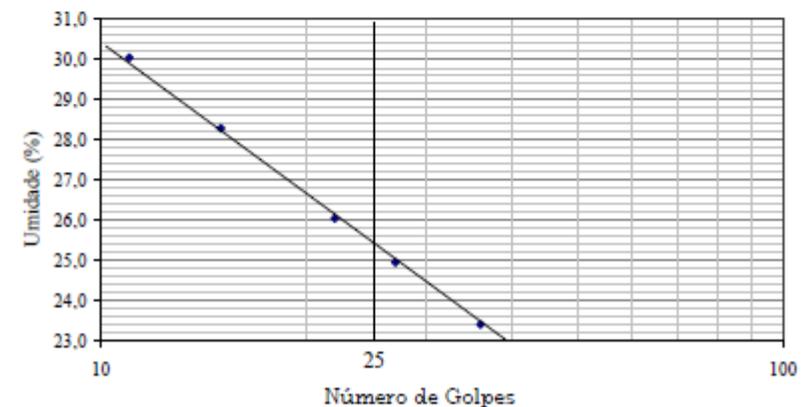
LIMITE DE PLASTICIDADE

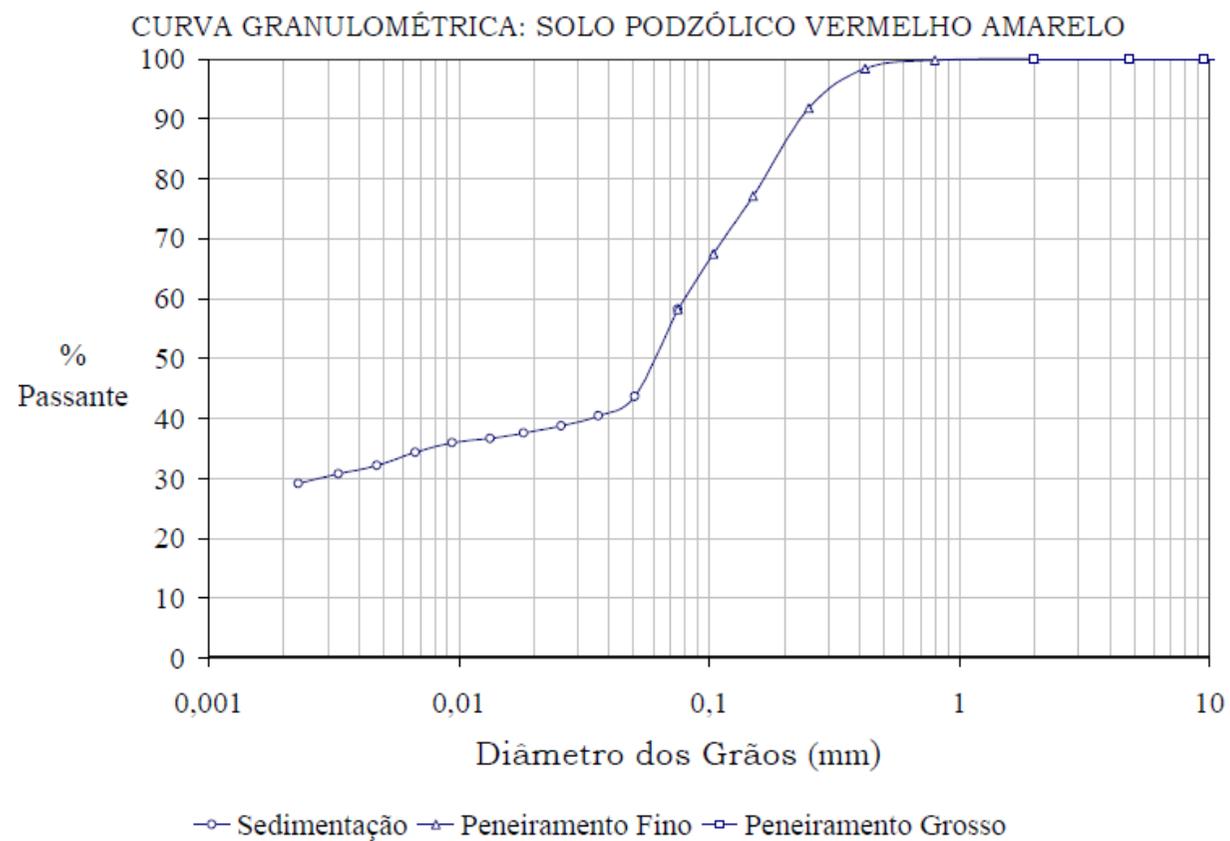
Cápsula Nº	P30	P31	P83	
S + A + T (g)	16,58	13,71	12,85	
S + T (g)	16,26	13,42	12,53	
Água (g)	0,32	0,29	0,32	0,00
Solo (g)	1,80	1,61	1,82	0,00
Tara (g)	14,46	11,81	10,71	0,00
Umidade %	17,8	18,0	17,6	0,0

RESULTADOS

LIMITE DE LIQUIDEZ	25,4
LIMITE DE PLASTICIDADE	17,8
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	7,6

LIMITE DE LIQUIDEZ



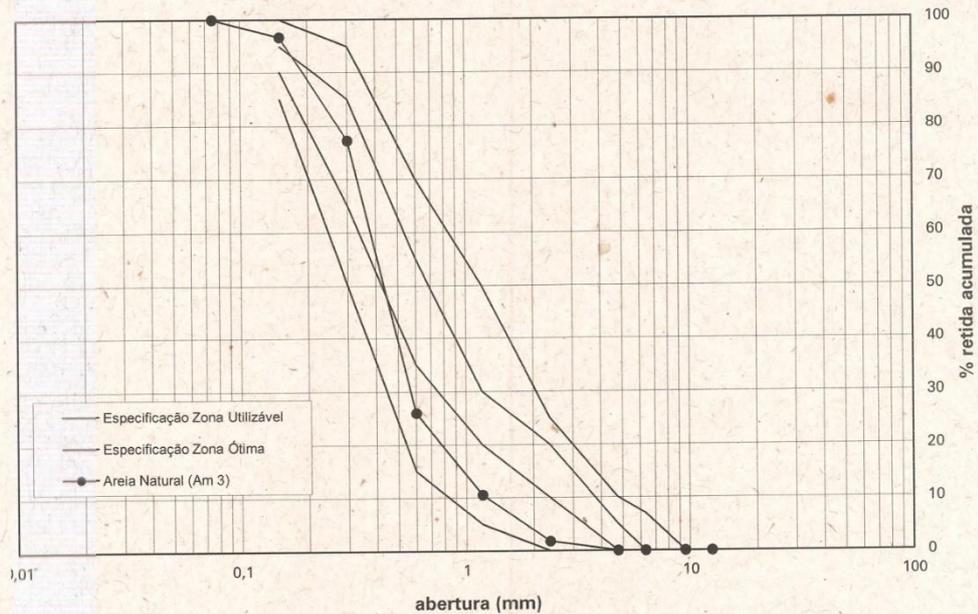


ANEXO B – Caracterização da areia

Obra/Proced. : Unesp		Carta n.º:	
Cliente: Rafael		O. S. n.º:	
Identificação: Areia Natural (Am 3)		Data ensaio: 12/06/2013	

Normal	Auxiliar	Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm		0,0	0,0	
-	1/2"	12,5 mm		0,0		0,0
3/8"	-	9,5 mm		0,0	0,0	
-	1/4"	6,3 mm		0,0		0,0
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	0,0	
N.º 8	-	2,36 mm	17,9	1,8		1,8
N.º 16	-	1,18 mm	87,8	8,8		10,6
N.º 30	-	600 µm	154,1	15,4		25,9
N.º 50	-	300 µm	513,6	51,3		77,2
N.º 100	-	150 µm	195,0	19,5		96,7
fundo	-	75 µm	32,9	3,3		100,0
Total			1001,3	100,0	212,2	

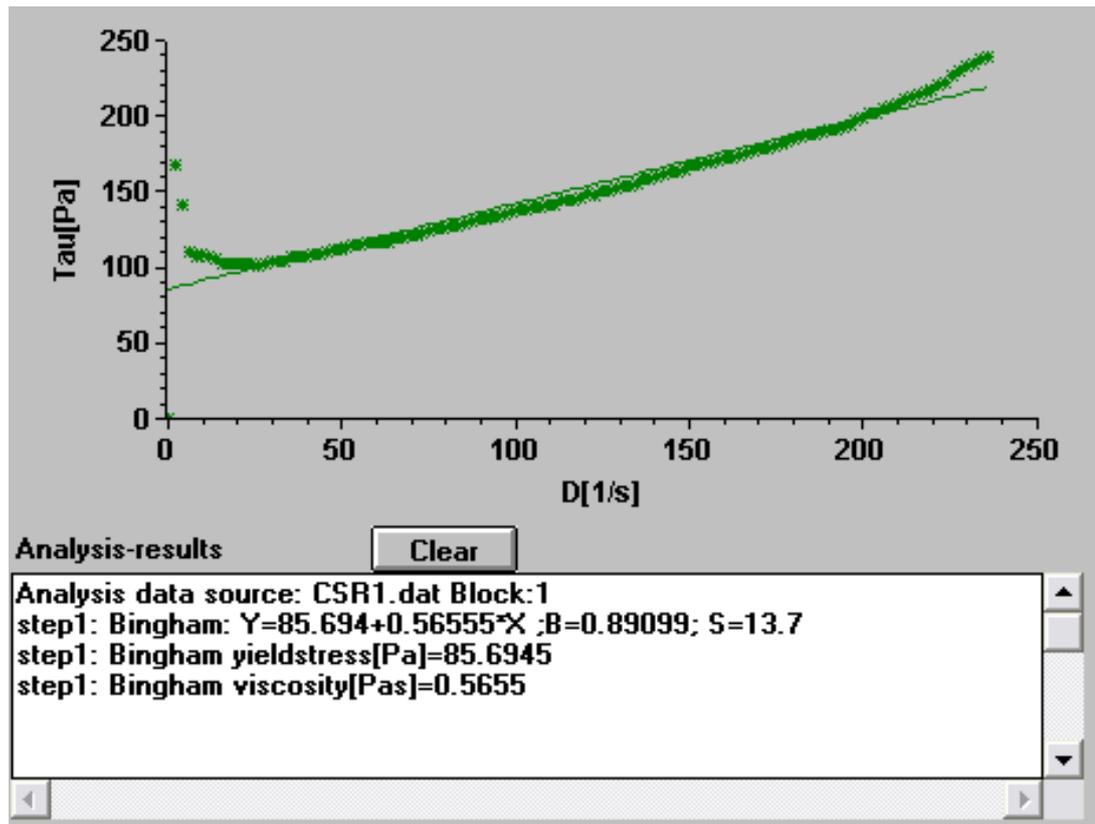
Peneiras (mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	% Retida Acumulada							
Areia	100,0	96,7	77,2	25,9	10,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



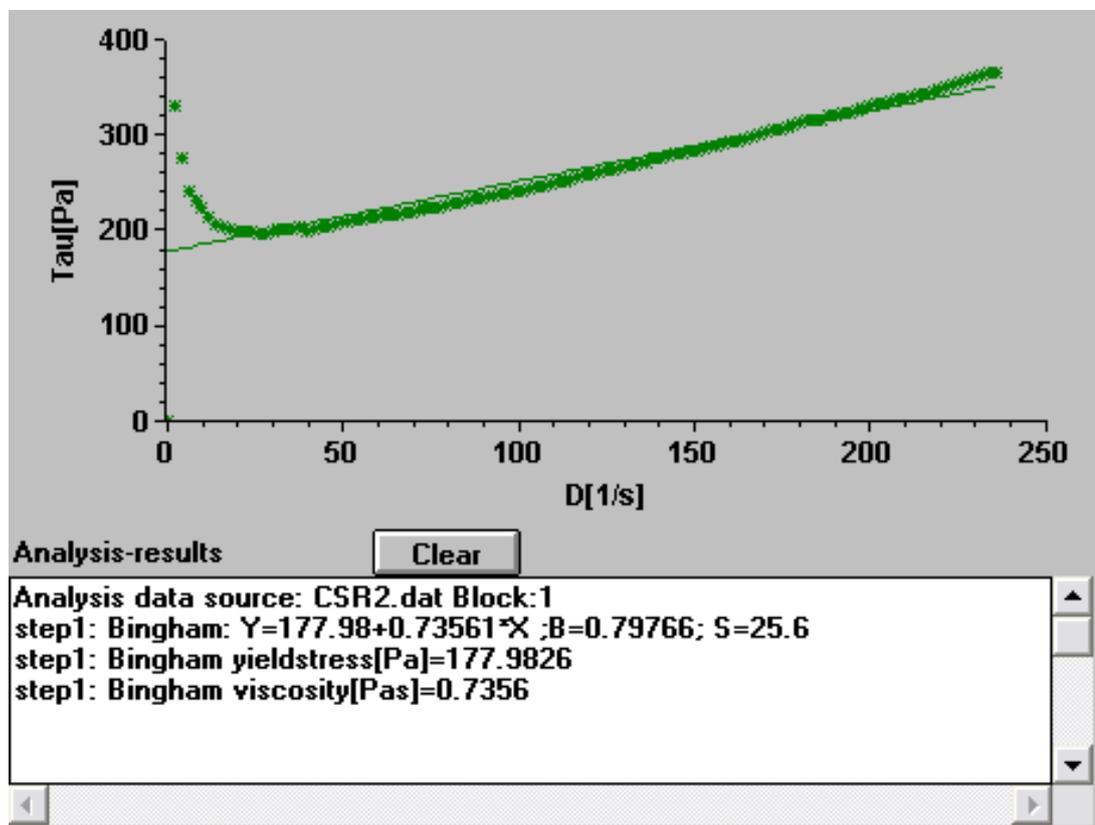
φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absorção (%)	pulverulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
2,36	2,12	2,627	2,617	2,644			0,38	0,40	+ clara

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

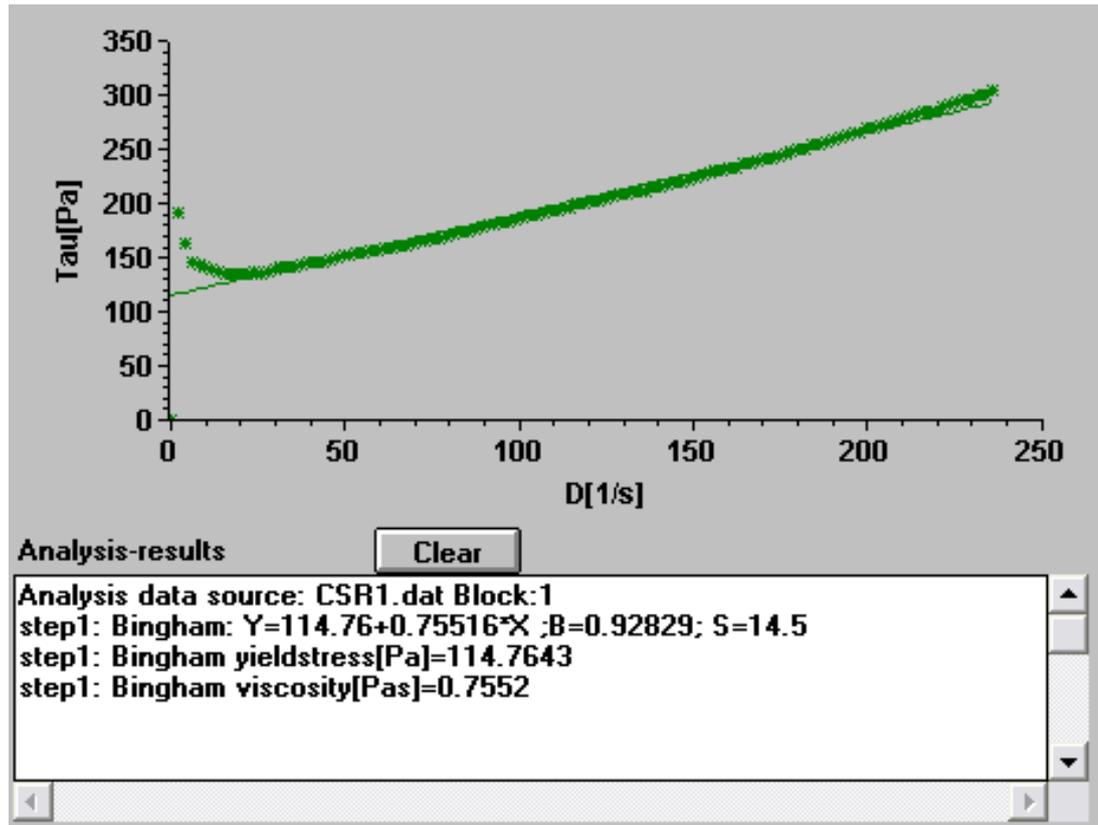
ANEXO C – Resultados reométricos



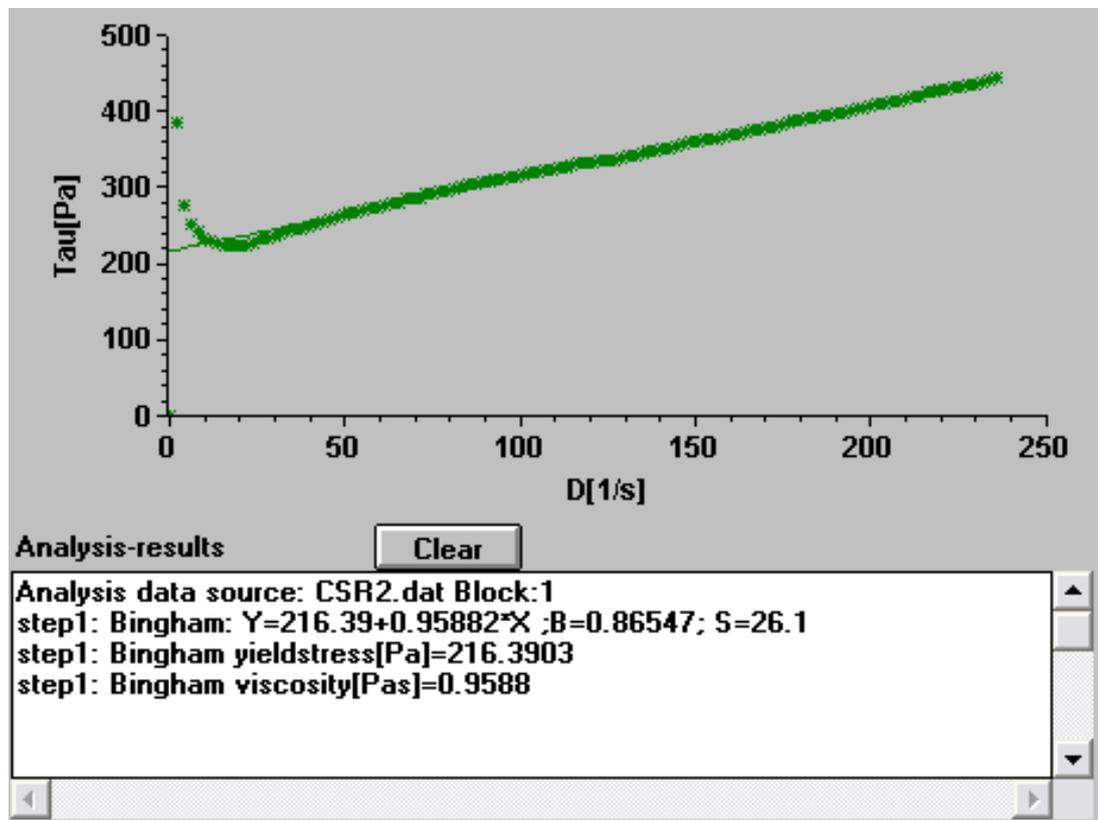
Mistura 1 – Inicial



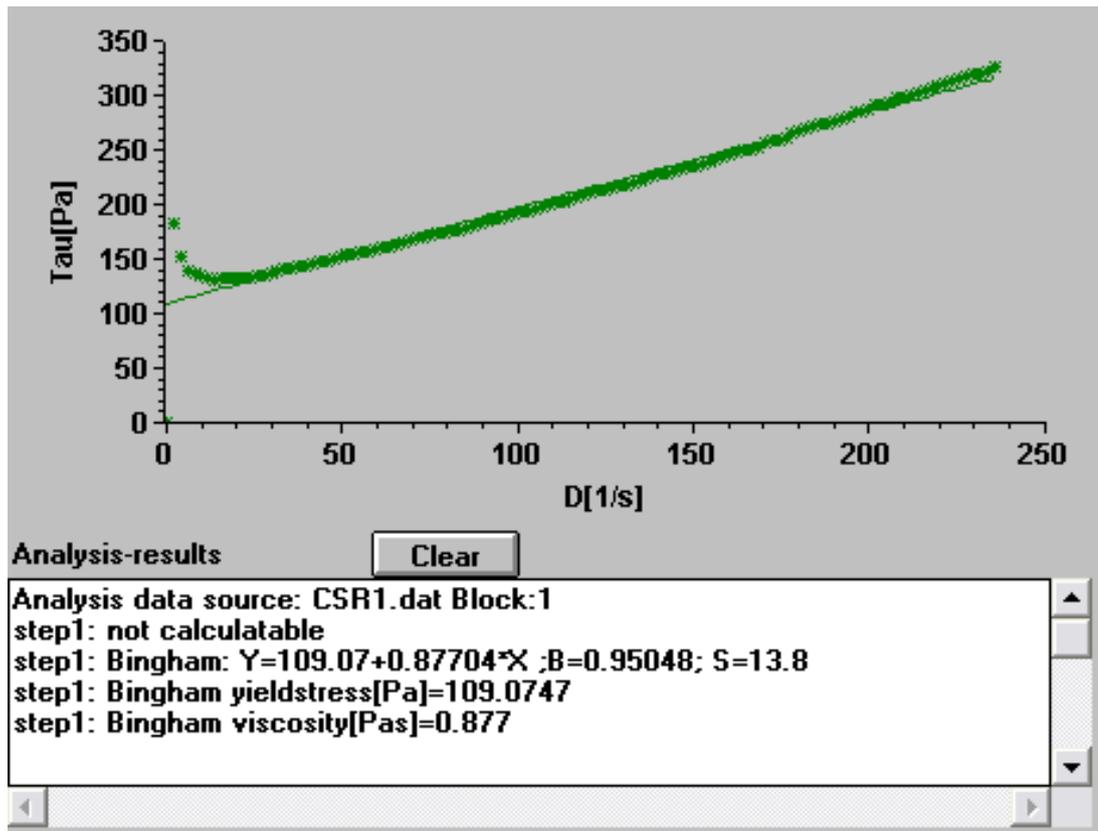
Mistura 1 – Após 15 minutos



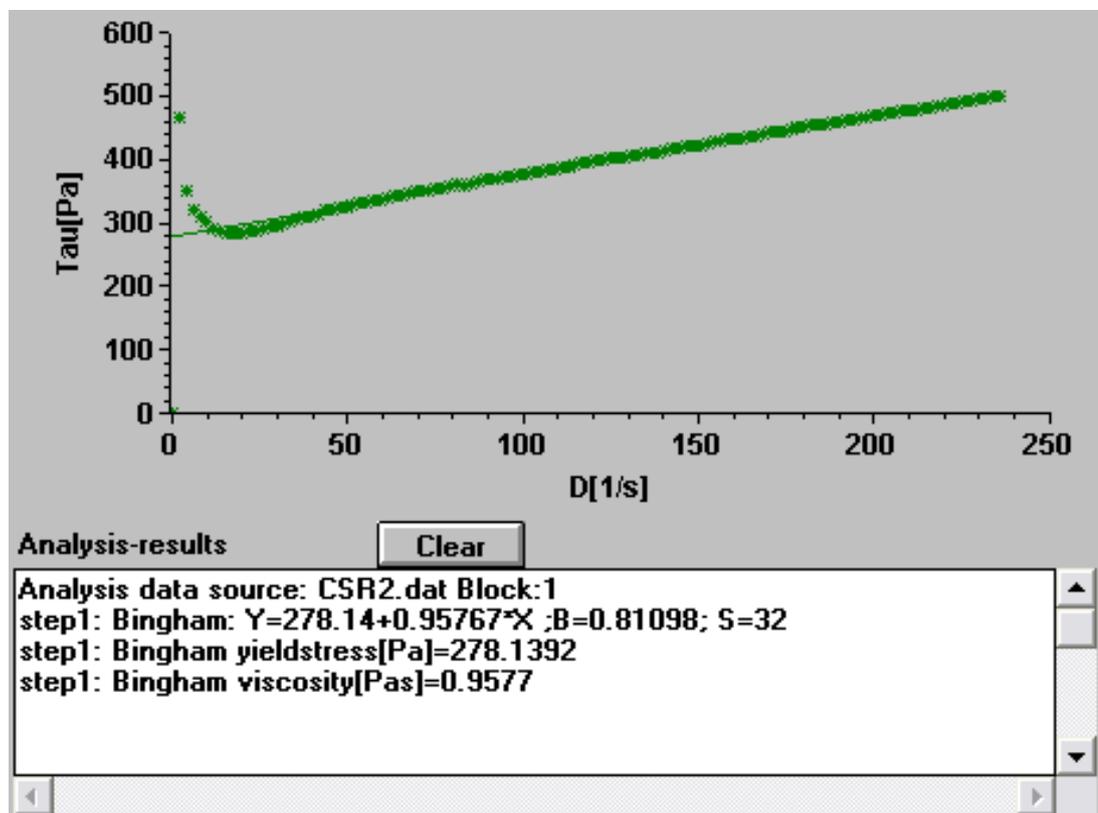
Mistura 7 – Inicial



Mistura 7 – Após 15 minutos



Mistura 13 – Inicial



Mistura 13 – Após 15 minutos

APÊNDICE

APÊNDICE A – Outras correlações

