

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

SUSANA DALILA DOLEJAL BERTÉ

**OTIMIZAÇÃO E ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DO SOLO-CIMENTO AUTO-ADENSÁVEL**

Ilha Solteira
2012

SUSANA DALILA DOLEJAL BERTÉ

**OTIMIZAÇÃO E ESTUDO DO COMPORTAMENTO
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 ALCÂNTARA
Orientador

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

Ilha Solteira
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- B536o Berté, Susana Dalila Dolejal.
Otimização e estudo do comportamento do solo-cimento auto-adensável /
Susana Dalila Dolejal Berté. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012
.150.f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área do Conhecimento: Estrutura, 2012
- Orientador: Marco Antonio de Moraes Alcântara
Co-orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini
Inclui bibliografia
1. Solo-cimento. 2. Auto-adensável. 3. Otimização.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Otimização e Estudo do Comportamento do Solo-Cimento Auto-Adensável

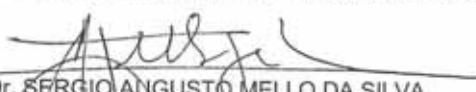
AUTORA: SUSANA DALILA DOLEJAL BERTÉ

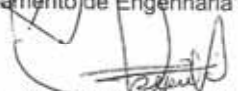
ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA

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

Aprovada 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. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. OBEDE BORGES FARIA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 24 de setembro de 2012.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Altiva e Geraldo Berté, e à meus irmãos Paulo e Geraldine, dedico este trabalho e todas as homenagens.

AGRADECIMENTOS

À DEUS

Por estar comigo em todos os momentos.

AOS PAIS, IRMÃOS E FAMILIARES

Pelo apoio e compreensão pelas vezes que tive que me ausentar para realizar este trabalho e também pela certeza de que sempre acreditaram em mim. Obrigada mais uma vez, pois devo à vocês, tudo de melhor que fui, que sou e que ainda serei.

AO PROFESSORES E ORIENTADORES

A todos os professores do curso de Pós Graduação em Engenharia Civil pelos ensinamentos.

Em especial:

aos Professores Sady Zago e Elfride Lindner da Unoesc pela carta de recomendação à Unesp

ao professor Renato Bertolino que participou do meu ingresso neste curso,

ao professor José Augusto de Lollo pelo apoio, carinho e orientações ao longo deste curso

ao professor Jorge Luís Akasaki por instigar a pesquisadora que existia dentro de mim

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

e, em especial, ao meu Professor e Orientador Marco Antonio de Moraes Alcântara, a quem devo boa parte do sucesso deste trabalho. Meus méritos são todos seus também.

AOS AMIGOS E COLEGAS DE CURSO

Aos meus amigos que considero como sangue do meu sangue e aos colegas de curso pelo apoio, amizade, convivência, troca de experiências e aprendizado de vocês recebidos.

Eu não poderia esquecer de agradecer o Colega Felipe Maximiano que me ajudou no laboratório.

AOS FUNCIONÁRIOS DA UNESP

A todos os funcionários da Unesp de Ilha Solteira, pelo carinho e atenção que sempre recebi e que de alguma forma, contribuíram para o andamento e conclusão deste curso.

Em especial, aos técnicos do Laboratório de Materiais, pois, sem a ajuda de vocês este trabalho não teria sido possível.

À CAPES

Pelo auxílio financeiro

“De que irei me ocupar no céu, durante toda a eternidade, se não me derem uma infinidade de problemas de matemática para resolver?”
(Augustin Louis Cauchy)

RESUMO

Esta dissertação trata de uma pesquisa sobre a otimização e o comportamento do SCAA – Solo-Cimento Auto-Adensável tanto no seu estado fresco quanto no seu estado endurecido, confeccionando-se misturas com variação nos teores de cimento, água e aditivo superplastificante. A proposta visa analisar e compreender os desafios de se obter a auto-adensabilidade em misturas de solo-cimento, bem como o comportamento deste material no que diz respeito aos finos do solo e o cimento frente à água, envolvendo a coesão ou dispersão das partículas de solo, na tentativa de determinar qualitativamente ou quantitativamente a fluidez, a homogeneidade, a exsudação, a segregação, a resistência à compressão mecânica e a absorção de água do material. A pesquisa foi dividida em três etapas, sendo elas: o Estudo Preliminar (EP) que contou com 5 misturas, o Estudo de Otimização (EO) que contou com 27 misturas e o Estudo de Aperfeiçoamento (EA). No EP e no EO, com o material no estado fresco, foram efetuados os ensaios do Funil, de Espalhamento, de Segregação e de Adensamento e Moldagem em corpos-de-provas cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e em formato de estrelas. No EO, os cilindros, no estado endurecido, foram submetidos a ensaios de Resistência à Compressão Mecânica e Absorção de Água, sendo que os resultados de resistência à compressão mecânica de todas as misturas apresentaram valores entre 2,0 e 7,5 MPa, atendendo assim a norma de solo-cimento; e quanto aos valores obtidos de absorção de água, 3 das 27 misturas apresentaram valores superiores ao que a norma estipula como máximo de 20% e as demais misturas apresentaram valores bem inferiores a este. No EA, foi eleita a mistura otimizada, sendo esta repetida e, com ela, confeccionados 20 corpos-de-provas cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, que foram submetidos a ensaios de resistência mecânica à compressão axial simples. Também no EA, a mistura otimizada foi mais uma vez repetida e utilizada para avaliar a viabilidade desta ao escoamento por gravidade através da passagem da mistura por um funil com mangueira de 2 metros com a confecção de três corpos-de-provas com geometrias diferentes para ensaio de absorção de água, com o objetivo de comparar os diferentes valores de superfícies específicas expostas dos corpos-de-prova que podem interferir na absorção. Ainda no EA foi repetida a mistura que apresentou maior resistência à compressão mecânica e também confeccionados 20 CPs cilíndricos para confirmar o valor de 7,5 MPa que esta apresentou.

Palavras-Chaves: Solo. Solo-cimento. Auto-adensável. Otimização.

ABSTRACT

This paper is a study on the optimization and behavior of SCSC – Self-Compacting Soil Cement both in its fresh state as in its hardened state, using mixtures with variation in levels of cement, water and superplasticizer. The proposals are to analyze and understand the challenges of attaining a self-compacting soil cement as to understand the behavior of this material, especially the fine part of the soil and cement plus water, involving the cohesion or dispersion of the particles of the soil, in an attempt to determine the flowability, homogeneity, exudation, segregation, the mechanical compressive strength and the water absorption of the material. The research was divided into three stages: the Preliminary Study (PS), which featured five mixtures, the Study of Optimization (SO), which included 27 mixtures, and the Study and Improvement (SI). In PS and SO, during the fresh state of the material, there were performed the tests of Funnel, Scattering, Segregation and molding cylinders of 5 cm in diameter and 10 cm height and some in shape of stars. In the SO, the cylinders, in the hardened state, were tested for compressive strength and water absorption. The results of mechanical compression resistance of all blends showed values between 2.0 and 7.5 MPa, thus according to the standard of soil-cement. On the water absorption test, 3 of the 27 mixtures showed higher values than the standard provides (a maximum of 20%) and the other mixtures showed values well below this. In the SI, the mixture with better results on the tests was selected. With this mixture, it was made 20 cylinders of 5 cm diameter and 10 cm in height, which were tested for compressive strength. Also in SI, the selected mixture was again repeated. This time it was used to assess the feasibility of gravity flow through the passage of the mixture through a funnel with hoses with 2 meters. For this, it was constructed three-bodies of different geometries, for water absorption test, in order to compare the different values of specific surfaces of exposed body-of-evidence that can interfere with absorption. Still in EA, the mixture with the highest resistance to mechanical compression was made again to determine the characteristic resistance to compression by making 20 cylinders.

Key Words: Soil. Soil-cement. Self-compacting. Optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPC – Associação Brasileira dos Produtores de Cal
a/c – água/cimento
AFGC – Association Française de Génie Civil
CAA – Concreto Auto-Adensável
CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CP – Cimento Portland
CPs – Corpos de Provas
EP – Estudo Preliminar
EO – Estudo de Otimização
EA – Estudo de Aperfeiçoamento
IP – Índice de Plasticidade
LC – Limite de Compacidade
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
SCAA – Solo Cimento Auto-Adensável
SCP – Solo-Cimento Plástico
SCC – Solo-Cimento Compactado
UNESP – Universidade Estadual Paulista
CTC – Capacidade de Troca Catiônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	113
1.1	Problema e Relevância da Pesquisa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>14</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	O Solo	15
2.1.1	<i>Classificação dos Solos</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Mineralogia dos Solos.....</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>Atividade Físico-Química dos Solos.....</i>	<i>21</i>
2.1.4	<i>Granulometria dos Solos.....</i>	<i>22</i>
2.2	O Cimento	224
2.2.1	<i>O Cimento Portland</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>A Pasta de Cimento</i>	<i>24</i>
2.3	Aditivos Químicos	25
2.3.1	<i>Atuação dos Aditivos Superplastificantes</i>	<i>26</i>
2.4	Materiais de Construção: viabilidade de produção e requisitos de desempenho ...	26
2.4.1	<i>Propriedades das Misturas Frescas.....</i>	<i>27</i>
2.4.2	<i>Materiais cerâmicos para alvenaria e vedação</i>	<i>33</i>
2.5	Sistemas Construtivos e Exigências para os Materiais de Alvenaria.....	33
2.5.1	<i>Aspectos tecnológicos do uso do Solo como Material de Construção.....</i>	<i>34</i>
2.5.2	<i>O Solo-cimento como Material Cerâmico.....</i>	<i>35</i>
2.5.3	<i>Alvenaria de Solo-Cimento.....</i>	<i>36</i>
2.5.4	<i>Parede Monolítica</i>	<i>37</i>
2.6	O Solo-cimento	38
2.6.1	<i>Breve História do Solo-cimento.....</i>	<i>39</i>
2.6.2	<i>Normatização Atual do Solo-cimento.....</i>	<i>40</i>
2.6.3	<i>Dosagem e Mistura do Solo-cimento.....</i>	<i>41</i>
2.6.4	<i>Aplicações e Tecnologias do Solo-Cimento</i>	<i>42</i>
2.6.5	<i>Algumas Propriedades do Solo-cimento.....</i>	<i>45</i>
2.6.6	<i>Otimização do Solo-cimento</i>	<i>48</i>
3.	MATERIAIS DE MÉTODOS.....	52

3.1	Materiais	52
3.1.1	Solo	52
3.1.2	Cimento.....	53
3.1.3	Água.....	54
3.1.4	Aditivo.....	54
3.2	Método.....	54
3.2.1	Procedimento Experimental do Estudo Preliminar	55
3.2.2	Procedimento Experimental do Estudo de Otimização.....	58
3.2.3	Procedimento Experimental do Estudo de Aperfeiçoamento	66
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	69
4.1	Resultados e Discussões do Estudo Preliminar	69
4.1.1	Resultados Qualitativos da 1ª Mistura – EP.....	71
4.1.2	Resultados Qualitativos da 2ª Mistura – EP.....	72
4.1.3	Resultados Qualitativos da 3ª e 4ª Mistura – EP.....	73
4.1.4	Resultados Qualitativos da 5ª Mistura – EP.....	74
4.2	Resultados e Discussões gerais sobre o Estudo de Otimização.....	75
4.2.1	Resultados e Discussões do Material no Estado Fresco em função da variação dos constituintes em relação ao solo	76
4.2.2	Resultados e Discussões do Material no Estado Endurecido em função da variação dos constituintes em relação ao solo.....	96
4.2.3	Análise quanto à Resistência Mecânica das Misturas.....	113
4.2.4	Análise Comparativa entre as Propriedades das Misturas em função dos teores de cimento, água e aditivo superplastificante.....	115
4.3	Resultados e Discussões do Estudo de Aperfeiçoamento	131
4.3.1	Escoamento por Gravidade na Mistura Otimizada.....	131
4.3.2	Resistência à Compressão Axial da Mistura Otimizada	131
4.3.3	Absorção de Água na Mistura Otimizada.....	132
4.3.4	Resistência à Compressão Axial da 21ª Mistura	132
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136
	REFERÊNCIAS	138
	ANEXOS	146
	ANEXO A – Caracterização do Solo Torre	147

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é, certamente, a maior consumidora de recursos naturais de qualquer economia (JOHN, 2000). Na tentativa de contribuir para o bem-estar do meio ambiente, a Engenharia Civil vem, cada vez mais, se preocupando em fazer uso de materiais alternativos de construção e, dentre estes, pode-se citar o solo-cimento que, segundo Foppa (2005), quando se utiliza o solo do local da obra, melhorando suas propriedades para a sua adequada utilização, está se utilizando de uma alternativa de projeto sustentável.

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.

Nesta pesquisa, são efetuados estudos quanto à otimização e o comportamento do Solo-Cimento Auto-Adensável – SCAA no estado fresco e endurecido, objetivando verificar a influência da água, do cimento e do aditivo superplastificante em um solo que se constitui, granulometricamente, de partículas argilosas, siltosas e arenosas e que se encontra com ampla disponibilidade na região de Ilha Solteira – SP, que é o solo Podzólico Vermelho Amarelo, bastante utilizado nas pesquisas desenvolvidas na UNESP – Universidade Estadual Paulista, desta cidade.

Utilizando-se de métodos empíricos, foram efetuados os estudos Preliminar, de Otimização e de Aperfeiçoamento e, com estes, feitos ensaios em laboratório, tais como, Funil, Espalhamento, Segregação, Adensamento e Moldagem, Resistência à Compressão Mecânica e Absorção de água.

O intuito foi encontrar parâmetros de dosagem para se chegar ao traço otimizado, onde não houvesse segregação, nem exsudação e que, ao mesmo tempo, fosse uma mistura fluída, homogênea, que se adensasse por gravidade e que atendesse às propriedades de resistência à compressão mecânica, densidade e absorção de água. Para isto, foi necessário observar as influências das relações água/cimento e água/finos do solo, além do comportamento do solo e do cimento frente ao aditivo superplastificante.

1.1 Problema e Relevância da Pesquisa

A construção civil atual vem se deparando com cobranças no que diz respeito aos impactos ambientais que esta proporciona quando utiliza de recursos naturais indiscriminadamente. No intuito de colaborar com o meio ambiente, a Engenharia Civil vem buscando materiais alternativos de construção que diminuam estes impactos e uma dessas alternativas é o solo-cimento, uma vez que, segundo Goodary et al. (2012), a estabilização de solo com cimento satisfaz os requisitos de construção sustentável.

Segundo Foppa (2005), não existem metodologias de dosagem com critérios racionais para misturas de solo-cimento baseadas em critérios como existe, por exemplo, para o concreto. Mesmo assim, não se pode afirmar que determinado material possua um traço perfeito ou ideal, uma vez que, através das pesquisas e da tecnologia, sempre haverá possibilidade de melhoramento dos materiais.

O SCAA requer uma quantidade maior de água para que seja efetivamente uma mistura fluída e, com a presença de materiais finos como a argila e o cimento, o teor de água exigido pela elevada superfície específica destes dois materiais é ainda maior, ocasionando os problemas de retração e porosidade nas peças confeccionadas, que irão gerar menor resistência mecânica e maior absorção de água.

Aio et al. (2011), afirmaram que o uso de grão siltoso e argiloso no solo-cimento ocasiona dificuldade de homogeneização durante o seu preparo e que, isto ocorre, em função dos grãos finos que estes solos possuem. Dessa forma e, em função das tantas aplicações do solo-cimento na construção civil, se faz necessário um estudo avançado do mesmo com o objetivo de otimizar o SCAA, no intuito de se obter um traço eficiente para o material.

Além disso, é possível afirmar que muitas das manifestações patológicas encontradas nos materiais de construção civil poderiam ser evitadas se houvesse uma intervenção no momento da confecção destes materiais, ou seja, ainda no estado fresco. De acordo com Segantini e Alcântara (2010), diversas pesquisas com o SCP – Solo-Cimento Plástico e SCC– Solo-Cimento Compactado vêm sendo realizadas na UNESP de Ilha Solteira desde 1994. Porém, no que diz respeito ao SCAA esta pesquisa é a precursora neste Campus.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é criar uma mistura otimizada de solo-cimento que seja auto-adensável, avaliando seu comportamento e suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- obter os teores de água, cimento e aditivo superplastificante ótimos exigido pelo SCAA, no intuito de se obter a fluidez e evitar a exsudação e a segregação da mistura no estado fresco;
- analisar o comportamento das misturas no estado fresco no que diz respeito a água frente ao cimento e aos finos do solo;
- realizar os ensaios do funil, espalhamento, segregação, adensamento e moldagem com o material no estado fresco para garantir a otimização da mistura;
- verificar as propriedades de resistências à compressão mecânica e de absorção de água com o material no estado endurecido e comparar esses valores com as normas de solo-cimento vigentes;
- avaliar a viabilidade de lançamento e adensamento via escoamento por gravidade para o preenchimento do SCAA em fôrmas, bem como avaliar a superfície de exposição dos corpos de provas que podem interferir na absorção de água; e
- determinar os valores de resistência à compressão mecânica axial simples da mistura otimizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda em forma de itens os componentes do Solo-Cimento Auto-Adensável – SCAA, sendo eles, o solo, o cimento e o aditivo químico, explorando seus aspectos e conceitos, bem como traz informações sobre os sistemas construtivos utilizando este material e as exigências para os materiais alternativos, finalizando com os conceitos e informações pertinentes sobre o solo-cimento.

2.1 O Solo

Este item aborda algumas definições para os solos e se subdivide na classificação, na mineralogia, na atividade físico-química e granulometria dos solos. O solo pode ser compreendido sob diferentes aspectos se analisados sob pontos de vista como os da engenharia, da geologia ou da pedologia, tanto no aspecto de conceito quanto no que diz respeito a sua origem.

Do ponto de vista da engenharia, Carvalho (2010) afirmou que o solo é um material natural e pode ser considerado como um dos materiais fundamentais da construção civil, uma vez que, se ele não for usado como material de construção, ele é usado como suporte das construções e, para Pinto (2006), o solo pode ser denominado como um conjunto contendo partículas sólidas, água e ar.

Do ponto de vista da geologia, Pinto (2006) afirmou que todos os solos se originaram da decomposição das rochas que constituem a crosta terrestre, sendo esta decomposição decorrente de agentes do intemperismo químico e físico, como por exemplo, variações de temperaturas que provocam dilatações e contrações nos maciços, dando origem a trincas e, conseqüentemente, a percolação da água que, por sua vez, ataca quimicamente os minerais.

De acordo com Salomão e Antunes (1998) e Segantini e Alcântara (2010), sob os pontos de vista tanto da geologia quanto da pedologia, o solo pode ser considerado um corpo em constante evolução, resultante do intemperismo das rochas da crosta terrestre que caracteriza um perfil distinto do terreno, apresentando horizontes em camadas denominadas O, A, B e C, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Denominações dos horizontes em camadas do solo

O	Horizonte superficial constituído de matéria orgânica
A	Horizonte superficial mais intemperizado
B	Horizonte menos intemperizado recebendo a migração de elementos do horizonte A
C	Horizonte de transição entre o solo e a rocha, com minerais mais próximos da rocha de origem

Fonte: Salomão e Antunes (1998)

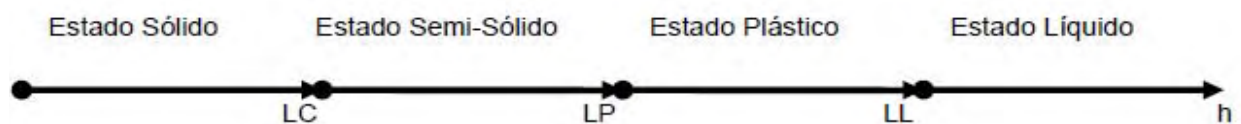
Segundo Carvalho (2010) a origem do solo, de acordo com visão da pedologia, leva em consideração o intemperismo por ele sofrido, sendo que este está associado a vários fatores, tais como: rocha de origem, clima, condições de drenagem, relevo, ação de organismos e tempo sobre as rochas.

Ainda conforme a pedologia, de acordo com Salomão e Antunes (1998), os minerais primários – mais próximos da rocha de origem, são gerados pelo intemperismo físico, e os minerais secundários formados pelo intemperismo químico, sendo que do intemperismo físico resultam os solos de granulometria mais grossa e estes, por sua vez, mantêm a composição mineralógica mais próxima da rocha de origem, ao passo que o intemperismo químico dá origem ao solo de grãos mais finos, constituindo os argilo-minerais.

De modo geral, os agentes que colaboram para a formação dos solos podem ser elencados como o congelamento das águas, resfriamento do magma e as erupções dos vulcões, além da presença da fauna e da flora, que por sua vez, favorece o ataque químico nas rochas, através da hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions e carbonatação (PINTO, 2006).

De acordo com Carvalho (2010) o solo pode ser considerado como sólido, semi-sólido, plástico ou líquido, sendo estes limites definidos pela consistência do solo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Estados Limites dos Solos



Fonte: Carvalho (2010)

Os ensaios para a determinação em laboratório dos Limites de Liquidez e de Plasticidade dos solos devem ser efetuados segundo as prescrições normativas das NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente.

Ainda segundo Carvalho (2010), quanto à plasticidade, a classificação dos solos fundamenta-se nas umidades correspondentes aos Limites de Atterberg, com o uso da Equação 1 e da Equação 2.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

$$IC = \frac{LL - h}{LL - LP} \quad (2)$$

Onde:

IP é o Índice de Compacidade do solo

IC é o Índice de Consistência do solo

LL é o Limite de Liquidez do solo

LP é o Limite de Plasticidade do solo

h é a umidade do solo

No Quadro 2 são apresentados alguns valores típicos de solos brasileiros quanto ao Limite de Liquidez e o Índice de Plasticidade.

Quadro 2 – Resultados típicos de solos brasileiros quanto ao LL e IP

Solos	LL (%)	IP (%)
Residual de arenitos (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaíse	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 40	5 a 15

Fonte: Pinto (2006)

2.1.1 Classificação dos Solos

De acordo com Carvalho (2010), os solos podem ser classificados sob vários aspectos e, a seguir, estão apresentadas algumas destas classificações, tais como, a classificação quanto à origem, quanto à composição mineralógica e quanto à composição química.

Quanto à origem, os solos se classificam como residuais – solos que permanecem em seu local de formação; e sedimentares – solos que se denominam em função ao meio que os

transportam, sendo aluvionares – os solos transportados pela água; coluvionares – os solos transportados pela gravidade; e eólicos – os solos que são transportados pelo vento (CARVALHO, 2010).

Quanto à composição mineralógica, Carvalho (2010) afirmou que os solos se enquadram em categorias de comportamento, como por exemplo, em função dos minerais que contribuem para o seu grau de expansibilidade ou da sua atividade físico-química. Pinto (2006) afirmou que a composição mineralógica dos solos depende da composição da rocha matriz e que dentre os minerais comumente encontrados nos solos estão o quartzo, o feldspato, a gipsita, a calcita e a mica, sendo o quartzo um mineral que se encontra na maioria das rochas e apresenta maior resistência à desagregação, dando origem às areias e siltes, já o feldspato é o mineral mais atacado pela natureza, dando origem às argilas que, possuem um comportamento complexo em função de imperfeições ocorridas na sua composição mineralógica.

Quanto à composição química, Carvalho (2010) afirmou que os solos se enquadram em categorias, como, por exemplo, os solos lateríticos, que dependem do teor de sílica em relação aos teores de óxido de alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ou de alumínio mais Ferro ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$), sendo considerados lateritas verdadeiras aqueles cuja relação é inferior a 1,33, solos lateríticos aqueles com relação entre 1,33 e 2 e solos não lateríticos os que representam esta relação superior a 2 (CARVALHO, 2010).

2.1.2 Mineralogia dos Solos

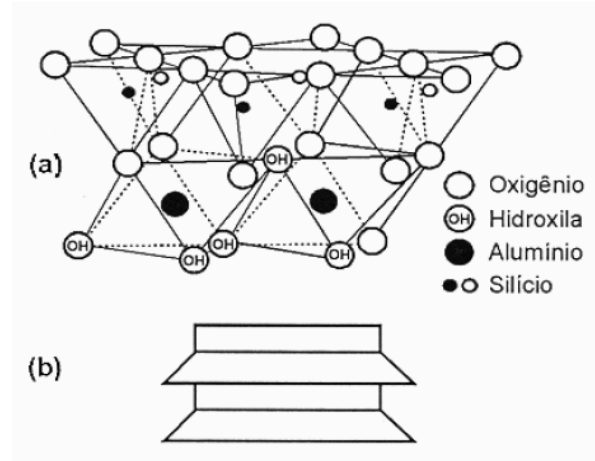
Segundo Sampaio (2006), o solo é composto de minerais que podem acarretar diferenças no seu comportamento. De acordo com Segantini e Alcântara (2010), na composição de solo estabilizado, faz-se necessário o conhecimento das características mineralógicas, de granulometria, de acidez do solo, e do tipo de íons presentes no solo, uma vez que são fatores que influenciam fortemente na estabilização química dos solos.

Pinto (2000) complementa esta idéia dizendo que o solo possui componentes, como por exemplo, os alumino-silicatos que se apresentam nas formas “1:1” e “2:1”, sendo que, nos

argilo-minerais do tipo “1:1”, como por exemplo, a Caulinita e a Halosita, abundantes em solos tropicais, observa-se um maior empacotamento, onde é mínima a superfície de exposição e, praticamente, não apresentam insatisfação de cargas, onde este tipo de estrutura apresenta-se muito pouco reativa.

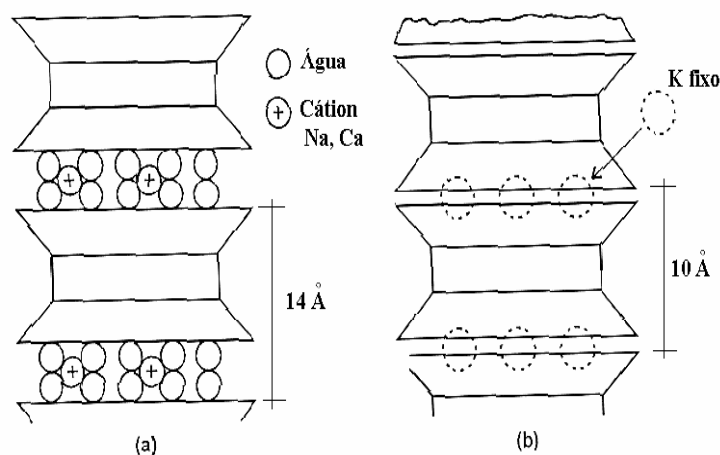
Os argilo-minerais do tipo “2:1” “constituem-se na forma mais reativa, predominante em solos de regiões temperadas ou com baixo grau de intemperismo, sendo exemplos destes as Montmorilonitas, a Clorita e a Vermiculita que, em função de possuírem cargas superficiais nas lâminas de silício, se tornam mais sujeitas à interação com elementos ativos do meio, principalmente, íons positivos e água (SEGANTINI; ALCANTARA, 2010). As Figuras 2, 3 e 4 apresentam alguns exemplos de estruturas destes componentes.

Figura 2 – Exemplo de estrutura da camada de caulinita (a) atômica (b) simbólica



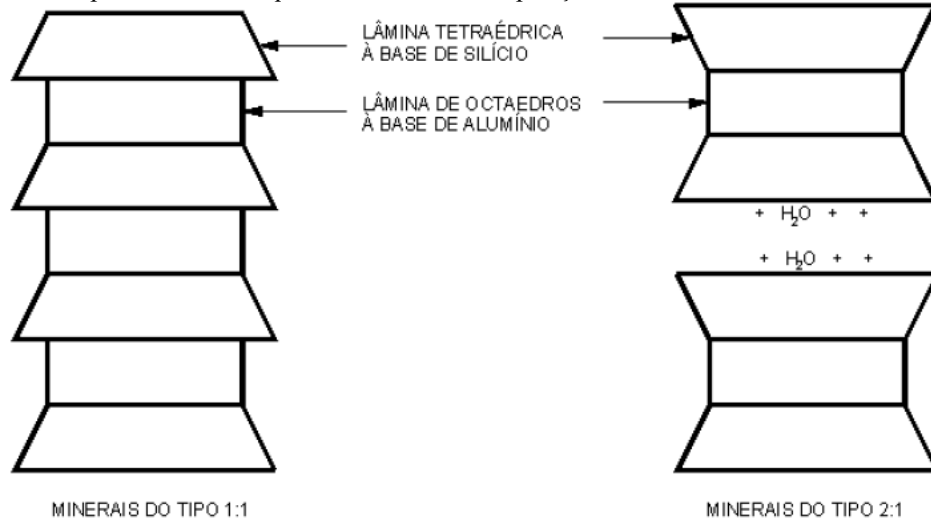
Fonte: Pinto (2000)

Figura 3 – Exemplo de estrutura de camada simbólica de minerais com camadas 2:1 – (a) Esmeclita (b) ilita



Fonte: Pinto (2000)

Figura 4 – Tipos de Minerais quanto ao número e disposição de camadas tetraédricas e octaédricas



Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

2.1.3 Atividade Físico-Química dos Solos

A atividade físico-química gerada durante o processo de homogeneização do solo com os componentes a ele adicionados é um fator que merece atenção na estabilização de solos, pois esta atividade pode influenciar no estado de agregação, floculação ou dispersão das partículas por meio de interações de natureza elétrica.

Pinto (2006) concluiu isto quando afirmou que um átomo de alumínio (Al^{3+}) pode perfeitamente substituir um de silício (Si^{4+}) na estrutura tetraédrica, assim como, na estrutura octaédrica, alguns átomos de alumínio serem substituídos por outros átomos de menor valência, como o magnésio (Mg^{+}). Já as cargas negativas, presentes na superfície dos solos, se originam das quebras em sua estrutura química ou em substituições isomórficas na estrutura dos argilo-minerais, podendo, este fenômeno ser percebido quando, por exemplo, um íon alumínio, com valência positiva 3^{+} ocupa o lugar do silício, que tem valência 4^{+} em condições de hibridação (NOBREGA, 1985).

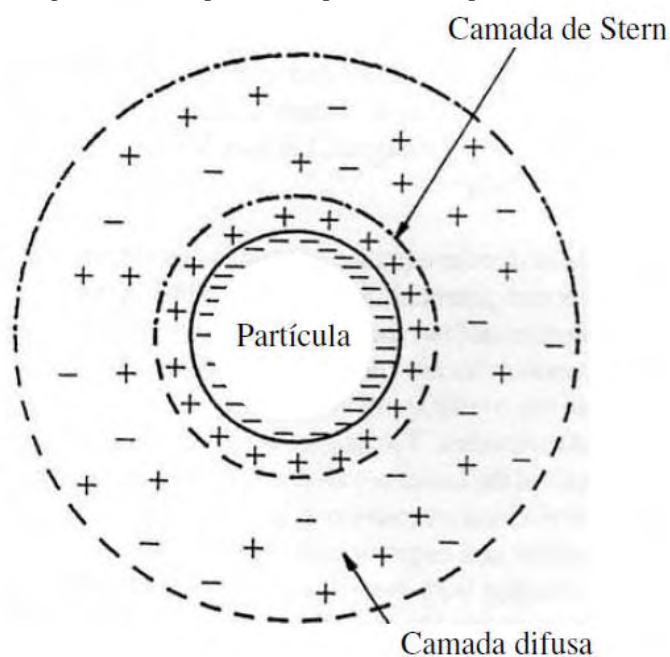
De acordo com Nobrega (1985), a estabilização química dos solos ocorre devido às modificações na superfície das partículas de solo e que podem ser entendidas como a troca de cátions e, conseqüente, floculação. Estas modificações podem acontecer pela troca de íons Na^{+} ou K^{+} , que neutralizam as cargas superficiais do solo, por íons Ca^{2+} ou Mg^{2+} em

função da sua maior condição de seletividade no complexo de trocas conhecido como CTC – Capacidade de Troca Catiônica (NOBREGA, 1985).

Conforme Segantini e Alcântara (2010), os grãos finos de solo apresentam cargas elétricas em sua superfície que são satisfeitas, normalmente, por íons de Na^+ ou K^+ , dando origem a um núcleo envolvido por uma nuvem de íons, denominada Dupla Camada Difusa. 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 flocculação das partículas em função da menor repulsão entre os grãos e da atração gravitacional entre eles e, se houver a saturação do solo por cátions de menor valência, como, por exemplo, o Na^+ ou o K^+ , isto dá origem à dispersão dos grãos do solo.

A dispersão e a flocculação das partículas de solo são importantes para o processo tecnológico em pesquisas que utiliza solo estabilizado, pois a dispersão ocasiona a homogeneidade das misturas e a flocculação se constitui em uma resistência à deformação e ao processo de compactação, podendo interferir nas condições de plasticidade (LIMA, 1981). A Figura 5 apresenta um exemplo de compressão muito difundido da Dupla Camada Difusa, onde, de acordo com Kim (1995), a camada de Stern é aquela em que os íons estão ligados fortemente às partículas e a camada difusa tende a obedecer ao modelo gravitacional.

Figura 5 – Exemplo de compressão da dupla camada difusa



Fonte: Kim (1995)

2.1.4 Granulometria dos Solos

Segundo Pinto (1998), os solos são muito distintos e respondem de maneira muito variável às intervenções em função do tamanho de suas partículas, uma vez que, um mesmo solo, normalmente, é constituído de diversos tamanhos de grãos, os quais denominam as faixas granulométricas que compõe este material, determinadas e regulamentadas por especificações normativas.

A granulometria de um solo é definida através de ensaios de laboratório seguindo a NBR 7181 (ABNT, 1988). Carvalho (2010) afirmou que através da análise granulométrica pode-se avaliar a textura do solo para associá-la ao seu uso na engenharia e, dessa forma, para a prática de estabilização química do solo com cimento, permitindo assim avaliar de forma mais segura o comportamento deste material estabilizado. O Quadro 3 apresenta as denominações das partículas de solo em função do tamanho dos grãos:

Quadro 3 – Denominações das frações das partículas em função do tamanho dos grãos

Denominação	Tamanhos das Partículas
Matacão	de 20 cm a 1 m
Pedra	de 7,6 cm a 20 cm
Pedregulho	de 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	de 2 mm a 4,8 mm
Areia média	de 0,42 mm a 2 mm
Areia fina	de 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	de 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

Fonte: ABNT (1995)

O Quadro 4 apresenta as frações de solo em função da sua granulometria juntamente com a influência dos tamanhos dos grãos de solo em algumas de suas propriedades.

Quadro 4 – Resumo das Propriedades das Classes Granulométricas dos Constituintes Minerais

Classe Granulométrica	Retenção de Água	Permeabilidade	Propriedades Mecânicas
Argila	Forte	Fraca	Seco – Tenaz Úmido – Plástico e Pegajoso
Areia Fina	Fraca	Forte	Seco – Pouco Tenaz e Solto Úmido – Pouco Plástico
Areia Grossa	Nula	Forte	Seco – Solto Úmido – Solto

Fonte: Sampaio (2006)

Nota-se a associação entre a granulometria dos solos e o seu comportamento no texto de Bauer (1994), que conceituou as argilas como sendo um material natural, terroso, constituído de grãos muito finos, de fácil moldagem e que apresentam alta plasticidade quando adicionado a certa quantidade de água e que endurece depois de seco ou cozido.

Para Campos (2011) a argila apresenta grãos microscópicos, boa coesão, grande impermeabilidade e forma lamelar, ao contrário das areias, que são esferoidais, e ainda se comporta diferentemente da areia em função da sua capacidade de aglutinação e, por este motivo, é usada há milhares de anos como argamassa de assentamento e como matéria-prima na confecção de tijolos.

Gomes (1986) afirmou que, para a confecção de cerâmicas, a granulometria do solo interfere em suas propriedades, informando que maiores quantidades de partículas finas e grossas e menores quantidades de partículas médias favorecem a densidade das misturas. Para Pinto (2006), o LL e o LP indicam a influência do solo no comportamento de misturas, sendo que, pode ocorrer de solos com elevado teor de argila apresentarem índices mais baixos de consistência do que aqueles solos com baixo teor de argila e, isto acontece em função da grande variação na composição mineralógica que as argilas possuem.

2.2 O Cimento

Neste item é demonstrado o conceito de cimento Portland, juntamente com os onze tipos de cimentos Portland existentes, citando a normatização vigente para, finalmente, abordar o item que explica sobre a pasta do cimento.

2.2.1 O Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que confere resistência mecânica às misturas e que resulta da moagem do clínquer, constituindo-se, em sua maioria, de silicatos e aluminatos hidráulicos de cálcio, podendo conter adições de substâncias que alteram as propriedades para atender determinados fins no seu emprego (YAZIGI, 2003). O clínquer

pode receber adições junto com a moagem, resultando em alguns tipos básicos de cimento com elementos ativos como os silicatos de cálcio, que contribuem com a formação de materiais cimentantes após as reações de hidratação, e os aluminatos de cálcio que atuam formando o calor de hidratação (YAZIGI, 2003).

Segundo Souza e Tamaki (2001), os tipos de cimento Portland são os seguintes:

- CP I – Cimento Portland Comum
- CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição
- CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória
- CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
- CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler
- CP III – Cimento Portland de Alto-Forno
- CP IV – Cimento Portland Pozolânico
- CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- CP RS – Cimento Portland Resistente a Sulfatos
- CP BC – Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
- CP –B – Cimento Portland Branco

De acordo com Almeida (2005), o tipo do cimento influencia na demanda de água para aquisição da trabalhabilidade nas misturas cimentícias e, de acordo com ABCP (1985a), os cimentos que poderão ser utilizados na confecção do solo-cimento deverão atender as especificações seguintes:

- NBR 5732:1991 – Cimento Portland Comum;
- NBR 5733:1991 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- NBR 5735:1991 – Cimento Portland de Alto Forno; e
- NBR 5736:1991 – Cimento Portland Pozolânico.

2.2.2 A Pasta de Cimento

Segundo Souza e Tamaki (2001) as pastas de cimento são compostas por misturas homogêneas contendo aglomerantes hidráulicos e água, podendo ainda receber adições,

apresentando características físicas e mecânicas que são prescritas pelas normativas vigentes para cada fim.

De acordo com Helene e Andrade (2010), logo após a mistura, as pastas de matrizes cimentícias são compostas de três fases: cimento, água e ar e, em seguida, inicia-se o processo de hidratação do cimento em função da reação deste com a água e, neste momento, origina-se na mistura o chamado gel de cimento, acarretando novas fases na pasta com diferenças de volumes entre estas novas fases. No entanto, o volume total da pasta de cimento não se altera, salvo se ocorrer a evaporação da água que sobra quando a quantidade adicionada à mistura for maior que a necessária para a hidratação do cimento, gerando a retração na pasta (HELENE; ANDRADE, 2010).

Segundo Neville (1997) parte da água incorporada ao cimento Portland é fortemente retida por atração eletrostática nos poros do gel, não contribuindo para a hidratação; e outra parte é utilizada para hidratar as partículas de cimento e, finalmente, a água sobressalente permanece nos macroporos em regime hidráulico livre.

2.3 Aditivos Químicos

Neste item é feito um rápido comentário sobre aditivos químicos utilizados em concretos e argamassas e, na sequência, são abordados conceitos e funções do aditivo superplastificante.

Os aditivos químicos são, normalmente, adicionados às misturas de concretos e argamassas com o intuito de conferir propriedades particulares. Conforme Martin (2005), o intuito dos aditivos nas misturas cimentícias é melhorar ou corrigir algumas de suas propriedades que vão desde a trabalhabilidade, a homogeneidade, o tempo de pega e a resistência até a incorporação de ar, a inibição da corrosão e os redutores de retração. No caso de concretos, segundo Bauer (1994), os aditivos devem ser utilizados com critério e não devem ser usados para se corrigir defeitos nas misturas.

2.3.1 Atuação dos Aditivos Superplastificantes

Para Neville (1997), os efeitos dos superplastificantes, basicamente, se resumem em diminuir a demanda de água para se obter a trabalhabilidade das misturas, pois contribuem para a dispersão e desfloculação dos grãos de cimento bem como na interação físico-química da pasta, desenvolvendo a hidratação e distribuindo os poros, gerando fluidez e homogeneidade nas misturas.

A adição de um aditivo desfloculante em uma mistura de argila em contato com água, segundo Gomes (1986), ocasiona o aumento da repulsão entre as partículas, resultando na homogeneidade da mistura e na diminuição da viscosidade; porém, existe um valor ótimo de dosagem do desfloculante na mistura, uma vez que, ultrapassando este valor limite, ocorre a sobra do aditivo na massa, pois este não é mais adsorvido pelas partículas de solo.

Segundo Oliveira e Pandolfelli (2007), os aditivos químicos podem ser adicionados às misturas cimentícias com o propósito de promover a dispersão das partículas finas da matriz por meio de mecanismos de dispersão estérica e eletrostática, melhorando a homogeneidade e as propriedades reológicas.

Para os casos de concretos e argamassas, o aditivo se mostra muito mais eficaz do que a água para promover a desfloculação e a dispersão do cimento, pois esta induz a segregação quando em excesso, sendo que existe também um limite para o teor de aditivo com relação ao cimento, de modo que, quando este é ultrapassado, o material tende fatalmente para a segregação (ALCÂNTARA, 2004).

2.4 Materiais de Construção: viabilidade de produção e requisitos de desempenho

Os materiais de construção civil gozam de propriedades particulares e, normalmente, devem atender aos requisitos de desempenho relacionados às funções a que se destinam. Por se conferir as propriedades desejadas, estes devem estar compatíveis com o processo de produção. Neste item são exploradas algumas propriedades das misturas frescas, tais como,

trabalhabilidade, viscosidade, segregação, exsudação e reologia, abordando suas definições, juntamente com uma abordagem sobre os materiais cerâmicos para alvenaria e vedação.

2.4.1 Propriedades das Misturas Frescas

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, alguns conceitos de propriedades das misturas frescas são a seguir apresentados tomando-se como referências relativas os materiais: concreto e argamassa.

a) Trabalhabilidade

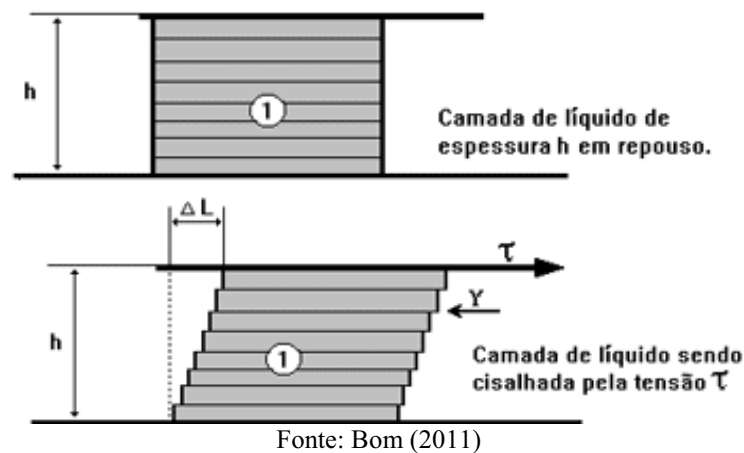
A trabalhabilidade das misturas dos materiais é definida por Neville (1997) como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma massa com uma perda mínima de homogeneidade. De modo geral, ela está associada às propriedades intrínsecas do material e nas ações do processo de produção.

b) Viscosidade

Segundo Gomes (1986), a viscosidade é a resistência que um fluido possui ao escoamento e, para os materiais cerâmicos envolvendo argilas, em particular, e em especial para barbotinas, o comportamento reológico apresenta o movimento em camadas que são deslizadas uma sobre as outras, transpondo os esforços de cisalhamento da mistura.

Ainda segundo Gomes (1986), o escoamento num fluido composto por partículas de argila que possuem formato lamelar, inicialmente em repouso num plano de referência, que então recebe um carregamento pontual aplicado à lâmina superior, provoca o deslizamento desta na mesma direção da força, fazendo com que o sistema desloque uma lâmina sobre a outra, dando origem a um gradiente de velocidade, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de um material que sofre tensão de cisalhamento



Onde:

ΔL = deformação do corpo como resultado da tensão de cisalhamento (cm)

τ = tensão de cisalhamento = força/área (N/m^2)

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

h = altura do sólido (cm)

A viscosidade linear μ ($kg/s/m$) de um fluido Newtoniano pode ser definida pela Equação 3.

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}} \quad (3)$$

Onde:

τ = Tensão de Cisalhamento (N/m^2)

$\partial v / \partial y$ = Gradiente de Velocidade (hz ou 1/s)

c) Segregação

Neville (1997) afirmou que uma forma de visualizar a segregação é quando, na superfície de uma mistura, a pasta de cimento tende a apresentar mais de uma fase ou quando ocorre qualquer separação entre os materiais. A segregação, embora seja visível em concretos, não é fácil de ser mensurada, podendo-se utilizar do ensaio de fluidez para ser observada, onde os golpes durante o ensaio provocam a segregação, e se a mistura não estiver coesa, as partículas se separam e a água se desloca para a borda do círculo, formando as franjas (NEVILLE, 1997).

d) Exsudação

Ainda segundo Neville (1997), o fenômeno da exsudação ocorre quando a água da mistura sobra da hidratação com o cimento e sobe para a superfície em função de ser o material mais leve da composição. Em função disto, a exsudação pode ser considerada como uma forma especial de segregação, em que parte da água da mistura se separa da massa.

e) Reologia dos Materiais de Construção

De acordo com Guimarães (2005), a reologia é a parte da física que estuda o comportamento do movimento de corpos deformáveis que não são nem sólidos nem líquidos e, segundo Ino et al. (2010), a reologia é considerada um ramo da mecânica dos fluídos que estuda a mecânica dos corpos deformáveis quando estão submetidos à forças internas.

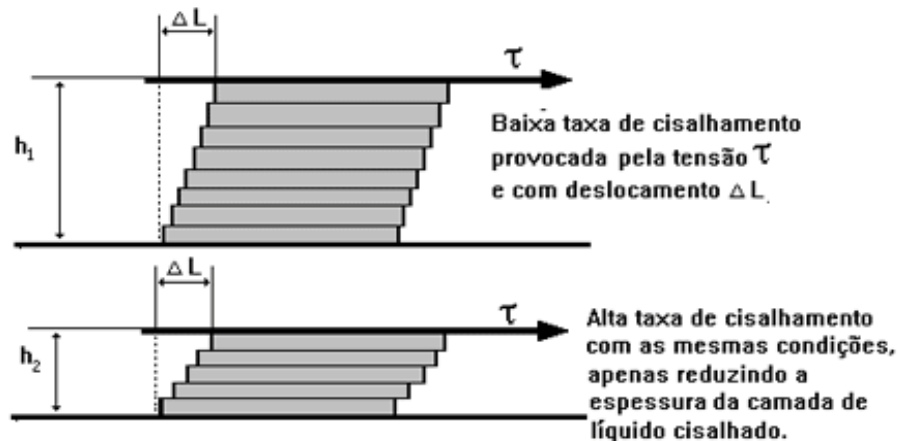
Gomes (1986) definiu reologia como sendo o estudo da fluência e da deformação dos corpos e, em estudos para a confecção de cerâmicas, por exemplo, é importante o conhecimento da maneira como a mistura de solo e água escoar devido à ação de uma força aplicada à mistura para saber como esta pasta ou barbotina irá se comportar frente às forças de prensagem, extrusão ou vibração.

As propriedades reológicas de um material são alteradas devido a continuidade da deformação em função dos esforços a que estes são submetidos, onde, para a reologia, o cisalhamento é um conceito de alta importância, como é o caso do concreto, por exemplo, que no estado fresco, precisa de uma força mínima para que seu escoamento inicie, em função da força resistente a este movimento, em virtude do atrito e da coesão entre seus materiais constituintes (GUIMARÃES, 2005).

Segundo Bom (2011), os parâmetros estudados pela reologia são basicamente três: a tensão de cisalhamento, a taxa de cisalhamento e a viscosidade, onde a tensão de cisalhamento causa no líquido um fluxo e, uma máxima velocidade de fluxo ocasionará na camada em contato com a superfície um movimento.

Já a taxa de cisalhamento pode ser definida como a variação de velocidade de fluxo com a variação da altura, que é a distância da superfície que induz o cisalhamento, ou seja, é a medida de o quanto as camadas do fluido escoam umas sobre as outras, podendo ter como exemplo o modelo das placas paralelas para diferenciar tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (BOM, 2011), como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Variação da taxa de cisalhamento com variação apenas da espessura do líquido cisalhado



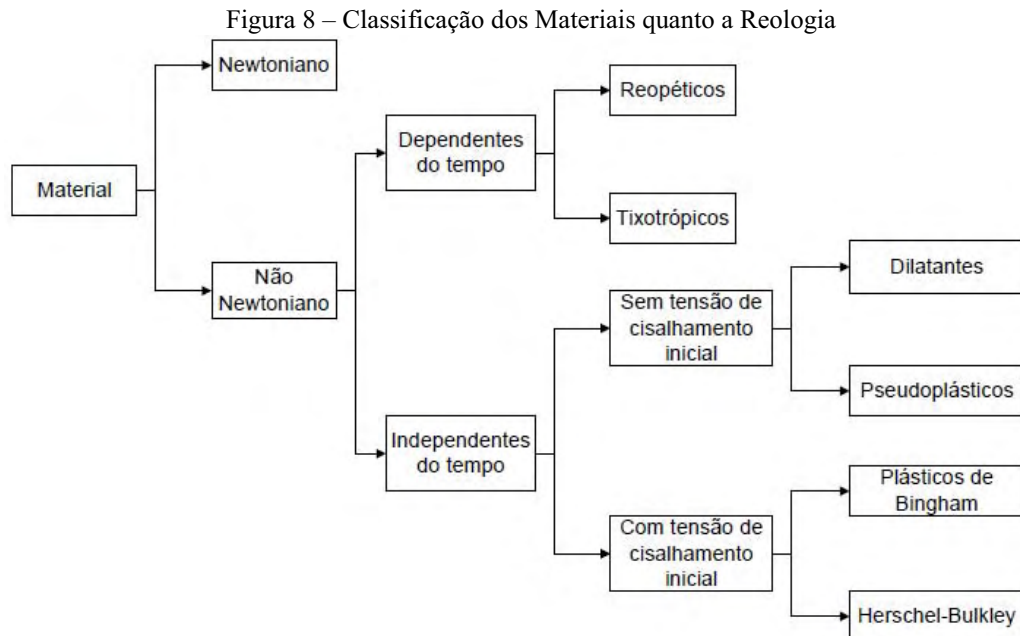
Fonte: Bom (2011)

Ainda segundo Bom (2011), num fluido, quanto menor o número de camadas maior é o escorregamento entre elas e, portanto, maior é a taxa de cisalhamento, sendo que, métodos de ensaios com viscosímetros de fluxo fornecem comparações relativas de valores de viscosidade.

Segundo Skarendahl (2000), a fluidez é alcançada com a inserção de aditivos superplastificantes em misturas cimentícias. De acordo com Bombled, kalvenes e kalvenes (1967), a fluidez é prejudicada conforme aumenta o atrito interno das misturas e está diretamente ligado a granulometria com relação à textura, ao tamanho e à forma dos grãos. Ainda para Bombled e kalvenes (1967), a coesão e o atrito interno interferem no escoamento das misturas, gerando resistência ao escoamento e a velocidade de escoamento é determinada pelos efeitos que a umidade proporciona às massas.

Segundo Segantini e Alcântara (2010), as denominações encontradas pela literatura para classificar os tipos de materiais com relação à reologia são: o material Hershel-Bukley, o material Plástico de Bingham, o material Pseudoplástico, o material Newtoniano e o material

Dilante. A Figura 8 apresenta um esquema-resumo dos materiais classificados de acordo com a reologia e suas particularidades.



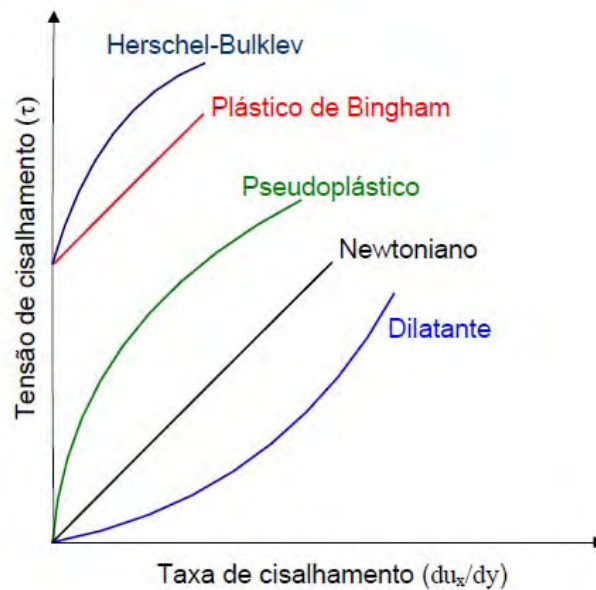
Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

Ino et al. (2010), afirmou que, na classificação reológica, os materiais são divididos em dependentes ou independentes do tempo, sendo que para os fluidos não-newtonianos que dependem do tempo, são alteradas as suas propriedades em função da tensão de cisalhamento e do tempo em que esta tensão é aplicada sobre o material.

Fazem parte do grupo de materiais não-newtonianos – os tixotrópicos – que, em função do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, a viscosidade diminui quando a tensão é aplicada e aumenta quando esta é retirada – e os reopéticos, sendo estes de comportamento inverso dos materiais tixotrópicos, uma vez que, a viscosidade aumenta conforme aumenta o tempo de aplicação da tensão, e a viscosidade volta ao estado inicial quando a tensão exercida é cessada (INO et al., 2010). Já os materiais com tensão inicial são os aqueles que precisam de uma tensão inicial de cisalhamento para que ocorra se dê início o escoamento e, um exemplo de material contido neste grupo é o plástico de Bingham. (INO et al., 2010).

A Figura 9 apresenta a tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação por cisalhamento para alguns materiais.

Figura 9 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação por cisalhamento para alguns materiais



Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

De acordo com Bom (2011), o comportamento dos materiais, segundo a reologia, pode ser explicado da seguinte maneira:

- **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, onde o fluxo só ocorre depois de vencida uma determinada tensão limite para o cisalhamento;
- **Herschel-Bukley:** se diferencia do Plástico de Bingham em função da não-linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Segundo Ino et al. (2010), os materiais classificados como newtonianos englobam todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos, como a água, os solventes e os óleos vegetais, e isso se deve ao fato de que, em sua composição, estes materiais possuem apenas um coeficiente de viscosidade a uma dada temperatura e independem da taxa de cisalhamento, enquanto os não-newtonianos são materiais onde a taxa de cisalhamento é inversamente proporcional à taxa de deformação, além disso, a viscosidade deste não é constante para uma dada situação.

De acordo com Ino et al. (2010), os materiais não-newtonianos independentes do tempo podem ser divididos em dois grandes grupos: sem tensão inicial e com tensão inicial, sendo que, para os primeiros, não é preciso uma tensão de cisalhamento inicial para iniciar o seu escoamento e, dentre os materiais que apresentam esta característica, podem-se citar os pseudoplásticos – onde a viscosidade é inversamente proporcional a taxa de cisalhamento e os dilatantes – que, ao contrário dos pseudoplásticos, a viscosidade é diretamente proporcional a taxa de cisalhamento.

2.4.2 Materiais cerâmicos para alvenaria e vedação

Segundo Bauer (1994), cerâmica pode ser definida como a pedra artificial, sendo a indústria da cerâmica uma das mais antigas do mundo em função da facilidade de encontrar a sua matéria-prima – a terra ou a argila. Já na pré-história, o homem utilizava o barro para confeccionar utensílios e, com o passar dos tempos, o homem descobriu que essa massa de argila endurecia com o calor, dando origem a cerâmica; e desde então, até os dias atuais, esta é amplamente utilizada por várias civilizações para os mais variados fins (BAUER, 1994).

Dentre os materiais de construção civil do mercado atual, encontram-se os blocos cerâmicos. De acordo com Souza e Tamaki (2001), estes blocos são fabricados a partir da argila e sua confecção se faz por meio de prensagem sendo, geralmente, queimados; e sua aplicação é para alvenaria, podendo ainda ser, em casos especiais, de função estrutural. De maneira análoga aos materiais cerâmicos, para fins de vedação, existem os blocos de concreto e os de solo-cimento, sendo que, para este último, segundo a NBR 8491 (ABNT, 1984), a resistência à compressão mínima deve ser de 2 MPa.

2.5 Sistemas construtivos e exigências para os materiais de alvenaria

Este item aborda os aspectos tecnológicos do uso do solo como material de construção, bem como o solo-cimento sendo considerado como material cerâmico, além da alvenaria de solo-cimento juntamente com uma rápida exploração sobre paredes monolíticas.

De acordo com Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1985a), os sistemas construtivos assumem importância sobre alguns aspectos, dentre eles os requisitos de desempenho, os custos da obra, o tempo de execução e a racionalização da construção, podendo-se prever no projeto as principais etapas e disposição de elementos.

Segundo ABCP (1985b), os requisitos de desempenho em sistemas de avaliação para edificação, normalmente são definidos em função das condições de exposição a que os elementos estão submetidos e em função das exigências e necessidades de conforto do usuário. De modo geral, são requeridos: segurança estrutural, segurança ao fogo, estanqueidade, conforto térmico, conforto acústico e durabilidade.

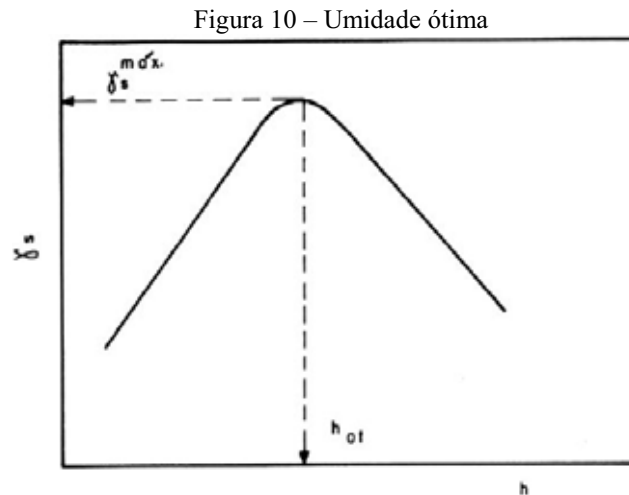
Conforme ABCP (1985c), isto poderá ser atendido com a concepção do sistema construtivo e das propriedades dos materiais, enquanto componentes destes elementos, juntamente com as propriedades básicas estabelecidas e requeridas para os materiais, em termos de requisitos de desempenho para edificações, podendo-se citar: a resistência à compressão, a condutividade térmica, o isolamento acústico e a permeabilidade, devendo estas propriedades ser mais ou menos relevantes, dependendo da sua aplicação e, para se conferir as propriedades desejadas, os materiais devem ser compatíveis com o processo de construção.

Neste sentido, são ressaltadas as propriedades das misturas frescas em compatibilidade com as ações do processo de produção e no uso do solo-cimento como material nos sistemas construtivos, levando em conta que suas propriedades devem atender as especificações normativas e as necessidades para o seu determinado emprego, fazendo ou não parte da estrutura da obra (CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO – CEPED, 1984).

2.5.1 Aspectos tecnológicos do uso do Solo como Material de Construção

CEPED (1984) considerou que existem dois métodos de se utilizar o solo como material construtivo, onde um deles se constitui de embeber o solo de água até este atingir uma consistência plástica; e o outro consiste em se obter uma mistura úmida de solo para compactar ou adensar, sendo que, no primeiro caso o produto final possui alto índice de poros deixados pela água que evapora da massa e, em função disso, apresenta resistências e

impermeabilidades menores que no segundo. No segundo caso, o solo é compactado ou prensado com uma quantidade de água bem menor do que no primeiro caso, chamada de umidade ótima para compactação, como ilustra a Figura 10.



Fonte: ABNT (1991)

A quantidade de água que deve ser adicionada ao solo pode ser determinada em laboratório e depende de cada tipo de solo (CEPED, 1984). Além destes aspectos, podem-se considerar os estados de consistência dos solos e a atividade físico-química dos solos, conforme os itens 2.1 e 2.1.3.

2.5.2 O Solo-cimento como Material Cerâmico

Petrucci (1978), quando aborda o assunto de materiais de construção de forma genérica, trata e concebe o solo-cimento como sendo um material cerâmico. De acordo com ABCP (1985c), em termos de parâmetros e propriedades relevantes como os requisitos de desempenho, o solo-cimento pode ser considerado como um caso particular dos materiais cerâmicos se caracterizando como uma inovação no processo desses materiais se comparados aos blocos cerâmicos tradicionais, uma vez que não usa queima e nenhum tipo de combustível para sua confecção, sobretudo com a utilização de prensas manuais.

Em termos de uma visão da microestrutura interna, o solo-cimento, compondo o grupo de materiais cerâmicos, se enquadra como um material possuidor de muitas fases, em função das combinações possíveis de átomos metálicos e não-metálicos, bem como, existem vários

arranjos diferentes em sua microestrutura para uma mesma combinação (por exemplo, o SiO_2 pode existir com várias estruturas, desde a sílica vítrea, passando por várias formas cristalinas, como a quartzo, a cristobalita e a tridimita), sendo que, a maior parte das fases cerâmicas é a cristalina (INO et al., 2010).

2.5.3 Alvenaria de Solo-Cimento

De acordo com ABCP (1985a), a alvenaria de tijolos de solo-cimento é uma alternativa interessante, uma vez que garante resistência mecânica similar aos tijolos tradicionais confeccionados com queima e esta resistência pode ser monitorada com relação à quantidade de cimento adicionada a mistura, além de não necessitar de mão-de-obra especializada, ser de baixo custo e ambientalmente correta em função da dispensa de queima e da pequena quantidade de cimento utilizada. Para Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira – CEPLAC (2011), os tijolos vazados para alvenaria de solo-cimento podem ser considerados como uma inovação no processo construtivo, pois facilitam as instalações elétricas e hidro-sanitárias, por se apresentarem com encaixe, como mostram as Figuras 11, 12 e 13.

Figura 11 – Exemplos de tijolos de alvenaria de encaixe de solo-cimento



Fonte: Vamos Construir (2011)

Figura 12 – Alvenaria com tijolos de encaixe de solo-cimento



Fonte: Vimaq Prensas (2011)

Figura 13 - Exemplo da distribuição hidráulica em alvenaria de tijolos de encaixe de solo-cimento



Fonte: Construtora Ecologikka (2011)

Ainda conforme CEPLAC (2011), a alvenaria de tijolos com blocos de solo-cimento apresenta algumas vantagens, tais como, redução de desperdício, pois são fabricados também em meio tijolo, eliminando a quebra de tijolos na obra, gerando uma economia estimada no custo final de até 30% (padrão médio); resistência e qualidade; atrativos ecológicos; dispensa da pintura pois os tijolos podem ficar aparentes como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de alvenaria com tijolos aparentes de solo-cimento



Fonte: Ecodomus (2011)

2.5.4 Parede Monolítica

Considera-se também relevante considerar o caso das paredes monolíticas. De acordo com Segantini e Alcântara (2010), as paredes monolíticas utilizam desfôrma rápida e o acabamento pode ser feito com colher de pedreiro, após conclusão do painel. A Figura 15 mostra um exemplo de construção de paredes monolíticas de solo-cimento.

Figura 15 – Exemplo de construção de paredes monolíticas de solo-cimento



Fonte: Veraldo (2009)

2.6 O Solo-cimento

Neste item são abordados alguns conceitos sobre solo-cimento bem como um breve histórico deste material juntamente com sua normatização vigente atual e informações sobre as dosagens, aplicações, tecnologias, propriedades e otimização deste material.

Segundo Bauer (1994), o solo-cimento é um material de proporções adequadas de solo com aglomerante hidráulico artificial, denominado cimento Portland; gerando uma mistura com propriedades melhoradas em função da estabilização do solo pelo cimento nele aplicado e, afirmou, ainda, que vários fatores estão diretamente ligados à característica do solo-cimento como produto final, tais como: dosagem de cimento, natureza do solo, teor de umidade e compactação.

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.

Conforme Grande (2003), ao se adicionar cimento ao solo, obtém-se um material que não sofre grandes variações volumétricas e não se deteriora completamente quando submerso em água, além de apresentar elevada resistência à compressão, maior durabilidade e boa impermeabilidade.

Para Aio et al. (2011), o solo-cimento pode ser classificado em duas categorias: SCC – Solo-Cimento Compactado e SCAA – Solo-Cimento Auto-Adensável. No caso do SCC, a água deve ser adicionada em quantidade suficiente, de modo a possibilitar a máxima compactação e a ocorrência da hidratação do cimento, e no caso do SCAA, a água deve ser adicionada até que se obtenha um produto de consistência plástica, de aspecto similar ao de uma argamassa de emboço (AIO et al., 2011).

Abiko (1986) considerou o atrito de estabilização no solo pelo cimento, visto que para o caso do solo natural, este tende a retornar ao estado plástico e sofrer retrações e fissuras frente a exposição com a umidade. Segundo Felt (1955), citado por Foppa (2005), as propriedades finais do solo-cimento também dependem do tipo de solo envolvido, e de acordo com ABPC

(1985), na estabilização de solos com cimento não é aconselhável a utilização de solos que contenham matéria orgânica, pois esta pode comprometer a hidratação do cimento.

Para CEPED (1984), a utilização de um solo que possui grande quantidade de finos para a confecção do solo-cimento, proporciona um aumento da quantidade de cimento e de água requerida pela mistura em função da grande área específica inserida na massa. Já para ABCP (1985), no solo-cimento, se faz necessário certa porcentagem de argila para que a mistura apresente coesão, além da resistência inicial que é contribuída pela presença de finos na massa.

De acordo com Goodary et al. (2012), a maioria das pesquisas sobre solo-cimento se concentram em melhorar a resistência do solo e suas características de durabilidade, aplicando-as em tecnologia tais como: construção de estradas, fundações e fabricação de tijolos para alvenaria, sendo estudados os fatores que implicam nas propriedades destes materiais no que interessa a Engenharia Civil, além dos aditivos incorporados as misturas e a composição mineralógica e química do solo utilizado.

2.6.1 Breve História do Solo-cimento

Conforme CEPED (1984), o uso de adição química ao solo, no intuito de estabilizá-lo para utilização em construção não é um processo recente e, assim como a rocha e a madeira, o solo-cimento foi um dos materiais de construção mais utilizados pelo homem desde os primórdios da humanidade e, após a segunda guerra, a ciência veio contribuir para o estudo e o aperfeiçoamento do solo como material construtivo, gerando economia nas obras, com propostas de técnicas de utilização deste material incluindo o uso de adições químicas que visavam a sua aplicação.

Segundo Bauer (1994), uma das primeiras vezes que se fez uso de solo estabilizado em construções, foi no Século III a.C., na Muralha da China, onde se utilizou uma mistura de solo e cal, e CEPED (1984), afirmou que a técnica de se construir com solo alcançou países da Europa como França e Alemanha e, também em países como o México que, em regiões de clima quente e seco, utilizou-se de construções de solo, como por exemplo, o Palácio dos Governadores, no Novo México, em 1609.

Segundo ABPC (1985), nos Estados Unidos, em 1915, o solo-cimento foi empregado pela primeira vez em pavimentações e em 1935 iniciou-se estudos sobre a tecnologia deste material. Ainda segundo ABPC (1985), em 1941, a ABCP começou a investir em pesquisas sobre solo-cimento em pavimentações e regulamentou a aplicação do solo-cimento plástico em construções.

De acordo com Segantini (2000), no Brasil, em 1941, a pavimentação do aeroporto de Petrolina – PE foi feita em solo-cimento e, de acordo com Silva (1991), as primeiras construções de casas brasileiras construídas com solo-cimento foram executadas na Fazenda Inglesa-Petrópolis no Rio de Janeiro em 1948. Ainda no Brasil e, de acordo com Silva (1991), em 1950, foi construído o Hospital Adriano Jorge de Manaus, com 10800 m², todo em solo-cimento, que apresenta-se, ainda hoje, em ótimo estado de conservação e, segundo Segantini (2000), em 1970, a pavimentação com utilização deste material no Brasil chegava a marca dos 7500 quilômetros.

2.6.2 Normatização Atual do Solo-cimento

Segantini e Alcântara (2010), apresentam algumas normas do Solo-Cimento como mostra o Quadro 5.

Quadro 5 – Normas de solo-cimento em vigor

NBR	Descrição
8491:1984	Tijolo maciço de solo-cimento. Especificação
8492:1984	Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água – Método de ensaio
10832:1989	Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual - Procedimento
10833:1989	Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica - Procedimento
10834:1994	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Especificação
10835:1994	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Forma e dimensões. Padronização.
10836:1994	Bloco vazado de solo cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio
11798:1990	Materiais para sub-base ou base de solo cimento – Especificação
12023:1992	Solo-cimento – Ensaio de compactação – Método de ensaio
12024:1992	Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio
12025:2012	Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpo-de-prova cilíndricos – Método de ensaio
12254:1990	Execução de sub-base ou base de solo cimento – Procedimento
13554:1996	Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por Solo molhagem e secagem
13555:1996	Solo cimento – Determinação da absorção d'água

Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

2.6.3 Dosagem e Mistura do Solo-cimento

Segundo CEPED (1984), os solos mais adequados para a confecção do solo-cimento compactado são os que possuem 100% dos grãos passando pela peneira 4,8 mm; de 10 a 50% passando na peneira 0,075 mm; limite de liquidez $< 45\%$ e índice de plasticidade $< 18\%$, pois estes solos condicionam menor consumo de cimento.

De acordo com Pinto (1980), a quantidade de cimento adicionada ao solo-cimento tem sido adotada com uma porcentagem em relação a massa de solo seca, no intuito de gerar ganho de resistência e durabilidade às peças. De acordo com Segantini e Alcântara (2010), as dosagens em volumes para as misturas de solo-cimento compactado variam entre 1:12 e 1:16 (solo:cimento), enquanto que para a mistura do solo-cimento plástico estes valores ficam na faixa entre 1:8 e 1:10.

Conforme ABCP (1985a), a quantidade de cimento utilizado na mistura de solo-cimento varia em função do tipo de solo e da aplicação do material. O Quadro 6 mostra os teores de cimento sugeridos pela ABCP, para solos arenosos, segundo a classificação HRB – *Highway Research Board*, que é um Sistema Rodoviário de Classificação.

Quadro 6 – Teores de cimento (em massa) sugeridos pela ABCP, para solos arenosos

Classificação HRB	Teor de Cimento (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	8
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: ABCP (1986)

Para Goodary et al. (2012), o teor de finos do solo ótimo para a utilização em solo-cimento é da ordem de 25% em relação a massa total, embora já se conheça trabalhos em que foi utilizado solos com cerca de 60% de grãos finos em relação a massa total, obtendo bons resultados.

Nesse contexto, o solo adequado deverá conter uma mistura de partículas grossas, médias e finas, uma vez que as propriedades de cada tipo de grão irão influenciar na homogeneidade

das misturas em função de seu comportamento expansivo, proporcionando densidade e, automaticamente, maiores valores de resistência mecânica e maior durabilidade às peças confeccionadas (GOODARY et al., 2012).

2.6.4 Aplicações e Tecnologias do Solo-Cimento

São diversas as aplicações do solo-cimento plástico ou compactado na construção civil, que vão desde fundações e edificações, até contenções e pavimentações. De acordo com Segantini e Alcântara (2010), o solo-cimento plástico ou compactado é viável para aplicação em fundações superficiais em obras consideradas pequenas; mas, Segantini (2000), em seu trabalho com o solo-cimento plástico, objetivou obter este material para ser utilizado como elementos de fundação profunda – estacas, onde os resultados obtidos indicaram a necessidade de se trabalhar com teor de cimento em 14% e umidade em 27%, apresentando como tensão de ruptura à compressão simples valores variando entre 121 e 149 KPa e os valores de abatimentos no cone de *Abrams (Slump-Test)*, em função do teor de umidade de 27%, foram da ordem de 9 cm.

a) Fundações em Solo-cimento Compactado

Conforme CEPED (1984), o solo-cimento utilizado em fundações tem bom comportamento e, se feitas em forma de sapata corrida, devem ser executadas ao longo de todas as paredes da edificação, sendo que a execução é rápida e simples, abrindo-se as valas e preenchendo-as com o material para compactá-las com auxílio de soquetes com as dimensões especificadas em normas e em projeto.

b) Paredes Monolíticas de Solo-cimento Compactado

De acordo com ABCP (1985b), as paredes monolíticas em solo-cimento constituem uma alternativa de construção habitacional que garante resistência à compressão e à choques

similares as paredes de alvenaria convencional, sendo que estas resistências são aumentadas proporcionalmente ao aumento de cimento. Conforme ABCP (1985b), as vantagens das paredes monolíticas vão desde a possibilidade de se utilizar o próprio local da obra, a dispensa da aplicação de pintura e a não necessidade de mão-de-obra especializada, sendo que a redução dos custos pode chegar a 40%, se comparado com a alvenaria convencional.

Segundo Segantini e Alcântara (2010), em paredes monolíticas, o solo-cimento é compactado dentro de fôrmas, em blocos horizontais sucessivos, semelhante sistema de taipa e, esta compactação se dá com auxílio de soquetes, permitindo a imediata desfôrma para reutilizá-la na etapa seguinte. Segantini e Alcântara (2010) apresentam uma parede monolítica de solo-cimento compactado sendo executada no Campus da UNESP de Ilha Solteira, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Execução de parede monolítica de solo-cimento



Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

A cura deste material se dá através de molhagens sucessivas na primeira semana após a confecção da parede e, para as instalações hidrossanitárias e elétricas, se faz necessário rasgos nas paredes, que devem ser feitos imediatamente após a compactação da parede (SEGANTINI; ALCÂNTARA, 2010).

c) Solo-cimento Compactado, Prensado e Auto-Adensável

CEPED (1984), afirmou que para o solo-cimento plástico, a água é adicionada até que a mistura atinja uma consistência plástica e para o solo-cimento compactado, deve-se adicionar água ao solo para se obter a melhor compactação possível da mistura, sendo que para o solo-

cimento plástico, como a quantidade de água adicionada é maior para uma mesma quantidade de solo, o produto final possui alto índice de poros deixados pela água que evapora da massa e, em função disso, apresenta resistências e impermeabilidades menores que no segundo.

De acordo com CEPED (1984), a compactação de solo-cimento necessita de alguma forma de energia, como por exemplo, impacto, vibração ou prensagem, e o seu efeito confere às peças confeccionadas com este material, um aumento da sua densidade, diminuição do índice de vazios, gerando ganho de resistência mecânica e permeabilidade. Também faz parte da tecnologia do solo-cimento, o processo de produção de peças deste material confeccionadas por processo de extrusão. Já, no processo auto-adensável este adensamento do material deve ocorrer por ação da gravidade, preenchendo por completo as fôrmas e ganhando resistência desejada.

d) Tijolo de Solo-cimento para Alvenaria

Para CEPED (1984), existem dois tipos de tijolos de solo-cimento: compactado e prensado, sendo que o primeiro é fabricado através da mistura de solo, cimento e água na sua quantidade ótima para a melhor compactação deste material, que depois de misturado, o material é socado dentro da fôrma para que se obtenha a forma e a resistência desejadas, possibilitando a rápida desmoldagem; e o tijolo prensado é confeccionado com o auxílio de uma máquina-prensa, dando forma ao tijolo.

De acordo com CEPLAC (2011), os tijolos de solo-cimento produzidos em prensas dispensam a queima em fornos, necessitando apenas passarem por um processo de cura através da umidificação das peças. Conforme Segantini e Alcântara (2010) existem prensas para confecção de tijolos de solo-cimento prensado com dimensões variadas, podendo chegarem até sete tamanhos diferentes de tijolos e, possibilitando ainda a fabricação de diversos modelos como, por exemplo: os maciços, os vazados, com canaletas, de encaixe, placas de revestimento e de enfeite decorativo.

Para CEPED (1984), a alvenaria de tijolos vazados facilita as instalações hidráulicas e elétricas pois as tubulações podem passar pelos vazados dos blocos e o piso da edificação

também pode ser feito de solo-cimento com a mesma mistura utilizada em paredes e, da mesma forma que em pisos de concreto, as espessuras podem variar de 4 a 8 cm.

2.6.5 Algumas Propriedades do Solo-cimento

Neste item serão abordadas algumas propriedades que materiais de construção civil devem apresentar para sua aplicação em edificações tais como: Desempenho térmico, Desempenho Acústico, Absorção de Água, Retração na Secagem e Resistência à Compressão.

a) Resistência à Compressão

De acordo com Consoli et al. (2007), Vitali (2008) e Fonseca et al. (2009), quanto às propriedades do solo-cimento em função dos parâmetros de dosagem, têm-se que, embora a quantidade de água incorporada ao solo tenha importância para o processo tecnológico do solo-cimento, assim como a quantidade de cimento, algumas dificuldades têm sido encontradas em se adotar o fator a/c como uma variável de estudo, como parâmetros de dosagem para este material. Estes autores consideram o solo-cimento em estado não saturado, e que nesta condição, a relação água/cimento não tem correlação com a resistência, e sim, a relação "volume de cimento/volume de vazios", sendo que a relação água/cimento só é parâmetro que pode ter correlação com a resistência para o caso de misturas saturadas, onde a relação água/cimento pode ter relação com os vazios do solo.

De acordo com Fonseca et al. (2009), a isto podem ser consideradas questões particulares relativas à compactação de solos como, a interação físico-química e a porosidade, e o tempo de compactação. Por outro lado, resultados diferentes podem ser apresentados em Horpbilsuk (2003), citado em Fonseca et al. (2009), onde o parâmetro água/cimento se apresentou como parâmetro de referência para o valor da resistência mecânica em um caso estudado de misturas de solo-cimento. Conforme os últimos autores citados, a quantidade de água utilizada era alta o suficiente para que tivesse relação com a quantidade de vazios do solo, isto é, similar ao que acontece com o caso do concreto de cimento Portland, onde, a quantidade de água reflete a quantidade vazios presente na fase de argamassa. Os papéis de natureza físico-

química desempenhados pela água nos poros do solo são então diferentes, para os casos de solos saturados e de solos insaturados, assim como do teor de umidade em mistura.

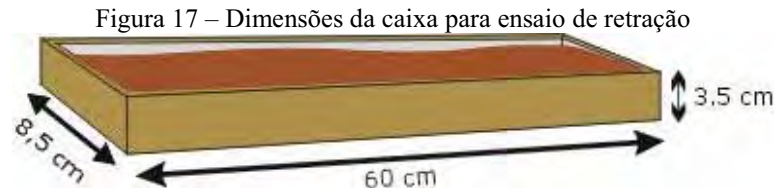
Esclarecem então em Fonseca et al. (2009) que, para o caso de solo-cimento nas condições usuais de aplicação, enquanto que a água afeta a resistência mecânica pela possível interferência na estrutura do solo durante a fase de compactação, a porosidade afeta a resistência pelo possível número de contatos entre partículas criados e distinguem o caso de solo-cimento como que em condições de trabalho insaturadas, e as relações do tipo “volume de vazios/consumo de cimento” parecem ser as mais apropriadas como variável de estudo.

Segundo Foppa (2005), de maneira geral, pode-se dizer que a resistência à compressão simples de solos cimentados é função da quantidade de cimento e da densidade de cada tipo de solo, sendo que a dosagem de cimento na massa é, normalmente, dada pela porcentagem de cimento em relação à massa de solo seco. Segundo a NBR 8491 (ABNT, 1984), a resistência média dos tijolos de solo-cimento não deve ser inferior a 2,0 MPa aos sete dias.

b) Retração na Secagem

De acordo com CEPED (1984), a água incorporada na mistura de solo-cimento evapora durante o processo de secagem e cura do material, gerando retração nas peças, além de propiciar poros e fissuras internas, provocando menor resistência mecânica, maior absorção de água e degradação acelerada do material. Dessa forma, CEPED (1984) sugere um ensaio para verificar a viabilidade do solo para ser utilizado em misturas de solo-cimento, quanto à retração, onde é adicionado água ao solo até que se atinja uma consistência plástica da mistura, semelhante à de uma argamassa de assentamento.

Este material é inserido em uma caixa de madeira, previamente pintada internamente com óleo, com dimensões de 60 cm comprimento; 8,5 cm de largura e 3,5 cm de espessura como mostra a Figura 17. Este material deve permanecer em repouso à sombra por sete dias, para se fazer a leitura da retração no sentido do comprimento da caixa. Para que o solo possa ser utilizado na confecção de solo-cimento, a retração total deve ser inferior a 2 cm e a amostra não deve apresentar fenda transversal na parte central da caixa (CEPED, 1984).



Fonte: IBDA (2011)

c) Absorção de Água

Os materiais a base de solo estabilizado podem sofrer absorção de água, em face do caráter higroscópico do material, da porosidade interna e da superfície. Os ensaios de absorção em corpos-de-provas de solo-cimento são normatizados segundo a NBR 8491 (ABNT, 1984) e NBR 8492 (ABNT, 1984), que resumidamente, determina que três corpos de prova sejam secados em estufa até que se atinja um peso constante, indicando que não há mais água nos mesmos para depois serem imersos em água por um período de 24 horas.

Após retirados da água, dentro de 3 minutos os corpos de prova devem ser pesados e obtém-se o valor da absorção com dos valores de peso seco (M1) e peso saturado (M2), através da fórmula dada na Equação 4.

$$A(\%) = \frac{M2 - M1}{M1} \cdot 100 \quad (4)$$

A NBR 8491 (ABNT, 1984) prescreve que a absorção ensaiada conforme a NBR 8492 (ABNT, 1984) não deve apresentar absorção individual maior que 22% e a média da absorção entre os três corpos de prova não deve ser maior que 20%.

d) Desempenho Acústico

Conforme Salgado (2008), isolamento acústico trata-se da propriedade que alguns materiais apresentam de não permitir que as ondas sonoras sejam transmitidas entre ambientes distintos, e essa propriedade, de modo geral, está ligada à densidade do material, ou seja, o isolamento acústico é diretamente proporcional à densidade que o material apresenta, porém, o quanto maior é a densidade do material, maior é seu poder de refletir o som.

L'hermite (1967), apresentou que, quando uma parede de 50 kg/m² dobra de peso, existe atenuação de 4 dB, o que implicaria em uma parede muito pesada em se tratando somente do isolamento acústico. No entanto, Salgado (2008), afirmou que os materiais considerados bons quanto ao poder de absorver o som e não refleti-lo são leves, macios e porosos, e sua aplicação é de interesse nas edificações residenciais, tanto em alvenarias quanto em lajes, mas, principalmente, em edificações educacionais e de lazer.

e) Desempenho Térmico

De acordo com Salgado (2008), isolamento térmico trata de se fazer uso de materiais em edificações que impeçam a troca de temperatura entre ambientes adjacentes e, os projetos de construção civil que visam atender essas condições necessitam ser projetados com materiais isolantes que dependem de propriedades como sua densidade e espessura para garantir o conforto térmico dos ambientes.

De acordo com CEPED (1984), na antiguidade, as paredes de construções com terra na Babilônia, chegavam a ter 4 metros de espessura e, no Brasil, no período colonial, as construções com solo chegavam atingir 1 metro de espessura, sendo que nos dias atuais as paredes de solo-cimento estão no padrão de 10 e 15 cm de espessura e seu isolamento térmico acompanha o desempenho das paredes construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos.

2.6.6 Otimização do Solo-cimento

A otimização do solo-cimento se baseia, basicamente, nas dosagens dos materiais envolvidos na mistura, que são o solo, o cimento, a água e, eventualmente, aditivos que podem ser incorporados à massa fluída. Para que se efetive a otimização do material solo-cimento, é imprescindível que o estudo leve em consideração os comportamentos das misturas e a influência de cada componente envolvido na massa, em alguns aspectos como os descritos a seguir.

a) Influência do cimento no solo-cimento

Segundo Consoli (2007), qualquer pequena quantidade de cimento adicionada ao solo pode modificar as suas propriedades e, quanto maior a quantidade de cimento a ele adicionada, maiores são as alterações em suas propriedades, como por exemplo, o aumento da capacidade de carga quanto à resistência mecânica, a durabilidade quanto à molhagem e secagem do material e a diminuição da permeabilidade.

No entanto, Foppa (2005), afirmou que a adição de cimento em solos argilosos proporciona o aumento da tendência à retração em função da maior quantidade de finos na mistura e, em solos granulares, aumenta a tendência à expansão. Segundo Catton et al. (1962), citado por Foppa (2005), quando a adição de cimento ao solo é pequena observa-se a redução da capacidade de retenção de água e redução no índice de plasticidade.

b) Influência dos finos do solo no solo-cimento

Para Gomes (1986), a densidade da mistura com partículas argilosas tratadas com cimento depende não tanto da mineralogia, mas sim da superfície específica e da quantidade dos finos da massa, uma vez que a superfícies específicas (expressa por m^2/g ou m^2/m^3) podem proporcionar diferenças apreciáveis à resistência mecânica dos corpos.

c) Influência da água e íons frente ao solo

Como não é usual trabalhar com água pura, e esta contém normalmente impurezas, a ação água é compreendida juntamente com os íons que a acompanha, refletindo-se, então, na dupla camada difusa. Segundo Pinto (2006), a água é um mineral mais complexo do que sua simples composição química (H_2O) sugere e, neste sentido, quando a água entra em contato com os grãos de argila os íons circulam entre as partículas deste solo, afastando-as uma das outras e, com a elevação do teor de água na massa de solo, no contorno das partículas, a chamada camada dupla, que constitui uma camada de água atraída pelos grãos de solo que permanecem em volta das partículas, dando origem a expansão da massa de solo.

Os grãos de argila, quando em contato com a água, sofrem forças de repulsão e de atração entre si, sendo as forças de repulsão ocasionadas às cargas líquidas negativas e as de atração são geradas por forças de Van der Waals que, especialmente em argilas, se dá devido às

moléculas de água aderidos ao grão, gerando o efeito de coesão entre as partículas, contribuindo para a densidade do material e, resultando, assim, na resistência do material fabricado com o solo (PINTO, 2006). Em face da saturação de cátions, na solução do solo, e do índice de valência deste e dos princípios de seletividade da dupla camada difusa, as expansões ou contrações desta podem conduzir a floculação dos solos e, em particular, pela troca iônica, o Ca^{++} substitui os íons Na^{+} e K^{+} , conduzindo-os à floculação (PINTO, 2006).

d) Influência da água frente ao cimento

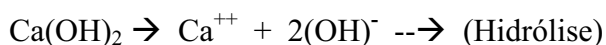
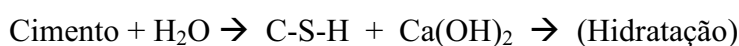
Segundo Foppa (2005), a água considerada satisfatória para utilização em misturas de solo-cimento é a potável e, segundo Neville (1997), a quantidade de água necessária para a hidratação completa do cimento é de cerca 40% da massa do cimento, sendo que, 20% é consumida na hidratação e 20% fica retida na água de gel.

Segundo Horpibulsuk et al. (1970), citado por Foppa (2005), em seus estudos com argilas com altos teores de umidade, verificaram através de ensaios de compressão simples, que a relação água/cimento é um fator importante para o desenvolvimento da resistência deste material, uma vez que leva em consideração as interações físico-químicas entre a água, a argila e o cimento.

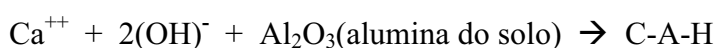
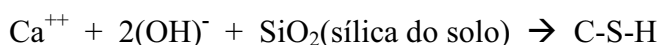
De acordo com Horpibulsuk (2003), a relação água/cimento pode ser considerada uma referência para os valores de resistência à compressão mecânica no material solo-cimento, uma vez este autor utilizou em seu trabalho com misturas de solo-cimento uma dosagem de água alta para avaliar a quantidade de vazios no solo, sabendo que a água influencia na resistência mecânica devido à possível interferência na estruturação do solo e a porosidade influencia a resistência mecânica em função no não contato entre partículas.

Segundo Núñez (1991), citado por Foppa (2005), as reações que ocorrem em um sistema solo-cimento-água são as seguintes:

- Reações Primárias:



- Reações Secundárias:



Onde o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e o C-A-H (aluminato de cálcio hidratado) são compostos cimentantes responsáveis pela resistência.

e) Tempo de homogeneização

Segundo Ligjtsey et al. (1970), citado por Foppa (2005), o tempo de mistura deve ser suficiente para uma boa homogeneização, porém, se ocorrer demora na compactação da mistura de solo-cimento, a umidade, resistência, densidade e durabilidade são alteradas em função da água que pode evaporar da massa neste intervalo de tempo.

De acordo com Ligjtsey et al. (1970), citado por Foppa (2005), em campo, se durante o tempo compreendido entre a homogeneização da mistura de solo-cimento e sua compactação, a massa perder água por evaporação, se fará necessária a adição de uma porcentagem adicional de água não prevista em projeto, que, provavelmente, acarretará em perda de resistência e durabilidade do solo-cimento resultante da demora na compactação da mistura fresca e, além da evaporação da água, deve-se levar em consideração o tempo de pega do material, havendo o aumento das reações de hidratação e alteração da consistência do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão explicados os materiais envolvidos nas misturas e suas dosagens juntamente com o método adotado para os ensaios. Também será detalhado o método e o procedimento experimental do estudo Preliminar, do estudo de Otimização e do Estudo de Aperfeiçoamento.

3.1 Materiais

O presente trabalho de pesquisa fez uso dos materiais: solo, cimento, água e aditivo superplastificante.

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é o Podzólico Vermelho Amarelo, bastante utilizado nas pesquisas desenvolvidas na Unesp de Ilha Solteira – SP. Trata-se de um solo 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.

Segundo Zimback (2003), o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, desenvolvido pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos – SNLCS, órgão da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, classifica os solos com base em seus horizontes. Esta classificação visa agrupar solos com características semelhantes e fornecer informações sobre sua utilização, sendo que o solo Podzólico Vermelho Amarelo apresenta grande variação em características morfológicas e analíticas, com textura argilosa, sendo solos com profundidade variável (ZIMBACK, 2003).

O solo, depois de coletado, em seguida foi peneirado e exposto no pátio do Laboratório de Materiais de Engenharia Civil para secar. Após a secagem ao ar e ao sol, o solo foi armazenado em baldes com tampa e deixado na sala do mesmo laboratório para iniciar a sua caracterização e os ensaios da pesquisa.

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

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

O Quadro 7 apresenta as porcentagens das frações quanto a distribuição Granulométrica do solo utilizado na pesquisa.

Quadro 7 – Porcentagens de distribuição granulométrica

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

Fonte: do Próprio Autor – Anexo A

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II Z 32, que se trata de um cimento composto, com adição de pozolana que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, podendo ser aplicado em todas as fases da construção e é regulamentado pela NBR 11578:1991, além de ser um produto de grande disseminação e facilidade de ser encontrado no mercado.

3.1.3 Água

Foi utilizada água destilada em todos os ensaios de laboratório.

3.1.4 Aditivo

Foi optado por utilizar um aditivo superplastificante redutor de água nas misturas da pesquisa em função de que o objetivo era confeccionar misturas fluídas 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, pode-se reduzir a quantidade de água, gerando fluidez nas mesmas sem prejudicar tais propriedades. O aditivo utilizado foi o superplastificante redutor de água para concreto de ação estérica e eletrostática: Viscocrete CB 3535 da empresa Sika.

Segundo Sika (2012), o Viscocrete CB 3535 trata-se de um aditivo líquido cuja composição básica é uma solução de policarboxilato, de pega normal, que atua através dos efeitos de adsorção superficial e separação estérica nas partículas do cimento e no processo de hidratação e algumas das propriedades obtidas são apresentadas a seguir:

- extremo poder redutor de água, resultando em altas resistências à compressão;
- excelente fluidez com mínimo fator a/c sem segregação e sem exsudação;
- melhora a aderência e a textura da superfície do concreto; e
- aumenta a impermeabilidade e durabilidade do concreto

3.2 Método

Esta investigação foi dividida em três estudos:

- EP – Estudo Preliminar;
- EO – Estudo de Otimização e
- EA – Estudo de Aperfeiçoamento.

Todos os ensaios desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais e Solos do Departamento de Engenharia Civil da UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira – SP.

3.2.1 Procedimento Experimental do Estudo Preliminar

A intenção do EP foi a de efetuar um contato com este tipo de mistura para a fabricação do SCAA, variando-se as dosagens dos componentes e efetuando análises qualitativas quanto o comportamento do material no estado fresco com relação às quantidades de cimento, água e aditivo superplastificante incorporadas nas misturas. Sendo este estudo um primeiro contato com a confecção do material, inicialmente, não se tinham valores predeterminados para as quantidades dos componentes envolvidos de modo que, então, foram escolhidas as proporções aleatoriamente, fixando-se sempre as porcentagens destes em relação à massa de solo.

O EP contou com um total de 5 misturas, que se davam reservando-se uma quantidade de solo com umidade natural que, em seguida, era determinada através do procedimento de secagem em infravermelho, sendo, então, o valor da água incorporado a descontar do valor de água a adicionar. Os procedimentos das misturas se deram alternando os teores de cimento, água e aditivo superplastificante, cujas dosagens estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições do EP

Mistura	Solo Seco (g)	Cimento (%)	Água (%)	Aditivo (%)
1^a	970	2%	39%	0%
2^a	970	5%	39%	0%
3^a	970	12%	39%	0%
4^a	970	15%	39%	0%
5^a	970	20%	36%	0,6%

Fonte: do Próprio Autor

O valor reservado de solo para cada mistura do EP era de 1000 g, porém, foi determinado o valor de 3% de umidade no solo, sobrando assim 970 g de solo seco utilizado nas 5 misturas. Em função da caracterização do solo e de acordo com o Anexo A, determinou-se o valor do Limite de Liquidez do solo, como sendo de 25,4%. Assim, utilizou-se como teor inicial de água a ser adicionado às misturas, o valor de 1,5xLL, que resultou em 39% de água. A adição

de cimento foi fixada aleatória e empiricamente em porcentagem, sendo que este valor foi inicialmente pequeno, aumentando-se a cada mistura.

Na 5ª mistura do EP foi utilizado aditivo superplastificante, sendo que o seu teor foi fixado em porcentagem em relação à massa de solo, passando estes pelo processo empírico desta pesquisa, embora pesquisas já realizadas com o material solo-cimento apresentadas pela literatura tenham utilizado a porcentagem de aditivo em relação à massa de cimento, como por exemplo, na pesquisa de Machado et al. (2005), que utilizaram 1% de aditivo em relação à massa do cimento.

O EP foi o ponto de partida para o EO, uma vez que a cada mistura efetuada, analisava-se o comportamento das misturas quanto as variáveis de exploração frente as quantidades dos componentes envolvidos, gerando hipóteses para as dosagens das novas composições nas misturas seguintes e para o EO. As variáveis de exploração das misturas desta pesquisa foram relacionadas à fluidez, à homogeneidade, ao espalhamento, à auto-adensabilidade, à segregação, à exsudação, à densidade, à retração, à absorção de água e à resistência à compressão axial e diametral. Os estudos analisaram o comportamento das misturas de forma quantitativa e qualitativa com relação à influência do teor de cimento, da água e do aditivo superplastificante, sendo analisadas e discutidas as misturas como materiais compósitos.

Tendo em vista a criação de uma sistemática de ensaios para a confecção do material em estudo, optou-se por apresentar a evolução das 5 misturas do EP, descritas a seguir.

1ª Mistura – EP

A primeira mistura do EP foi o primeiro passo em busca de uma mistura fluída. Adotou-se baixo teor de cimento (2%), com o intuito de que ele fosse crescente nas próximas misturas, juntamente com 970 g de solo e 39% de água. O solo foi misturado com o cimento até atingir uma coloração uniforme. Em seguida, adicionou-se a água e efetuou-se a homogeneização de forma manual com o auxílio de uma espátula.

2ª Mistura – EP

Na segunda mistura do EP a massa de solo utilizada foi de 970 g e manteve-se os 39% de água da mistura anterior. Porém, nesta, tentou-se obter melhores resultados que na primeira, aumentando o teor de cimento para 5% e a homogeneização foi efetuada de forma mecânica

com a hélice acoplada em furadeira como mostram as Figuras 36 e 37. Realizaram-se os ensaios de escoamento confinado – Funil, e de escoamento livre – Espalhamento.

A homogeneização se deu utilizando uma hélice, produzida para este fim, acoplada a uma furadeira como mostra a Figura 18. A Figura 19 mostra as duas hélices confeccionadas para os experimentos.

Figura 18 – Homogeneização da mistura com hélice acoplada à furadeira



Fonte: do Próprio Autor

Figura 19 – Hélices que eram acopladas à furadeira para homogeneização das misturas



Fonte: do Próprio Autor

3ª e 4ª Misturas – EP

Na tentativa de se obter ainda melhores resultados, por meio do aumento da adição de cimento, na terceira e quarta misturas, foram utilizados 12% para a terceira e 15% para a quarta mistura, respectivamente. Mais uma vez, a homogeneização mecânica foi realizada com furadeira e hélice. Ainda durante a homogeneização, foi efetuada uma mistura manual e, assim, foi possível criar uma pasta mais homogênea, sugerindo que a massa requer um manuseio contínuo até o momento do seu lançamento nas fôrmas.

5ª Mistura – EP

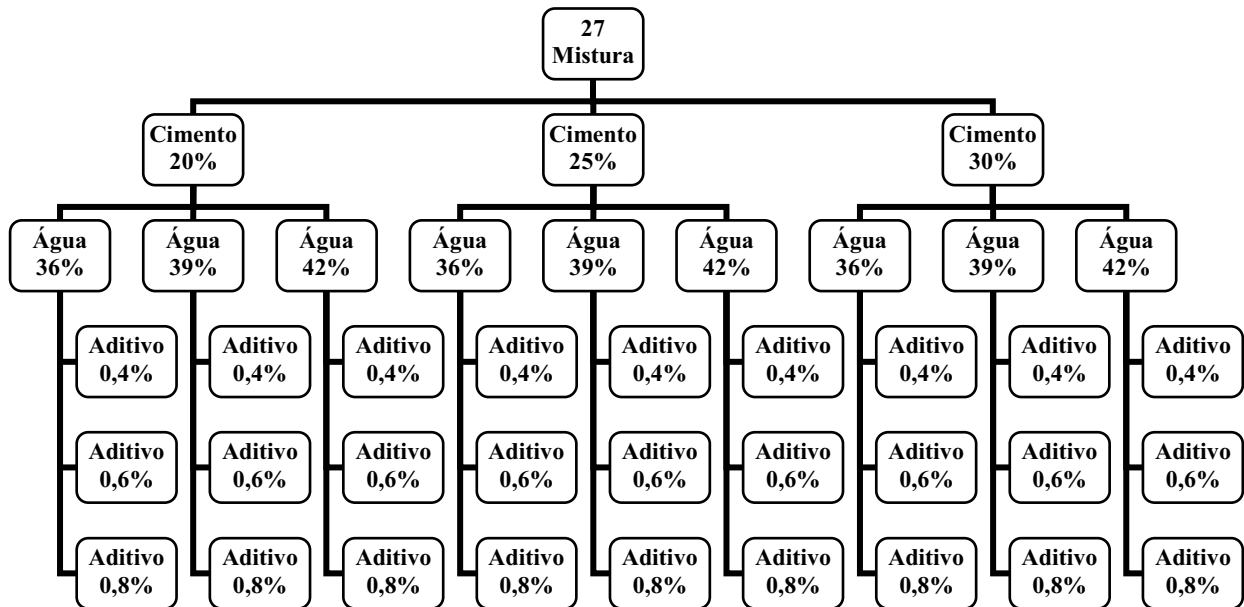
Na 5ª mistura optou-se por colocar menos água na mistura em comparação com as anteriores, fixando assim o valor de 36%, com o intuito de eliminar o problema da exsudação. Mais uma vez também, em relação às misturas anteriores, aumentou-se a quantidade de cimento adicionada, fixada desta vez em 20% em relação à massa de solo seco. Também a homogeneização foi mecânica, realizada com furadeira e hélice e, com o objetivo de resolver

o problema da imobilidade, optou-se, neste momento, por inserir 0,6% de aditivo superplastificante em relação à massa de solo.

3.2.2 Procedimento Experimental do Estudo de Otimização

O EO contou com 27 misturas e teve o intuito de buscar uma mistura otimizada, definindo os teores ótimos de cimento, água e aditivo superplastificante, com a tentativa de identificar a influência destes no comportamento do SCAA, juntamente com os fatores que interferem nas propriedades deste material, utilizando-se em todas elas o valor fixo de solo de 5000 g e variando-se as quantidades de cimento, água e aditivo superplastificante nas composições, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Composições do EO



Fonte: do Próprio Autor

Todas as misturas do EO homogeneização foram realizadas em argamassadeira com capacidade para 20 litros com três velocidade de rotação, sendo 124, 220 e 450 rpm, sendo utilizadas nas homogeneizações das misturas a velocidade 124, de modo a se evitar efeitos diferenciados em face da inércia dos materiais, optou-se por trabalhar com a velocidade mais baixa. A Figura 21 apresenta o equipamento e a Figura 22 apresenta o aspecto da mistura solo-cimento enquanto homogeneizava-se.

Figura 21 – Argamassadeira



Fonte: do Próprio Autor

Figura 22 – Solo-cimento sendo homogeneizado em argamassadeira



Fonte: do Próprio Autor

Os procedimentos para a homogeneização das misturas ocorreram de acordo com a seguinte sequência:

- 1.) era passado óleo no interior da bacia da argamassadeira no intuito de evitar que o material aderisse à mesma;
- 2) eram colocados o solo e o cimento, efetuando-se a mistura destes dois componentes e este processo se dava por aproximadamente 10 minutos, até que se obtivesse uma mistura de coloração homogênea;
- 3) adicionava-se água aos poucos, com a argamassadeira em movimento, e deixava-se bater o material por aproximadamente 15 minutos;
- 4) desligava-se a argamassadeira e, com o auxílio de uma espátula de pedreiro, remexia-se manualmente a mistura para averiguar a homogeneidade, a consistência e a presença de pelotas na mistura;
- 5) adicionava-se o aditivo e continuava a homogeneização por mais 4 ou 5 minutos, até que encontrava-se um material homogêneo;
- 6) iniciavam-se, então, os ensaios do material no estado fresco.

a) Ensaios do material no estado fresco

Os ensaios no estado fresco realizados nas misturas foram os seguintes: Ensaio do Funil, de Espalhamento, de Segregação por peneiramento e de Adensamento e Moldagem por gravidade.

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 velocidade expressa por massa/tempo dada em g/s. Inicialmente, utilizou-se o procedimento com o “*Funil de Marsh*”, com abertura de passagem de 8 mm, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Funil de Marsh



Fonte: do Próprio Autor

Este ensaio consistiu em preencher o funil com 1000 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. Porém, observou-se que o bocal de saída deste funil 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 24.

Figura 24 – Funil fabricado para a pesquisa



Fonte: do Próprio Autor

Ensaio de Espalhamento

O Ensaio de Espalhamento foi executado conforme as prescrições das normas para concreto auto-adensável NBR NM 67 ABNT (1998) e NBR NM 68 ABNT (1998), em uma placa metálica de 100 x 100 centímetros, de modo que não absorva água nem provoque atrito com a mistura, e por um tronco de cone com materiais de mesmas características da base, sendo este ensaio 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 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, efetuado de modo similar ao *Cone de Abrams* proposto por Kantro (1980), com algumas adaptações, possibilitou verificar 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 em uma placa metálica sobre uma mesa e em seguida era medido o valor do espalhamento. Os passos deste ensaio estão ilustrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28. 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.

Figura 25 – Preenchimento do Cone



Fonte: do Próprio Autor

Figura 26 – Retirada do cone sobre a placa



Fonte: do Próprio Autor

Figura 27 – Espalhamento resultante



Fonte: do Próprio Autor

Figura 28 – Medição dos diâmetros do Espalhamento



Fonte: do Próprio Autor

Segundo EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES – EFNARC (2002), recomenda-se para o espalhamento no CAA, um valor de diâmetro entre 650 e 800 mm. ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL – AFGC (2000) e Alcântara (2004) recomendam o intervalo de 600 a 700 mm, de modo que a superfície seja o mais circular possível, sendo também levadas em consideração a homogeneidade e a presença de água nas bordas.

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 (peneira + fundo) na balança, tarava-a e despejava-se uma quantidade fixa de mistura na peneira, para assim, verificar a quantidade de material que ficava retido na peneira em relação ao total de mistura despejado, como pode ser observado nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Ensaio de Segregação



Fonte: do Próprio Autor

Figura 30 – Material retido na Peneira



Fonte: do Próprio Autor

Este ensaio, não sendo exatamente igual, se assemelha em parte, com o ensaio de peneiramento utilizado em Alcântara (2004), para se verificar a segregação em casos de concretos auto-adensáveis, onde se utilizou de peneiras para mensurar a quantidade de material retido nas mesmas em relação à quantidade total de material despejado na peneira.

Ensaio de Adensamento e de Moldagem

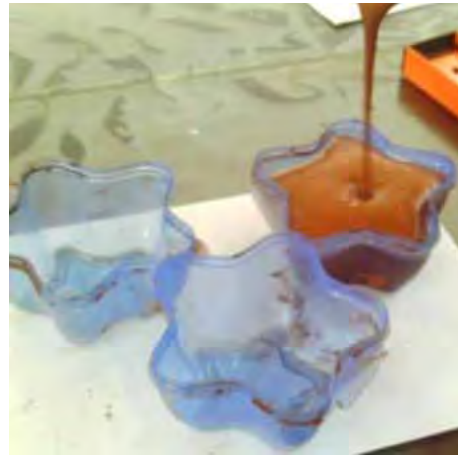
Os ensaios de adensamento e moldagem consistiram em preencher as fôrmas avaliando a auto-adensibilidade das misturas, através do total preenchimento das fôrmas, sem auxílio de outro recurso senão a ação da gravidade. As 27 misturas do EO foram submetidos ao ensaio de adensamento e moldagem em corpos de provas cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento como mostra a Figura 31. Da 4ª a 7ª mistura do EO foram confeccionados moldes em formato de estrelas para verificar a auto-adensabilidade das misturas, que foram comprovadas como sendo possível, como mostram as Figuras 32 a 34.

Figura 31 – Ensaio de Adensamento em moldes cilíndricos



Fonte: do Próprio Autor

Figura 32 – Ensaio de Adensamento em moldes com formato de estrelas



Fonte: do Próprio Autor

Figura 33 – Ensaio de Adensamento e Moldagem em moldes em formato de estrelas



Fonte: do Próprio Autor

Figura 34 – Desfôrma dos Corpos de Prova em formato de estrelas



Fonte: do Próprio Autor

A desfôrma dos CPs era feita num prazo entre 2 ou 3 dias após a moldagem e ocorreu de forma manual, com o esforço de tração de modo que os CPs saíam facilmente das fôrmas. Com todas as misturas do EO foram confeccionados 8 CPs em formato cilíndrico, com os quais, 3 eram efetuados ensaios de resistência à compressão axial simples; 2 eram realizados o

ensaio de resistência à compressão diametral e com 3 eram realizados o ensaio de absorção de água.

No intuito de mensurar a quantidade de água que evapora dos CPs, estes eram pesados em seguida ao adensamento e moldagem, como mistura fresca, e também, no estado endurecido, no momento da desfôrma, como mostram as Figuras 35 e 36. Este procedimento possibilitou contabilizar a quantidade de água evaporada dos corpos de provas durante o período de secagem, promovendo a retração, o endurecimento e a resistência do material.

Figura 35 – Pesagem dos CPs com massa fluída



Fonte: do Próprio Autor

Figura 36 – CPs no momento da desfôrma



Fonte: do Próprio Autor

Além disso, no momento da desfôrma, eram medidos os diâmetros e os comprimentos dos corpos de provas, para assim, comparando com as medidas dos moldes, determinar a retração e a densidade aparente. Levando em consideração as retrações que os corpos de provas cilíndricos sofreram, foram calculadas as novas dimensões que estes CPs passaram a ter juntamente com as porcentagens de retrações e suas respectivas densidades, que foram diretamente afetadas em função do novo volume apresentado após sofrerem as retrações.

b) Ensaios do material no estado endurecido

Os ensaios realizados no estado endurecido foram: Resistência à Compressão Axial e Diametral e Absorção de Água.

Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Diametral

Os corpos de provas que foram submetidos ao Ensaio de Compressão Mecânica ficavam em câmara úmida durante 28 dias para cura, dentro de um saco plástico, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Corpos de prova ensacados para irem para câmara úmida



Fonte: do Próprio Autor

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 Prensa de ensaio de CBR – Índice de Suporte Califórnia, da marca Pavitest, modelo C1006, contendo anel dinâmico com capacidade de 4000 Kgf, sendo a operação feita de forma manual e obtendo o valor da carga de ruptura em Kgf. A Figura 38 mostra um ensaio de resistência à compressão simples axial sendo executado.

Figura 38 – Ensaio de Compressão Axial



Fonte: do Próprio Autor

Ensaio de Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram realizados nos corpos de prova cilíndricos das 27 misturas do EO se deram seguindo as prescrições da NBR 13555 (ABNT, 1996), da NBR 8491 (ABNT, 1984) e da NBR 8492 (ABNT, 1984).

3.2.3 Procedimento Experimental do Estudo de Aperfeiçoamento

Dentre as 27 misturas do EO, a 18ª mistura foi eleita como a mistura otimizada e então, para o EA, esta foi repetida duas vezes para:

- 1) a confecção de 20 CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial no intuito de confirmar esse valor já obtido com 3 CPs desta mistura no EO;
- 2) a realização do ensaio de escoamento por gravidade com o preenchimento de 3 CPs com formas e tamanhos diferentes, como mostra a Figura 39, utilizando-se de um funil acoplado a uma mangueira de 2 metros de comprimento como mostra a Figura 40. Estes três CPs foram submetidos ao ensaio de absorção de água para verificar a influência da superfície externa na absorção de água. As Figuras 41, 42 e 43 apresentam os croquis das três fôrmas utilizadas neste ensaio.

Figura 39 – CPs confeccionados com o escoamento por gravidade



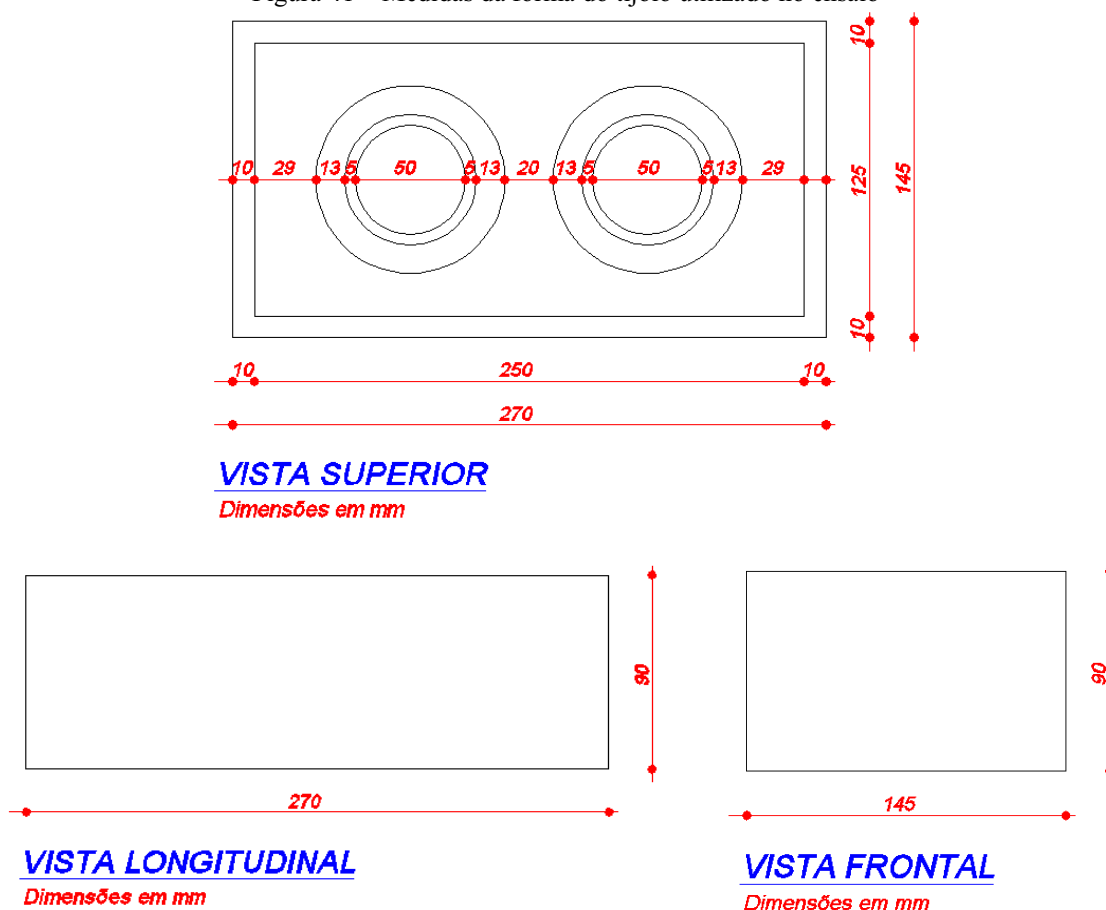
Fonte: do Próprio Autor

Figura 40 – Funil com mangueira para ensaio de escoamento por gravidade



Fonte: do Próprio Autor

Figura 41 – Medidas da fôrma do tijolo utilizado no ensaio



Fonte: do Próprio Autor

Figura 42 – Medidas da fôrma do bloco hexagonal utilizado no ensaio

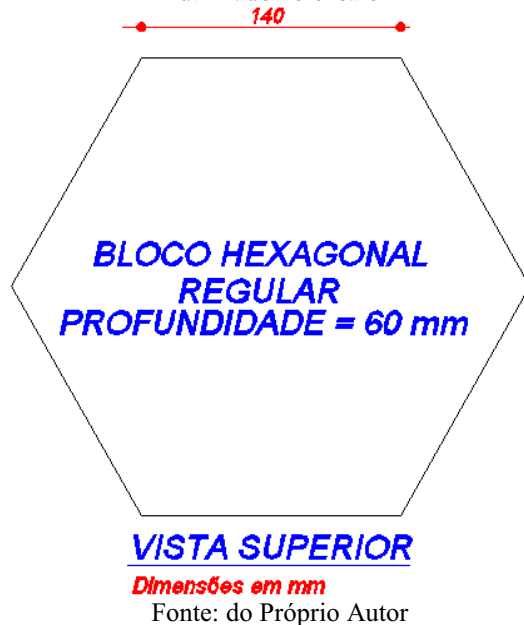
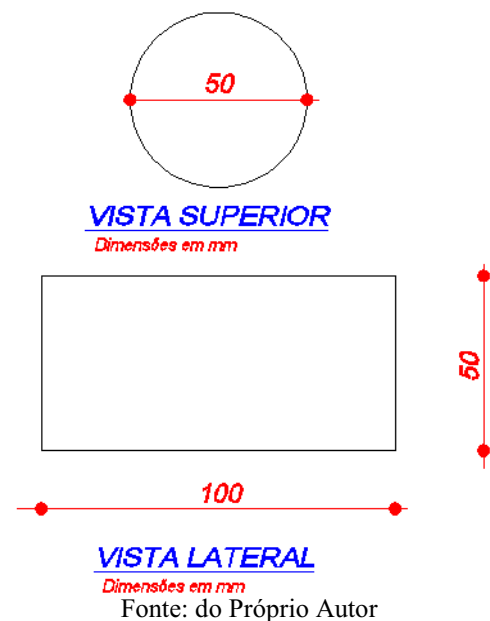


Figura 43 – Medidas da fôrma do cilindro utilizado no ensaio



A escolha da 18ª mistura como sendo a otimizada, se deu pelos seguintes motivos:

- pode ser considerada com boa fluidez, uma vez que a descarga no funil foi de 750 g/s;
- apresentou bom espalhamento e de acordo com a recomendação de AFGC (77 cm);
- apresentou bons valores de segregação (12,8% # 2,38mm e 1,8% # 4,76mm);
- apresentou boa densidade (2,11 g/cm³), uma vez que acima de 2 g/cm³ é considerado bom para material cerâmico;
- apresentou boa resistência mecânica (3,61 MPa)
- apresentou bom valor de absorção de água (2%)

Ainda no EA, foi repetida a 21ª mistura do EO e com esta confeccionados 20 CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura para também confirmar o valor de resistência à compressão axial desta, uma vez que esta mistura apresentou o maior valor de resistência mecânica dentre as 27, dada por 7,5 MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão demonstrados e discutidos os resultados dos estudos Preliminar, de Otimização e de Aperfeiçoamento, 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 do Estudo de Otimização.

4.1 Resultados e Discussões do Estudo Preliminar

Os resultados do EP são, de modo geral, qualitativos, e se relacionam com a estabilidade e a exsudação da mistura, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Formas como as misturas se apresentavam

Mistura	Cimento	Água	Aditivo	a/c	a/c+solo	Formas de Apresentação
1ª	2%	39%	0%	19,5	0,38	Instável, apresentando forte exsudação
2ª	5%	39%	0%	7,8	0,37	Instável, apresentando forte exsudação
3ª	12%	39%	0%	3,3	0,35	Instável, apresentando exsudação
4ª	15%	39%	0%	2,6	0,34	Estável, sem exsudação e sem mobilidade
5ª	20%	36%	0,6%	2,0	0,33	Estável, sem exsudação e com mobilidade

Fonte: do Próprio Autor

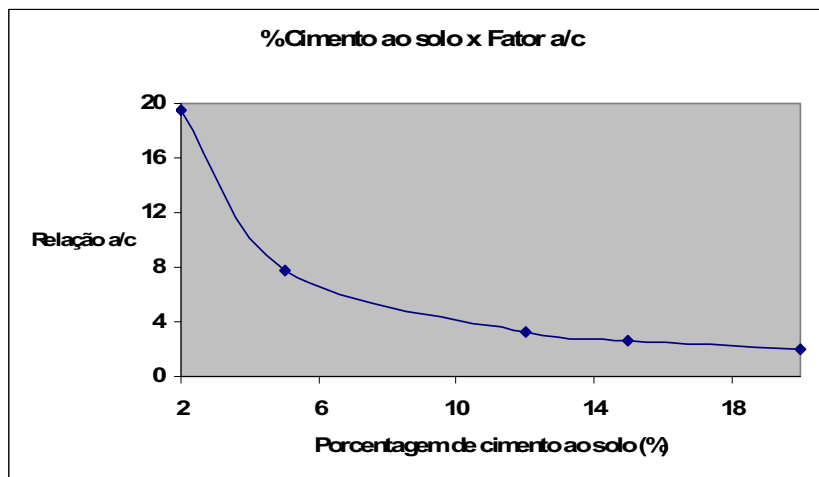
Conforme os resultados qualitativos apresentados na Tabela 2 para o caso do EP e pelos relatos já apresentados no desenvolvimento da metodologia, a correta evolução da estabilidade das misturas está frente ao aumento da incorporação do cimento e isto está de acordo com Catton et al. (1962), citado por Foppa (2005).

Os finos do solo, que constituem valores acima de 30%, mostram a forte influência na instabilidade no comportamento das misturas e vem de encontro com o texto de Aio et al. (2011), quando afirmaram que o solo siltoso e argiloso, quando utilizado em mistura de solo-cimento, geram dificuldade de homogeneização durante o seu preparo e que, isto ocorre, em função dos grãos finos que estes solos possuem.

Cabe destacar que, segundo Alcântara (1995), os tipos de minerais como o quartzo, a caulinita e os oxi-hidróxidos de ferro presentes nos solos, os quais são de baixa atividade do ponto de vista da Capacidade de Troca Catiônica – CTC, pode ser diferenciado entre os tipos de solos.

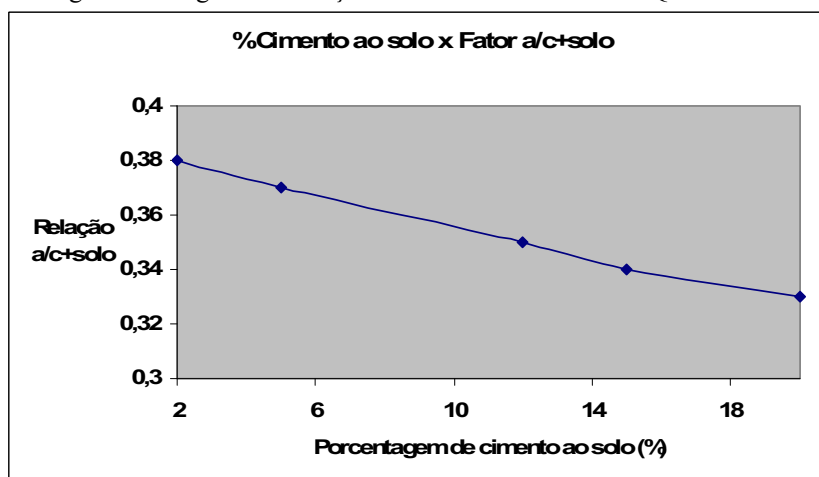
As Figuras 44 e 45 apresentam a variação de porcentagem da água com relação ao cimento e com relação ao solo e cimento, justamente quando se variou a porcentagem de cimento com relação ao solo. A sobreposição das duas relações é dada pela Figura 46.

Figura 44 – Água com relação ao cimento – Queda Exponencial



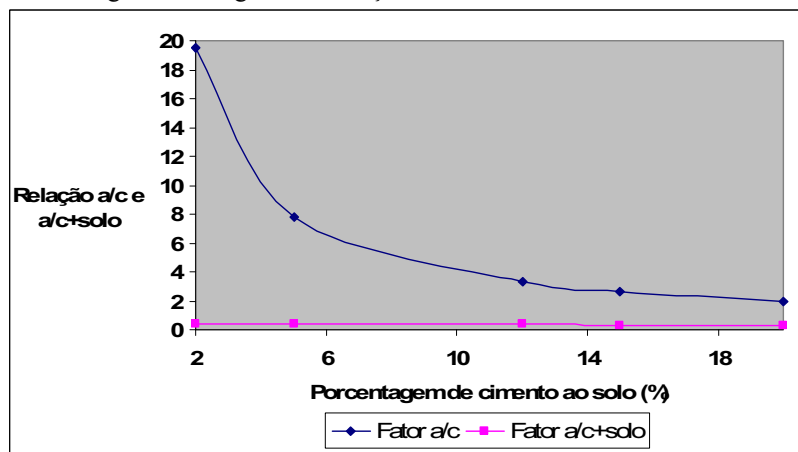
Fonte: do Próprio Autor

Figura 45 – Água com relação ao solo seco + cimento – Queda Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 46 – Água com relação ao cimento e ao solo+cimento



Fonte: do Próprio Autor

Pode-se observar que durante a variação da porcentagem de cimento com relação ao solo no EP, a taxa da variação percentual da quantidade de água com relação ao cimento foi muito maior do que com relação à mistura seca total, de modo a confirmar a importância da incorporação de cimento na retenção da água e estabilização da mistura. Isto está em acordo com Neville (1997), que considera que para o caso do concreto, a diminuição da quantidade de água por cimento faz aumentar a consistência.

Também cabe levar em consideração as discussões de Goodary et al. (2012), quando diz que o solo estabilizado deve possuir um baixo fator água/cimento para que obtenha melhores valores de resistência mecânica, o que pode ser conseguido com a maior entrada de cimento e diminuição da quantidade de água na mistura.

4.1.1 Resultados Qualitativos da 1ª Mistura – EP

Esta mistura, no estado fresco, mostrou-se instável e não fluída o suficiente para ser considerada auto-adensável. Desta mistura, foram confeccionados dois corpos de provas cilíndricos, que não puderam ser curados nem rompidos, pois apresentaram baixíssima resistência, uma vez que se quebravam ao toque das mãos, logo após a desfôrma. Embora tenha sido possível a realização da prática de moldagem, verificou-se a presença de uma camada de água sobrenadante sobre o material solo-cimento, identificando-se duas fases bem distintas do material.

Como a mistura apresentava uma boa homogeneização somente após instantes de agitação esta não possibilitou efetuar os ensaios do funil, de espalhamento, de segregação e de adensamento, pois apresentava rápida sedimentação com separação dos grãos. Após cessada a agitação, considerou-se que pode ter havido falha durante o processo de agitação feito de forma manual por esta não ter um gradiente de velocidade uniforme exigidos na confecção deste material, tendo em vista as condições reológicas e próprias da mistura e de cada material em particular. Uma hipótese que foi adotada é o fato de que o solo apresenta diferentes proporções granulométricas, que ocasionaram diferenças diretamente proporcionais na retenção de água. Considerou-se que a quantidade de água ainda era demasiada, ocasionando a exsudação e, conseqüentemente, a segregação da massa.

4.1.2 Resultados Qualitativos da 2ª Mistura – EP

Esta mistura apresentou bom desempenho quanto à fluidez, permitindo executar o ensaio do funil, sendo que todo o material passou pelo funil sem obstruções ou interrupção do fluxo, como mostra a Figura 47.

Figura 47 – Mistura passando pelo Funil



Fonte: do Próprio Autor

Já no ensaio de espalhamento, para verificar visualmente a fluidez, a segregação e a exsudação da mistura, não se obteve o sucesso desejado, uma vez que o formato que a superfície de espalhamento apresentou não pode ser considerado um círculo, e também houve a presença de pelotas de solo no mesmo, mostrando-se uma mistura pouco homogênea e longe de ser considerada auto-adensável, como pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 – Ensaio de Espalhamento



Fonte: do Próprio Autor

Foi então constatada, por esta experiência, que é possível o escoamento confinado (funil) e escoamento livre horizontal (espalhamento). Cabe considerar que, durante a homogeneização, a mistura apresentou-se como um material em 3 fases: massa mais densa por baixo, pasta intermediária, e água livre por cima. Adotou-se como hipótese a partir desta experiência que a maneira mecanizada de se homogeneizar a mistura era deficiente, uma vez que, depois que o mesmo material foi homogeneizado manualmente, o material se apresentou significativamente uniforme, sem fases. Considerou-se relevante também que, como a argila é muito sujeita às forças de coesão, ela se aglutinou e foi para o fundo, reforçando-se a necessidade de haver o comportamento mais acentuado do cimento na mistura.

Foi deixado a mistura descansar por 2 minutos e voltando-se a mexer manualmente para verificar a ocorrência de exsudação na mistura. Acreditou-se que a mistura mecanizada pode contribuir para a ocorrência da segregação, em razão da diferença de inércia do material compósito, pois a água, o cimento e o solo possuem valores de inércias próprios e diferentes entre si e, ainda, a geometria do aparato (hélice), que produz o cisalhamento, induzindo diferentes velocidades em função da inércia das misturas.

Diante dos resultados de escoamento livre e confinado, ficou a sugestão de, nos ensaios seguintes criar um ensaio para se avaliar a segregação. Considerou-se que este poderia ser feito passando o material por duas peneiras de malhas 2,38 mm e 4,76 mm, respectivamente. Este ensaio foi realizado na 3ª e 4ª misturas.

4.1.3 Resultados Qualitativos da 3ª e 4ª Mistura – EP

Na 3ª e 4ª misturas, foram realizadas as composições envolvendo 12% e 15% de cimento, respectivamente. Após a homogeneização mecânica (furadeira e hélice) a massa foi deixada em repouso por 2 minutos e observou-se a segregação do material, sendo nítida a percepção de uma concentração de material mais grosso no fundo do recipiente e observou-se que a massa, quando ficava em repouso, segregava, porém, quando era posta em movimento, a mesma se homogeneizava novamente.

Percebeu-se ainda a presença de uma pequena quantidade de água sobrenadante. Porém, observou-se que com 15% de cimento a mistura segregou menos do que as anteriores e, automaticamente, da mesma forma, houve menos exsudação, levando a conclusão de que o aumento de cimento na mistura favorece para o desaparecimento deste problema, sendo então considerado como forma de resolver o problema da sobra de água com a adição de mais cimento à mistura nos ensaios posteriores.

No ensaio do funil da quarta mistura, observou-se que o material passou facilmente e sem obstruções, com descarga regular, observando-se um único fio de material passante, sendo este resultado, qualitativamente, o melhor de todos os casos até o momento.

4.1.4 Resultados Qualitativos da 5ª Mistura – EP

A 5ª mistura apresentava-se coesa, pela primeira vez, numa só fase, porém, sem mobilidade. A inserção de 0,6% de aditivo superplastificante em relação à massa de solo resolveu o problema da imobilidade ocorrido nas misturas anteriores e após deixar a mistura descansar por 2 minutos e voltando a misturá-la, notou-se que a mesma não sofreu alteração como segregação ou exsudação.

Com base nesta, e comparando-a as misturas anteriores, confirmou-se a necessidade de se utilizar o aditivo superplastificante nas próximas misturas, com o intuito de melhorar a fluidez, sem sobra de água, sem exsudação e sem segregação. Em função disso, optou-se, neste momento, por utilizar aditivo superplastificante em todas as misturas do EO.

Quanto a homogeneização das misturas, de acordo com a reologia, os materiais podem precisar de um valor mínimo (valor crítico) para que entrem em movimento. A partir deste momento, foi determinado que a homogeneização de todas as misturas do EO seriam feitas em argamassadeira.

4.2 Resultados e Discussões gerais sobre o Estudo de Otimização

Os resultados do EO visam estabelecer possíveis correlações entre os parâmetros de composição e as variáveis definidas como propriedades, de modo a poder avaliar as propostas de ensaios para o estado fresco e de orientar as dosagens, visando a otimização do material.

A Tabela 3 apresenta os valores das relações água/solo seco, água/cimento e água/cimento+solo seco para as respectivas misturas de 1 a 27, de modo que, a partir destes valores possa se discutir sobre os diversos resultados para o EO.

Tabela 3 – Fatores de água, cimento e solo nas misturas

Mistura	Cimento (%)	Água (%)	Aditivo (%)	Fator Água/Solo seco	Fator Água/Cimento	Fator Água/Cimento + Solo seco
1ª	20%	39%	0,6%	0,39	1,95	0,33
2ª	25%	36%	0,6%	0,36	1,44	0,29
3ª	25%	39%	0,6%	0,39	1,56	0,31
4ª	20%	36%	0,4%	0,36	1,80	0,30
5ª	20%	39%	0,4%	0,39	1,95	0,33
6ª	20%	36%	0,6%	0,36	1,80	0,30
7ª	25%	39%	0,4%	0,39	1,56	0,31
8ª	25%	36%	0,4%	0,36	1,44	0,29
9ª	20%	42%	0,4%	0,42	2,10	0,35
10ª	20%	42%	0,6%	0,42	2,10	0,35
11ª	20%	39%	0,8%	0,39	1,95	0,33
12ª	20%	36%	0,8%	0,36	1,80	0,30
13ª	20%	42%	0,8%	0,42	2,10	0,35
14ª	25%	36%	0,8%	0,36	1,44	0,29
15ª	25%	39%	0,8%	0,39	1,56	0,31
16ª	25%	42%	0,4%	0,42	1,68	0,34
17ª	25%	42%	0,6%	0,42	1,68	0,34
18ª	25%	42%	0,8%	0,42	1,68	0,34
19ª	30%	36%	0,4%	0,36	1,20	0,28
20ª	30%	36%	0,6%	0,36	1,20	0,28
21ª	30%	36%	0,8%	0,36	1,20	0,28
22ª	30%	39%	0,4%	0,39	1,30	0,30
23ª	30%	39%	0,6%	0,39	1,30	0,30
24ª	30%	39%	0,8%	0,39	1,30	0,30
25ª	30%	42%	0,4%	0,42	1,40	0,32
26ª	30%	42%	0,6%	0,42	1,40	0,32
27ª	30%	42%	0,8%	0,42	1,40	0,32

Fonte: do Próprio Autor

Admitindo-se o SCAA como um material novo e não tendo parâmetros de dosagens exatas para sua confecção, os resultados da Tabela 3 assumem importância primordial para este tipo de proposta de trabalho tendo em vista que, de acordo com Horpbilsuk (2003), a relação

água/cimento foi adotada como referencia para o valor da resistência mecânica para o material solo-cimento, sendo que a dosagem de água utilizada nas misturas era alta o suficiente para exprimir a quantidade de vazios do solo, sendo que a água interfere na resistência mecânica pela possível interferência na estrutura do solo e a porosidade influencia a resistência mecânica em função da falta de contatos entre partículas.

Ainda neste sentido, para Consoli et al. (2007), Vitali (2008) e Fonseca et al. (2009), tanto a água quanto o cimento incorporados em misturas de solo-cimento possuem grande importância para seu processo tecnológico, tendo em vista que ocorrem algumas dificuldades para se adotar a relação água/cimento enquanto variável de estudo. Para Fonseca et al. (2009), com relação a compactação em misturas de solo-cimento compactadas, as interferências podem se dar quanto a interação físico-química, a porosidade e o tempo de compactação, onde a compactação interfere na microestrutura do solo.

4.2.1 Resultados e Discussões do Material no Estado Fresco em função da variação dos constituintes em relação ao solo

A Tabela 4 apresenta os resultados alcançados para o ensaio do Funil, em termos de velocidade de passagem da mistura pelo funil em g/s.

Tabela 4 – Velocidades de Passagem das misturas no funil (g/s)

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Velocidade (g/s)	348,50	554,04	396,00	516,49	666,20	568,85	507,28	412,23	173,00
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Velocidade (g/s)	148,07	594,07	655,07	1695,07	323,74	603,28	710,66	840,00	750,00
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Velocidade (g/s)	226,76	536,19	444,50	479,61	642,20	692,04	727,70	680,35	797,10

Fonte: do Próprio Autor

Efetuada-se uma ligação a partir dos dados da Figura 20 e os resultados da Tabela 4, observa-se que a grande maioria das misturas onde foi inserida uma maior quantidade de aditivo superplastificante, ou seja, 0,8%, atingiu uma maior fluidez, fato este que vem de

encontro com o texto de Skarendahl (2000), quando afirmou que a fluidez é alcançada de maneira mais eficiente com a inserção de aditivos superplastificantes em misturas cimentícias. A seguir, a Tabela 5 apresenta os resultados alcançados para o ensaio de Espalhamento do SCAA, em termos de diâmetros médios (em cm).

Tabela 5 – Diâmetros e Diâmetros médios das misturas (cm)

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
<i>Diâmetros Médios (cm)</i>	59,0	41,0	45,0	38,8	43,0	41,5	46,0	36,2	49,5
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
<i>Diâmetros Médios (cm)</i>	57,5	50,5	41,0	86,0	35,5	63,0	82,0	80,0	77,0
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
<i>Diâmetros Médios (cm)</i>	28,5	39,5	36,0	45,0	39,5	37,0	68,0	60,0	57,0

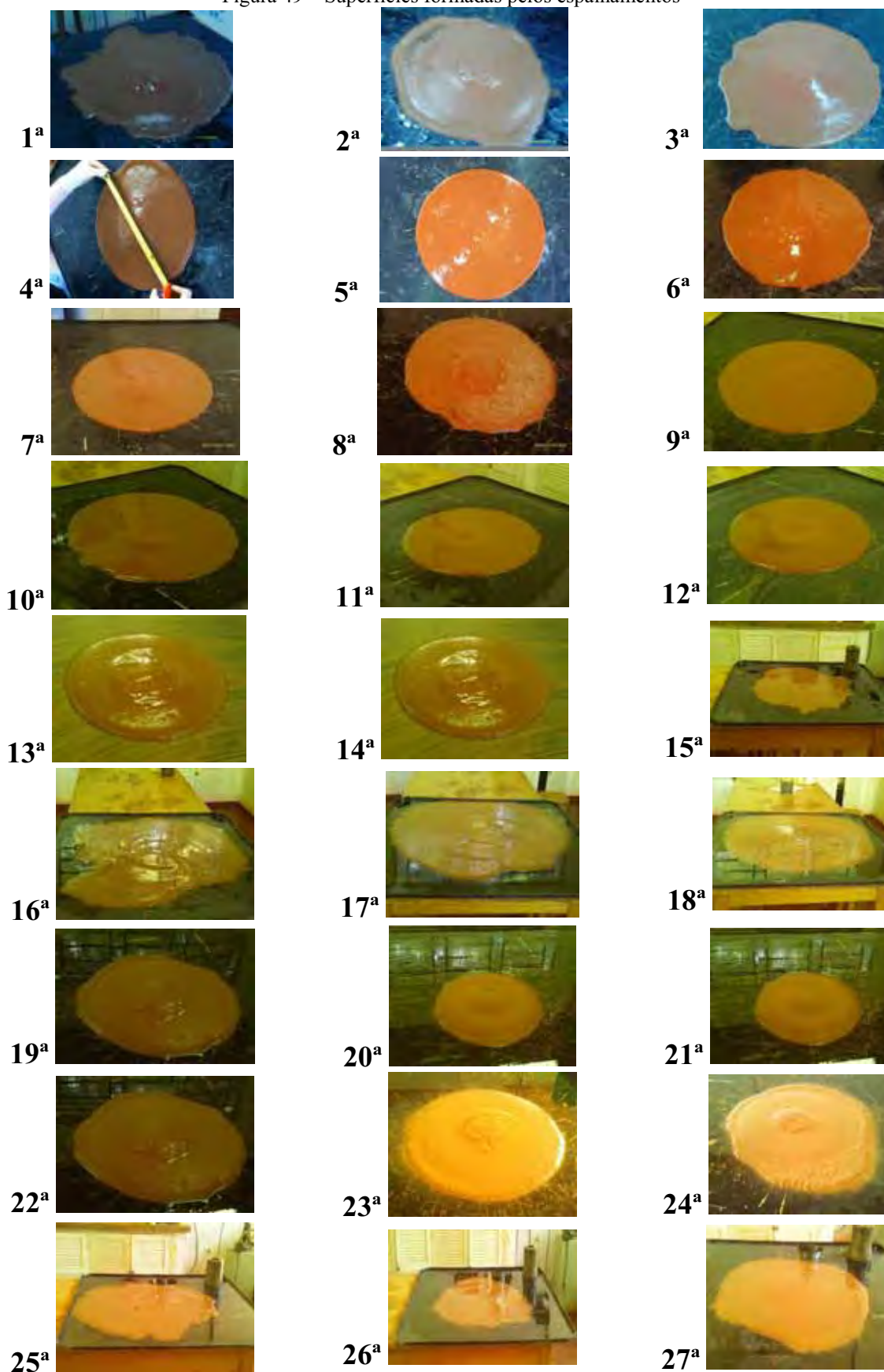
Fonte: do Próprio Autor

Tendo em vista os valores de diâmetros de espalhamento apresentados por meio da Tabela 5, considera-se que estão associados à fluidez, à homogeneidade e à segregação das misturas. Isto está de acordo com Bomble e Kalvenes (1967), quando afirma que a fluidez é prejudicada conforme aumenta o atrito interno das misturas e está diretamente ligado a granulometria com relação à textura, ao tamanho e à forma dos grãos. A incorporação do aditivo em quantidades diferentes permite proporcionar, em diferentes graus, a dispersão do cimento, a desfloculação e a mobilidade.

A Figura 49 apresenta a ilustração de cada superfície formada no ensaio de Espalhamento das 27 misturas do EO, podendo-se considerar que, as misturas SCAA, quando tomadas sob diferentes condições de umidade, podem assumir diferentes condições de consistência e fluidez, implicando-se em diferentes tamanhos e formas.

Ainda na Figura 49, é possível observar as diferenças quanto aos formatos geométricos resultados do espalhamento de cada mistura, sendo que algumas se aproximaram quase que de um círculo perfeito, além de apresentarem nitidamente uma boa homogeneidade, sem a presença de segregação ou franjas d'água na circunferência do círculo, como é o caso da 5^a, 7^a, 9^a e 11^a misturas, por exemplo. O contrário também pode ser visualizado, por exemplo, nas misturas 1^a, 15^a, 16^a e 25^a

Figura 49 – Superfícies formadas pelos espalhamentos



Fonte: do Próprio Autor

Os valores dos ensaios de segregação por peneiramento, em termos de porcentagens do material retido sobre o material total, vertido nas peneiras de aberturas de malha de 4,76 mm e 2,38 mm, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Porcentagens retidas nas Peneiras no ensaio de segregação

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Retido # 4,76 mm (%)	3,3	24,2	7,2	2,4	1,3	2,4	1,0	15,7	1,9
Retido # 2,38 mm (%)	18,7	65,6	5,6	26,9	6,4	20,9	8,1	67,0	2,1
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Retido # 4,76 mm (%)	1,2	2,2	0,4	1,4	15,2	0,8	1,5	1,6	1,8
Retido # 2,38 mm (%)	4,4	25,4	11,2	8,5	39,2	7,7	8,7	12,4	12,8
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Retido # 4,76 mm (%)	68,2	40,9	54,6	38,8	14,8	2,2	6,6	4,8	6,2
Retido # 2,38 mm (%)	100,0	82,6	87,1	81,9	54,1	20,8	32,3	21,9	24,0

Fonte: do Próprio Autor

Com as porcentagens de material retido nas peneiras no ensaio de segregação, nota-se pela Tabela 6 que alguns valores extremos como, por exemplo, na 19^a mistura que ficou retido 100% do material na peneira com abertura de malha de 2,38 mm e na 12^a mistura onde a porcentagem de material retido foi de somente 0,4% na peneira com abertura de malha de 4,76 mm.

Estes resultados podem ser considerado coerentes, uma vez que a 19^a mistura foi a que recebeu a dosagem mais seca, ou seja, a sua composição foi que continha mais cimento (30%), menos água (36%) e menos aditivo (0,4%); ao passo que, a 12^a mistura foi a que recebeu a menor quantidade de cimento (20%) e a maior quantidade de aditivo superplastificante (0,8%).

Comportamento das misturas no estado fresco em função dos parâmetros de dosagens

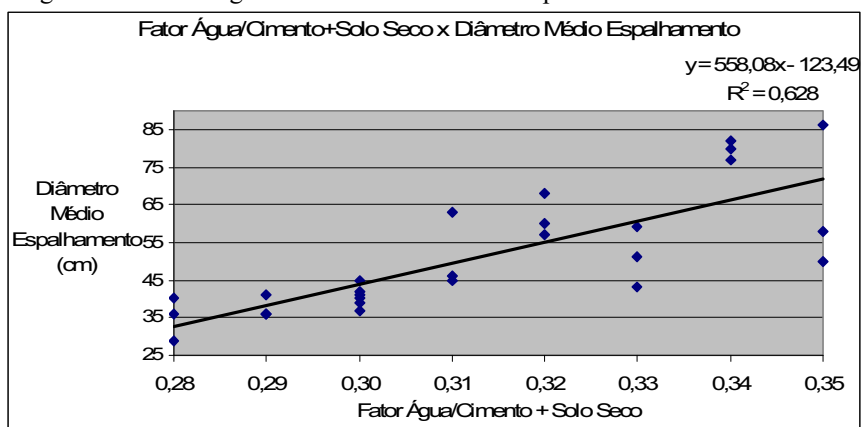
A partir de agora, serão apresentados alguns gráficos que visam correlacionar as propriedades das misturas juntamente com suas variáveis de dosagens. Na tentativa de encontrar os respectivos coeficientes de correlação, verificou-se que estes se enquadram de diversas maneiras, desde a inexistência de correlação, assim como correlação fraca, fraca a média, média a forte e forte. No entanto, mesmo que algumas correlações tenham apresentado

valores muito baixos, mostram indicativos importantes para análises físicas dos comportamentos em questão desta pesquisa.

Porém, cabe aqui ressaltar que existe uma diferença quanto as análises matemáticas e físicas envolvidas, uma vez que, as linhas de tendências dos gráficos são formadas, computacionalmente, em modelo matemático, apenas se preocupando em acompanhar os pontos que representam os valores das misturas e não levam em consideração o sentido físico dos comportamentos que as misturas apresentam em função das variáveis. Na tentativa de encontrar uma lei que melhor se ajustasse aos pontos dos resultados com as respectivas correlações, os ajustes são apresentados, dependendo do caso, na forma linearmente proporcional, exponencial, polinomial ou logaritmica.

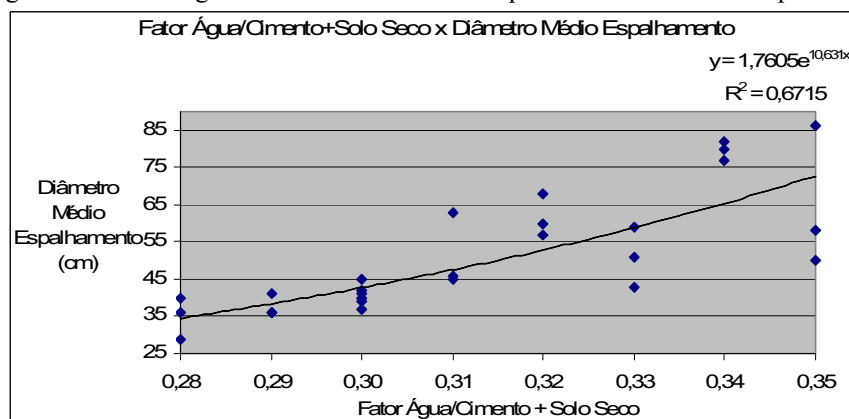
Através dos valores obtidos no ensaio de espalhamento tentou-se relacionar o escoamento livre com a água, o cimento e o solo; obteve-se as correlações como mostram as Figuras 50 a 55.

Figura 50 – Fator Água/Cimento+Solo Seco x Espalhamento – Análise Linear



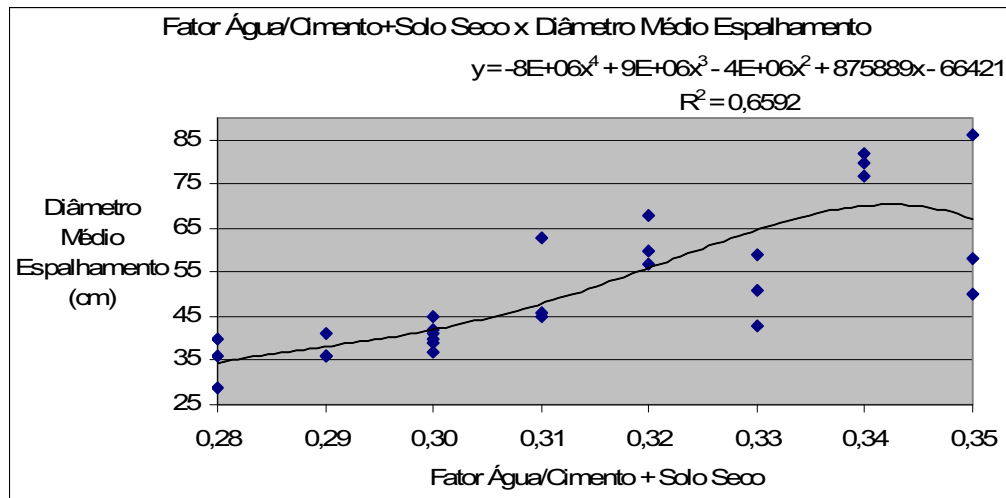
Fonte: do Próprio Autor

Figura 51 – Fator Água/Cimento+Solo Seco x Espalhamento – Análise Exponencial



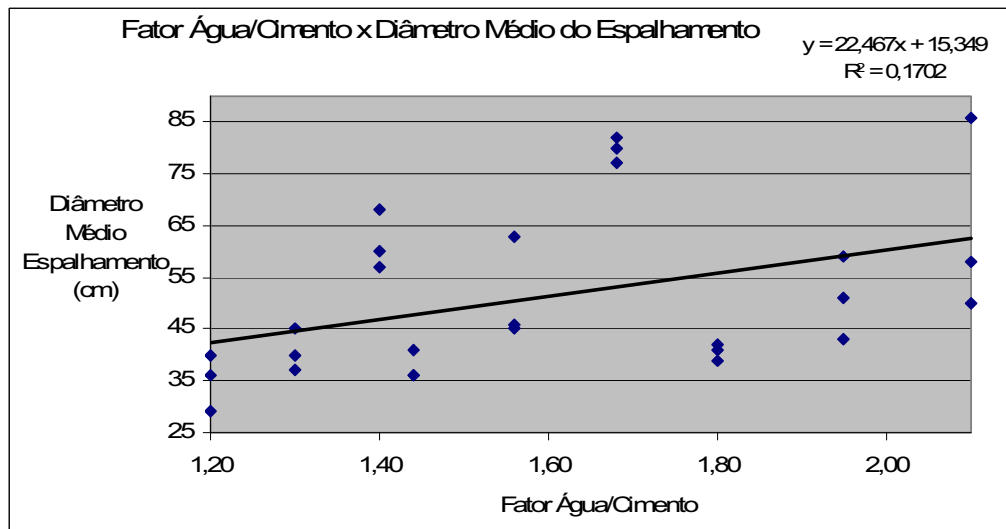
Fonte: do Próprio Autor

Figura 52 – Fator Água/Cimento+Solo Seco x Espalhamento – Análise Polinomial



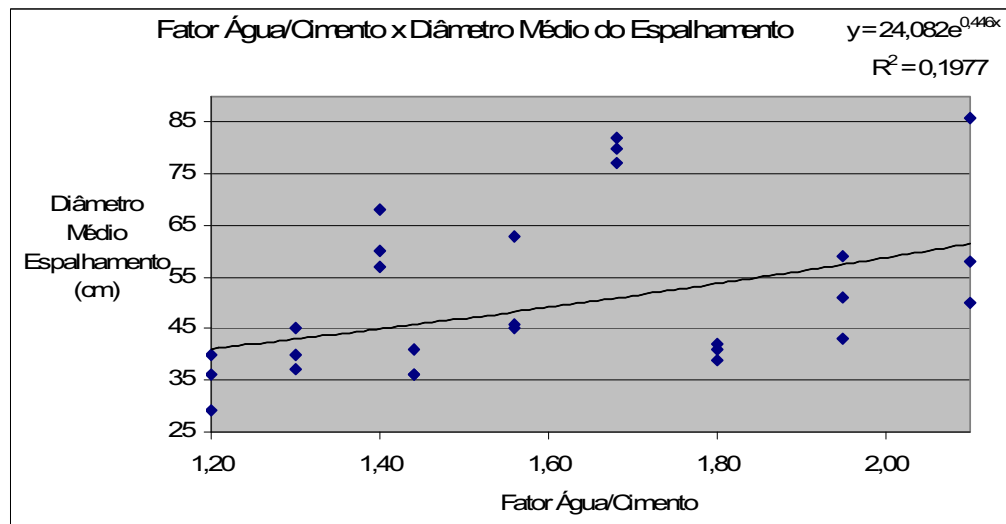
Fonte: do Próprio Autor

Figura 53 – Fator Água/Cimento x Espalhamento – Análise Linear



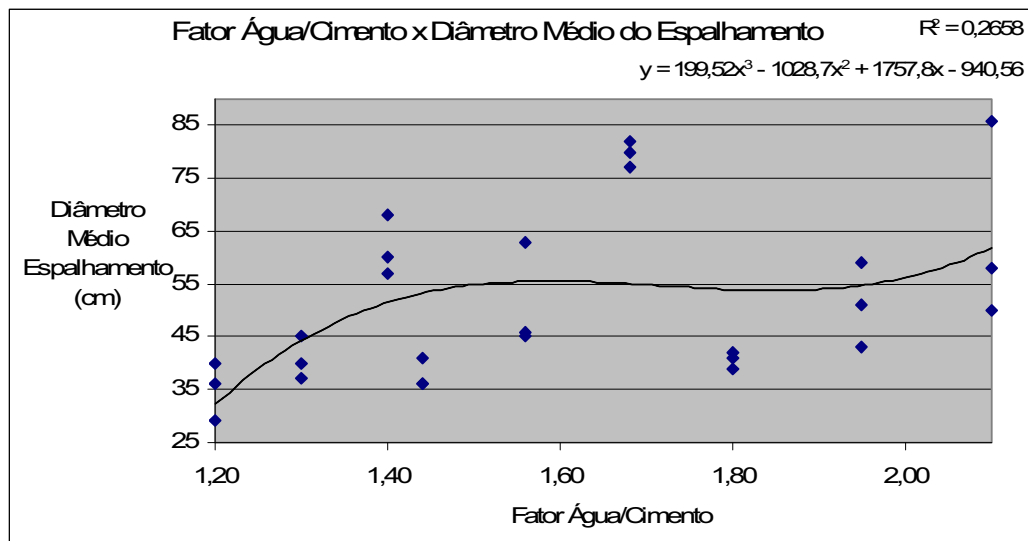
Fonte: do Próprio Autor

Figura 54 – Fator Água/Cimento x Espalhamento – Análise Exponencial



Fonte: do Próprio Autor

Figura 55 – Fator Água/Cimento x Espalhamento – Análise Polinomial



Fonte: do Próprio Autor

Como se pode observar, as Figuras 50 a 55 sugerem que o diâmetro médio de espalhamento aumenta tanto quando se aumenta também o fator água/cimento como o fator água/cimento + solo seco, o que já se era esperado. Isto pode ter ocorrido porque, assim como ocorre em concretos, o aumento da relação água/cimento acarreta na diminuição do poder ligante do cimento, e do poder de refrear o escoamento, indicando que o aumento de água na mistura gera maior fluidez, propriedade esta tão necessária ao material auto-adensável.

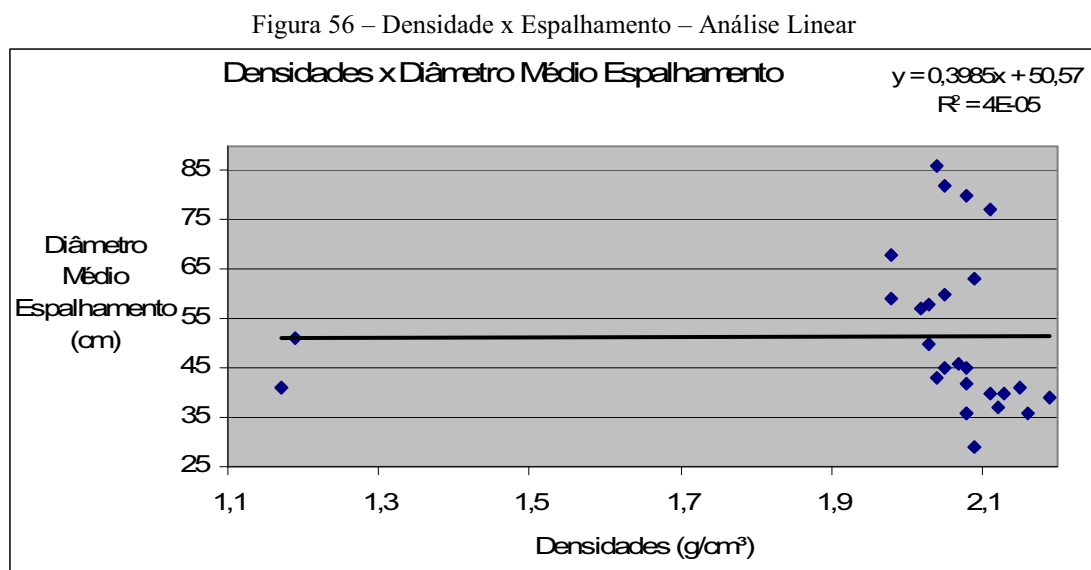
Comparando-se as Figuras 50, 51 e 52 pode-se observar que a análise exponencial foi a que melhor se ajustou aos pontos dos valores dos resultados, uma vez que apresentou maior valor de coeficiente de correlação dentre as três; porém, os três gráficos se apresentaram com valores de correlação considerados médio à forte. Observa-se pelas Figuras 50 e 51 que o valor do diâmetro de espalhamento tende a ser crescente com o aumento da relação água/cimento+solo; e a Figura 52 sugere um refreamento, o que pode estar mais próximo em termos do sentido físico, isso porque quanto mais se aumenta a quantidade de água na mistura mais fluída ela fica. No entanto, a Figura 52 dá o indicativo de um ponto ótimo para a fluidez ligada à homogeneidade da mistura, uma vez que chega um momento que o aumento da inserção de água na mistura pode ocasionar a segregação ou exsudação, provocando uma competição entre os materiais no momento do escoamento, pois estando os materiais desligados uns dos outros pode ocasionar que um impeça o escoamento do outro.

Observa-se também que dentre as Figuras 53, 54 e 55, a linha de tendência que mais se adequou para a interpretação do sentido físico é a polinomial. Porém, estes três últimos

gráficos apresentaram coeficientes de correlação baixos em se tratando de modo global, correlacionando as 27 misturas, indicando que, provavelmente existe restrições na influência de variáveis, pois, percebe-se que há formação de grupos de pontos, concluindo-se que a proximidades desses pontos indicam correlações altas entre si e num intervalo em que os fatores água/cimento e água/cimento+solo possuem valores próximos, deixando o indicativo de que se analisarmos cada grupo de pontos a correlação será maior entre eles.

Estes resultados demonstram que a variação da trabalhabilidade, em termos de escoamento livre, está condicionada à variação da relação água/cimento e água/cimento+solo; e que a variação da porcentagem de água com relação ao cimento varia em taxa menor do que com a relação água/cimento+solo, de modo a se ter um indicativo de que é possível melhorar a resistência mecânica e a absorção, sem trazer grandes prejuízos às condições de trabalhabilidade, visto que a variação está em função da soma das duas quantidades de finos (solo+cimento). Isto está em acordo com o EP que indica a necessidade de uma quantidade maior de água para um aumento da relação água/cimento+finos do solo.

No intuito de relacionar o escoamento livre durante o ensaio de espalhamento com a densidade das misturas do EO, se obteve os resultados entre a densidade das misturas com seus respectivos valores de diâmetros de espalhamento, como mostra a Figura 56.

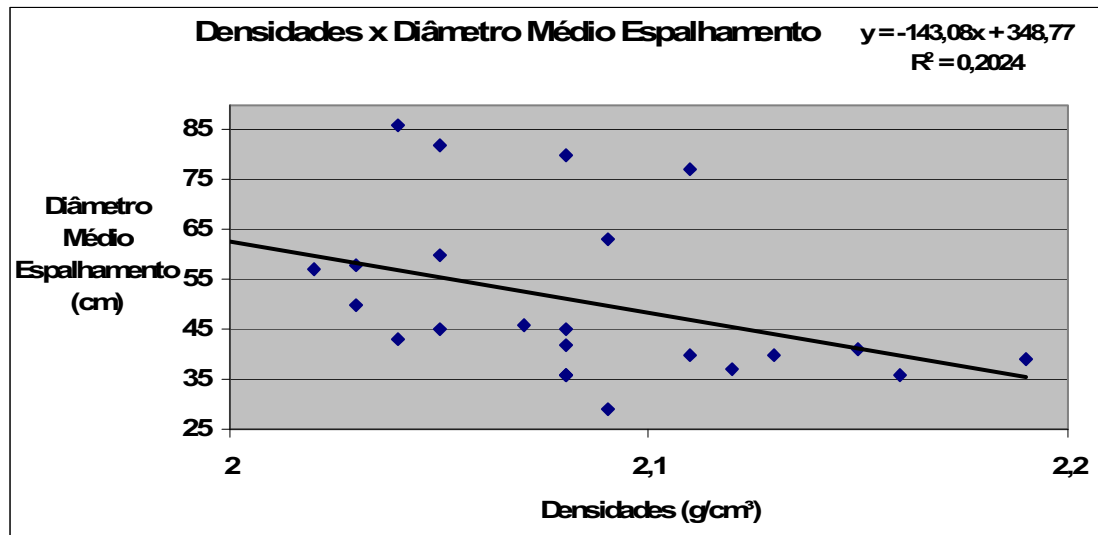


Fonte: do Próprio Autor

Diante da Figura 56, observa-se que os valores destas misturas nessa relação apresentaram ausência de correlação. No entanto, nota-se no gráfico, dois pontos bem afastados dos demais,

o que sugere que estejam interferindo nesta ausência de correlação, uma vez que não é comum o fato do valor do diâmetro de espalhamento aumentar com o aumento da densidade. Portanto, com o intuito de analisar a diferença, optou-se por ignorar esses dois pontos, gerando um novo gráfico, o qual é apresentado na Figura 57.

Figura 57 – Densidade x Espalhamento – Análise Linear



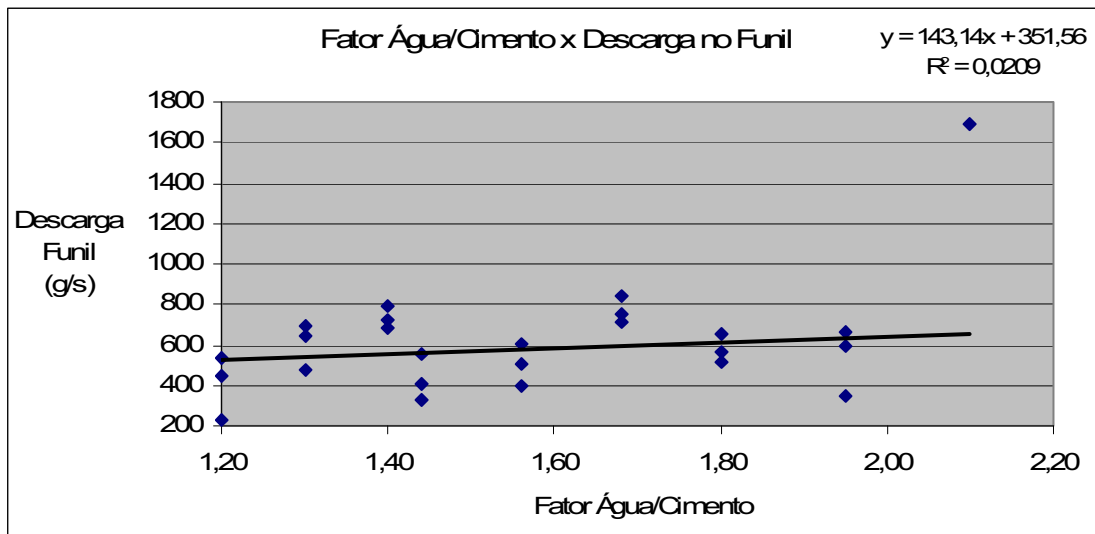
Fonte: do Próprio Autor

Observando agora a Figura 57, nota-se que a correlação aumentou em relação a Figura 56, percebendo-se que a coerência ocorre com a diminuição dos valores dos diâmetros de espalhamento conforme aumenta os valores das densidades nas misturas, fato este que pode ocorrer tendo em vista que a diminuição da densidade favorece o escoamento, considerando que o aumento da densidade pode influenciar na ocorrência de aglutinação e floculação dos grãos de solo e cimento, principalmente quando estes entram em contato com pouca quantidade de água.

Esta discussão vem de acordo com o texto de Lima (1981), quando afirmou que a dispersão e a floculação das partículas de solo são importantes para o solo estabilizado, uma vez que a dispersão ocasiona a homogeneidade das misturas e a floculação gera uma resistência à deformação.

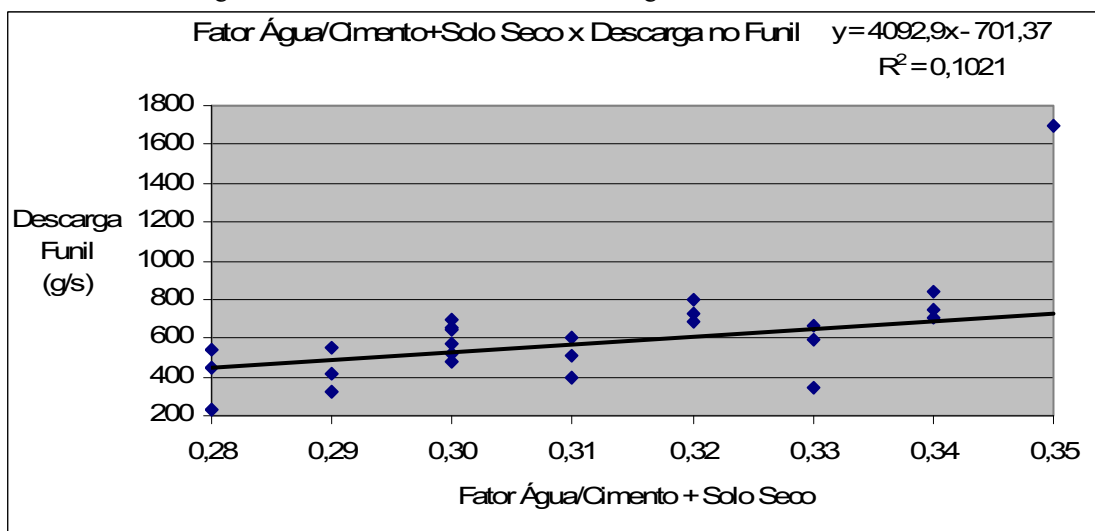
As Figuras 58 e 59 buscam apresentar as correlações entre o fator água/cimento e o fator água/cimento + solo seco com relação à descarga das misturas no funil, através da análise das velocidades de passagem, caracterizado como escoamento confinado.

Figura 58 – Fator a/c x Descarga Funil – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 59 – Fator a/c + solo seco x Descarga Funil – Análise Linear



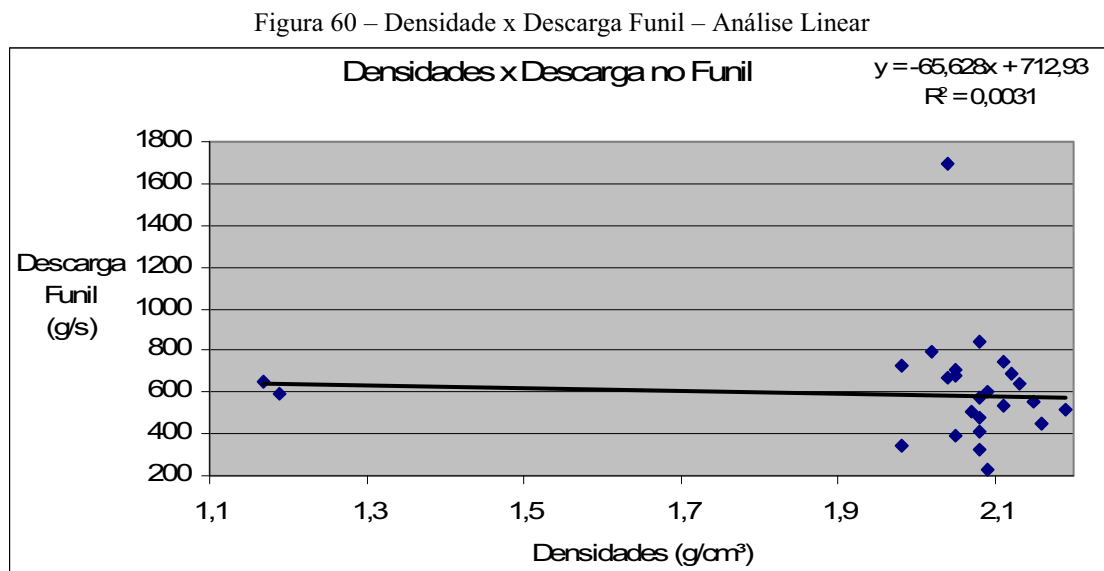
Fonte: do Próprio Autor

Com uma relação de proporcionalidade nas Figuras 58 e 59, observa-se que os valores das misturas nessas relações apresentaram valores muito baixos, dando um indicativo de ausência de correlação. Porém, observa-se também um único ponto distante dos demais, que pode ter influenciado nesta aparente ausência de correlação, uma vez que, observa-se que os demais pontos se aproximam das linhas de tendências dos gráficos, mais uma vez formando grupos de pontos. No entanto, mesmo com a correlação apresentando-se baixa do ponto de vista matemático, é visível a proporcionalidade na linha de tendência do gráfico e mesmo na equação da reta, que a velocidade de passagem das misturas pelo funil aumenta com o do fator água/cimento ou água/cimento+solo seco.

Assim, pode-se interpretar que o fator água/cimento interfere diretamente na fluidez da mistura e indica que o aumento da relação água/cimento pode contribuir para a maior fluidificação da mistura, mas também que, para o caso de escoamento confinado pode induzir a maiores perturbações e a concorrência entre os materiais se a mistura não estiver com boa homogeneidade e ocorrendo segregação; além do fato que o aumento da água frente ao cimento diminui o poder de coesão no estado fresco dado pelo cimento e a viscosidade, induzindo-se a choques intergranulares e atrito interno.

Isso vem de encontro com o texto de Bombléd e Kalvenes (1967), quando afirmou que a coesão e o atrito interno interferem na viscosidade das misturas, gerando resistência ao escoamento, sendo que a velocidade de escoamento é determinada pelos efeitos que a umidade proporciona às massas.

A Figura 60 busca apresentar as correlações entre a densidade e a descarga das misturas no funil, através da análise das velocidades de passagem, caracterizado como escoamento confinado.



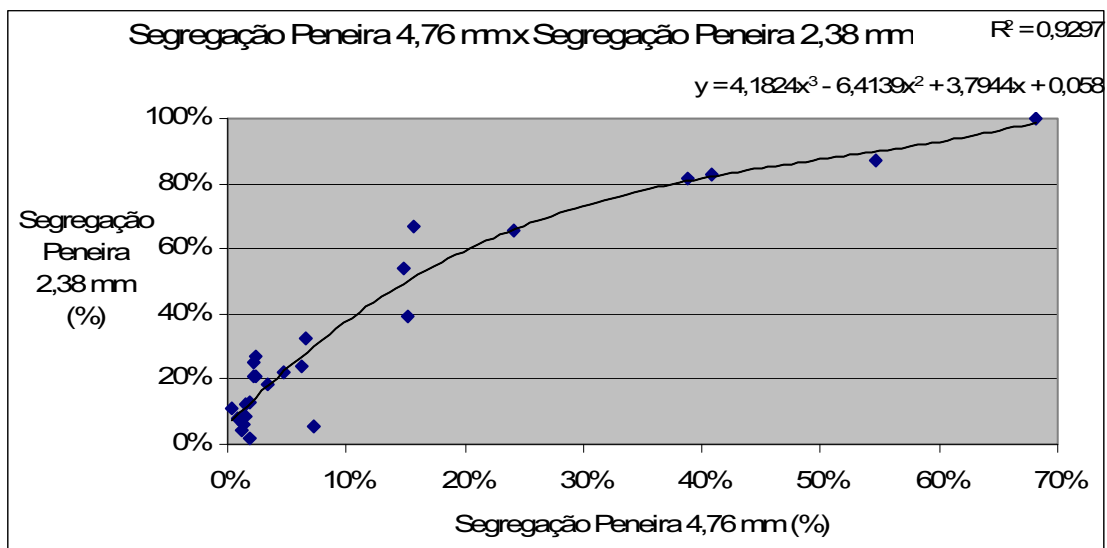
Fonte: do Próprio Autor

De acordo com a Figura 60, observa-se visualmente que os valores das misturas nessas relações apresentaram ausência de correlação. No entanto, observa-se também um aglutinado de pontos num determinado espaço do gráfico, supondo que ali encontram-se os valores representativos.

Apesar da ausência de correlação na Figura 60, observa-se que a descarga no funil diminui com o aumento da densidade, e os pontos mais afastados da linha de tendência pode sugerir a presença de flocos na mistura, podendo isto ter influenciado na passagem da mistura pelo funil; porém, o aumento da viscosidade pode induzir a maiores perturbações no escoamento confinado.

As Figuras 61 apresenta a correlação entre os valores retidos nas peneiras 4,76 mm e 2,38 mm, para uma análise polinomial.

Figura 61 – Segregação - Peneira 4,76 mm x Peneira 2,38 mm – Análise Polinomial



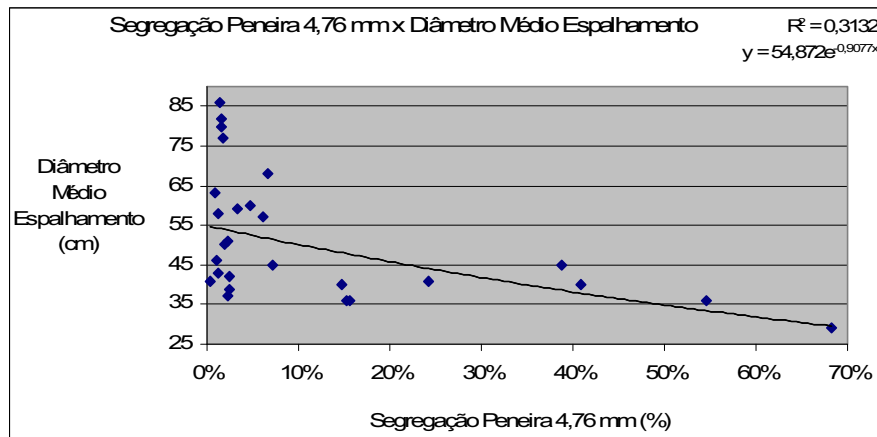
Fonte: do Próprio Autor

Observando a Figura 61, a qual demonstrara forte correlação entre os valores retidos nas peneiras, nota-se que a curva polinomial se ajustou bem aos pontos do gráfico e, com elas também se pôde comprovar a coerência entre os resultados, uma vez que quanto maior for o percentual retido na peneira 4,76 mm, maior também deve ser o percentual retido na peneira 2,38 mm.

A segregação apresentada pelo material pode ser decorrente da deficiência dos finos em reter a água e, também, devido à floculação em face da hidratação do cimento, e da atividade físico-química das argilas, tendo o aditivo um papel importante de contribuir para a dispersão do material por ação estérica eletrostática, fornecendo a melhor interpretação entre os constituintes.

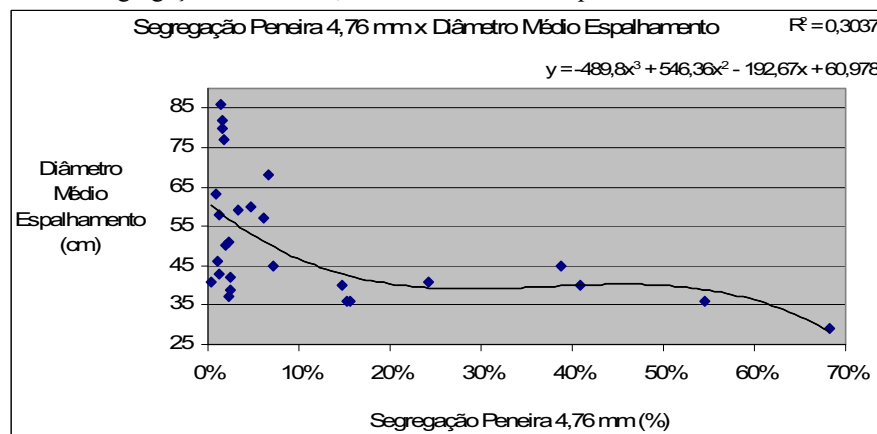
Considerou-se importante avaliar as possíveis correlações entre os valores obtidos nos ensaios de segregação e os demais ensaios do estado fresco. Neste sentido, tem-se então, através das Figuras 62 a 64, as possíveis correlações entre os resultados da segregação com peneira de malha 4,76 mm e os de espalhamento em escoamento livre.

Figura 62 – Segregação - Peneira 4,76 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Exponencial



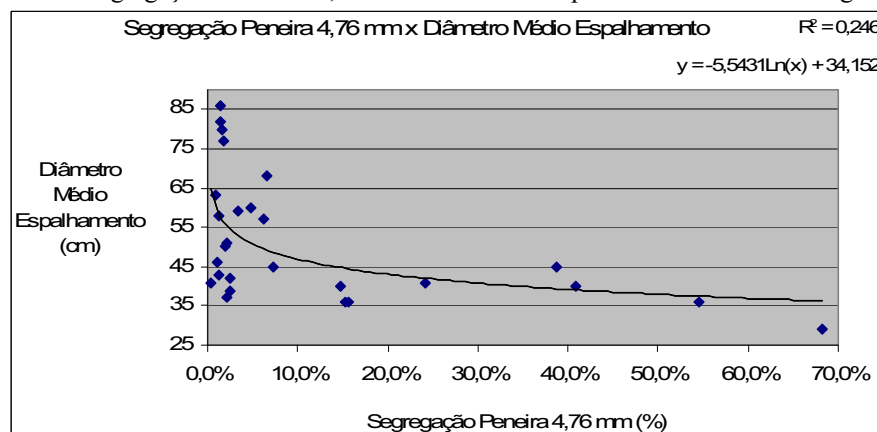
Fonte: do Próprio Autor

Figura 63 – Segregação - Peneira 4,76 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Polinomial



Fonte: do Próprio Autor

Figura 64 – Segregação - Peneira 4,76 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Logarítmica

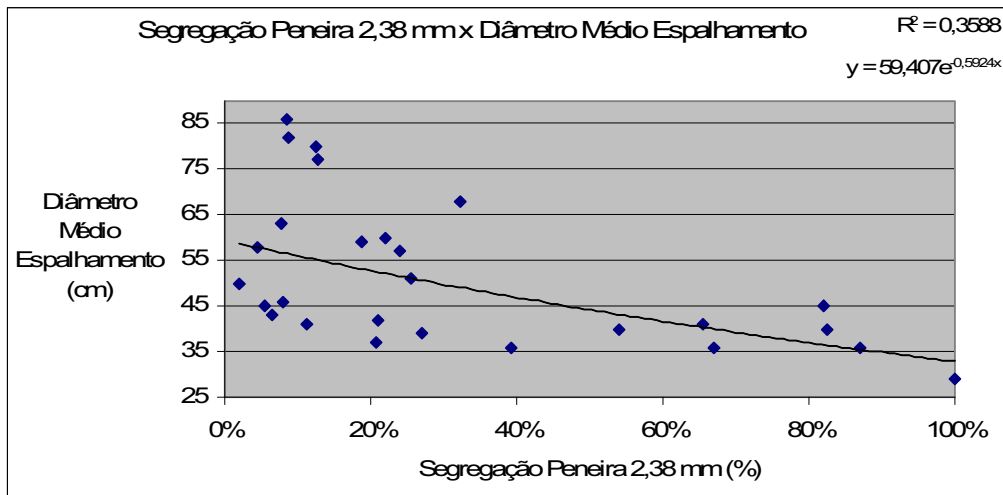


Fonte: do Próprio Autor

Pode-se perceber, observando as Figuras 62 a 64 que há uma correlação fraca entre os valores da segregação de peneira 4,76 mm e o diâmetro de espalhamento. Mesmo assim, é visível o decréscimo do valor do diâmetro de espalhamento conforme cresce a porcentagem de material retido na peneira. Estes resultados são condizentes com o texto de Neville (1997), quando afirmou que uma forma de visualizar a segregação é quando os materiais envolvidos na mistura tendem a apresentar mais de uma fase ou quando ocorre qualquer separação entre os materiais e que a segregação, embora seja visível, não é fácil de ser mensurada.

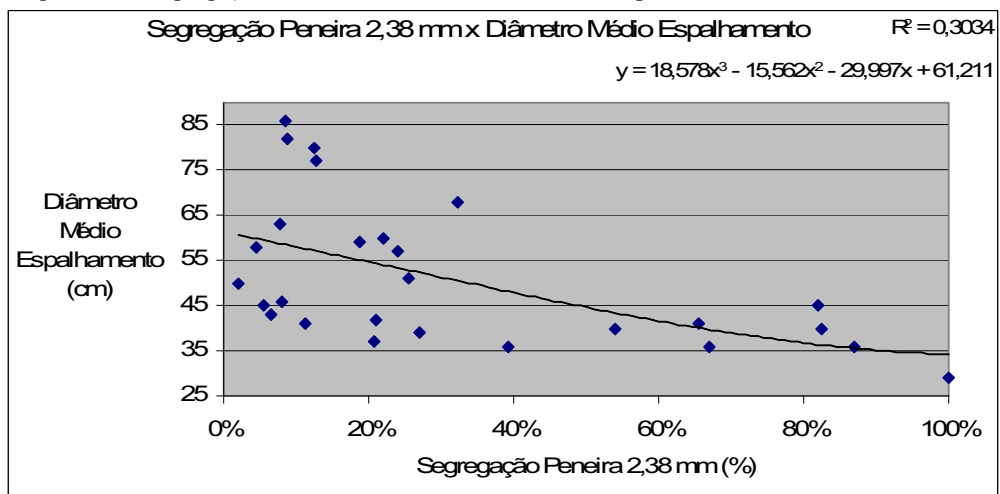
De maneira análoga, as Figuras 65 a 67 mostram as possíveis correlações entre os resultados da segregação com peneira de malha 2,38 mm e espalhamento em escoamento livre.

Figura 65 – Segregação – Peneira 2,38 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Exponencial



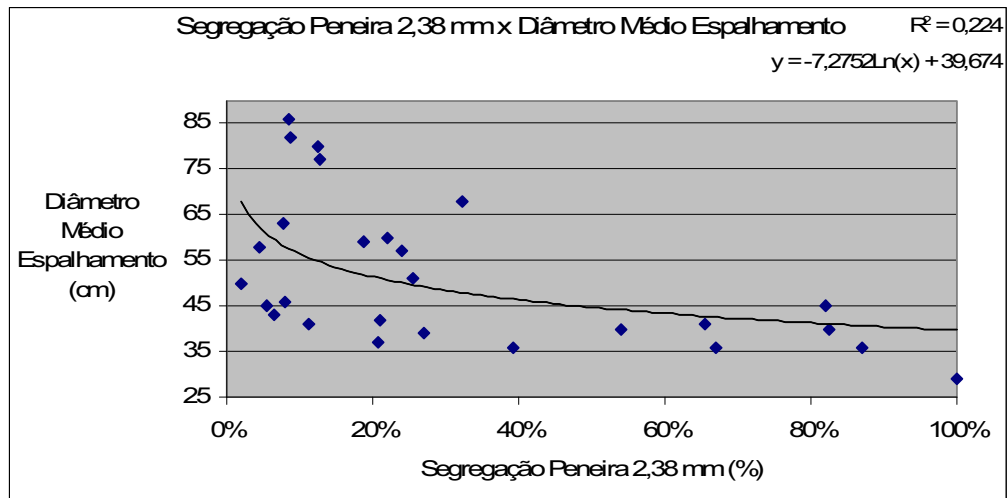
Fonte: do Próprio Autor

Figura 66 – Segregação – Peneira 2,38 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Polinomial



Fonte: do Próprio Autor

Figura 67 – Segregação – Peneira 2,38 mm x Diâmetro Espalhamento – Análise Logarítmica



Fonte: do Próprio Autor

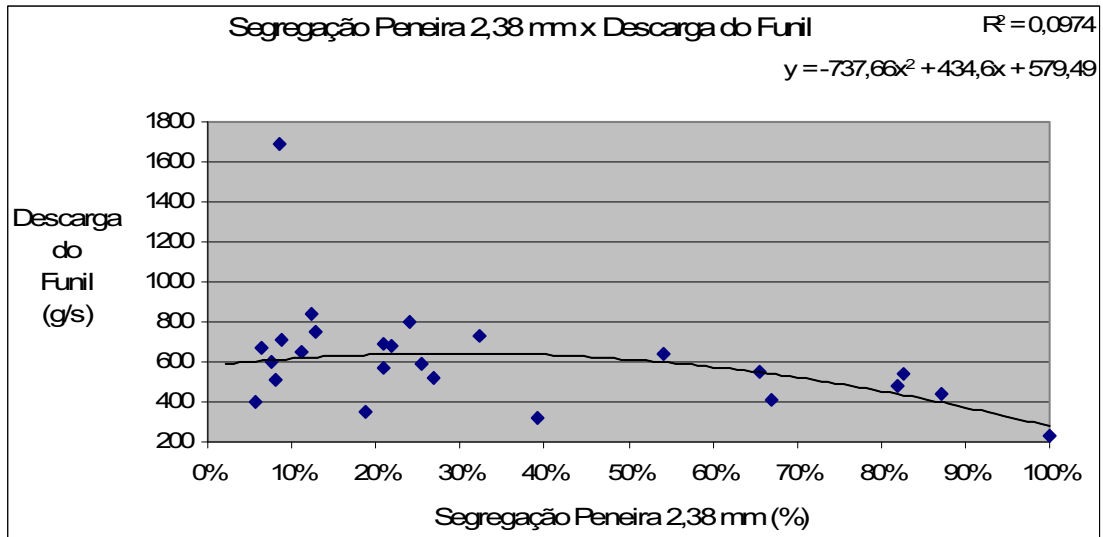
Pode-se perceber, observando as Figuras 65 a 67 que há também, assim como para o caso da peneira 4,76 mm, uma correlação fraca à média entre os valores da segregação de peneira 2,38 mm e o diâmetro de espalhamento, sendo visível o decréscimo do valor do diâmetro de espalhamento conforme cresce a porcentagem de material retido na peneira.

A superfície de espalhamento pode ser um indicativo da condição de trabalhabilidade do material e sugere que o seu aumento em diâmetro pode implicar em condição favorável para a trabalhabilidade de misturas auto-adensáveis. Não implica, porém, que o seu crescimento de modo generalizado contribui para o aumento do valor de sua resistência, estando esta sujeita a outros fatores, como a quantidade de água e de cimento.

Possivelmente, o aumento da segregação pela formação de flocos se dá conforme o texto de Lima (1981), quando afirmou que a compressão da dupla camada difusa, pelo aumento do pH, gera uma condição ideal à floculação das partículas em função da menor repulsão entre os grãos e da atração gravitacional entre eles, e com o texto de Neville (1997), quando afirmou que o fenômeno da exsudação ocorre quando a água da mistura sobra da hidratação com o cimento e sobe para a superfície em função de ser o material mais leve da composição. Dessa maneira, a água livre provoca mais competitividade entre os componentes da mistura do que fluidificação.

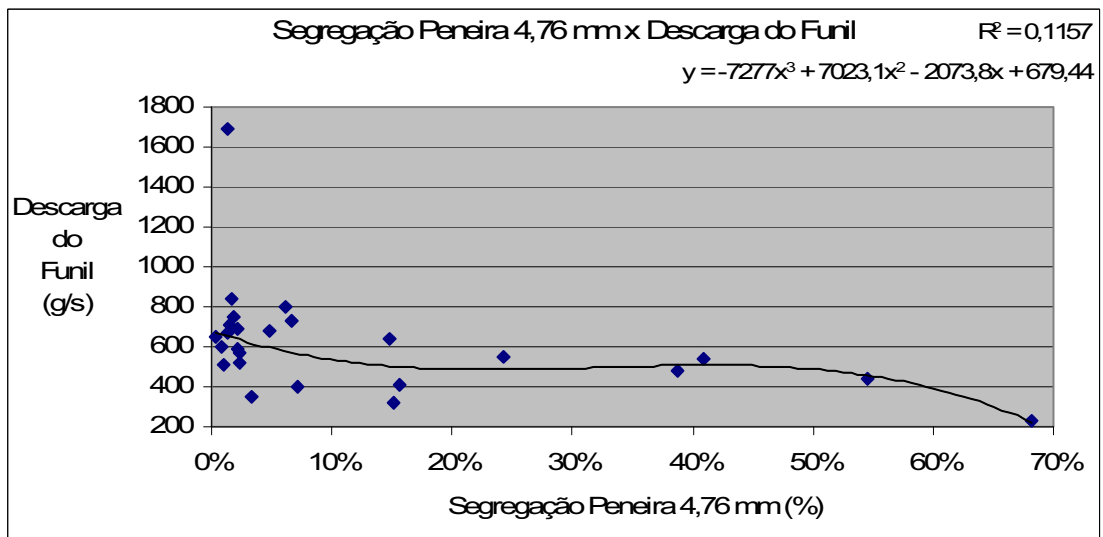
Da mesma forma, as Figuras 68 e 69 procuram buscar correlações entre os resultados de segregação e de escoamento confinado, relacionando os valores obtidos no ensaio de segregação com as peneiras 2,38 mm e 4,76 mm com os valores de descarga no funil.

Figura 68 – Segregação – Peneira 2,38 mm x Descarga do Funil – Análise Polinomial



Fonte: do Próprio Autor

Figura 69 – Segregação – Peneira 4,76 mm x Descarga do Funil – Análise Polinomial



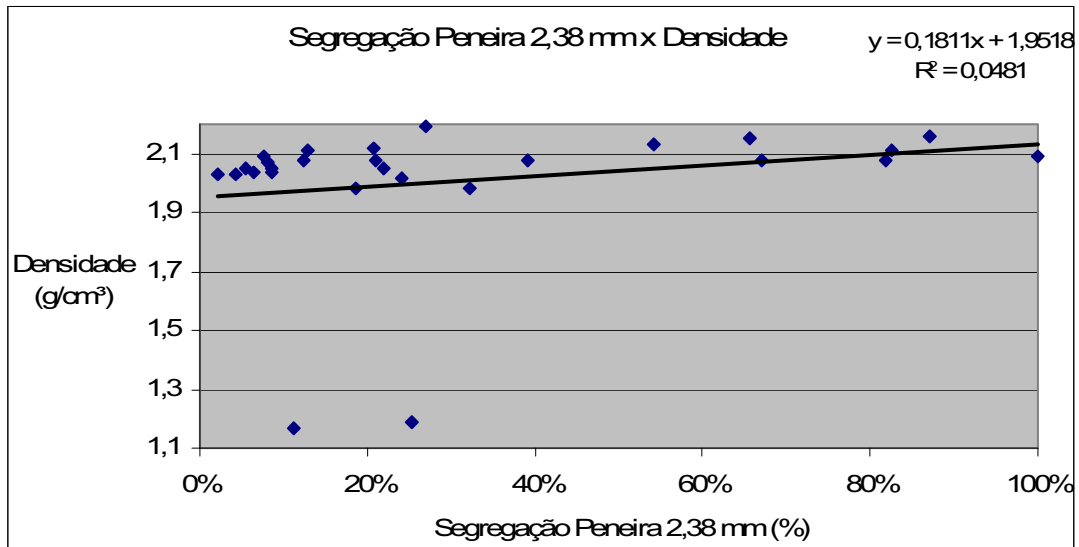
Fonte: do Próprio Autor

Observa-se nas Figuras 68 e 69 que ocorre a inexistência de correlação entre as variáveis, o que pode ter ocorrido em função da análise global, levando em conta os 27 pontos do gráfico, sendo que um deles encontra-se bem mais afastado dos demais. Mesmo assim, pode-se observar nestas figuras, do mesmo modo que no caso do escoamento livre, no escoamento confinado há uma diminuição da velocidade de passagem das misturas pelo funil com o aumento da segregação. Isso sugere que a segregação implica no aumento da competitividade

e nas influências do fluxo do material, podendo contribuir a uma leve diminuição nas condições do escoamento pela descarga no funil.

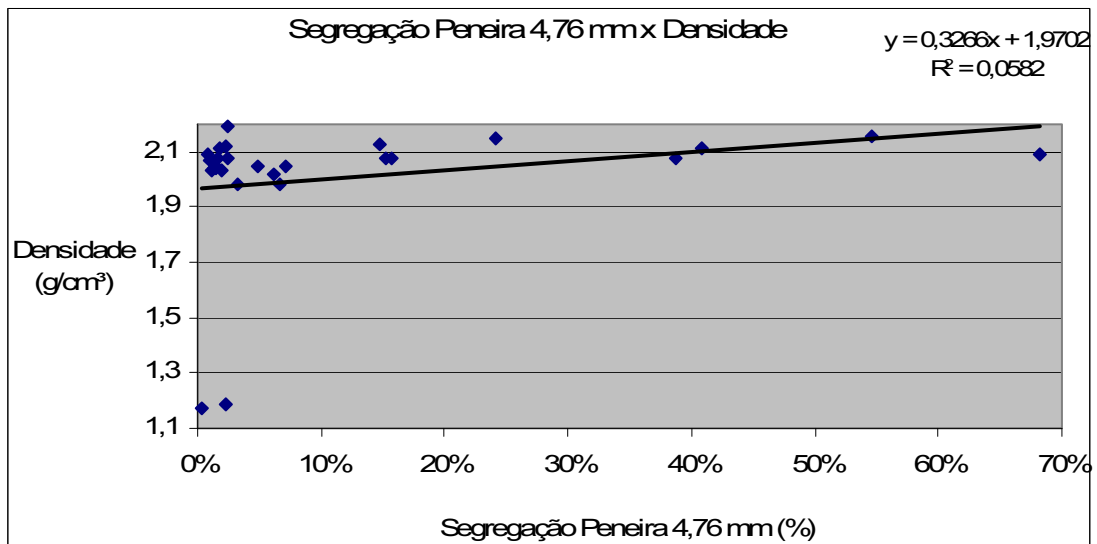
Buscou-se também associar os valores dos resultados da segregação com os valores obtidos nos valores de densidade, conforme ilustram as Figuras 70 e 71.

Figura 70 – Segregação – Peneira 2,38 mm x Densidade – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 71 – Segregação – Peneira 4,76 mm x Densidade – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

De acordo com as Figuras 70 e 71, observa-se o aumento proporcional da densidade com o aumento da porcentagem de material retido nas peneiras durante o ensaio de segregação mesmo ocorrendo a inexistência de correlação entre as variáveis, que pode ter sido gerada em

função da existência de dois pontos bem afastados dos demais. Estes resultados condizem com o texto de Goodary et al. (2012), quando afirmam que os finos do solo contribuem para a coesão, proporcionando densidade ao material, onde a segregação pode estar induzindo o material mais concentrado e coeso.

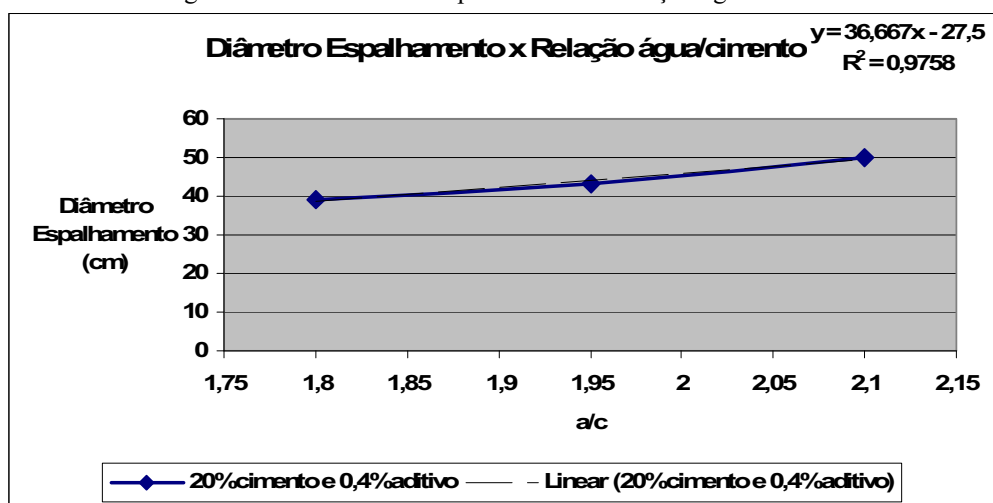
4.2.1.1 Influência da Relação água/cimento no Espalhamento para Situações Particulares

Neste item foram tomadas algumas situações particulares, de modo a se diminuir as interferências entre variáveis dos valores globais com as 27 misturas, com misturas de diferentes famílias, optando agora por se trabalhar com misturas de classes famílias com variáveis comuns entre si, de modo a se obter melhores correlações, como as apresentadas à seguir.

a) Influência da Relação água/cimento no Espalhamento

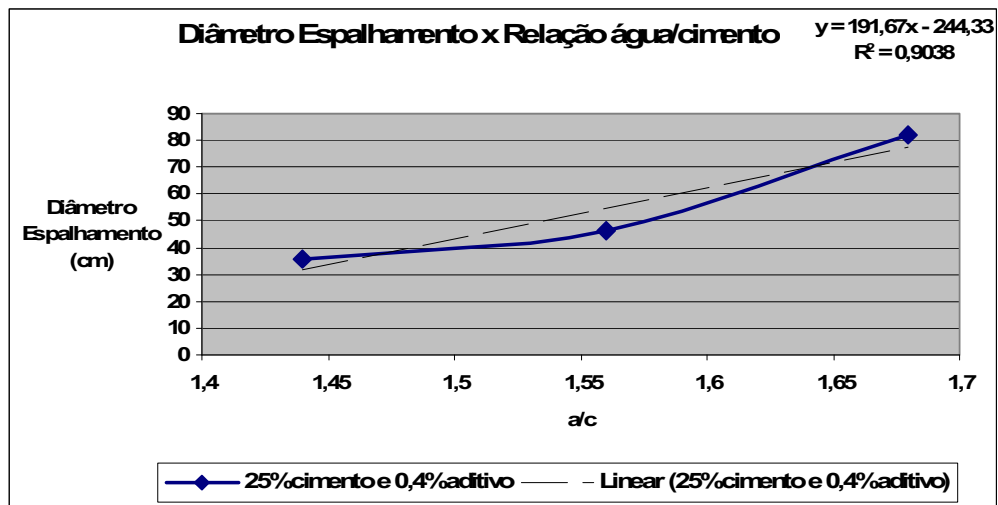
A seguir, serão apresentados nas Figuras 72 a 74 a influência do fator água/cimento nos valores dos diâmetros de espalhamento, fixando-se o aditivo superplastificante e variando-se as dosagens de cimento.

Figura 72 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento



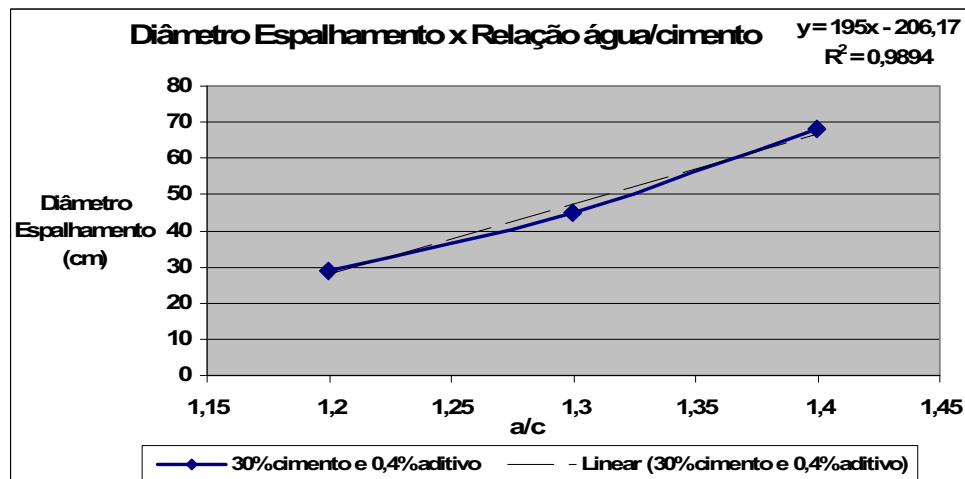
Fonte: do Próprio Autor

Figura 73 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento



Fonte: do Próprio Autor

Figura 74 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento



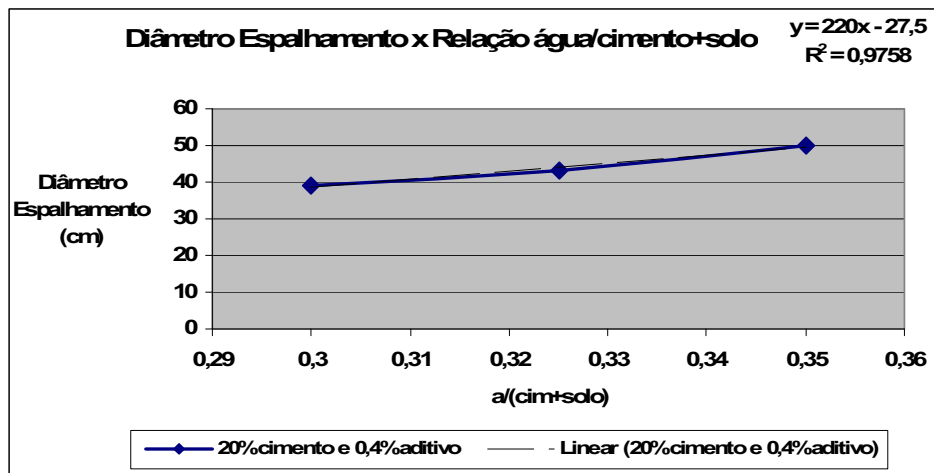
Fonte: do Próprio Autor

As Figuras 72 a 74 mostram que existe uma correlação alta entre os grupos de valores de diâmetro de espalhamento e o fator água/cimento, mesmo variando-se os valores de cimento inserido nas misturas, com o intuito de visualizar as curvas das famílias de composições das misturas que se diferenciam pela quantidade de cimento incorporada, porém, possuem as mesmas quantidades para os valores de superplastificante.

b) Influência da Relação água/cimento+solo no Espalhamento

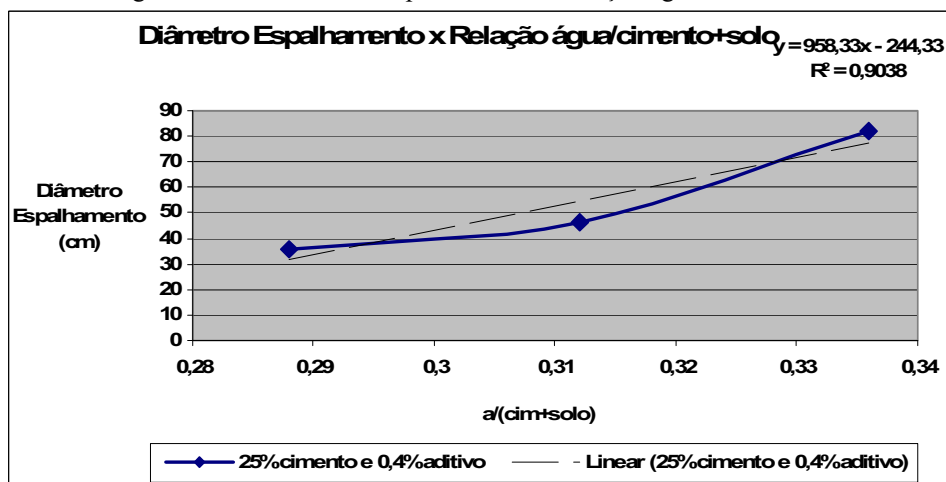
A seguir, serão apresentados nas Figuras 75 a 77 a influência do fator água/cimento+solo nos valores dos diâmetros de espalhamento, fixando-se o aditivo superplastificante e variando-se as dosagens de cimento.

Figura 75 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento+solo



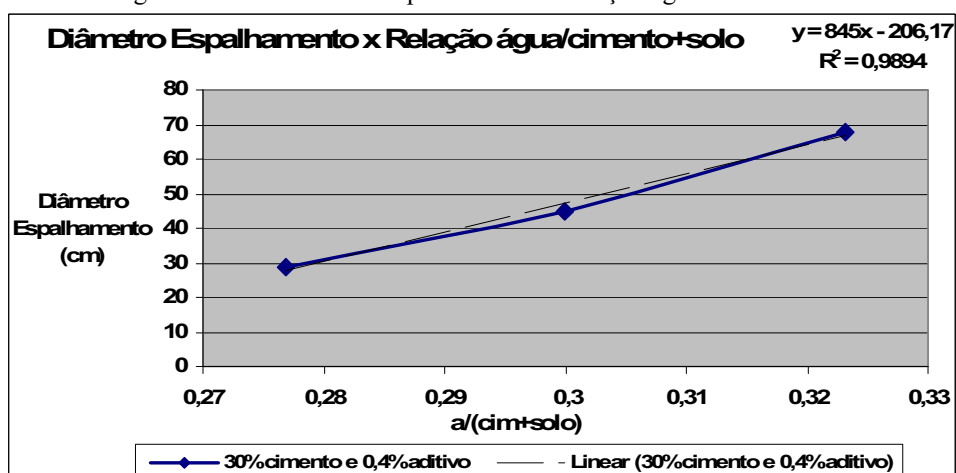
Fonte: do Próprio Autor

Figura 76 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento+solo



Fonte: do Próprio Autor

Figura 77 – Diâmetro de Espalhamento x Relação água/cimento+solo



Fonte: do Próprio Autor

As Figuras 75 a 77 mostram que existe uma correlação alta entre os grupos de valores de diâmetro de espalhamento e o fator água/cimento+solo, mesmo variando-se os valores de cimento inserido nas misturas, com o intuito de visualizar as curvas das famílias de

composições das misturas que se diferenciam pela quantidade de cimento incorporada, porém, possuem as mesmas quantidades para os valores de superplastificante.

4.2.2 Resultados e Discussões do Material no Estado Endurecido em função da variação dos constituintes em relação ao solo

A Tabela 7 apresenta os valores médios de densidades nos cilindros, em g/cm³, avaliados quando no estado fresco para as misturas, juntamente com o respectivo desvio padrão.

Tabela 7 – Densidades dos CPs (g/cm³)

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Densidades Médias nos Cilindros (g/cm ³)	1,98	2,15	2,05	2,19	2,04	2,08	2,07	2,08	2,03
Desvio Padrão	0,05	0,06	0,04	0,08	0,06	0,07	0,02	0,04	0,04
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Densidades Médias nos Cilindros (g/cm ³)	2,03	1,19	1,17	2,04	2,08	2,09	2,05	2,08	2,11
Desvio Padrão	0,04	0,05	0,08	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Densidades Médias nos Cilindros (g/cm ³)	2,09	2,11	2,16	2,08	2,13	2,12	1,98	2,05	2,02
Desvio Padrão	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,01	0,04	0,07	0,04

Fonte: do Próprio Autor

A Tabela 8 apresenta os resultados de Resistência Mecânica à Compressão Simples e Diametral, para os corpos de provas das respectivas misturas aos 28 dias de cura.

Tabela 8 – Resistências à Compressão dos CPs das misturas (MPa)

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Resistências Médias Axial (MPa)	3,38	5,60	4,54	4,43	3,12	3,47	3,38	4,45	2,42
Desvio Padrão	0,18	0,30	0,07	0,32	0,02	0,70	0,18	0,39	0,11
Resistências Médias Diametral (MPa)	0,50	0,84	0,75	0,83	0,43	0,43	0,50	0,96	0,47
Desvio Padrão	0,06	0,03	0,06	0,02	0,05	0,09	0,06	0,07	0,06
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Resistências Médias Axial (MPa)	2,01	2,47	2,70	2,82	4,23	3,41	2,88	4,47	3,61
Desvio Padrão	0,35	0,19	0,26	0,08	0,54	0,46	0,16	0,17	0,47
Resistências Médias Diametral (MPa)	0,35	0,42	0,56	0,38	0,60	0,79	0,52	0,83	0,81
Desvio Padrão	0,01	0,04	0,05	0,02	0,52	0,11	0,02	0,01	0,04
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Resistências Médias Axial (MPa)	6,28	4,40	7,51	5,61	5,56	5,83	3,90	3,81	3,48
Desvio Padrão	0,52	0,43	0,11	0,14	1,39	0,27	0,13	0,04	0,38
Resistências Médias Diametral (MPa)	1,4	1,06	1,72	1,09	1,12	1,46	0,65	0,80	0,66
Desvio Padrão	0,09	0,08	0,03	0,13	0,03	0,08	0,01	0,03	0,08

Fonte: do Próprio Autor

Observando os resultados da Tabela 8 percebe-se que todas as misturas apresentaram valores de resistência à compressão axial que atendem a NBR 8491 (ABNT, 1984), a qual prescreve que a resistência média dos tijolos de solo-cimento não deve ser inferior a 2,0 MPa. Com os valores apresentados nas Tabelas 7 e 8, pode-se considera-se que as misturas apresentaram valores de densidade e resistência mecânica que enquadram as peças como perfis leves e com resistência mecânica adequada.

A Tabela 9, por sua vez, apresenta os valores médios dos resultados dos ensaios de absorção de água nos cilindros.

Tabela 9 – Média de Absorção de Água nos CPs cilíndricos (%)

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Média Absorção de Água (%)	13,7	10,7	15,1	21,0	20,0	10,4	9,5	19,5	7,9
Desvio Padrão	0,22	0,73	0,26	1,06	0,86	0,37	0,54	0,37	1,15
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Média Absorção de Água (%)	22,8	3,8	8,5	6,2	5,8	4,7	1,5	4,3	2,0
Desvio Padrão	0,80	0,42	0,66	0,70	0,92	0,21	0,16	0,12	0,65
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Média Absorção de Água (%)	3,6	4,7	5,2	6,4	5,3	5,3	6,2	5,5	4,0
Desvio Padrão	0,17	0,25	0,17	0,33	0,19	0,12	0,12	0,17	0,22

Fonte: do Próprio Autor

Do mesmo modo que para os valores de Resistência à Compressão Mecânica Axial, observando os resultados da Tabela 9 percebe-se que, com exceção da 4^a e 10^a mistura, todas as demais apresentaram valores de absorção de água que satisfazem a NBR 8491 (ABNT, 1984), a qual prescreve que a absorção ensaiada conforme a NBR 8492 (ABNT, 1984) não deve apresentar absorção média maior que 20%, além do fato que a grande maioria das misturas apresentaram valores bem abaixo deste estipulado pela norma.

A Tabela 10 apresenta os valores médios referentes à quantidade de água evaporada dos CPs cilíndricos, com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 10 – Média de água evaporada nos CPs

Mistura	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
Média Água Evaporada (%)	8,0	3,7	9,0	3,2	8,4	6,4	6,2	8,5	3,5
Desvio Padrão	2,28	0,42	0,80	0,73	1,77	3,53	1,84	2,67	1,56
Mistura	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a	14 ^a	15 ^a	16 ^a	17 ^a	18 ^a
Média Água Evaporada (%)	10,7	84,0	84,6	8,8	7,7	6,6	5,4	7,8	6,6
Desvio Padrão	0,67	4,76	13,03	2,27	1,15	1,5	2,39	2,30	2,33
Mistura	19 ^a	20 ^a	21 ^a	22 ^a	23 ^a	24 ^a	25 ^a	26 ^a	27 ^a
Média Água Evaporada (%)	10,4	8,7	9,6	10,2	7,1	5,9	12,3	8,6	10,2
Desvio Padrão	2,47	0,79	1,08	1,06	2,83	0,74	1,62	2,81	2,58

Fonte: do Próprio Autor

Com base nos resultados da Tabela 10 percebe-se que, as misturas do EO apresentaram valores baixos de evaporação de água durante o processo de cura e secagem, com uma média geral de 13%, com exceção da 11ª e 12ª misturas que apresentaram valores de 84% e 84,6%, respectivamente. Estes resultados altos de evaporação de água pode ter ocorrido devido ao fato de nas misturas 11ª e 12ª o teor de cimento adicionado foi o mais baixo (20%), e ainda o teor de 39% de água e o maior teor de aditivo (0,8%) fez com que essa quantidade de cimento fosse insuficiente para reter a água e esta viesse a sobrar na mistura, causando a sua evaporação. Isto vem confirmar o comportamento e as hipóteses adotadas no EP.

A Tabela 11 apresenta os valores das retrações nos CPs cilíndricos para as 27 misturas do EO.

Tabela 11 – Média das retrações nos CPs

Mistura	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Médias Retrações (%)	8,5	6,0	7,4	7,6	8,2	6,7	6,7	7,1	6,6
Desvio Padrão	1,15	2,24	1,26	2,11	2,19	1,52	0,28	1,66	1,51
Mistura	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª	16ª	17ª	18ª
Médias Retrações (%)	9,3	8,2	4,8	8,3	6,2	6,7	4,6	8,3	6,8
Desvio Padrão	1,58	1,34	1,55	1,95	1,11	1,62	1,47	1,4	1,44
Mistura	19ª	20ª	21ª	22ª	23ª	24ª	25ª	26ª	27ª
Médias Retrações (%)	4,7	3,5	5,0	4,8	5,1	5,3	3,8	5,8	3,3
Desvio Padrão	1,20	1,87	0,89	1,27	2,21	0,54	1,92	3,38	1,44

Fonte: do Próprio Autor

Diante dos valores mostrados na Tabela 11, nota-se que os maiores valores de retrações foram apresentados pelas misturas que utilizaram a maior quantidade de água (42%), fato este que vem comprovar que o teor de água adicionado à mistura é diretamente proporcional a quantidade de água que sai da mistura, gerando assim a diminuição das peças. Cabe ressaltar que a retração, desde que não ocasione fissuras internas no material, ela é benéfica em se tratando de desfôrma no processo produtivo das peças confeccionadas com este material, uma vez que a facilidade e agilidade na desfôrma gera a rapidez na produção.

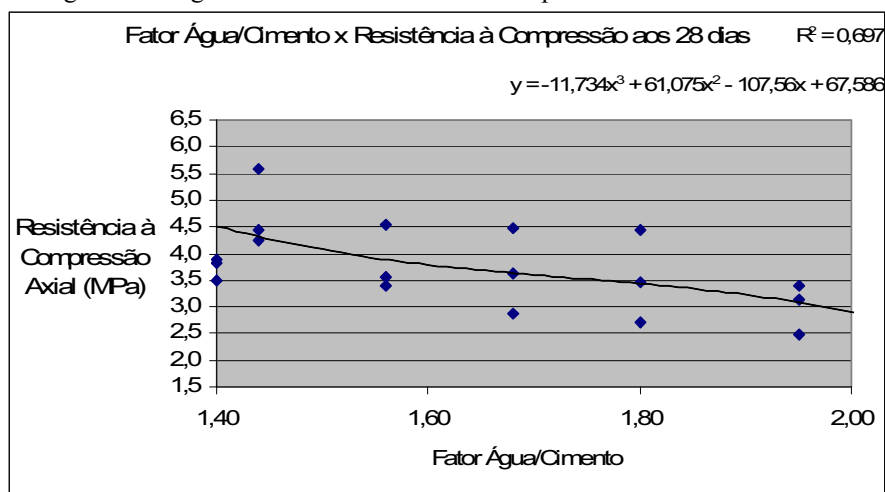
A facilidade dos corpos de provas saírem das moldes na desfôrma provavelmente ocorreu em função da retração, do desmoldante e da superfície interna lisa das fôrmas. Observou-se que, aparentemente, para o caso desta pesquisa, a retração não gera fissuras internas no material, o que é benéfico em se tratando de desfôrma no processo produtivo das peças confeccionadas com este material.

Comportamento das misturas no estado endurecido em função dos parâmetros de dosagens

De forma análoga ao item apresentado quanto ao comportamento das misturas no estado fresco, a partir de agora, serão apresentados alguns gráficos que visam correlacionar as propriedades das misturas no estado endurecido juntamente com suas variáveis de dosagens, com o intuito de encontrar os respectivos coeficientes de correlação, cabendo aqui também ressaltar que existe uma diferença quanto as análises matemáticas e físicas envolvidas.

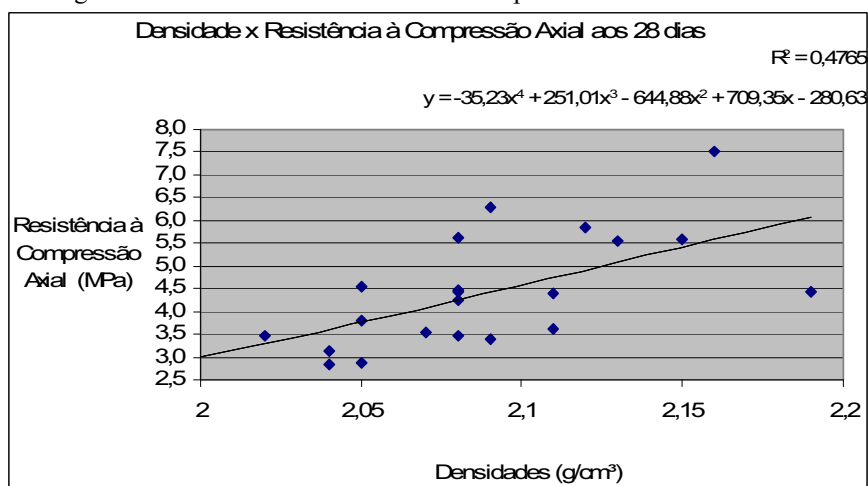
Tendo em vista a qualificação dos materiais, buscou-se correlacionar os valores de resistência à compressão axial simples com relação aos valores de relação água/cimento, bem como relacionar os valores de densidades alcançadas com os valores de resistência à compressão axial simples, como mostram as Figuras 78 e 79.

Figura 78 – Água/cimento x Resistência à compressão – Análise Polinomial



Fonte: do Próprio Autor

Figura 79 – Densidade x Resistência à compressão – Análise Polinomial



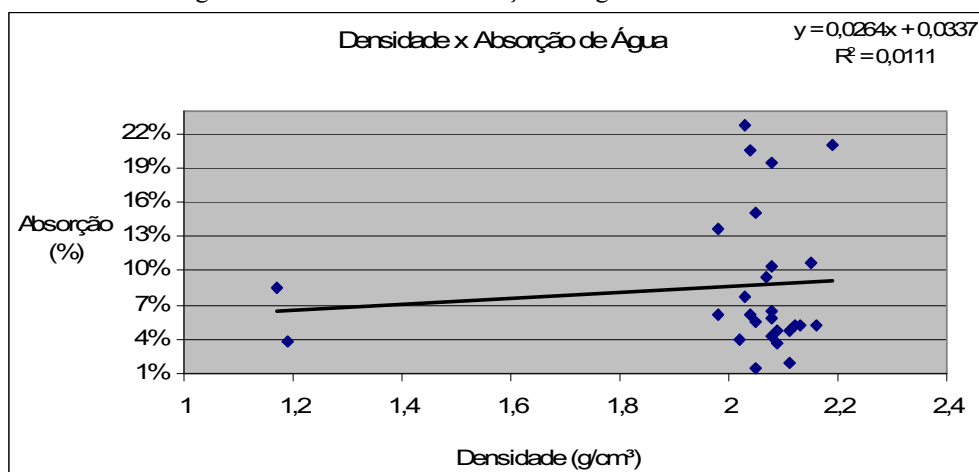
Fonte: do Próprio Autor

Com as Figuras 78 e 79, pode-se observar uma correlação considerada média à forte, que é influenciada pelo fator água/cimento e pela densidade que interferem diretamente na resistência à compressão mecânica axial, sendo que o aumento do fator água/cimento contribui para a diminuição desta propriedade, enquanto que os valores de densidade são diretamente proporcionais a resistência à compressão mecânica axial, ou seja, quanto maior a densidade, maior a resistência à compressão axial.

Estes resultados podem ser comparados com os de Horpibulsuk et al. (1970), citado por Foppa (2005), quando em seus estudos com argilas com altos teores de umidade verificaram através de ensaios de compressão simples, que a relação água/cimento é um fator importante para o desenvolvimento da resistência deste material, uma vez que leva em consideração as interações físico-químicas entre a água, a argila e o cimento.

Os resultados podem confirmar que o aumento da água com relação ao cimento implica numa matriz mais diluída e menos resistente mecanicamente, mais uma vez, análoga aos casos de concretos. Este fato condiz com o texto de Fonseca et al. (2009) quando afirmou que a resistência mecânica à compressão axial é influenciada pela quantidade de cimento e água adicionada à mistura, uma vez que a relação água/cimento interfere diretamente nos vazios do material endurecido e, automaticamente em sua densidade e, em seu trabalho, concluiu que a porosidade é um parâmetro fundamental e que deve ser levando em consideração quando se trata de densidade e resistência à compressão mecânica axial. Da mesma maneira que nos casos anteriores, procurou-se também avaliar os valores da absorção de água com a densidade dos corpos de provas, que é ilustrado na Figura 80.

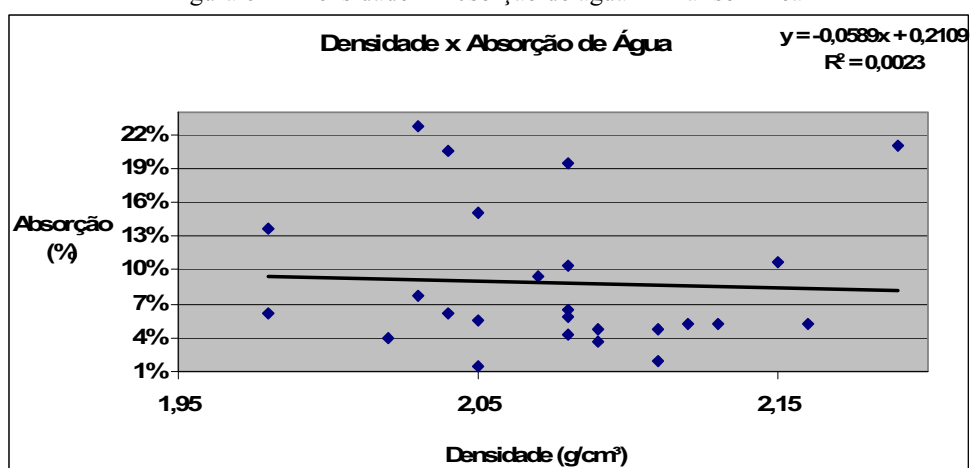
Figura 80 – Densidade x Absorção de água – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Percebe-se na Figura 74 uma concentração de pontos numa determinada região do gráfico e dois pontos mais afastados, dando a entender que a maior parte dos valores de densidade estão entre 2 e 2,2 g/cm³, gerando uma inexistência de correlação entre as variáveis, além do indicativo da absorção de água aumentar com o aumento da densidade. Porém, se estes dois pontos forem desprezados, se obtém um novo gráfico, ainda com inexistência de correlação, porém com o indicativo mais coerente de que a absorção de água diminui com o aumento da densidade, conforme mostra a Figura 81, uma vez que a densidade de um material está diretamente ligada à quantidade de vazios em seu interior, que por sua vez, gera maior absorção de água.

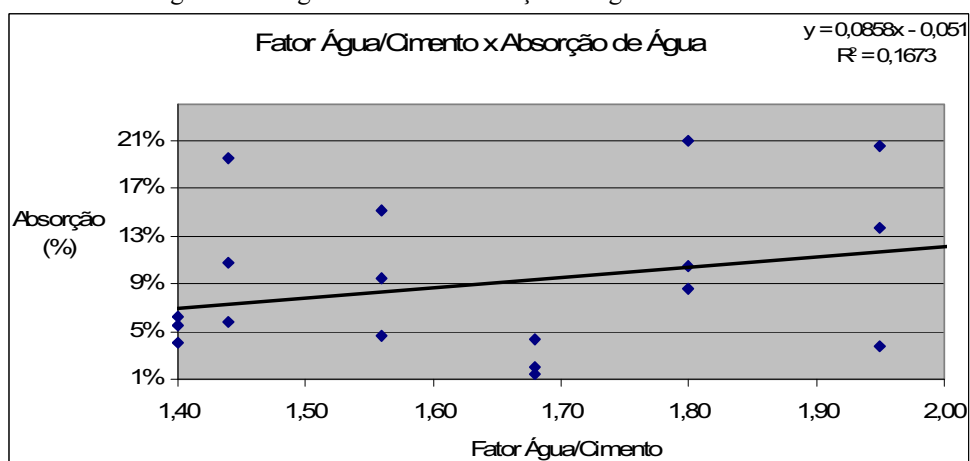
Figura 81 – Densidade x Absorção de água – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

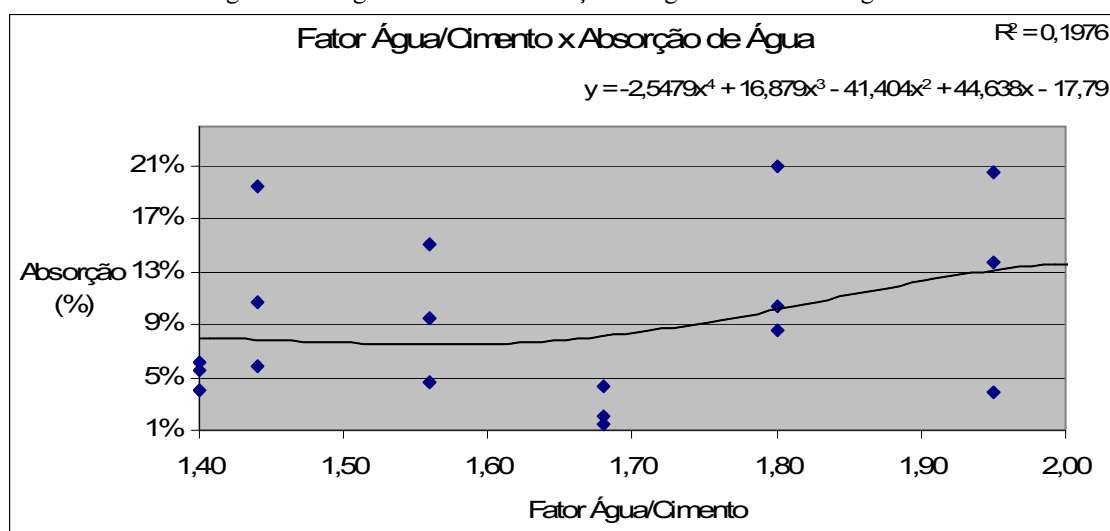
Com o intuito de também correlacionar a relação água/cimento das misturas com os respectivos valores de absorção de água, gerou-se os gráficos apresentados nas Figuras 82 e 83.

Figura 82 – Água/cimento x Absorção de água – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 83 – Água/cimento x Absorção de água – Análise Poligonal

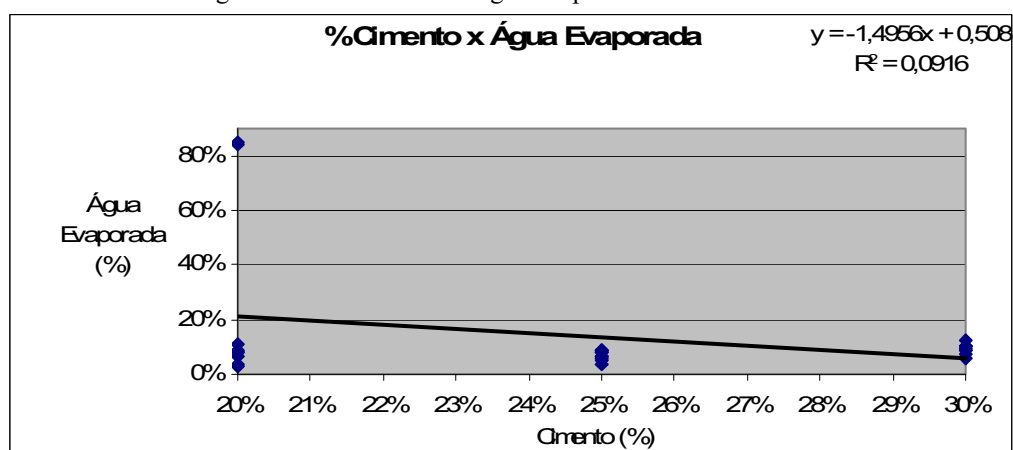


Fonte: do Próprio Autor

Como mostram as Figuras 82 e 83, a absorção de água nos CPs tende à aumentar com o aumento do fator água/cimento, embora perceba-se uma existência fraca de correlação entre as variáveis, para o caso do fator água/cimento é uma comprovação o fato da quantidade de água adicionada a mistura sobrar, gerar poros e, por isso, aumentar a absorção d'água. O fator água/cimento está relacionado com a inserção de água nas misturas, que deve ser analisada para o caso do solo-cimento como a interferência da água nos grãos de solo, uma vez que, segundo Gomes (1986), a granulometria do solo interfere nas propriedades dos materiais em função das quantidades de partículas finas, grossas e médias que favorecem a densidade das misturas.

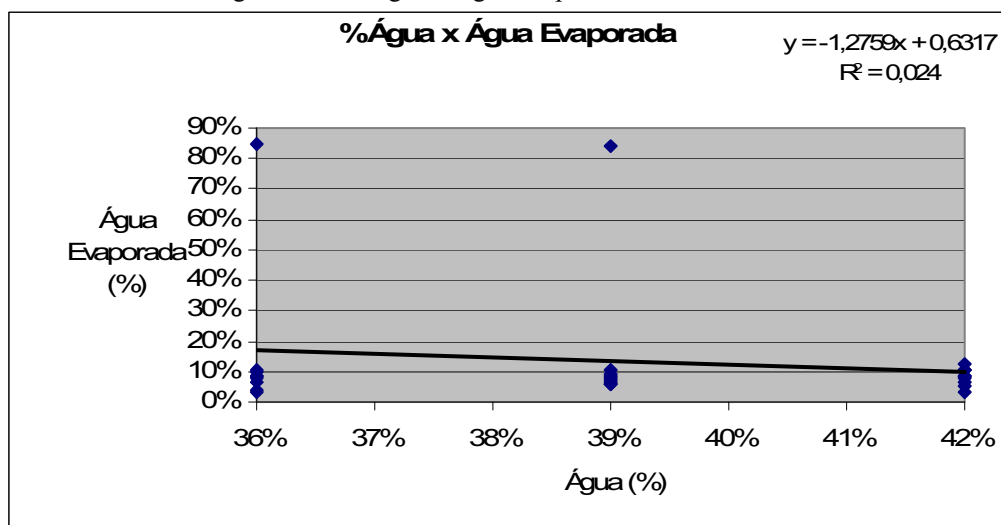
As Figuras 84, 85 e 86 apresentam a correlação entre a as quantidades de cimento, água e superplastificante incorporadas nas misturas que interferem na evaporação de água das peças.

Figura 84 – % Cimento x Água evaporada – Análise Linear



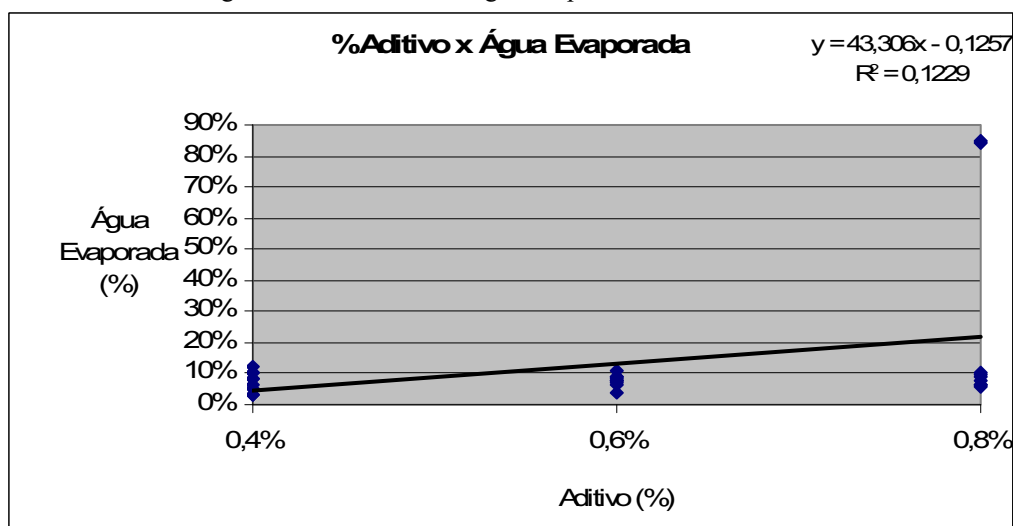
Fonte: do Próprio Autor

Figura 85 – % Água x Água evaporada – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 86 – % Aditivo x Água evaporada – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

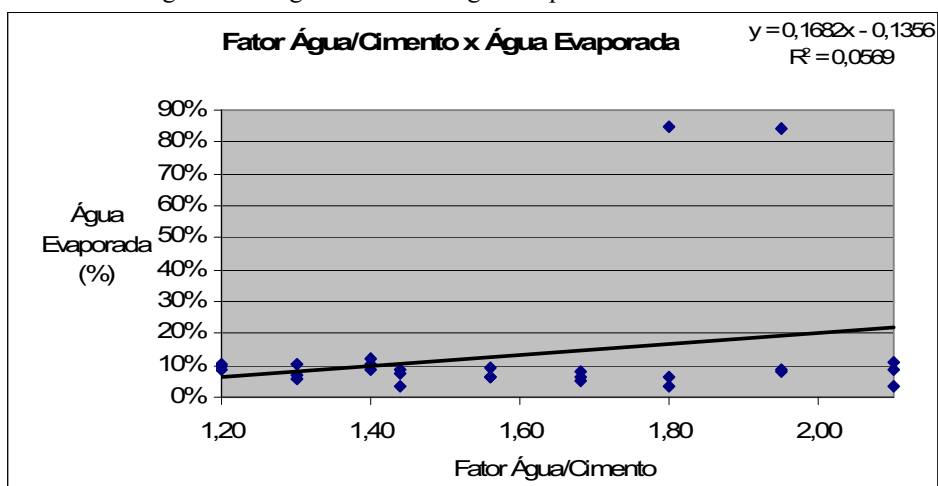
A Figura 84 mostra um resultado onde o aumento da inserção de cimento nas misturas fazem com que a evaporação de água diminua, fenômeno este que pode ser compreendido uma vez que já é sabido que o cimento retém a água de amassamento nas misturas, fazendo com que a sobra de água para evaporar diminua de quantidade.

De maneira análoga, a Figura 85, embora com uma correlação muito baixa, mostra um resultado já esperado, onde o aumento da evaporação de água é proporcional ao aumento da quantidade de água inserida na mistura, uma vez que é condizente afirmar que quanto mais água se adiciona a massa, mais água irá sobrar e, conseqüentemente, evaporar. Observando a

Figura 86, os resultados indicam que com o aumento da quantidade de aditivo inserido nas misturas tende a aumentar a quantidade de água evaporada.

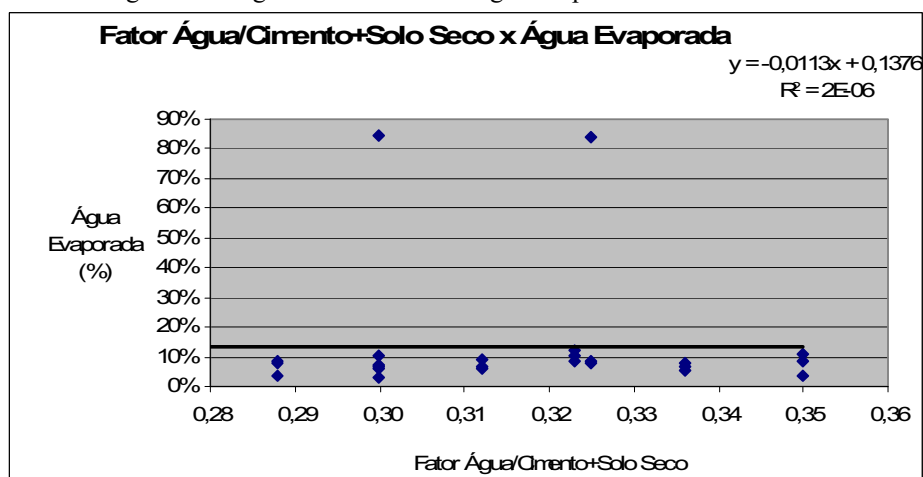
As Figuras 87 e 88 apresentam as correlações entre as variações nas relações água/cimento e água/cimento+solo com relação à água evaporada nos CPs no momento da cura por secagem.

Figura 87 – Água/cimento x Água evaporada – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 88 – Água/cimento+solo x Água evaporada – Análise Linear



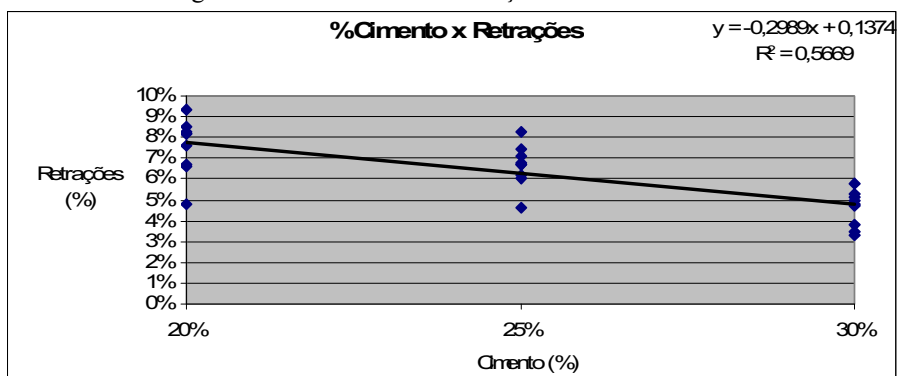
Fonte: do Próprio Autor

Embora ocorra a inexistência de correlação, as variações nas correlações água/cimento e água/cimento + solo apresentadas nas Figuras 87 e 88, a variação se mostra mais acentuada quando ela é quantificada com relação a quantidade total de água de manuseio, visto que, o cimento pode reter parte da água com a sua atividade físico-química e de hidratação. Ainda observando que na Figura 87 a reta é crescente enquanto que na Figura 88 a reta é decrescente, indica que a inserção de materiais secos na mistura tendem a reter a água

adicionada e com isso menos água sobra para evaporar, sugerindo que quando é grande a quantidade de água na mistura, o cimento sozinho não é capaz de reter toda a água.

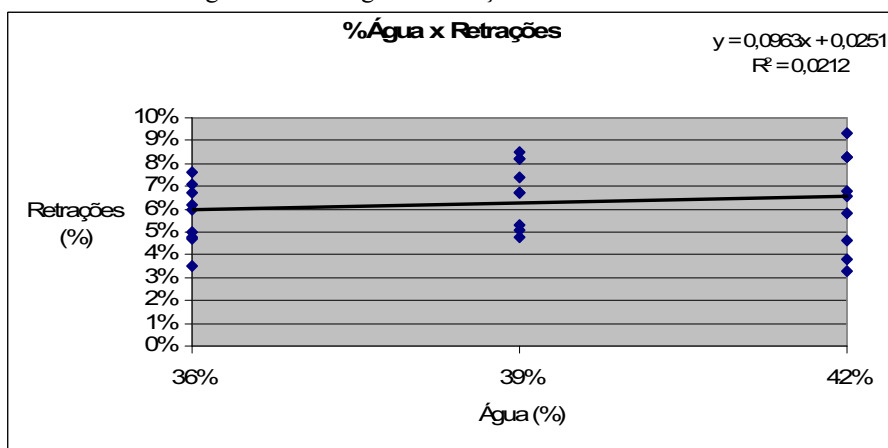
Do ponto de vista das retrações, a influência do cimento, da água e do teor de aditivo é visualizada pelas Figuras 89, 90 e 91.

Figura 89 – % Cimento x Retrações – Análise Linear



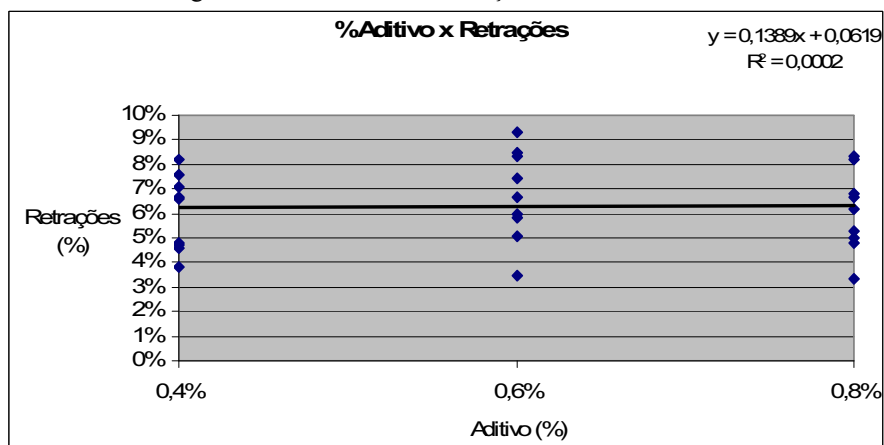
Fonte: do Próprio Autor

Figura 90 – % Água x Retrações – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 91 – % Aditivo x Retrações – Análise Linear

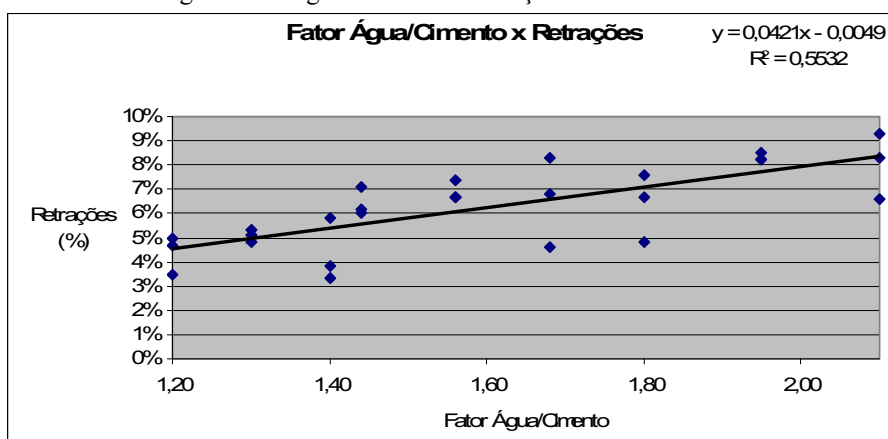


Fonte: do Próprio Autor

Observa-se uma correlação média entre as variáveis mostradas no gráfico da Figura 89, onde as retrações diminuem proporcionalmente com o aumento da inserção do cimento nas misturas, provavelmente em decorrência que, quanto mais cimento a massa possuir, mais água ele vai requerer e assim, menos água vai evaporar da peça, ocasionando uma menor retração da mesma.

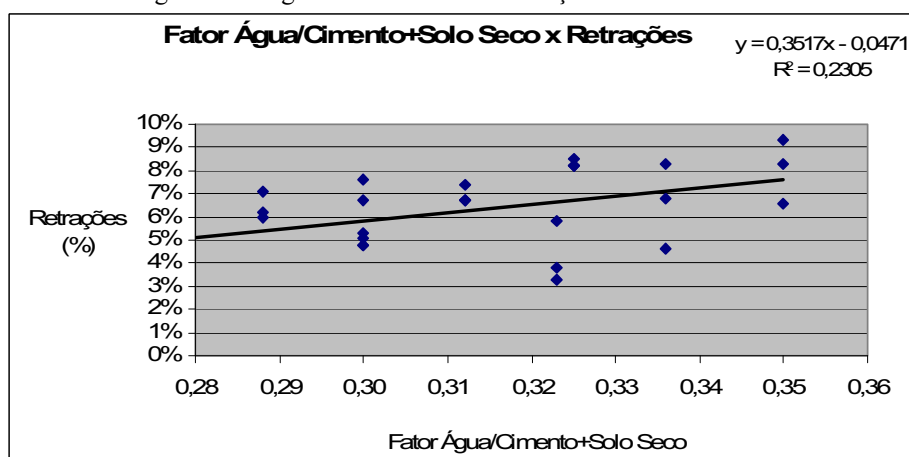
De maneira análoga, embora as Figuras 90 e 91 tenham apresentado inexistência de correlação, observa-se que as retrações aumentam com o aumento da inserção da água e do aditivo nas misturas, gerando uma coerência de valores, uma vez que quanto mais esses dois componentes são adicionados às misturas, mais vai ocorrer a retração das peças, cabendo aqui ressaltar que no caso do aditivo, para a Figura 85 observa-se que este aumento de retração é dado de maneira muito lenta, onde o aditivo ocasiona uma influência pouco significativa. As Figuras 92 e 93 ilustram a variação das retrações em função dos valores das relações água/cimento e água/cimento+solo.

Figura 92 – Água/cimento x Retrações – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 93 – Água/cimento+solo x Retrações – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

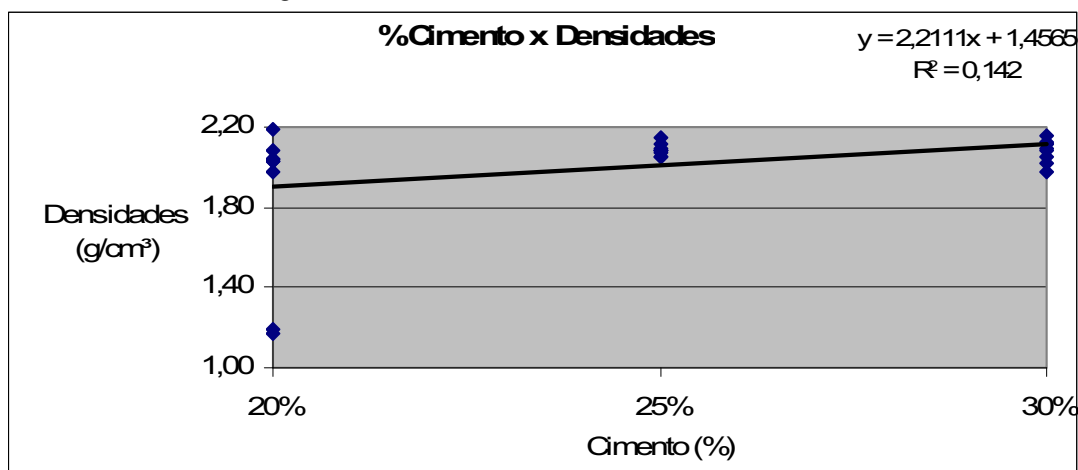
Percebe-se na Figura 92 uma correlação média entre as variáveis e também pode-se observar nitidamente que com o aumento das retrações ocorre proporcionalmente ao aumento dos valores do fator água/cimento das misturas, fato este que pode se dar devido ao aumento da quantidade de água inserida à mistura, que gera a formação da água livre e evapora, causando a retração e os valores das correlações são mais acentuados para o caso do cimento, visto que este apresenta maior finura.

Observa-se que as informações do gráfico apresentado na Figura 93, embora sua correlação tenha se apresentado fraca, mais uma vez o aumento da quantidade de água inserida numa mistura gera a sua sobra, que por sua vez gera a sua evaporação e, por consequência, ocasiona retração na peça. Como o gráfico demonstra um crescimento proporcional da retração em função do aumento do fator água/cimento+solo seco, tem-se o indicativo de que para o caso de retrações, a quantidade de solo na mistura é menos relevante do que a adição de água na mesma.

Estes resultados condizem com o texto de Foppa (2005), quando afirmou que a adição de cimento em solos argilosos proporciona o aumento da retração em função da maior quantidade de água exigida pelos finos da mistura, uma vez que quando a adição de cimento ao solo é pequena observa-se a redução da capacidade de retenção de água.

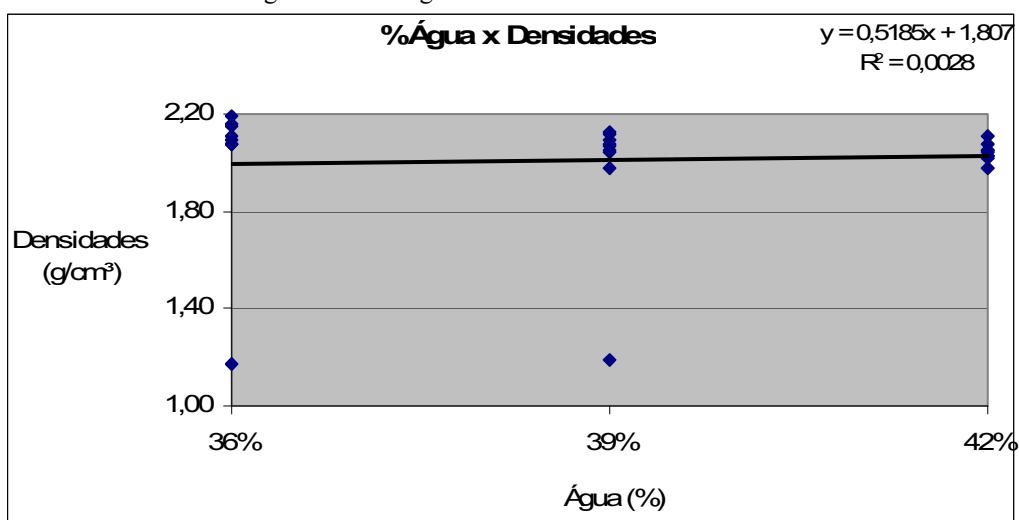
As Figuras 94, 95 e 96 ilustram a variação da densidade em função das porcentagens da água, do cimento, e do aditivo superplastificante.

Figura 94 – % Cimento x Densidade – Análise Linear



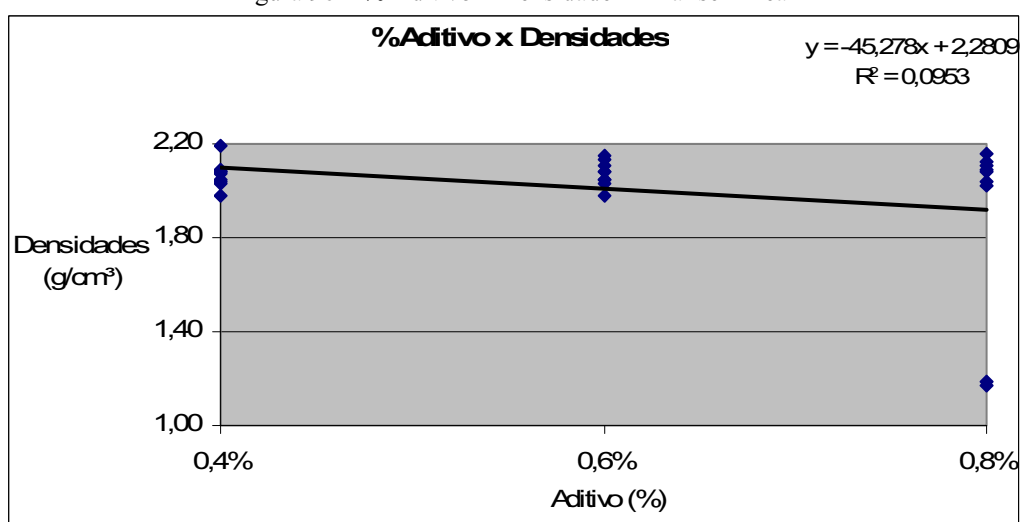
Fonte: do Próprio Autor

Figura 95 – % Água x Densidade – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 96 – % Aditivo x Densidade – Análise Linear

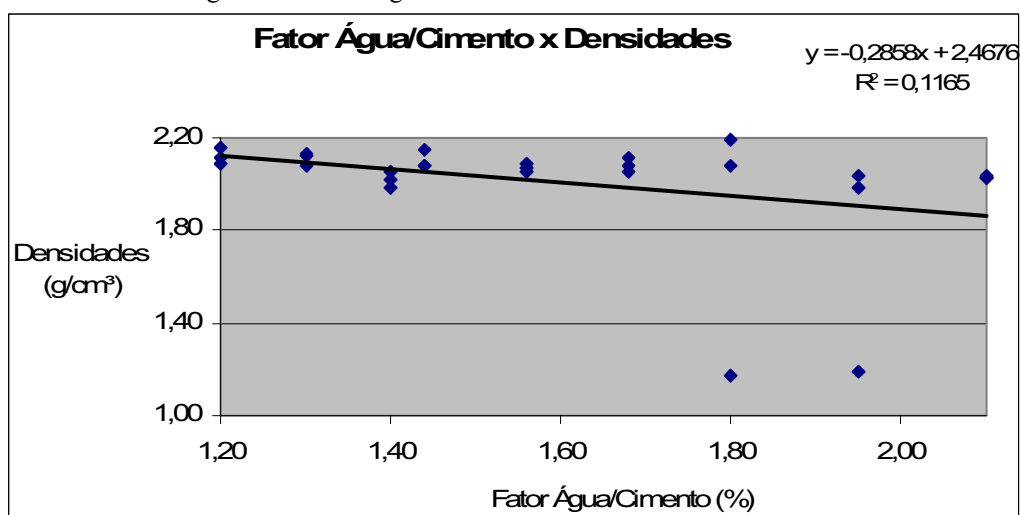


Fonte: do Próprio Autor

Embora as correlações dos gráficos mostrados nas Figuras 94, 95 e 96 apresentaram inexistência de correlação, percebe-se que com o aumento da formação dos materiais cimentantes retendo a água na formação de produtos, ocorre o fato da evaporação de água deixar vazios, diminuindo assim a densidade. O fato da reta da Figura 96 ter se apresentado decrescente dá indícios de que o aditivo tende a reduzir a viscosidade do material, dilatando-o e homogeneizando bem o material, dispersando dos grãos e, consequentemente, deixando-o menos denso.

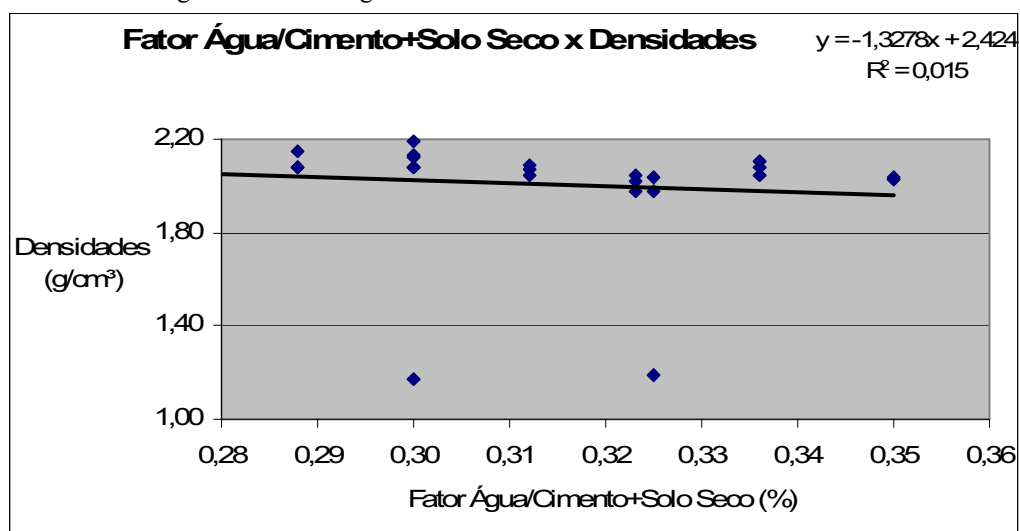
Em acordo com a influência da porcentagem de água adotada, as Figuras 97 e 98 buscam correlacionar os valores das relações água/cimento e água/cimento + solo aos valores das densidades.

Figura 97 – Fator água/cimento x Densidade – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Figura 98 – Fator água/cimento+solo x Densidade – Análise Linear



Fonte: do Próprio Autor

Observa-se nas Figuras 97 e 98 uma inexistência de correlação ou uma correlação muito fraca; porém, a variação da densidade em função da variação água/cimento indica que o aumento da água contribui para a evaporação, visto que a matriz se torna mais porosa com o aumento da inserção de água na mistura, gerando uma densidade menor. Além disso, nota-se nas Figuras que o decréscimo da densidade é mais acentuado quando comparada somente do fator água/cimento do que comparada com o fator água/cimento + solo seco. Isso sugere que a

adição de materiais secos na misturas tendem a reter a água, diminuindo sua sobra e consequentemente sua evaporação, diminuindo assim os poros e aumentando a densidade.

De modo à melhor solucionar o problema da diminuição da densidade com o acréscimo do fator água/cimento tem-se que o aditivo pode ser útil às misturas, uma vez que Neville (1997) afirmou que o efeito dos superplastificantes, basicamente, se resume em diminuir a demanda de água pois contribui para a dispersão e desfloculação dos grãos de cimento bem como na interação físico-química da pasta, desenvolvendo a hidratação e distribuindo os poros, gerando fluidez e homogeneidade nas misturas.

4.2.1.2 Influência da Relação água/cimento na Resistência Mecânica para Situações Particulares

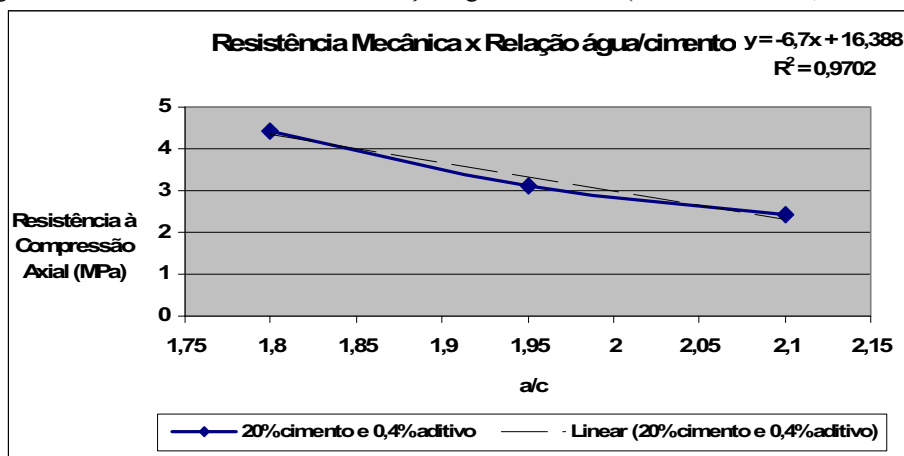
De forma análoga ao item 4.2.1.1, neste item foram tomadas algumas situações particulares, de modo a se diminuir as interferências entre variáveis dos valores globais com as 27 misturas, com misturas de diferentes famílias, optando agora por se trabalhar com misturas de classes famílias com variáveis comuns entre si, de modo a se obter melhores correlações, como as apresentadas à seguir.

a) Influência da Relação água/cimento na Resistência Mecânica

A seguir, serão apresentados gráficos onde estão agrupados famílias de composições, fixando-se o valor do superplastificante e variando os valores de cimento, uma vez que há diferenças quando se analisa todas as composições de modo global e juntas, e quando se analisa uma série com características particulares e comuns, como é o caso agora. Cabe aqui ressaltar que uma análise não prevalece sobre a outra, uma vez que são formas diferentes de se analisar para melhor interpretação dos comportamentos.

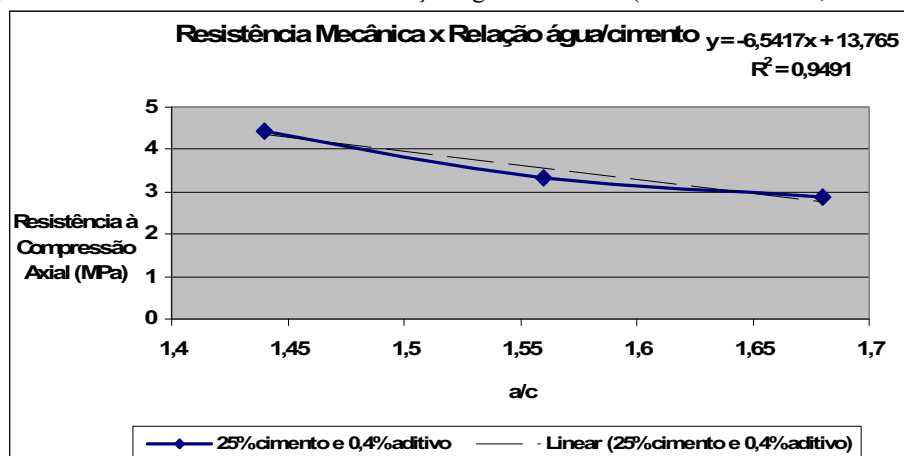
Para isso, nas Figuras 99 a 101 são apresentadas a influência do fator água/cimento nos valores de resistências mecânicas, fixando-se o aditivo superplastificante e variando-se as dosagens de cimento.

Figura 99 – Resistência Mecânica x Relação água/cimento – (20% cimento e 0,4% aditivo)



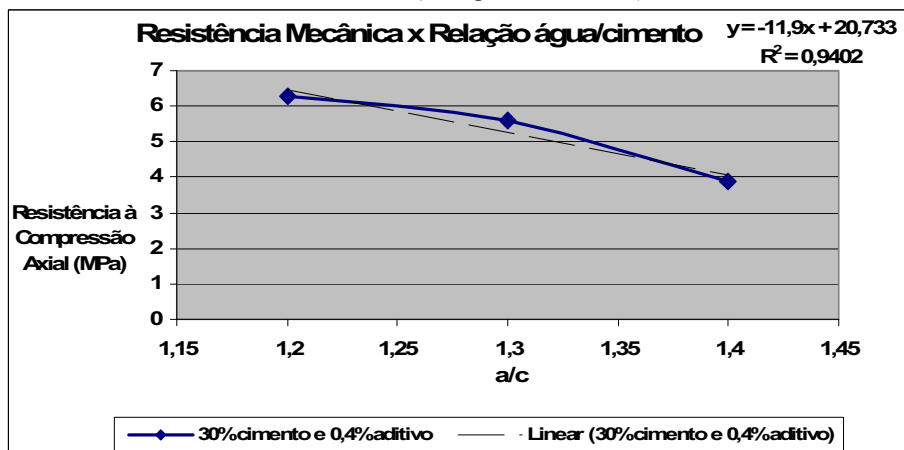
Fonte: do Próprio Autor

Figura 100 – Resistência Mecânica x Relação água/cimento – (25% cimento e 0,4% aditivo)



Fonte: do Próprio Autor

Figura 101 – Resistência Mecânica x Relação água/cimento – (30% cimento e 0,4% aditivo)



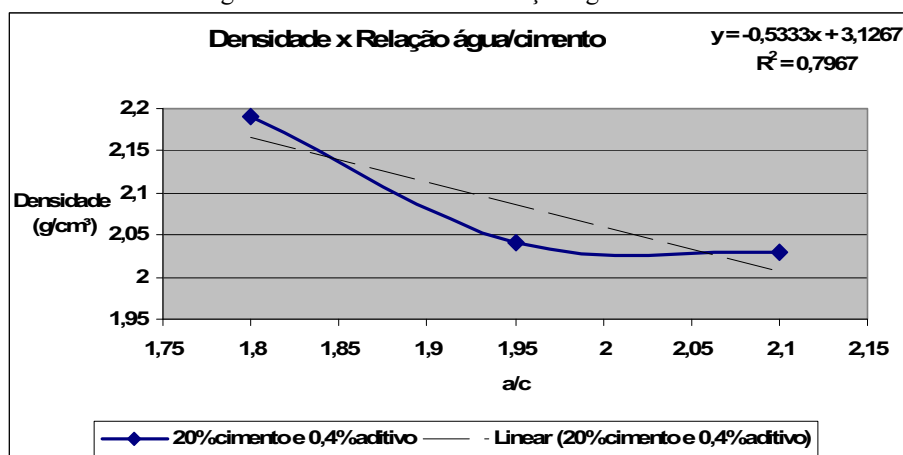
Fonte: do Próprio Autor

As Figuras 99 a 101 mostram que existe correlação alta entre os grupos de valores de resistências e o fator água/cimento, sendo que, mesmo aumentando-se a inserção do cimento nas misturas os valores de resistência tendem a cair quanto maior for o fator a/c e o intuito foi o de visualizar as curvas das famílias de composições das misturas que se diferenciam da quantidade de cimento, porém, são as mesmas para os valores de superplastificante, confirmando assim, a queda da resistência mecânica em função do aumento da relação a/c.

b) Influência da Relação água/cimento na Densidade

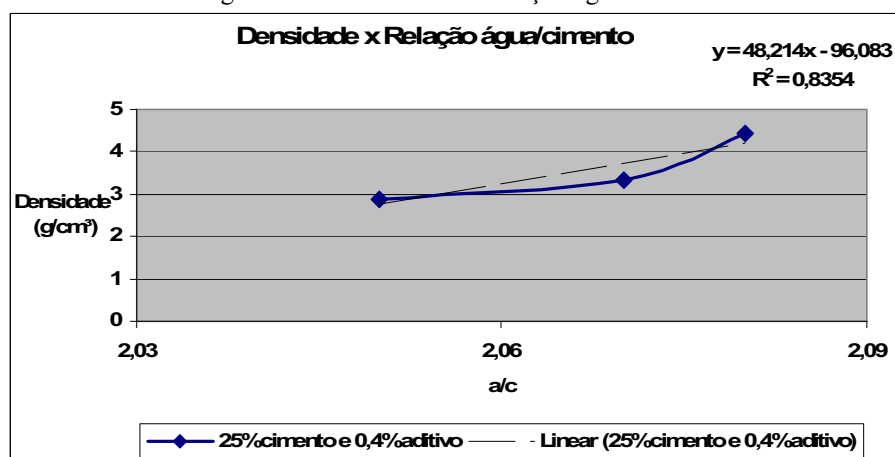
A seguir, serão apresentados nas Figuras 102 a 104 a influência do fator água/cimento nos valores de densidade, fixando-se o aditivo superplastificante e variando-se as dosagens de cimento.

Figura 102 – Densidade x Relação água/cimento



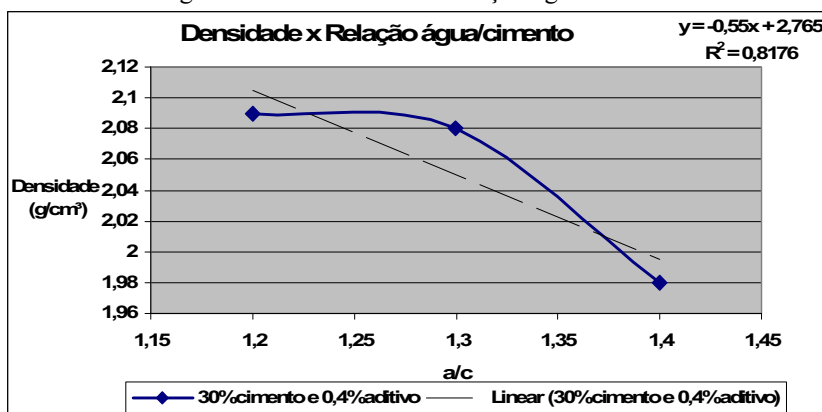
Fonte: do Próprio Autor

Figura 103 – Densidade x Relação água/cimento



Fonte: do Próprio Autor

Figura 104 – Densidade x Relação água/cimento



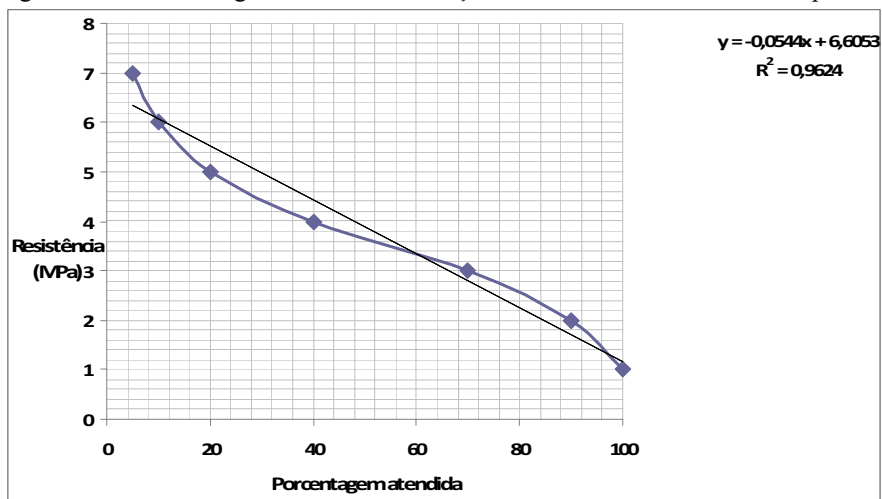
Fonte: do Próprio Autor

As Figuras 102 a 104 mostram que existe uma correlação média à alta entre os grupos de valores de densidade e o fator água/cimento, mesmo variando-se os valores de cimento inserido nas misturas, com o objetivo de visualizar as curvas das famílias de composições das misturas que se diferenciam pela quantidade de cimento incorporada, porém, possuem as mesmas quantidades para os valores de superplastificante.

4.2.3 Análise quanto à Resistência Mecânica das Misturas

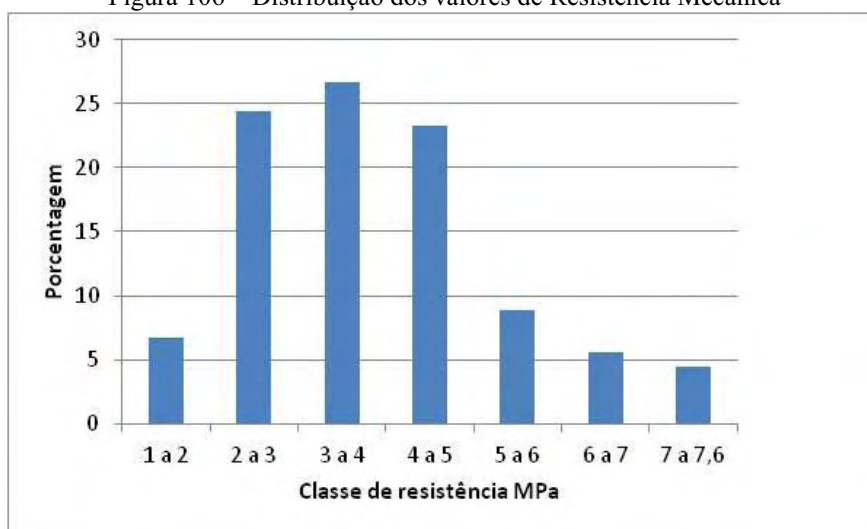
A Figura 105 ilustra as porcentagens de misturas atendidas quanto aos valores de resistência à compressão axial de todas as misturas do EO. Da mesma forma, a Figura 106 apresenta todos os valores de resistência à compressão axial em um formato de distribuição desses valores, entre 1 e 7,6 MPa.

Figura 105 – Porcentagem atendida em função do valor da resistência à compressão



Fonte: do Próprio Autor

Figura 106 – Distribuição dos valores de Resistência Mecânica



Fonte: do Próprio Autor

Observando-se os valores de resistência à compressão mecânica apresentados nas Figuras 105 e 106, observa-se que todas as misturas atenderam a normatização vigente que prescreve o valor mínimo de 2,0 MPa para peças confeccionadas com solo-cimento. A Figura 105 informa as porcentagens de misturas atendidas quanto aos valores de resistência à compressão axial de todas as misturas do EO englobando todos os valores que se encaixam entre 1 e 7,6 MPa.

De forma análoga, porém distribuída, a Figura 106 mostra as porcentagens atendidas de resistência à compressão mecânica na faixa entre 1 e 7,6 MPa, permitindo notar neste gráfico que o maior número de misturas apresentou valores de resistência à compressão mecânica entre 2 e 5 MPa, atendendo as prescrições das normas vigentes para solo-cimento, o que representa o caso de um material cerâmico de boa qualidade estrutural; e 50% dos casos, o valor médio, atende ao valor de 3,89 MPa.

Este tipo de variação pode dar um indicativo de que os parâmetros do processo de produção guardaram também uma relação proporcional, considerando as variações propostas nas quantidades dos materiais, em termos da variação das relações água/cimento, água/solo+cimento e superplastificante/solo+cimento, de modo a refletir na resistência mecânica; o que indica, aparentemente, que a proposta experimental abriu o espectro de variação de resistência para este material.

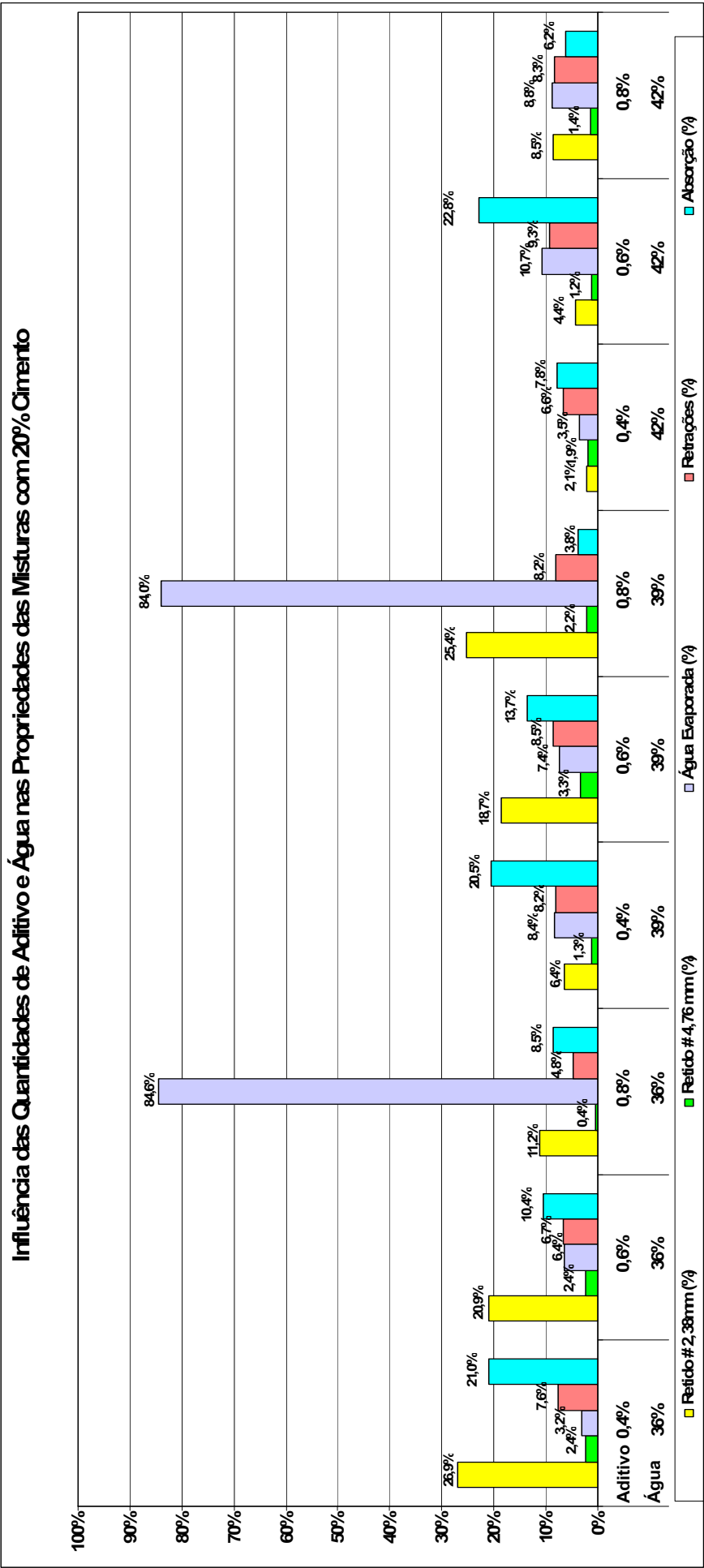
Para os casos de maior resistência mecânica, estas análises condizem com o texto de Goodary et al. (2012), quando afirma que para se obter alta resistência mecânica o solo estabilizado

deve possuir um fator água/cimento baixo. A relação água/cimento para o caso dos concretos e argamassas é um indicativo da qualidade da matriz cimentante, enquanto que as relações água-cimento, água-solo+cimento e superplastificante-solo+cimento poderiam estar associadas à trabalhabilidade da mistura, a qual pode afetar indiretamente a compacidade da mistura no adensamento, e no valor final da resistência mecânica.

4.2.4 Análise Comparativa entre as Propriedades das Misturas em função dos teores de cimento, água e aditivo superplastificante

As Figuras 107 a 112 apresentam os resultados globais compatíveis da análise comparativa entre as propriedades, com o intuito de se efetuar uma análise comparativa entre as propriedades apresentadas pelas misturas, influenciadas pelas quantidades de aditivo e água com relação às dosagens de cimento inseridas nas mesmas.

Figura 107 – Influência das quantidades de aditivo e água nas propriedades das misturas com 20% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

Figura 108 – Influência das quantidades de aditivo e água nas propriedades das misturas com 20% de cimento

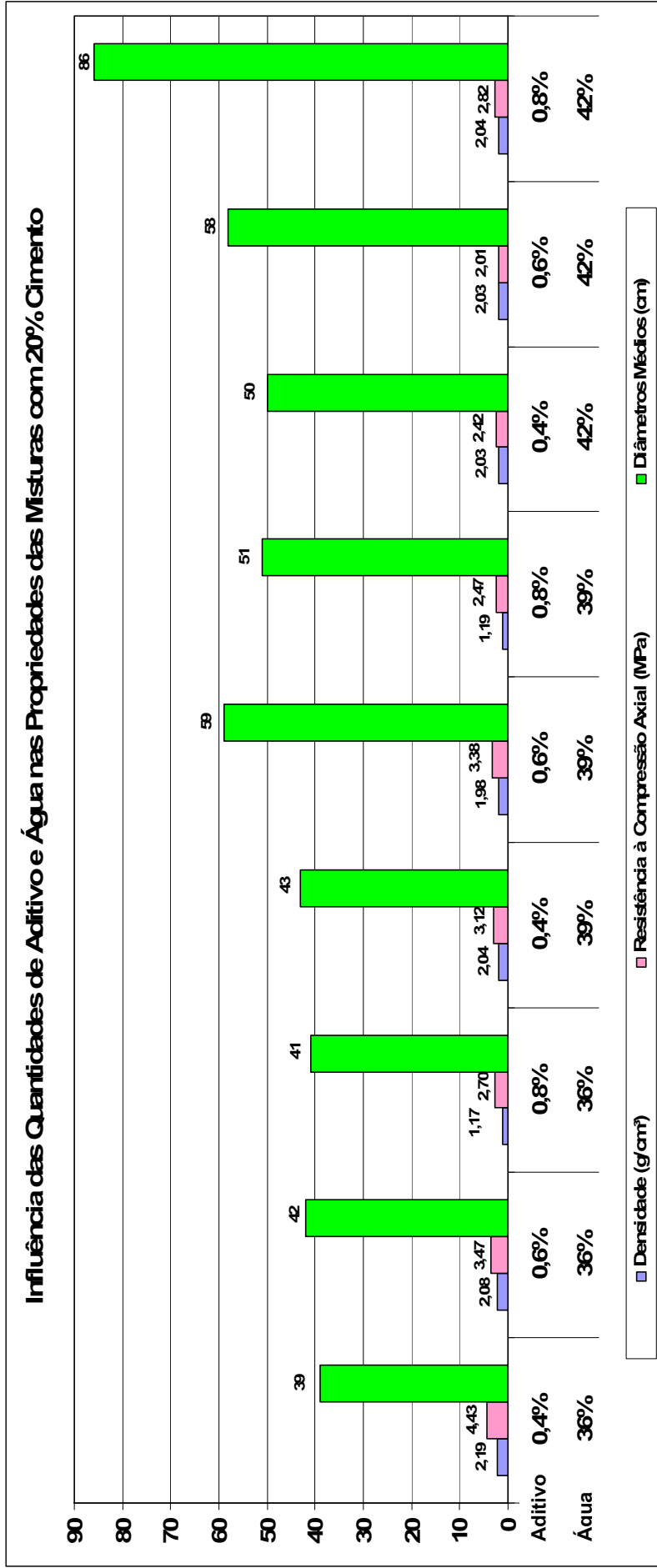
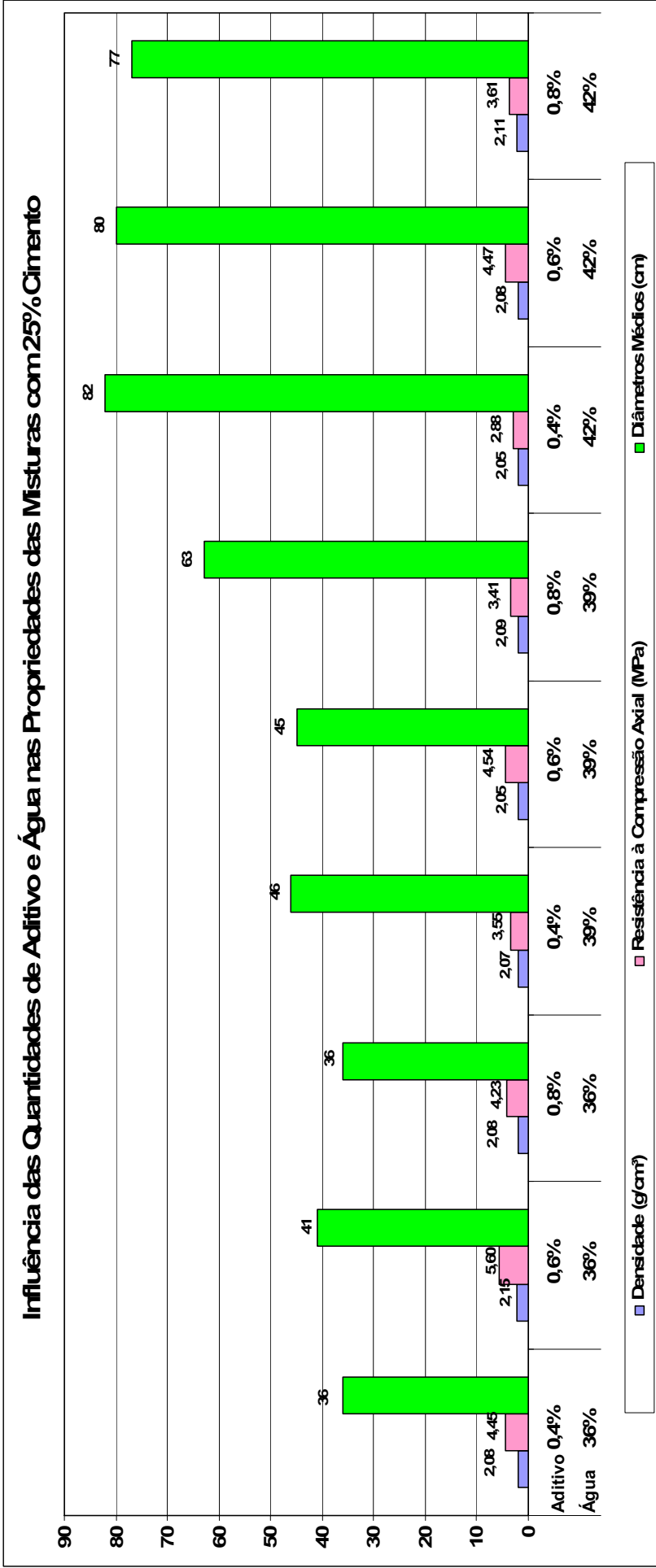
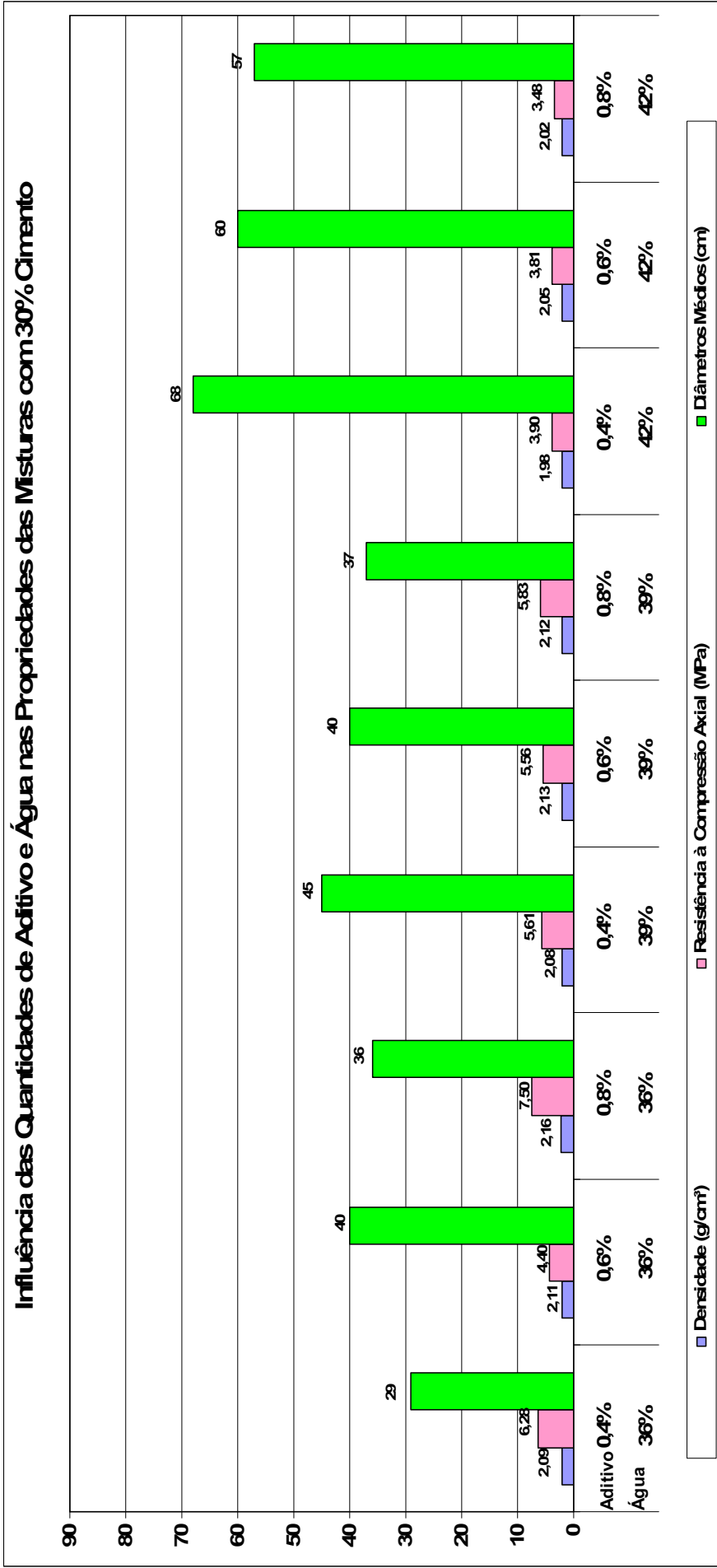


Figura 110 – Influência das quantidades de aditivo e água nas propriedades das misturas com 25% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

Figura 112 – Influência das quantidades de aditivo e água nas propriedades das misturas com 30% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

Em se tratando de valores globais, verifica-se conforme as Figuras 107 a 112, a variação do aditivo não implica, obrigatoriamente, em grande variação da superfície de espalhamento se comparado com a variação da água, sendo que a diminuição do diâmetro de espalhamento com o consumo de cimento pode ocorrer em face do poder do cimento como agente coesivo. De acordo com Camões (2005), o efeito dos aditivos superplastificantes dá origem aos fenômenos de dispersão, adsorção e potencial de repulsão entre as partículas envolvidas nas misturas, resultando na desfloculação e dispersão das partículas de cimento em função da forte carga elétrica negativa, gerando a repulsão umas das outras.

Ainda segundo Camões (2005), a quantidade de superplastificante a inserir numa composição de concreto, por exemplo, tem o objetivo de obter uma fluidez máxima da pasta para uma dada relação água/cimento e, assim, assumir as características da pasta que controlam as propriedades. Neste sentido, o superplastificante assume o papel de agente de fluidificação e mobilidade. Com relação aos valores de resistência à compressão simples, observou-se também que os valores são mais favoráveis para os casos de maiores teores de cimento e com relação aos menores valores de água. O aumento do teor de aditivo, segundo os valores médios globais contribui para um pequeno aumento do valor da resistência à compressão; porém, as diferenças nos valores globais são mais relevantes para a variação da água e do cimento.

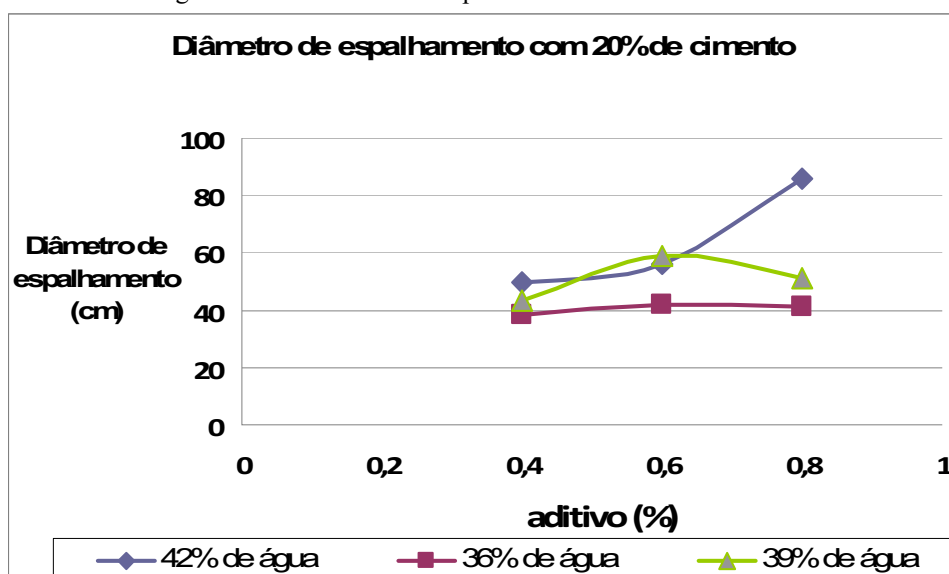
Observando as Figuras 107, 109 e 111, nota-se que o aumento da segregação aumenta com o aumento do cimento, se fixado o mesmo valor para a água e o aditivo. Porém, se ao contrário, fixarmos o cimento, com o aumento da água e o aditivo, aumenta-se também a segregação. Isso mostra que para uma mesma quantidade de cimento, quanto maior a quantidade de água, mais sobra dessa água vai gerar, ocorrendo a exsudação. Ainda de acordo com as Figuras 107, 109 e 111, observa-se que o valor de absorção de água e as retrações diminuem com o aumento do cimento, independente do aumento da quantidade de água na mistura, dando indicativos de que o cimento realmente tem o poder de reter a água de amassamento.

Com as Figuras 108, 110 e 112, observa-se que a resistência à compressão axial aumenta com o aumento do cimento e diminui com o aumento da água. Ainda observando estas figuras, percebe-se como o aditivo superplastificante trabalha com o cimento e como o cimento responde em contato com o aditivo, uma vez que com menos cimento, o aumento do aditivo gera a fluidificação, aumentando o valor do espalhamento. Já com mais cimento, mesmo

aumentando a água e o aditivo, o espalhamento tende a diminuir, levando assim a indícios do poder ligante do cimento, mesmo frente à água e ao aditivo. Conforme as Figuras 108, 110 e 112, considerando a influência do teor de superplastificante na mistura, podem ser considerados dois casos que serão apresentados conforme a exploração destes resultados.

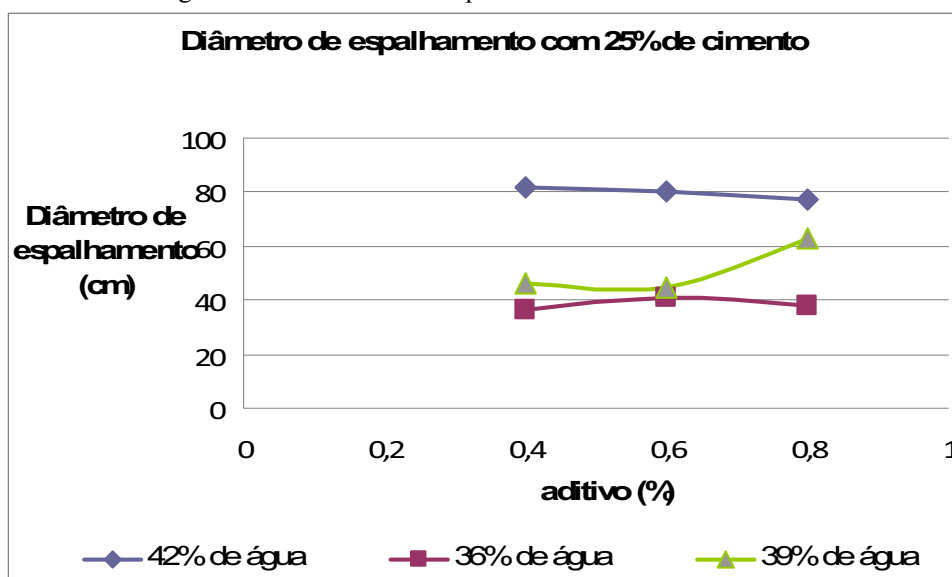
As Figuras 113 a 115 procuram apresentar esta influência a partir da fixação do teor de cimento, e fazendo variar o teor de água incorporada.

Figura 113 – Diâmetro de Espalhamento com 20% de cimento



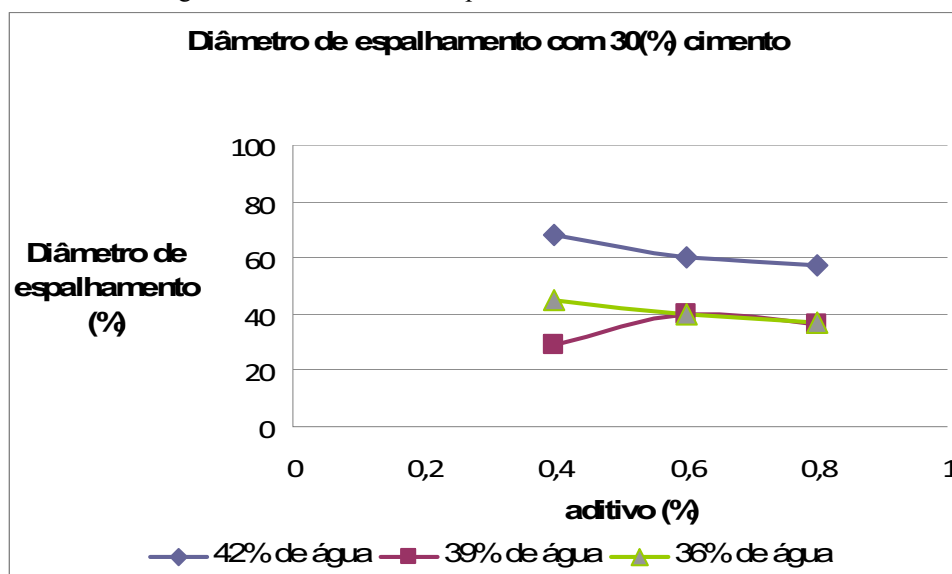
Fonte: do Próprio Autor

Figura 114 – Diâmetro de Espalhamento com 25% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

Figura 115 – Diâmetro de Espalhamento com 30% de cimento

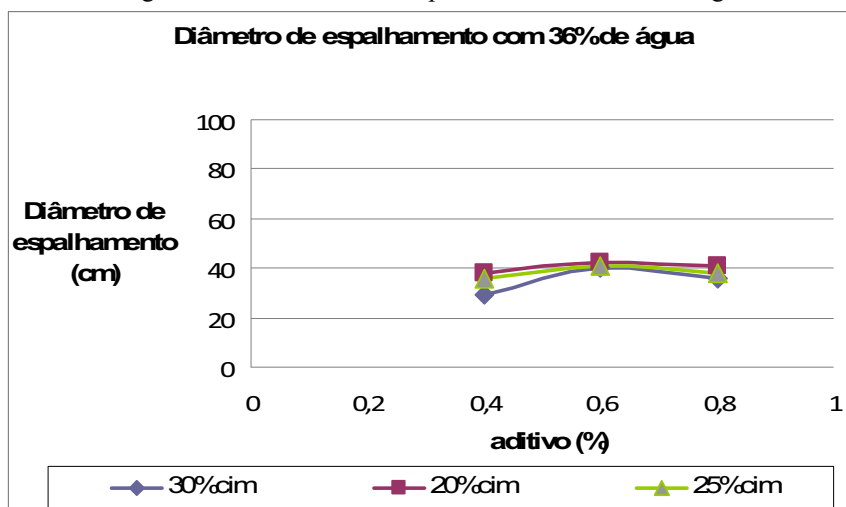


Fonte: do Próprio Autor

Estas Figuras 113 a 115 sugerem que a mistura pode ser fluidificada a partir do aumento do teor do superplastificante para alguns casos, como os da misturas contendo 20% de cimento e 42% de água, e 25% de cimento contendo 39% de água; contudo, aparentemente, o aumento do teor de superplastificante tem atuado preferencialmente no sentido de diminuir os diâmetros de espalhamento, como são claramente visíveis nos casos de 25% de cimento e 42% de água, ou 30% de cimento e 36% e 42% de água.

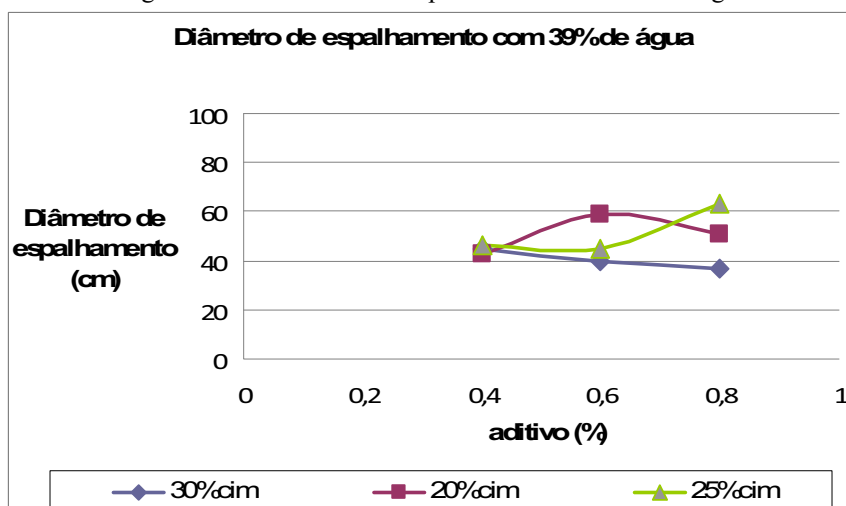
Este comportamento é mais perceptível para com o aumento do consumo de cimento na mistura. Pode estar associado ao refreamento do escoamento em face da acentuação das propriedades viscosas da mistura, devido ao aumento da viscosidade conferido pelo aumento do consumo de cimento, o qual é um agente de viscosidade, nestas condições, pode se dificultar o acesso das moléculas do superplastificante às partículas de cimento, tornando inoperante parte do superplastificante. Possíveis associações podem também existir entre as moléculas do superplastificante e os argilo-minerais do solo, visto que ambos são dotados de cargas superficiais. As Figuras 116 a 118 procuram apresentar a influência da variação do teor de superplastificante em mistura a partir da fixação do teor de água em mistura, e fazendo variar o teor de cimento.

Figura 116 – Diâmetro de Espalhamento com 36% de água



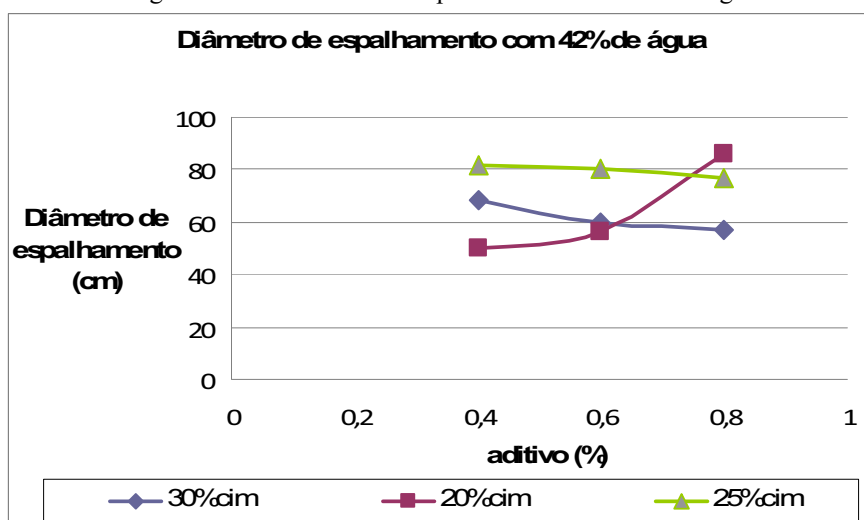
Fonte: do Próprio Autor

Figura 117 – Diâmetro de Espalhamento com 39% de água



Fonte: do Próprio Autor

Figura 118 – Diâmetro de Espalhamento com 42% de água

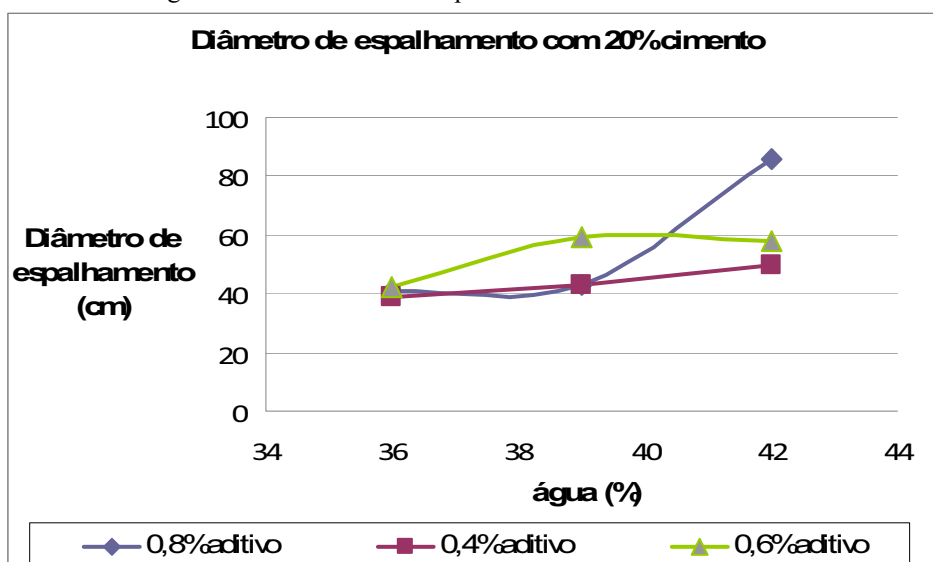


Fonte: do Próprio Autor

Pode se observar pelas Figuras 116 a 118 a influência da água como agente fluidificante, de maneira que para cada caso de família de mistura envolvendo um teor de cimento a curva do valor do diâmetro de espalhamento se desloca de modo favorável às condições de fluidificação, manifestando a influência do aumento do teor do superplastificante para os casos envolvendo os maiores teores de cimento.

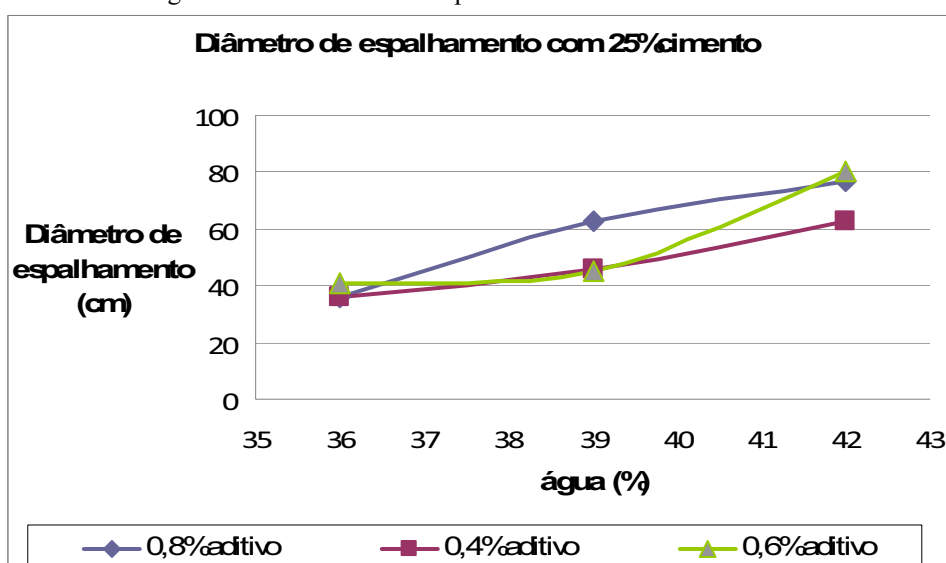
Quanto à influência do teor de água incorporada na mistura, do mesmo modo pode se analisar dois casos. As Figuras 119 a 121 apresentam a influência da variação do teor de água a partir da variação do teor de cimento, fazendo-se variar o teor do superplastificante.

Figura 119 – Diâmetro de Espalhamento com 20% de cimento



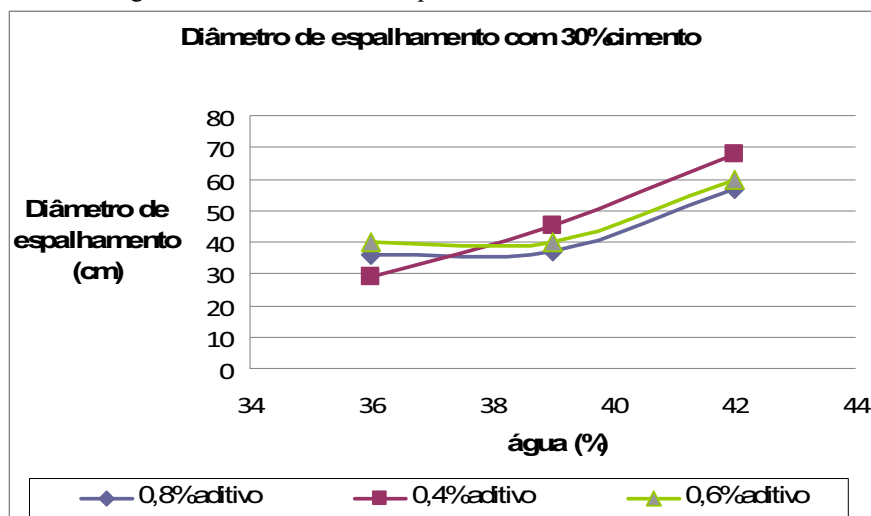
Fonte: do Próprio Autor

Figura 120 – Diâmetro de Espalhamento com 25% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

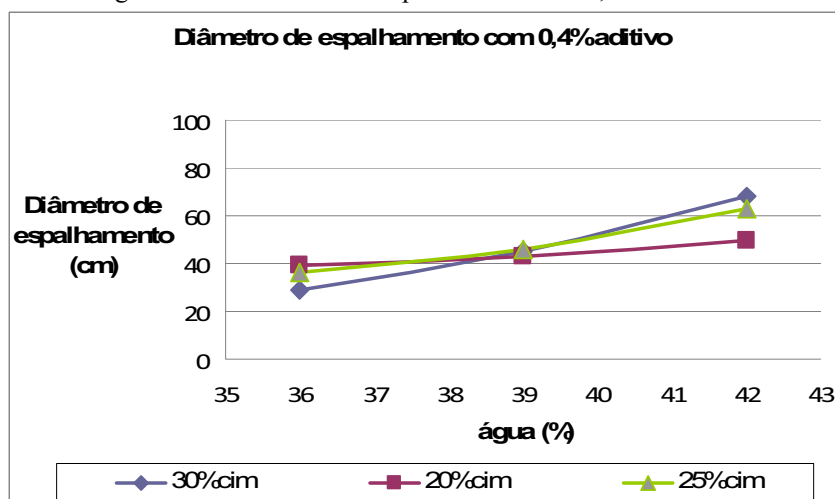
Figura 121 – Diâmetro de Espalhamento com 30% de cimento



Fonte: do Próprio Autor

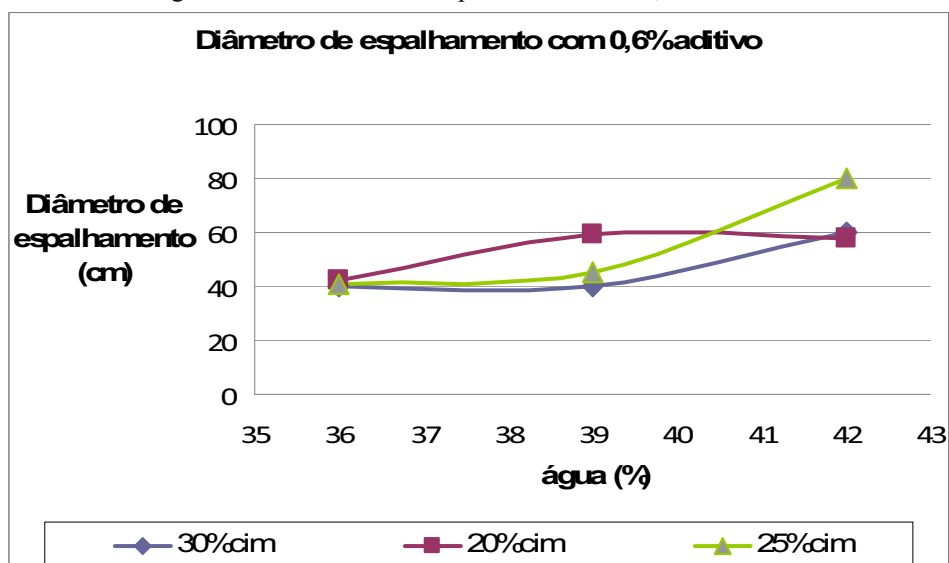
As Figuras 119 a 121, em consonância com as Figuras apresentadas anteriormente, 113 a 118, se observa que a variação do teor de água incorporada na mistura contribui para a fluidificação destas, em todos os casos. Um destaque é dado à Figura 121, 30% de cimento, onde, se observa que para o caso do menor teor de superplastificante o possível efeito de diluição da água se mostrou mais eficaz para o caso da utilização de 0,4%, o menor teor, tornando mais eficaz o superplastificante lançado na mistura. A mesma Figura apresenta o efeito favorável de diluição e fluidificação pela ação da água para os casos de 0,6 e 0,8% de superplastificante, embora, ressaltadas as influências devidas aos teores adotados, conforme a posição das curvas. As Figuras 122 a 124 apresentam a influencia da variação do teor de água a partir da variação do teor de aditivo, fazendo-se variar o teor do cimento.

Figura 122 – Diâmetro de Espalhamento com 0,4% de aditivo



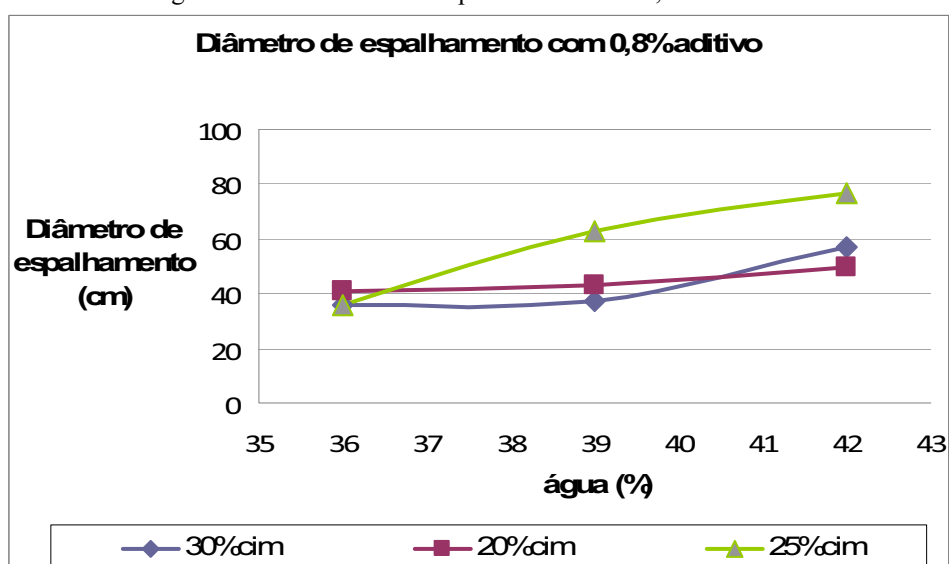
Fonte: do Próprio Autor

Figura 123 – Diâmetro de Espalhamento com 0,6% de aditivo



Fonte: do Próprio Autor

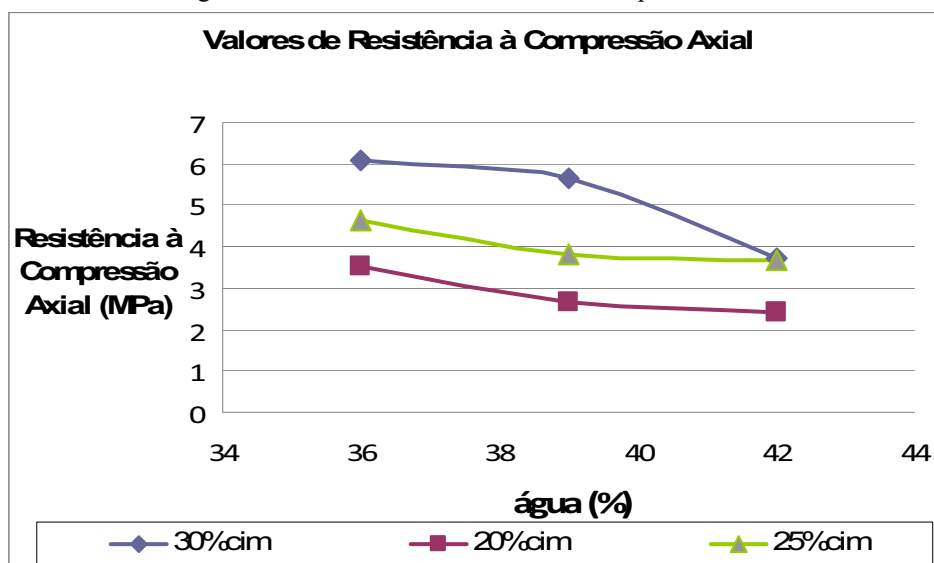
Figura 124 – Diâmetro de Espalhamento com 0,8% de aditivo



Fonte: do Próprio Autor

Observando as Figuras 122 a 124, se faz notar que a água atua como agente fluidificante para todos os casos, principalmente onde o teor de cimento é mais elevado. Quanto aos valores de resistência mecânica, a Figura 125 procura apresentar a variação dos valores médios em função do teor de água incorporada, para os três casos de consumo de cimento, conforme as informações das Figuras 108, 110 e 112.

Figura 125 – Valores de Resistência à Compressão Axial



Fonte: do Próprio Autor

São tomados os valores médios para cada caso de consumo de cimento e teor de água conforme os valores adotados para o caso do teor do aditivo. Embora possa se verificar através das Figuras 108, 110 e 112 que o valor da resistência mecânica pode variar para um mesmo teor de água, conforme o teor do aditivo, verifica-se pela Figura 125, que os valores médios para cada caso de consumo de cimento tendem a ser decrescentes com o acréscimo de água.

Observando-se os resultados das Figuras 108, 110 e 112, verifica-se que os valores de resistência mecânica encontrados sofrem a influência majoritária do teor de água adotado para cada consumo de cimento, mas sofrem também a influência dos diâmetros de espalhamento adotados, e da densidade alcançada. A influência do diâmetro de espalhamento se reflete tanto nas condições de fluidez e de trabalhabilidade, contribuindo para o aumento da densidade, como na fluidificação e possível sedimentação, resultando um material menos denso. Observa-se pela Figura 125, que para o maior teor de água incorporado, os consumos de 25% a 30% de cimento se tornam equivalentes para o desempenho médio.

Esta análise pode ser confrontada com os resultados apresentados nas Figuras 107, 109 e 111. Analisando agora as Figuras 107, 109 e 111, podem ser feitas algumas considerações relevantes. Para o consumo de 20% de cimento, verifica-se que, para o menor teor de água incorporado, 36%, a variação do superplastificante tende a diminuir a porcentagem de material retido na peneira de abertura de 2,38 mm, por outro lado, esta porcentagem retida

pode ser crescente para 39% e 42%, em decorrência das possíveis associações do superplastificante com as partículas do solo, porém, para o caso de 42% o valor do material retido é bem inferior aos valores anteriores.

Isto está em acordo com o papel da água na dissolução, assim como ao aumento das interações físico-químicas na mistura. Para o caso da peneira de 4,76 mm de abertura, os valores de retenção se apresentam baixos, em comparação aos valores de retenção para 2,38 mm. Os valores dos diâmetros de espalhamento se apresentam então coerentes, de modo que, para os valores referentes aos casos de 36% de água incorporada, os valores se mantêm estáveis enquanto se processa a desfloculação da mistura; para o caso de 39% existe um aumento com o aumento do teor do aditivo, seguindo-se de um refreamento, coerente com o aumento de material floculado e retido na peneira 2,36 mm de abertura; e para o caso de 42% de água incorporada existe o aumento do diâmetro de espalhamento a partir do aumento do teor do aditivo, visto que o material se apresenta menos floculado, como apresentam os resultados de retenção na peneira de 2,38 mm.

Observa-se pela Figura 107 que o valor de água evaporada é grande para os casos de maiores teores de superplastificante, e teores de água de 36 e 39%, vindo a decair para os casos de 42%. A isto se justifica possivelmente a melhor incorporação da água na mistura, coerente com os baixos valores de retenção nas peneiras, e pelos bons valores de diâmetro de espalhamento.

Para o caso de consumo de cimento de 25%, conforme a Figura 109, nota-se que a quantidade de material retido é grande se comparada aos casos de 20% de cimento, em especial, para o caso de 36% de água incorporada. Observa-se que o superplastificante atua novamente no sentido de diminuir a floculação, e, desta forma, a porcentagem de material retido se torna também menor na peneira de 2,38 mm. A quantidade de material retido na peneira mais fina tende a permanecer baixo para os casos de 39% e de 42% de água, sofrendo um ligeiro crescimento com o teor do aditivo para o caso de 42%.

Os diâmetros de espalhamento, conforme Figura 110, se mostram coerentes com a variação da retenção em peneira conforme apresentado na Figura 109, de modo que eles se situam estáveis para o teor de 36% de água, em consonância com a desfloculação do material, passando a crescer com o teor de 39% de água incorporada, uma vez que o material se

apresenta desfloculado, e vem então a experimentar novo crescimento com o teor de 42% de água, apresentando ligeira diminuição em consonância com o material retido na peneira de 2,38 mm. Como decorrência de um maior teor de cimento, a quantidade de água evaporada se torna menor, devido a sua melhor retenção pelos finos, assim como o valor da absorção, em face da cimentação.

Para os casos de 30% de cimento, conforme a Figura 111, se torna notório os aumentos dos valores das porcentagens retidas tanto na peneira de 2,38 mm como de 4,76 mm. Observa-se que estes valores tendem a se tornar menores com o aumento da quantidade de água incorporada, e com o aumento do teor de superplastificante, para cada caso. Em coerência com os menores valores retidos, são incrementados os valores dos diâmetros de espalhamento para os teores de 36, 39 e 42% de água incorporada. Nota-se também para o consumo de 30% de cimento, que os valores de evaporação de água e de absorção tendem a se tornar também baixos, independentemente do teor de água.

4.3 Resultados e Discussões do Estudo de Aperfeiçoamento

4.3.1 Escoamento por Gravidade na Mistura Otimizada

O ensaio de escoamento por gravidade através do funil com mangueira do SCAA com 18ª mistura do EO, eleita como ótima e avaliado de forma qualitativa, pôde ser efetuado com sucesso, podendo ser considerado um resultado satisfatório uma vez que todo o material passou de forma boa e rápida pelo funil, sem ocorrência de obstruções na passagem e, dessa forma, conseguindo preencher os três corpos de provas conforme a Figura 39.

4.3.2 Resistência à Compressão Axial da Mistura Otimizada

Também com a repetição da 18ª mistura, foram confeccionados 20 CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, os quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples no intuito de se determinar os valores de Resistência à Compressão Axial desta

mistura. O resultado de fck desta mistura foi de 2,91 MPa, que representa ser um bom resultado se comparado com a normatização de solo-cimento que sugere 2,00 MPa de resistência à compressão.

4.3.3 Absorção de Água na Mistura Otimizada

Com os 3 CPs de geometrias diferentes confeccionados a partir da repetição da 18ª mistura, como mostra a Figura 39, foi efetuado o ensaio de absorção de água e os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de Absorção de Água em Função da Superfície de Exposição

Corpo de Prova	Superfície de Exposição (cm²)	Absorção de Água (%)
Cilindro	196,37	2,0%
Hexagonal	1.013,2	29,0%
Tijolo	1.111,9	31,0%

Fonte: do Próprio Autor

A través dos valores da Tabela 12, pode-se observar que absorção de água pode variar com a superfície de exposição do CP que entra diretamente em contato com a água, sendo significativa a diferença entre os valores de absorção de água dependendo da superfície de exposição, uma vez que estas duas grandezas são diretamente proporcionais.

4.3.4 Resistência à Compressão Axial da 21ª Mistura

Também com a repetição da 21ª mistura, foram confeccionados 20 CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, os quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples no intuito de se determinar o fck desta mistura. O resultado de fck desta mistura foi de 7,36 MPa, o que representa um ótimo resultado se comparado com a normatização de solo-cimento que sugere 2 MPa de resistência à compressão, se aproximando de um valor para o caso de elemento estrutural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- As diferentes proporções granulométricas do solo utilizado para o SCAA desta pesquisa pode ter ocasionado diferenças diretamente proporcionais na retenção de água, levando em consideração que a quantidade de água ainda era demasiada, em função de se buscar uma mistura fluida, ocasionando a exsudação e, conseqüentemente, a segregação da massa.
- Constatou-se durante o EP que, mesmo após sucessivas homogeneizações, a mistura retornava a apresentar fases distintas, fato que pode ter influenciado nas obstruções da passagem do material pelo funil, em função da homogeneização do material não se apresentar satisfatória.
- Concluiu-se que o funil de Marsh não é o mais adequado para o caso do SCAA, recomendando a utilização de um funil com um bocal de saída em torno de 20 mm como o de garrafa pet utilizado nesta pesquisa.
- Com o aumento da quantidade de cimento nas misturas observava-se uma melhor coesão e homogeneidade nas massas que se apresentavam em uma só fase e o aumento do fator água/cimento interfere negativamente na liga do cimento, provocando perda de homogeneidade na mistura. Isto faz com que a segregação e a viscosidade aumentem, influenciando no fluxo e implicando no refreamento do escoamento, ocasionado pela competitividade dos materiais durante o escoamento.
- O aditivo é um componente importante para estabilidade de misturas de SCAA, sendo percebido que, antes da inserção do aditivo as misturas do EP apresentavam-se instáveis, em mais de uma fase, com forte segregação e, mesmo quando ocorria a estabilidade, as misturas apresentavam ausência de mobilidade, uma vez que, o aditivo, com sua ação estérica eletrostática, fornece mobilidade ao material, além de melhorar a homogeneidade, dispersando os finos na mistura, fazendo assim, com que a água seja retida pelos finos.
- A trabalhabilidade das misturas de SCAA é função da variação da relação água/cimento e água/cimento+solo, trazendo indicativos de que é possível ter bons resultados de resistência mecânica sem trazer grandes prejuízos às condições de trabalhabilidade.

- A mistura otimizada de SCAA foi atingida com os teores ótimos de água, cimento e superplastificante e foi eleita como otimizada pois se enquadrava nas propriedades no estado fresco enquanto material auto-adensável, e no estado endurecido com os requisitos estipulados por norma e, conseguindo combinar bons valores de fluidez, homogeneidade, resistência mecânica e absorção de água.
- Com relação aos métodos de dosagens para misturas de SCAA, a quantidade de água merece maior atenção, pois a mesma influencia diretamente na retração, na segregação, na exsudação, e, conseqüentemente, na heterogeneidade das misturas.
- Com relação ao cimento, o seu aumento contribuiu para a retração de secagem, pois o cimento requer mais água e esta, por sua vez, evapora, ocasionando a retração por secagem e também os diâmetros de espalhamento aumentam com a diminuição da quantidade de cimento em função do poder coesivo do cimento. Porém, os diâmetros de espalhamento aumentam com o aumento da quantidade de água nas misturas, sendo que o aditivo não demonstra grande importância na variação da superfície de espalhamento se comparado com a água.
- Efetuando-se a inserção do aditivo superplastificante nas misturas, conseguiu-se maior fluidez nas massas, tendo em vista os valores de diâmetros de espalhamento apresentados pois estão associados à fluidez, à homogeneidade e à segregação das misturas, uma vez que a incorporação do aditivo permite proporcionar a dispersão do cimento e, conseqüentemente, a desfloculação e a mobilidade.
- Considerando que as densidades médias dos materiais cerâmicos é da ordem de 2 g/cm^3 , as densidades que os corpos de provas apresentaram podem enquadrar as peças como perfis leves, e a resistência está enquadrada acima dos valores estipulados por normas, fazendo da mistura um material leve e com resistência mecânica adequada.
- Foi constatada, por esta experiência, que é possível o escoamento em meio contínuo, através do funil e escoamento livre horizontal, bem como o escoamento por gravidade através de um funil de mangueira, desde que a mistura seja bem fluída como era o caso da mistura otimizada.
- As retrações nas peças confeccionadas com o SCAA podem ser consideradas benéficas em se tratando de processo produtivo, agilizando a produção em série de peças com este material, em função da rapidez na desfôrma pelo fato da peça diminuir de tamanho dentro da

forma durante o período de cura por secagem e os valores globais para as retrações médias se apresentaram compatíveis para com as variações dos constituintes, onde o aditivo apresenta a melhor influência.

- A segregação do material SCAA pode ser influenciada pelos finos do solo na mistura em, bem como pela agregação do solo em função da flocculação dos grãos devido a atividade físico-química das argilas, tendo assim, o aditivo um papel fundamental para contribuir com a dispersão desses grãos por ação estérica eletrostática, fornecendo a melhor homogeneização às misturas.
- A superfície específica dos corpos de provas influencia diretamente na absorção de água, além do fato que a absorção de água é inversamente proporcional a densidade, e a relação água/cimento é diretamente proporcional à absorção de água. Já quanto à evaporação de água, o que está diretamente relacionada é a quantidade de água incorporada na mistura, concluindo que o aditivo praticamente não contribui para este fato, concluindo-se também que a quantidade de água evaporada diminui com o crescimento da quantidade de cimento adicionado a mistura.
- Todos os traços apresentaram valores de resistência mecânica acima de 2,0 MPa, valor este exigido como mínimo pela normatização para o solo-cimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir desta pesquisa, propõem-se como sugestões para a realização de trabalhos futuros as seguintes:

- avaliar a durabilidade de peças confeccionadas com o SCAA através de simulações de exposições ambientais;
- confeccionar peças de SCAA com aço para verificar a aderência deste ao material metálico;
- efetuar a incorporação de fibras no material SCAA;
- confeccionar painéis com o SCAA;
- realizar o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura no material.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K. Sistema solo-cal/solo-cimento. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL: O USO DA CAL NA ENGENHARIA CIVIL, 5, 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1985. v. 1, p. 27-36.

AGOPYAN, V. Estudo dos materiais de construção - materiais alternativos. **Revista Construção São Paulo**, São Paulo, v. 3, n. 1935, p. 13-16. 1985.

AIO, D. A.; SILVA, J. P. N.; MACHADO, A. F.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo da influência do uso do cimento ARI nas propriedades do solo-cimento auto-adensável. In: WORKSHOP CONCRETO: DURABILIDADE, QUALIDADE E NOVAS TECNOLOGIAS, 2., 2011, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 2011. Disponível em: <<http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2004/Estudo%20da%20influ%EAncia%20do%20uso%20do%20cimento%20ARI%20nas%20propriedades%20do%20solo-cimento%20pl%Elstico.pdf>> Acesso em: 20 maio 2011.

ALCÂNTARA, 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.

ALCÂNTARA, M. A. M. **Bétons auto-plaçants et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique.** 2004. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Institut National des Sciences Appliquées – INSA, Toulouse, 2004.

ALMEIDA, I. R. Concretos de alto desempenho. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p. 1159-1193.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais.** São Paulo: ABCP. 1985a. 5 p. (Boletim Técnico, 111).

_____. **Construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado.** São Paulo: ABCP. 1985b. 5 p. (Boletim Técnico, 10).

_____. **Solo-cimento na habitação popular.** São Paulo: ABCP. 1985c. 14 p. (Boletim Técnico).

_____. **Dosagem das misturas de solo-cimento:** normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: ABCP, 1986, 51 p. (ET, 35).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5732:** cimento portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5733:** cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5735:** cimento portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

_____. **NBR 5736:** cimento portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 6457:** amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

_____. **NBR 6459:** solo - determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

_____. **NBR 6502:** rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

_____. **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.

_____. **NBR 7180:** solo - determinação do limite de plasticidade - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

_____. **NBR 7181:** solo - análise granulométrica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988. 13p.

_____. **NBR 7681:** calda de cimento para injeção - especificação. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

_____. **NBR 7682:** calda de cimento para injeção - determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

_____. **NBR 8491:** tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1984. 4 p.

_____. **NBR 8492:** tijolo maciço de solo-cimento – determinação da resistência à compressão e absorção de água – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 5 p.

_____. **NBR 10832:** fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

_____. **NBR 12025:** solo-cimento - ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

_____. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_____. **NBR 13555:** solo-cimento – determinação da absorção d'água. Rio de Janeiro, 1996. 1 p.

_____. **NBR MB 3443:** solo - controle de compactação pelo método de filf. Rio de Janeiro, 1991. 10 p.

_____. **NBR MN 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

_____. **NBR MN 68:** concreto – determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de graff. Rio de Janeiro, 1998. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL – ABPC. O uso da cal na engenharia civil. In: REUNIÃO DA INDÚSTRIA DA CAL, 5., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1985. 174 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL – AFGC. **Bétons autoplaçants, recommandations provisoires.** Paris: AFGC, 2000, 26 p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LCT, 1994. v. 2, 531 p.

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: 29 nov. 2011.

BOMBLED, J. P.; KALVENES, O. **Comportement rhéologique des pâtes, mortiers et bétons**: mesure, évolution, influence de certains paramètres. Paris: Revue des Matériaux de Construction Ciments et Bétons, 1967. v. 1, 179 p.

CAMÕES, A. Influência da presença de adições minerais no comportamento do betão fresco em composições com incorporação de superplastificantes. **Revista de Engenharia Civil**, Azurém, n. 23, p. 19-29, 2005.

CAMPOS, I. M. **Conheça os três tipos principais de solo**: areia, silte e argila. [S.l.]: IBDA, 2011. Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=59>> Acesso em: 23 maio 2011.

CARVALHO, J. C. Solo como material de construção. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON (Org.). **Materiais de construção civil e princípios básicos de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1, p. 525-561.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO – CEPED. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari: CEPED/ABCP, 1984. 147 p.

COMISSÃO EXECUTIVA DE PLANEJAMENTO DA LAVOURA CACAUEIRA – CEPLAC. **Construção com solo-cimento**. Cruzeiro: CEPLAC, 2011. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/semfaz/solocimento.htm>> Acesso em: 18 maio 2011.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L; HEINECK, K. S. Key parameters for Strength Control or Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 133, n. 2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R.C.; FONSECA, A. V.; COOP, M. R. Influence of cement-voids on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand ASCE. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 138, n. 1, p.100-109, 2012.

CONSTRUTORA ECOLOGIKKA. **Tijolo de solo-cimento**. Atibaia: Ecologikka, 2011. Disponível em: <<http://construtoraecologikka.com.br/Tijolo-solo-cimento.php>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

ECODOMUS. **Tijolo de solo-cimento**. [S. l.: s. n., 2011?]. Disponível em: <<http://ecodomus-br.blogspot.com/2011/01/tijolo-de-solo-cimento.html>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES- EFNARC. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Farnham: EFNARC, 2002. 32 p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>>. Acesso em: 18 jan. 2012.

FEITOZA, J. S. **Consolidação de solos moles com o uso de célula eletro-osmótica**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FONSECA, A. V; CRUZ, R. C; CONSOLI, N. C. Strength properties of a sandy soil-cement admixtures. **Journal Geotechnical & Geological Engineering**, Oklahoma, v. 27, n. 6, p. 681-686. 2009.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica dos solos artificialmente cimentados**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GOMES, C. F. **Argila: o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. 457 p.

GOODARY, R.; LECOMTE-NANA G. L.; PETIT, C.; SMITH, D. S. Investigation of the strength development in cement-stabilised soils of volcanic origin. **Construction and Building Materials**, Limoges Cedex, v. 28, n. 1, p. 592-598, 2012.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 180 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do concreto fresco**. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON. (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, p. 473-494.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento portland. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO 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. 905-944.

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.

ISNTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA – IBDA. **Solo-cimento, solução para economia e sustentabilidade.** São Paulo: IBDA, 2011. Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=124>>. Acesso em: 30 nov. 2011.

INO, A. et al. **Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010, v. 1, 832 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/livre%20doc%C3%Aancia%20vmjohn.pdf>> Acesso em: 25 out. 2011.

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

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

L’HERMITE, R. **Ao pé do muro.** Taguatinga: SENAI, 1967. 173 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.

MACHADO, A. F. et al. Análise da adição de resíduos de concreto nas características do solo-cimento plástico para uso em estacas moldadas in loco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: CBC, 2005. v. 8, p. 17. Disponível em: <<http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2005/An%E1lise%20da%20adi%E7%E3o%20de%20res%EDduos%20de%20concreto%20nas%20caracter%EDsticas%20do%20solo-cimento%20pl%E1stico%20para%20uso%20em%20estacas%20moldadas%20in%20loco.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2012.

MAGALHÃES, O. P. et al. Efeito da composição dos parâmetros de resistência e de rigidez de misturas de solo-cimento. 2012

MARTIN, J. F. M. Aditivos para concreto. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, p. 381-406.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

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

OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. **Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Materiais/Universidade Federal de São Carlos, 2007. 7 p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v53n327/a0853327.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Porto Alegre: Globo, 1978, 435 p.

PINTO C. S. **Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento**. 4. ed. São Paulo: ABCP, 1980. 22 p.

_____. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 p.

_____. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

_____. Propriedades dos solos. In: HACHICH W. et al. (Org). **Fundações: teoria e prática**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1998, p. 51-118.

SALOMÃO, F. X. T; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. de (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 87-100.

SAMPAIO, E. **Mineralogia do solo**. Évora: Departamento de Geociências: Universidade de Évora. 2006. 22 p.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP**. 2000. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

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

SKARENDAHL, A. Self-compacting concrete. **State-of-the-art report of RILEM TC 174-SCC - SARL**, Bagneux, v. 23, n. 35, p. 3-5, 2000.

SIKA S. A. **Inovation & consistency**. São Paulo: SIKA, 2012. Disponível em: <http://www.sika.com.br/pt/solutions_products/02/02a001/02a001sa99/02a001sa99ssa01/02a001sa99ssa01100/02a001sa99ssa01108.html>. Acesso em: 15 jan. 2012.

SILVA, A. M. Habitação em solo-cimento. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA CIVIL, 3., 1991, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 1991. p. 21-34.

SOUZA, R.; TAMAKI, M. R. **Especificação e recebimento de materiais de construção**. São Paulo: Centro de Tecnologia de edificações. 2001. 101 p.

TAVEIRA, E. S. N. Solo-cimento como sistema construtivo para habitações populares. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA CIVIL, 3., 1991, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 1991. p. 35-58.

VAMOS CONSTRUIR. **Tijolo de solo-cimento**. São Paulo: Ambela, 2011. Disponível em: <<http://vamosconstruir.com/materiais/tijolo-solo-cimento>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

VERALDO, A, C. **Casa de terra: interação entre arquitetura, paisagem e arte**. Campo Grande: Miranda, 2009. <<http://anaveraldo.blogspot.com/p/casa-de-terra.html>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

VIMAQ PRENSAS. **Tijolo ecológico de solo-cimento**. São Paulo: Vimaq Prensas, 2006. Disponível em: <<http://www.vimaqprensas.com.br/tijolo-ecologico-tag/obras>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2008.

ZIMBACK, C. R. L. **Classificação dos solos**. Botucatu: FCA/UNESP, 2003. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/30902309/Classificacao-dos-solos-Pedologia>>. Acesso em: 24 set. 2012.

YAZIGI, W. **A Técnica de edificar**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2003. 768 p.

ANEXOS

ANEXO A – Caracterização do 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	M34	Solo Umido (g):	70,71
(S + A + T) (g)	87,74	Solo Seco (g):	68,38
(S + T) (g)	84,10	ρ_s (g/cm ³):	2,78
(S) (g)	55,99	Solo Seco Resíduo - # 200 (g):	27,73
(A) (g)	3,64	Densímetro:	1
(T) (g)	28,11	Defloculante:	Hexametáfosfato de Sódio
w (%)	8,5	Am Total (Pen.Grosso)	66,39

T (°C)	Tempo (min)	Leitura	Correção	Leitura Corr.	Viscosid. $\mu s(10^{-4})$	ρ_w (g/cm ³)	Alt. Queda (cm)	Diâmetro ϕ (mm)	Porc. %
				0,00				0,076	58,2
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	15,5	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 N°	Diâmetro ϕ (mm)	Massa Retida	Porc. % < ϕ	Peneira N°	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	4,8	0,00	100,0	200	0,075	27,73	58,2
10	2,0	0,00	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	#10 #4
		Média: 0,42 < ϕ < 2,0	#40 #10
		Fina: 0,05 < ϕ < 0,42	#270 #40
Silt	0,005 < ϕ < 0,05	-	-
Argila	ϕ < 0,005	-	-

Porcentagem de Coorênola		
Fração	Subdivisão	(%)
Pedregulho	-	0,0
	Grossa	0,0
	Média	1,6
Areia	Fina	54,7
	-	11,4
Silt	-	11,4
Argila	-	32,3

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Classificação:	
Poço:	Amostra: SOLO PODZÓLICO VERMELHO AMARELO
Profundidade: (m)	Data: 13/07/2011
Local:	Operador: Mário / Gilson
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	26,0	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



