

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO AUTO-ADENSÁVEL

Study of behavior self-compacting soil-cement

Susana Dalila Dolejal Berté¹, Marco Antônio de Morais Alcantara²

Recebido em 07 de agosto de 2013; recebido para revisão em 14 de setembro de 2013; aceito em 26 de setembro de 2013; disponível on-line em 25 de novembro de 2013.



PALAVRAS CHAVES:

Comportamento reológico;

Solo-Cimento Auto-Adensável;

Requisitos de desempenho;

KEYWORDS:

Rheological behavior;

Self-compacting Soil-cement;

Performance requirements.

RESUMO: O artigo apresenta um estudo experimental sobre o Solo-Cimento Auto-Adensável – SCAA, com base na variação dos seus constituintes e nas propriedades resultantes sobre o estado fresco e o endurecido, e no atendimento aos requisitos para componentes de alvenaria. Para tanto, contou-se com 27 misturas, sendo fixado o valor de solo em massa, e variando-se os teores de cimento, de água, e de aditivo superplastificante. Como ensaios no estado fresco foram realizados os seguintes: ensaios do funil, ensaios de espalhamento, ensaios de segregação e ensaios de adensamento e moldagem de corpos de prova via escoamento por gravidade; e no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água. Observou-se que as condições de fluidez do SCAA são influenciadas predominantemente pela porcentagem de água em mistura; o cimento influencia de modo relevante nas condições de viscosidade, e que o superplastificante pode atuar tanto em sinergia com a água de maneira a aumentar a fluidez, como de modo inverso, de modo a refrear o escoamento. Os resultados de resistência à compressão apresentaram valores médios de 3,89 MPa, sendo que algumas misturas chegaram a valores de até 7,5 MPa.

ABSTRACT: The paper presents an experimental study on the Soil-Cement Self-compacting concrete - SCAA, based on the variation of its constituents and the resulting properties of fresh and hardened states, and in meeting the requirements for masonry components. Therefore, counted with 27 mixtures and fixed the value of the soil mass, and varying levels of cement, water, and of superplasticizer. As in fresh assays were performed as follows: test the funnel scattering assays, assays and assays segregation density and molding test specimens via gravity flow, and in the hardened state tests were carried resistant to axial compression and water absorption. It was observed that the fluidity of SCAA conditions are influenced predominantly by the percentage of water in the mixture; cement influence in a relevant way the conditions of viscosity, and that the superplasticizer may act either synergistically with water so as to increase the fluidity, and conversely, to restrain the flow. The results of compressive strength showed average values of 3.89 MPa, and mixtures reached some values up to 7.5 MPa.

* Contato com os autores:

¹ e-mail : susanaberte@yahoo.com.br (S. D. D. Berté)

Eng^a. Civil, Mestre, Docente do curso de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Oeste Paulista - UNOESTE

² e-mail : alcantara@dec.feis.unesp.br (M. A. M. Alcantara)

Eng. Civil, PhD, Professor Assistente Faculdade de Engenharia de Ilha solteira da Universidade Estadual Paulista Júlio de mesquita Filho - FEIS/UNESP

1. INTRODUÇÃO

O solo tem sido tradicionalmente uma fonte de matéria prima para a produção de materiais de construção de habitações, podendo ser utilizado na forma crua, sem queima. Abiko (1984) apresenta relatos do cotidiano sobre a utilização da terra crua concebendo sistemas construtivos compostos como alvenaria de tijolos adobes, taipa de sopapo, e taipa de pilão. Todavia, conforme Abiko (1984), este tipo de material tem como limitações a tendência de retornar ao estado plástico quando em contato com a umidade, assim como, de sofrer posteriores retrações de secagem, além de, quando nos ciclos de absorção e secagem, sofrer perda de massa, aumentando a permeabilidade. Como meios de se conter os efeitos desfavoráveis da umidade aos solos, o autor recomenda a estabilização destes com aditivos químicos cimentantes, dentre eles, o cimento. Com relação à compreensão do solo-cimento, tem-se conforme Abiko (1984) e Grande (2003) que, 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 ter elevação do valor da resistência à compressão, maior durabilidade, e boa impermeabilidade. De acordo com Goodary *et al.* (2012), a maioria das pesquisas sobre solo-cimento tem como objetivos a melhoria da resistência do solo e das suas características de durabilidade.

A tecnologia do solo-cimento compactado se difundiu generalizadamente na construção. Para o caso de fabricação de tijolos Segantini e Alcantara (2010) apresentam prensas manuais e automatizadas para a fabricação do solo-cimento prensado, bem como normas técnicas prescritas para estes materiais. Contudo, estas exigem um dispêndio de energia física para os operadores, nos casos de prensas manuais, ou de um custo inicial de implantação para o caso de prensas automatizadas. Uma alternativa de fabricação do solo-cimento poderia ser também através da viabilização do uso de uma forma auto-adensável para a fabricação deste material. Isto pode ser hoje viabilizado a partir do uso de aditivos superplastificantes, os quais podem contribuir para a fluidificação do solo-cimento. Neste sentido, cumpre estabelecer uma distinção entre o que seriam os materiais nas formas compactadas ou auto-adensável.

2. OBJETIVO

Os objetivos desta pesquisa foram os de

estabelecer alguns parâmetros de dosagem que permitissem conceber o SCAA para a produção de componentes de alvenaria, bem como, procurou-se enquadrar o SCAA dentro do contexto dos materiais que cumprem fins de vedação e pequena responsabilidade estrutural, papéis similares aos do solo-cimento tradicional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao se considerar as propriedades do solo-cimento em função dos parâmetros de dosagem, tem-se que embora a quantidade de água incorporada ao solo tenha importância para o processo tecnológico, assim como a quantidade de cimento, segundo Consoli *et al.* (2007), Fonseca *et al.* (2009), e também Magalhães *et al.* (2012) algumas dificuldades têm sido encontradas em se adotar o fator a/c como uma variável de estudo, especialmente como parâmetros de dosagem. De acordo com Fonseca *et al.* (2009), a isto podem ser consideradas questões particulares relativas à compactação de solos, como: a interação físico-química, a porosidade, e o tempo de compactação. Isto se apresenta coerente ao que é apresentado em Lima (1981). Os autores consideram de modo unânime que, para o caso do solo-cimento a relação que melhor pode apresentar correlação com o valor da resistência à compressão simples é a combinação entre a quantidade de vazios do solo com o volume de cimento adicionado, conforme a Equação 1. Este conceito apresentado procura conciliar a influência destas duas variáveis: do teor de cimento e da porosidade que, para o caso do solo-cimento, se apresenta como o mais eficiente no estabelecimento de variáveis de estudo, de modo que:

$$q_u (kPa) = A \left[\frac{V_v}{(V_{ce})^C} \right]^{-B} \quad \text{Eq. [01]}$$

Onde:

q_u : valor a resistência à compressão simples (kPa),

V_v : volume de vazios do solo (litros),

V_{ce} : volume de cimento adicionado (litros)

A, B e C: coeficientes utilizados de acordo com o tipo de solo utilizado, sendo adimensionais.

Estudos de Foppa (2005) e de Cruz (2008) procuraram verificar ideias às quais consideravam que durante a compactação de solos nunca se consegue expulsar completamente o ar dos vazios do solo, e, por causa disto, a relação água/cimento não seria a relação mais adequada, devendo haver uma relação mais importante com a estrutura do solo nas propriedades deste material. Estes autores buscaram ideias que

sugerem que a resistência seja correlacionada com a relação entre o volume de vazios com o volume de cimento. Fizeram então variar a relação “ η ”, porosidade, pela C_{iv} , teor volumétrico de cimento, de modo que, para estas duas últimas variáveis, se elimina a influência das dimensões da amostra. Obtiveram êxito em apresentar a variação da resistência e da rigidez do solo-cimento com a relação $\eta-C_{iv}$, de modo a que esta relação seja uma orientação de projeto no sentido de se monitorar o valor da resistência mecânica. Por outro lado, resultados diferentes podem ser apresentados em Horpbilsuk (2003), e que também são citados 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. Neste caso, a quantidade de água utilizada era elevada 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 de vazios presentes na fase de argamassa. Neste sentido, compreende-se que o valor da resistência mecânica poderia ser correlacionado com a relação água/cimento de modo que:

$$R = f(a/c) \quad \text{Eq. [02]}$$

Onde:

R: valor da resistência mecânica,

a/c: relação água/cimento.

Os papéis de natureza físico-química desempenhados pela água nos poros do solo seriam então diferentes, para os casos de solos saturados e de solos insaturados, assim como do teor de umidade em mistura. Consideram 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. 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.

Outras maneiras de se produzir o solo-cimento tem surgido em tempos mais recentes, procurando explorar misturas que requeiram valores baixos de energia em processo de moldagem, dispensando a

compactação. Segantini e Alcantara (2010) apresentam o solo-cimento plástico, concebido de modo a ser compactado sob a ação do seu peso próprio, podendo ser aplicado em contextos diversos, sendo, no caso apresentado em Segantini (2000), Morais (2000), e Machado et al. (2005), utilizado particularmente para a produção de estacas moldadas “in loco”, cujos requisitos de desempenho estão relacionados às exigências geotécnicas para fundações. De acordo com Segantini e Alcantara (2010), para a dosagem do solo-cimento plástico, a utilização dos teores de cimento deve ser, em peso, 4% acima daqueles sugeridos para o solo-cimento compactado, quando na sua densidade máxima. Alertam os autores que “alguns tipos de solo, sobretudo os mais finos, requerem quantidades elevadas de água para se conseguir a consistência plástica desejada, similar a uma argamassa de emboço. Nesses casos, deve-se levar em consideração a relação água/cimento na dosagem, sendo ideal uma relação “ $a/c < 1,0$ ”.

Isto vem de encontro aos relatos de Aio et al. (2011), que consideram que, em termos tecnológicos, 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).

Skarendahl (2000) destaca a fluidez alcançada com a inserção de aditivos superplastificantes em misturas cimentícias. Os aditivos superplastificantes, desenvolvidos para concretos, podem ser compreendidos conforme Alcantara (2004), o qual ressalta sobre a importância destes, os superplastificantes de ação estérica e eletrostática os quais promovem as boas condições de fluidez e de trabalhabilidade para os casos de concretos auto-adensáveis, visto que, a água é limitada para promover a boa dispersão do cimento, sendo o seu excesso responsável pela exsudação e segregação. Em termos de fatores atuantes sobre a reologia do concreto fresco, de acordo com Bomble e kalvenes (1967), a fluidez é prejudicada conforme aumenta o atrito interno das misturas, e este está diretamente ligado a granulometria com relação à textura, ao tamanho e à forma dos grãos. Ainda segundo Bomble 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. Nesse mesmo sentido, Alcântara (2004) considera que os finos assumem papel relevante no escoamento em razão de sua ação de superfície e formação de pasta, podendo, em alguns casos, favorecer o escoamento por efeito de lubrificação em razão de sua forma, ou refrear a partir de certo teor.

Dentro das considerações apresentadas, pode-se estabelecer a distinção entre o solo-cimento tradicional, compactado, o qual sofre a influência dos processos de compactação na estrutura dos solos, e os casos de solo-cimento plástico ou auto-adensável, viabilizado pela mistura íntima dos materiais, a partir da influência dos componentes de mistura.

4. METODO

Apresenta-se a seguir os materiais e os procedimentos realizados para a fabricação e a avaliação de desempenho do solo-cimento auto-adensável.

4.1 MATERIAIS

O solo utilizado na pesquisa foi do tipo Podzólico Vermelho Amarelo. 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; este foi um dos motivos de optar-se por estudá-lo. Outro motivo que levou à escolha deste solo foi o fato deste apresentar, segundo Alcantara (1995), granulometria que possui grãos de argila, silte, areia fina e areia média de maneira equitativa, considerando

importante para o solo-cimento a distribuição dessas partículas, as quais podem favorecer a homogeneidade e a densidade, além disso, considerou-se que, segundo Alcantara (1995), este solo apresenta baixos teores de matéria orgânica, as quais são potencialmente desfavoráveis às reações de hidratação do cimento. O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II Z 32, regulamentado pela NBR 11578:1991, é um produto de grande disseminação e facilidade de ser encontrado no mercado. Optou-se por utilizar um aditivo superplastificante dispersante para concreto de ação estérica e eletrostática.

4.2 MÉTODO

Foram realizados no Laboratório de Materiais e Solos do Departamento de Engenharia Civil da UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira – SP um estudo experimental do material SCAA, que contou com 27 misturas, fixando-se que a quantidade de solo em 5000 gramas, e variando-se os teores de cimento, água e de aditivo superplastificante, com o objetivo de identificar a influência destes no comportamento e nas propriedades do SCAA. No caso do estado fresco tinha-se por alvo a melhoria das propriedades de fluidez, homogeneidade, e de se viabilizar o processo tecnológico, e no estado endurecido, tinha-se por alvo o atendimento aos requisitos de desempenho do material como componente de construção, dos pontos de vista de resistência e de absorção. A Figura 1 mostra os teores das misturas deste estudo.

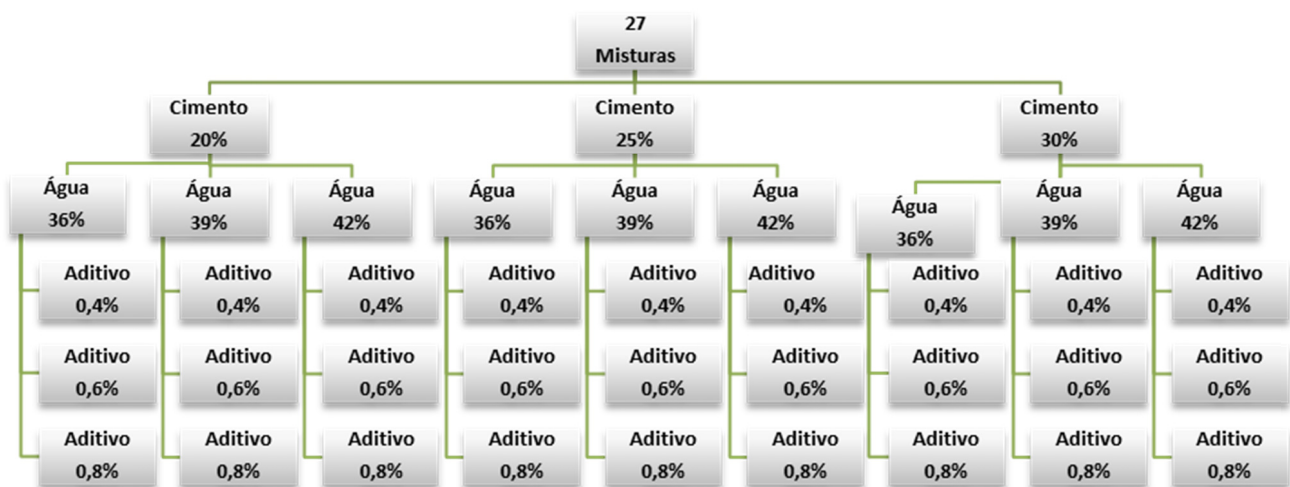


Figura 1 : Composições do Experimento

Em todas as misturas a homogeneização foi realizada em argamassadeira com capacidade para 20 litros. A Figura 2 apresenta o equipamento e a Figura 3 apresenta o aspecto da mistura solo-cimento enquanto era realizado o processo. O tempo de mistura se deu conforme o requerido para a completa homogeneização.

Os ensaios realizados no estado fresco foram os seguintes: Ensaio de Espalhamento “Slump-Flow”, Ensaio do Funil, Ensaio de Segregação por Peneiramento, Ensaio de Adensamento e de Moldagem por Ação da Gravidade. O Ensaio de Espalhamento foi executado conforme proposto por AFGC (2000) com algumas adaptações. Este tinha por objetivos verificar as variações das condições de coesão interna, e de fluidez das misturas. De modo similar ao que é executado para os casos de concreto auto-adensáveis, utilizou-se de uma placa metálica de 100 x 100 cm, e de um tronco de cone com materiais de mesmas características da base. Este cone possuía as mesmas dimensões do que é utilizado para os ensaios de “argamassa equivalente”,

conforme descrito em Schwartztruber e Catherine (2000), dadas por 100 mm para a abertura maior, 50 mm para a abertura menor, e 150 mm de altura. O interior cone era então preenchido com o material a ser avaliado, com o posterior regularização de superfície e limpeza do entorno, sendo, então, após erguido com o posterior escoamento do material em regime de escoamento livre sobre a placa.

O ensaio está ilustrado nas Figuras 4 e 5. Adotou-se o valor médio entre os dois diâmetros finais perpendiculares. Além dos diâmetros médios, os aspectos de homogeneidade foram considerados de modo visual, observando-se de forma qualitativa o aspecto circular da superfície, assim como as possíveis presenças de franjas ou vestígios de exsudação no contorno do círculo. Os objetivos do ensaio foram tão somente de observar as variações das propriedades viscosas, e fornecer informações de modo a poder associar com as condições de trabalhabilidade.



Figura 2: Argamassadeira utilizada na preparação do SCAA.



Figura 3: Solo-cimento sendo homogeneizado em argamassadeira.



Figura 4: Preenchimento do Cone.



Figura 5: Medição dos diâmetros do Espalhamento.

Para o ensaio do funil utilizou-se de um fabricado a partir de garrafa Pet, como ilustra a Figura 6. O procedimento se deu desta forma, dado que a garrafa pet trata-se de uma mercadoria com boa disseminação no mercado mundial, facilitando assim, a reprodução deste ensaio. Como modo de averiguar a fluidez das misturas, analisou-se o fluxo de queda do material através da velocidade expressa por massa/tempo dada em g/s. O procedimento deste ensaio consistiu em preencher o funil com 1000 g da mistura e, em seguida, registrar o tempo de escoamento de modo similar ao Ensaio de Determinação de Fluidez das pastas de cimentos prescritos pela NBR 7681 (ABNT, 1983) e NBR 7682 (ABNT, 1983). Buscou-se associar os resultados de fluidez em escoamento confinado com os de espalhamento, em regime livre.



Figura 6: Funil fabricado para a pesquisa

Quanto às condições 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 7 e 8. Este ensaio se assemelha em parte com o ensaio de peneiramento utilizado em Alcântara (2004) para se verificar a segregação em casos de concretos auto-adensáveis. No caso de Alcântara (2004), se utilizou de peneiras para mensurar a quantidade de material passante nas mesmas em relação à quantidade total de material nelas despejado. Para o caso desta pesquisa se avaliou a

quantidade de material retido com relação ao peso total vertido, o qual poderia ser resultado de floculação na mistura, ou do aumento da viscosidade, podendo, inclusive se buscar correlações com os valores dos ensaios de espalhamentos. Cumpre observar que os ensaios no estado fresco de espalhamento, do funil, e de segregação não tiveram repetição.



Figura 7: Ensaio de Segregação



Figura 8: Material retido na Peneira

Os ensaios de adensamento e moldagem tiveram como critério o preenchimento das fôrmas com as misturas sem auxílio de outro recurso senão a ação da gravidade, em corpos de provas cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento como mostra a Figura 9. Neste caso se permitiu a obtenção de três corpos de prova por mistura, e que permitiram a avaliação das densidades aparentes alcançadas, pela avaliação das dimensões e das pesagens após a cura. Ainda foram visualizadas de modo qualitativo as condições aparentes das superfícies dos corpos de prova.



Figura 9: Ensaio de Adensamento em moldes cilíndricos.

Com o intuito de averiguar a mobilidade e auto-adensabilidade do material, preenchendo três moldes de diferentes geometrias, como um paver hexagonal, um tijolo vazado e um cilindro, como mostra a Figura 10, foi efetuado um ensaio de adensamento e moldagem com a 18ª mistura. O preenchimento dos três moldes se deu utilizando-se de um funil acoplado a uma mangueira de 2 metros de comprimento e ½" de diâmetro, como mostra a Figura 11. A escolha da 18ª mistura para a realização deste ensaio se deu pelo motivo desta apresentar bom valor de fluidez, e bom

valor de espalhamento no ensaio "slump-flow".

Os ensaios realizados no estado endurecido foram: Resistência à Compressão Axial e Absorção de Água. Os corpos de provas que foram submetidos ao Ensaio de Resistência à Compressão simples ficaram em câmara úmida durante 28 dias para cura e seguiram as orientações das NBRs 12025 (ABNT, 2012), NBR 8491 (ABNT, 1984) e NBR 8492 (ABNT, 1984). O ensaio foi executado através do equipamento Prensa de ensaio de CBR – Índice de Suporte Califórnia, contento anel dinamométrico com capacidade de 4000 Kgf, sendo a operação feita de forma manual e obtendo o valor da carga de ruptura em Kgf. Os ensaios de absorção de água foram realizados nos corpos de prova cilíndricos das 27 misturas e se deram seguindo as prescrições da NBR 13555 (ABNT, 1996), da NBR 8491 (ABNT, 1984) e da NBR 8492 (ABNT, 1984). Adotou-se 3 unidades experimentais para cada mistura nos ensaios mecânicos e de absorção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 1 apresenta os resultados dos ensaios no estado fresco, considerando a fração de água cimento e aditivo e os parâmetros obtidos de segregação, espalhamento e velocidade do funil.

Quadro 1: Resultados dos Ensaio no Estado Fresco.

Cimento (%)	Água (%)	Aditivo (%)	Segregação 2,38mm (%)	Segregação 4,76mm (%)	Diâmetro de Espalhamento (cm)	Desvio Padrão Diâmetro de Espalhamento	Velocidade Passagem Funil (g/s)
20	36	0,4	26,9	2,4	39	0,25	516,49
		0,6	20,9	2,4	42	1,50	568,85
		0,8	11,2	0,4	41	3,00	655,00
	39	0,4	6,4	1,3	43	0,00	666,20
		0,6	18,7	3,3	59	7,00	348,95
		0,8	25,4	2,2	51	0,50	594,00
	42	0,4	2,1	1,9	50	0,50	173,00
		0,6	4,4	1,2	58	0,50	148,00
		0,8	8,5	1,4	86	2,00	1.695,00
25	36	0,4	67,0	15,7	36	0,80	412,23
		0,6	65,6	24,2	41	0,00	554,00
		0,8	39,2	15,2	36	0,50	323,74
	39	0,4	8,1	1,0	46	0,00	507,28
		0,6	5,6	7,2	45	0,00	396,00
		0,8	7,7	0,8	63	5,00	603,28
	42	0,4	8,7	1,5	82	5,00	710,66
		0,6	12,4	1,6	80	1,00	840,00
		0,8	12,8	1,8	77	0,25	750,00

Quadro 1: Resultados dos Ensaios no Estado Fresco (Continuação...).

30	36	0,4	100,0	68,2	29	0,25	226,76
		0,6	82,6	40,9	40	0,50	536,19
		0,8	87,1	54,6	36	0,00	444,50
	39	0,4	81,9	38,8	45	1,00	479,61
		0,6	54,1	14,8	40	0,50	642,20
		0,8	20,8	2,2	37	0,00	692,04
	42	0,4	32,3	6,6	68	3,00	727,70
		0,6	21,9	4,8	60	3,00	680,35
		0,8	24,0	6,2	57	3,00	797,00

Quanto aos valores dos diâmetros de espalhamento, a mistura que apresentou o menor valor de espalhamento, igual a 29 cm, tinha como dosagem o maior valor de cimento (30%), o menor valor de água (36%), e o menor valor de superplastificante (0,4%). Resultou numa mistura menos fluída, conforme o resultado apresentado, todavia cumpre observar que não foi comprometido o caráter auto-adensável com relação à qualidade da mistura diante dos ensaios no estado fresco.

Considerando-se as informações do Quadro 1, pode-se observar que, de maneira geral, para cada caso de consumo de cimento os diâmetros médios de espalhamento são favorecido gradativamente com o aumento da porcentagem de água em mistura; quanto à variação do teor de superplastificante, verifica-se que o seu incremento pode contribuir tanto para o aumento do diâmetro médio de espalhamento, como para a diminuição, em alguns casos. Aparentemente, o aumento do teor do superplastificante pode atuar em sinergia com a ação fluidificante da água; por outro lado, questiona-se pelos resultados que o aumento do superplastificante pode, aparentemente, também contribuir para o refreamento do escoamento, em consequência de possíveis interações físico-químicas entre moléculas deste com as partículas do solo, dotando então o material de maior viscosidade. As suposições quanto às interações físico-químicas entre o superplastificante e o solo são com base em Alcântara (1995), em face de o solo poder apresentar cargas elétricas na superfície, e destas poderem interagir cargas elétricas das moléculas do superplastificante.

Em complemento à discussão do parágrafo anterior, a Figura 12 ilustra a variação do diâmetro de espalhamento em função do teor de água incorporada, considerando-se para cada caso os valores médios dos

diferentes teores de cimento, e adotando-se também para o teor de aditivo a média aritmética dos valores.

Com relação à variação do consumo de cimento, observa-se que este pode contribuir preferencialmente para a tendência da diminuição do diâmetro de espalhamento, quando considerados os mesmos valores de porcentagem de água adotados. Para o caso do aumento de 20 para 25% de cimento, e utilização de 42% de água incorporada, houve possivelmente um efeito favorável no escoamento em decorrência do aumento do consumo de cimento, favorecendo a dispersão do material por efeito estérico-eletrostático onde as partículas de cimento tem um papel relevante. Já para os casos de maior consumo de cimento, 30%, existe de maneira mais efetiva a influência na diminuição do espalhamento, de modo que a curva referente a este valor se posiciona abaixo daquela dos valores médios, possivelmente em decorrência do aumento da viscosidade conferido pelo cimento.

Em coerência com o papel fluidificante da água, observado para os casos de escoamento livre, pode ser notada, através das Figuras 13 e 14, a influência desta na possível desfloculação ou na diminuição da viscosidade, com conseqüente diminuição de retenção nos ensaios de peneiramento, realizados com auxílio das peneiras de 2,38 mm e 4,76 mm, respectivamente. No caso, o efeito da água na desfloculação está compatível com as melhorias na mobilidade e no aumento do diâmetro de espalhamento com o aumento do teor de água, verificadas conforme a Figura 12. A influência do aumento da porcentagem de água se faz mais relevante para os maiores teores de cimento, do mesmo modo que, na Figura 12, anterior, a inclinação das curvas são maiores para os maiores teores de cimento, dando um indicativo de que a porcentagem de cimento pode contribuir para a maior sensibilidade quando em manipulações das misturas.

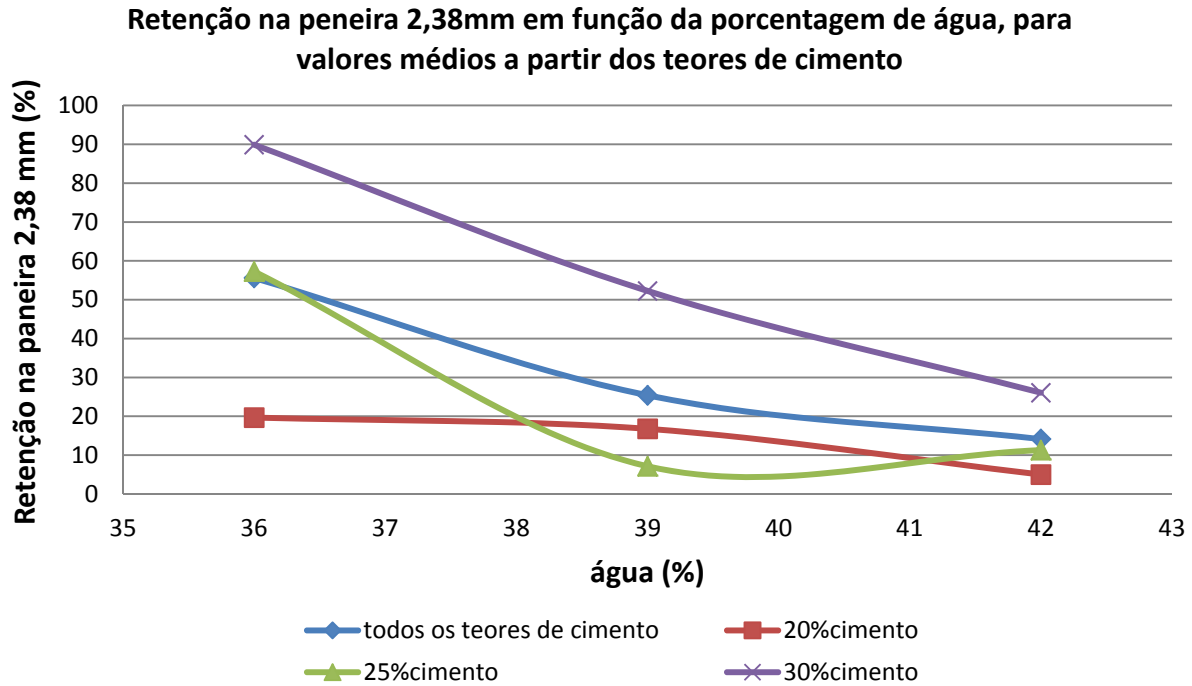


Figura 13: Retenção na Peneira 2,38 mm em função da porcentagem de água, para valores médios a partir teores de cimento.

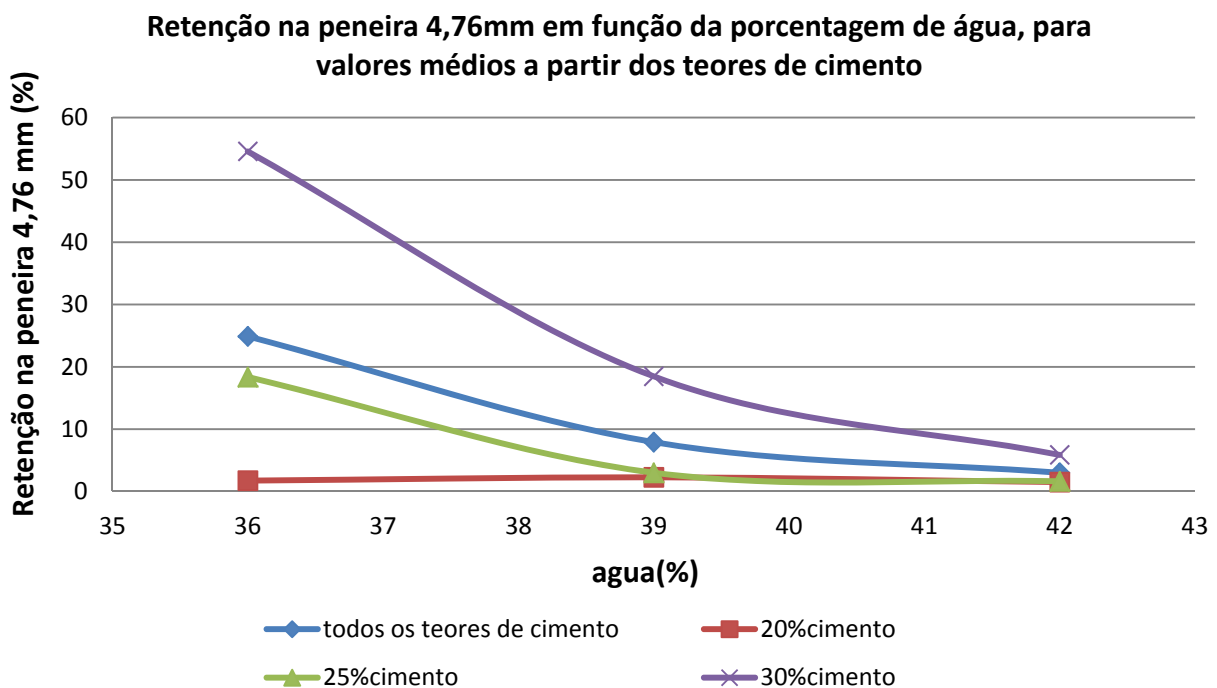


Figura 14: Retenção na Peneira 4,76 mm em função da porcentagem de água, para valores médios a partir teores de cimento.

Conforme a Figura 15, a seguir, pode-se notar que o aumento da retenção nas peneiras cresce com o teor de cimento para os dois casos de abertura de peneira. Isto se mostra coerente com o papel demonstrado pelo cimento em conferir maior coesão e viscosidade às misturas.

A taxa de crescimento tende a ser maior para o caso da peneira de menor diâmetro de abertura, em face da floculação que é decorrente de ações físico-química, e que cujos resultados são intuitivamente percebidos quando em aberturas de menores diâmetros.

Quanto ao caso do escoamento confinado com o auxílio do funil, observa-se que existe uma tendência de haver o aumento da vazão mássica com o

aumento do diâmetro de espalhamento, porém com um valor de correlação que seria situado como baixo, tendendo á médio. Como apresentado para o caso do escoamento livre, a variação do superplastificante e do cimento pode contribuir tanto para o aumento da como para a sua diminuição do escoamento. Fatores como a competitividade no escoamento para a passagem do bocal, influenciadas pela formação de flocos, podem contribuir para alguns valores anômalos, ou para a diminuição de valores. A Figura 16 ilustra as possíveis correlações entre os valores de escoamento livre e os de escoamento confinado. Observa-se que, para a curva proposta, existe a tendência de correlação que se situa próximo de correlação média, cujo coeficiente seria 0,5.

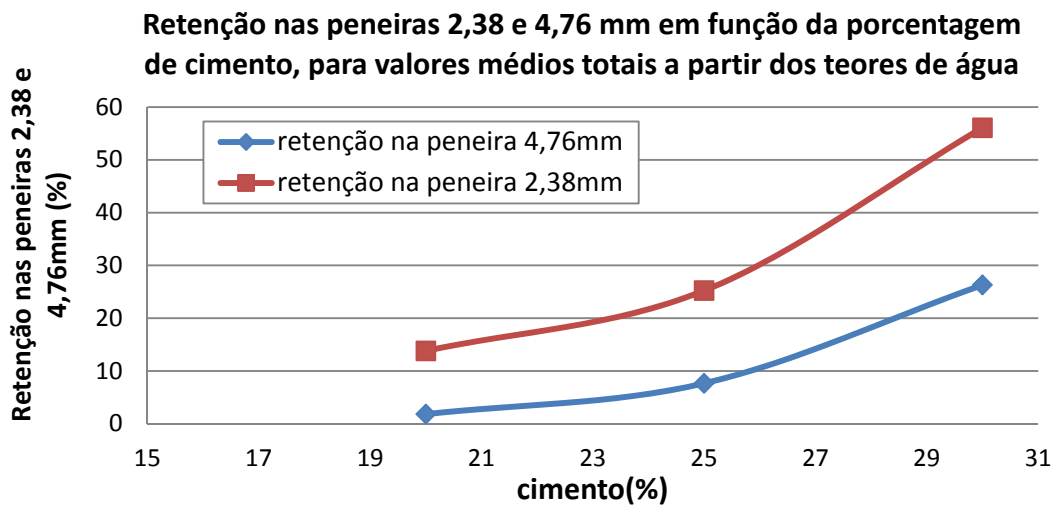


Figura 15: Retenção nas Peneiras 2,38 e 4,76 mm em função da porcentagem de cimento, para valores médios a partir dos teores de água.

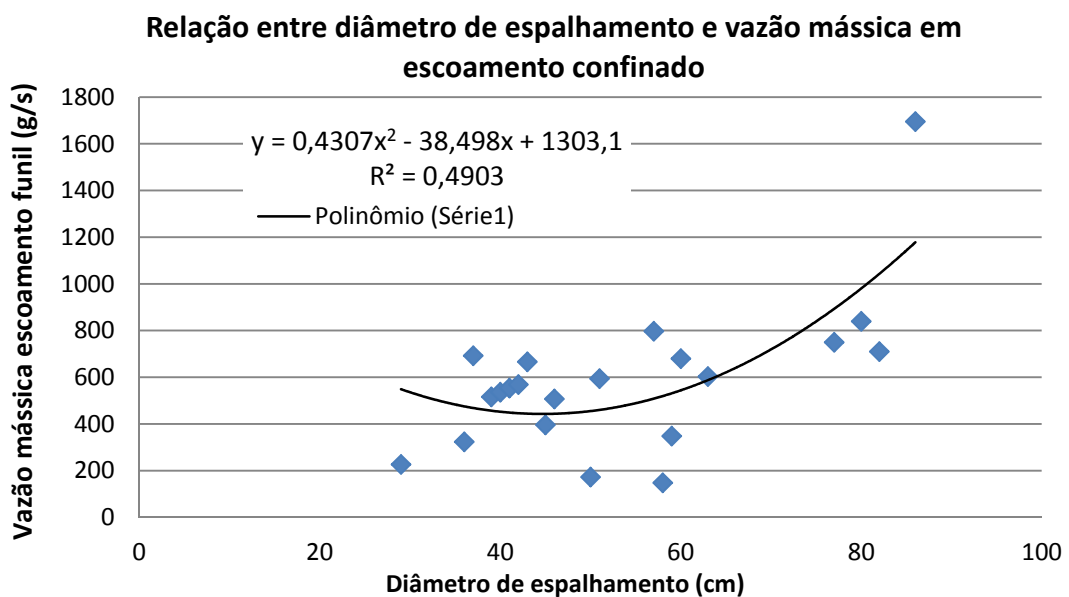


Figura 16: Relação entre diâmetro de espalhamento e vazão mássica em escoamento confinado.

Cumpra observar que, os ensaios realizados no estado fresco permitiram tão somente que caracterizar a variação do comportamento das misturas, não tendo sido no presente trabalho abordado um critério para a reprovação de composições em função de valores máximos ou mínimos dos diâmetros de espalhamento, por exemplo, mas, as variações de valores podem ser tomadas como indicativos das mudanças nas propriedades viscosas e de fluidez, de modo a serem levadas em consideração quando na aplicação do

processo tecnológico, quando em cada caso particular.

Com relação ao material no estado endurecido, o Quadro 2 apresenta os resultados de Resistência Mecânica à Compressão Axial Simples, para os corpos de provas das respectivas misturas aos 28 dias de cura.

O Quadro 3, por sua vez, apresenta os valores médios e o desvio padrão da resistência à compressão simples das 27 misturas, e da densidade, e são agrupadas em função do consumo de cimento e água.

Quadro 2: Resultados dos Ensaio no Estado Endurecido.

Cimento (%)	Água (%)	Aditivo (%)	Valor Médio Densidade (g/cm ³)	Desvio Padrão Densidade	Valor Médio Resistência Compressão Axial (MPa)	Desvio Padrão Resistência Compressão Axial	Absorção (%)	Desvio Padrão Absorção
20	36	0,4	2,19	0,08	4,43	0,32	21,0	1,06
		0,6	2,08	0,07	3,47	0,70	10,4	0,37
		0,8	1,17	0,08	2,70	0,26	8,5	0,66
	39	0,4	2,04	0,02	3,12	0,02	20,5	0,86
		0,6	1,98	0,05	3,38	0,18	13,7	0,22
		0,8	1,19	0,05	2,47	0,19	3,8	0,42
	42	0,4	2,03	0,04	2,42	0,11	7,9	1,15
		0,6	2,03	0,04	2,01	0,35	22,8	0,80
		0,8	2,04	0,06	2,82	0,08	6,2	0,70
25	36	0,4	2,08	0,04	4,45	0,39	19,5	0,37
		0,6	2,15	0,06	5,60	0,30	10,7	0,73
		0,8	2,08	0,07	4,23	0,54	5,8	0,92
	39	0,4	2,07	0,02	3,38	0,18	9,5	0,54
		0,6	2,05	0,04	4,54	0,07	15,1	0,26
		0,8	2,09	0,04	3,41	0,46	4,7	0,21
	42	0,4	2,05	0,07	2,88	0,16	1,5	0,16
		0,6	2,08	0,03	4,47	0,17	4,3	0,12
		0,8	2,11	0,03	3,61	0,47	2,0	0,65
30	36	0,4	2,09	0,03	6,28	0,52	3,6	0,17
		0,6	2,11	0,03	4,40	0,43	4,7	0,25
		0,8	2,16	0,02	7,50	0,11	5,2	0,17
	39	0,4	2,08	0,03	5,61	0,14	6,4	0,33
		0,6	2,13	0,05	5,56	1,39	5,3	0,19
		0,8	2,12	0,01	5,83	0,27	5,3	0,12
	42	0,4	1,98	0,04	3,90	0,13	6,2	0,12
		0,6	2,05	0,04	3,81	0,04	5,5	0,17
		0,8	2,02	0,04	3,48	0,38	4,0	0,22

Quadro 3: Média e Desvio Padrão da Densidade e Resistência Mecânica em função do consumo de cimento e água.

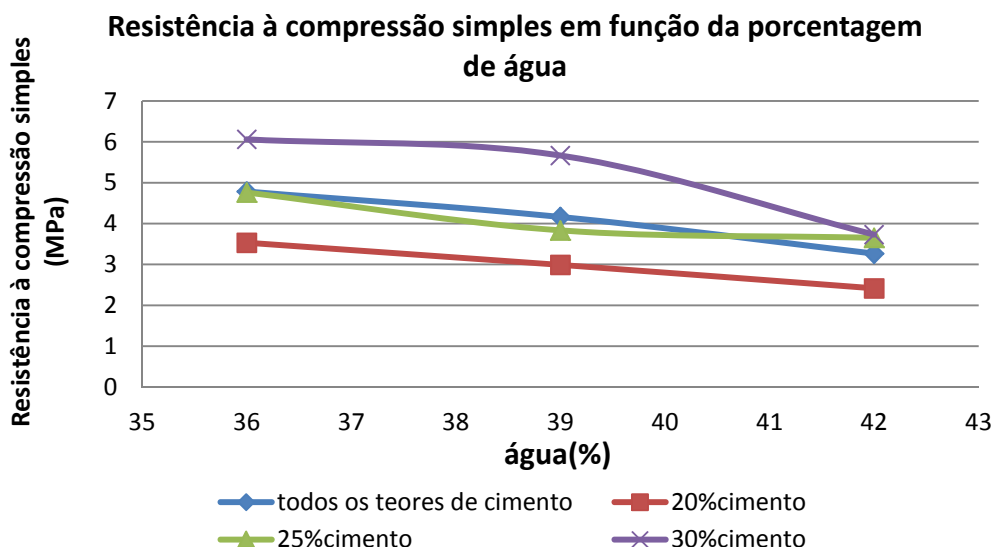
Cimento (%)	Água (%)	Densidade Média (g/cm ³)	Desvio Padrão Densidade	Resistência Média (g/cm ³)	Desvio Padrão Resistência
20	36	1,81	0,46	3,53	0,71
	39	1,74	0,39	2,99	0,38
	42	2,03	0,00	2,42	0,33
25	36	2,1	0,03	4,76	0,60
	39	2,07	0,02	3,78	0,54
	42	2,08	0,02	3,65	0,65
30	36	2,12	0,03	6,06	0,03
	39	2,11	0,02	5,67	0,12
	42	2,02	0,03	3,73	0,18

Com base nos valores do Quadro 3, a Figura 17 ilustra a variação do valor da resistência mecânica em função da porcentagem de água, para cada caso de consumo de cimento.

Pode-se observar pela Figura 17 que o valor da resistência mecânica tende a diminuir com o acréscimo de água em mistura, para cada consumo de cimento, de maneira que o este valor, de resistência, varia então em função da relação água/cimento, da mesma forma que nos casos dos concretos e argamassas. Com relação à absorção, observa-se pelo Quadro 2, que esta tende a diminuir com o aumento do consumo de cimento. Não se observa um comportamento bem definido quanto à variação do teor de água em associação ao valor do teor do superplastificante. Observa-se que os valores de resistência mecânica se situam entre 2,01 MPa a 7,5 MPa, conforme a dosagem. O valor médio global é dado por 3,89 MPa. Considerando que segundo a NBR 8491 (ABNT, 1984), a resistência à compressão mínima deve ser de 2,0 MPa, e que, para os ensaios de absorção 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%, considera-se que para a maioria das composições são atendidos os requisitos de desempenho. Observa-se ainda do quadro 3, que o valor da densidade aparente tende a diminuir com os valores dos teores de água adicionados, salvo para o caso de 25% no teor de cimento adicionado. A isto se devem possíveis melhorias nas condições de trabalhabilidade, em face do aumento do teor de água, em coerência com a figura 02, onde para este consumo de cimento o diâmetro de espalhamento foi acentuadamente mais desenvolvido com o aumento do teor de água.

A Figura 18 apresenta os valores das densidades aparentes em função dos teores de água e dos teores de cimento, analisados conjuntamente e de forma global.

**Figura 17:** Resistência à compressão simples em função da porcentagem de água.

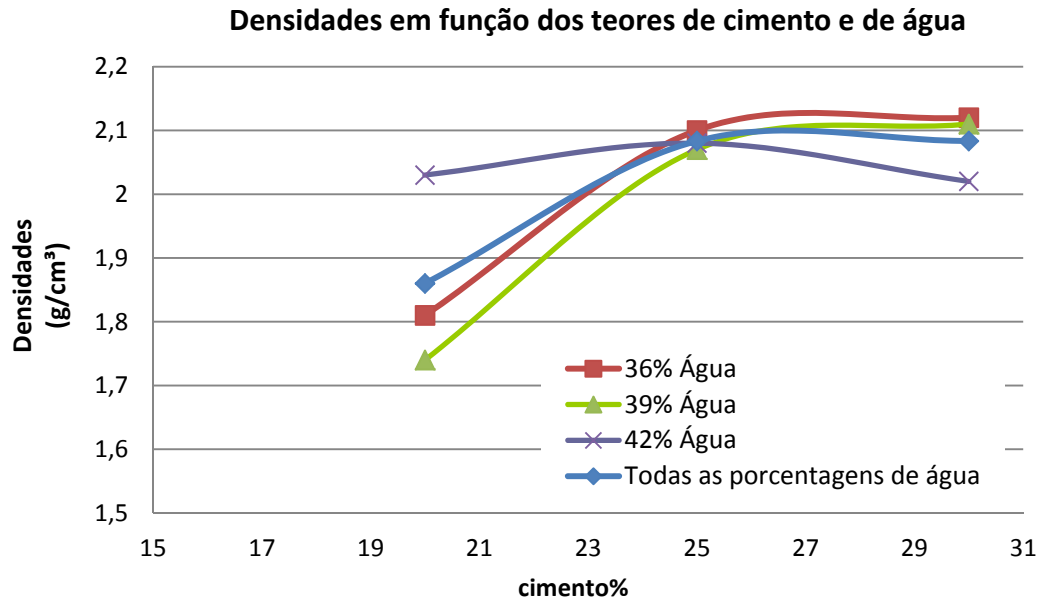


Figura 18: Densidades em função dos teores de água e cimento – Análise Global.

Conforme análise da figura 18, se observa que o valor da densidade aparente tende a aumentar com o aumento do consumo de cimento em porcentagem com relação ao solo, para cada caso de teor de água incorporada. Deste modo, o material vem a assumir comportamento similar aos dos concretos e argamassas, onde o valor da densidade aparente guarda relação com o valor da relação água/cimento. Nota-se uma possível

tendência de estabilização em torno de 30% de cimento com relação ao solo, em face, possivelmente, da melhor acomodação do cimento na estrutura do solo.

O Quadro 4 e a Figura 19 apresentam a variação da relação entre os valores médios alcançados para a resistência mecânica com relação ao valor da densidade aparente.

Quadro 4: Valores médios das resistências mecânicas pelos valores médios dos valores de densidades aparentes, em função do consumo de cimento.

	Valores médios das resistências mecânicas pelos valores médios dos valores de densidades aparentes, em função do consumo de cimento.		
Consumo de cimento por kg de solo (%)	20	25	30
Valores médios da resistência mecânica (MPa) pelos valores médios dos valores de densidades aparentes encontrados (g/cm ³)	2,01	2,72	2,91

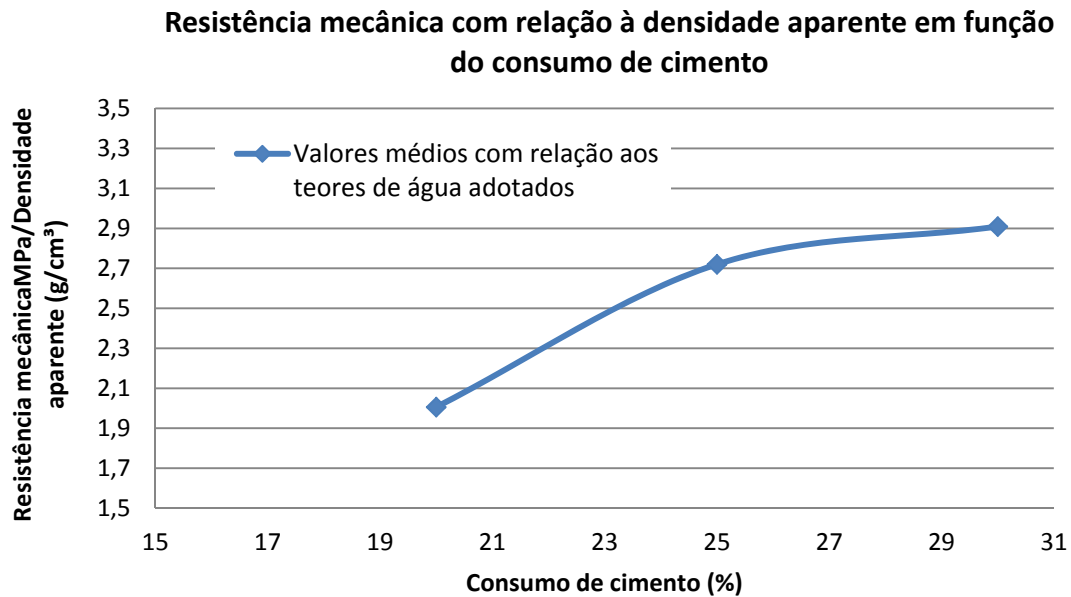


Figura 19: Relação dos valores médios alcançados para a resistência mecânica com relação ao valor da densidade aparente.

Por meio da Figura 19, se verifica que o valor da relação é crescente com o aumento do consumo de cimento por quantidade de solo, indicando que, o processo de estabilização química ocorre contribuindo de modo diferenciado para o aumento da resistência mecânica, de maneira que esta seja crescente não somente com a otimização do valor da densidade aparente, como nos casos da estabilização mecânica quando no escopo da geotecnia, mas é o resultado de um processo interno de cimentação nos poros da mistura.

Os valores alcançados para a densidade aparente dão indicativo da para a avaliação da eficácia do ensaio de adensamento e moldagem de corpos de prova cilíndricos; verificou-se, de forma qualitativa e visual que o material se adensou perfeitamente, preenchendo por completo as formas somente com a ação da gravidade, podendo, assim considerar o material como auto-adensável. Este fato assume grande importância na tecnologia do solo-cimento, no que diz respeito ao processo de produção de peças confeccionadas com este material, uma vez que os mesmos corpos de provas, depois de serem submetidos ao processo de cura por 28 dias, alcançaram valores de densidades aparentes e de resistências mecânicas desejadas, atendendo as normas vigentes. Quanto ao ensaio de adensamento com a utilização do funil de mangueira nos três moldes de geometrias diferentes, por análise e interpretação das informações de forma qualitativa, através da Figura 10, considera-se que houve

eficácia neste ensaio no que diz respeito à auto-adensabilidade, uma vez que os três moldes foram completamente preenchidos pelo material.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os protocolos adotados para os ensaios se adequaram ao estudo de caso do SCAA, uma vez que foi possível efetuar os ensaios e obter resultados tanto qualitativos quanto quantitativos, que possibilitaram mensurar os valores das propriedades, de se verificar indicativos de relações com os valores de dosagem. O fator água/cimento se considerou como parâmetro de dosagem importante, no sentido de monitorar os valores de resistência mecânica e de compacidade, e indicou que o SCAA apresenta o processo químico de hidratação nos poros da mistura como um diferencial no sentido de se incrementar o valor da resistência mecânica. A água atua como um grande agente de fluidificação, e o cimento como um agente de viscosidade. A inserção do aditivo superplastificante pode acarretar maior mobilidade às massas, contudo, o seu incremento pode também causar efeitos ainda totalmente não explicados, de modo que este não deve ser feito de modo indiscriminado. Acredita-se que pode ser promissor um estudo sobre as variáveis do solo-cimento auto-adensável, com base em inferências estatísticas que envolvam testes de significância e aderência entre variáveis. Considera-se que para a maioria das composições os objetivos do estudo foram alcançados, no sentido de se produzir um componente de alvenaria similar ao componente

tradicional de solo-cimento, pelo atendimento aos requisitos de desempenho conforme às exigências das normas NBR 8491 (ABNT, 1984 e NBR 8491 (ABNT, 1984).

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Capes pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa; à Faculdade de Engenharia Ilha Solteira-SP da UNESP, pelo apoio técnico e laboratorial; à Revista Eletrônica de Engenharia Civil-UFG pela oportunidade da publicação deste artigo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIKO, A.K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- 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%E1stico.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**. Viçosa: UFV. 1995. 91p. Tese (Mestrado)- Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- ALCÂNTARA, M. A. M. **Bétons auto-plaçants et fibrages híbridos: composition, rhéologie et comportement mécanique**. 2004. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – INSA, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **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 11578: cimento Portland composto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.
- _____. **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 12025: solo-cimento - ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.
- _____. **NBR 13555: solo-cimento – determinação da absorção d'água**. Rio de Janeiro, 1996. 1 p.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL(AFGC). **Bétons autoplaçants, recommandations provisoires**. Paris, 2000, np.
- 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.
- 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.
- CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na resistência, rigidez e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- 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.
- 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.

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.

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.; MIRANDA, D. E. O.; SOUZA, M. I. B.; ALBUQUERQUE, M. C.; SEGANTINI, A. A. S. 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, 45, 2005, Olinda PE. **CBC 2005**. v. 8, Olinda, PE: IBRACON, 2005. p. 1-17.

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

MORAIS, A. S. **Estudo das características de resistência do solo-cimento plástico e aplicação em estacas moldadas *in loco*.** Ilha Solteira-SP: UNESP, 2002. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia do *Campus* de Ilha Solteira, UNESP, 2002.