

Estudo da influência de parâmetros de processo na produção de tijolo de solo-cimento

Camilla Machado dos Santos^a, Adysson André Fortuna de Souza^a, Herbet Alves de Oliveira^a, Luciano de Melo^a, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida^a, Fernanda Martins Cavalcante de Melo^{a*}

^a Instituto Federal de Sergipe, IFS, Rua João Café Filho 260, Cidade Nova, 49200-000, Estância, SE

*e-mail: fernanda.melo@ifs.edu.br

Resumo

O tijolo de solo-cimento é considerado um produto ecológico e economicamente viável. Contudo, nota-se escassez de estudos sobre a influência da pressão de compactação nas propriedades dos tijolos, bem como a durabilidade desses em meio agressivo. Ante o exposto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Foram definidas doze formulações. Os tijolos foram caracterizados quanto à sua massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade. Os melhores resultados foram obtidos para pressão de compactação de 4,9 MPa, teor de cimento de 12,5% e umidade de 14%. Portanto, conclui-se que a pressão de compactação é um fator determinante para as propriedades estudadas, que a análise da umidade está associada à pressão aplicada e que o teor de cimento influencia, principalmente, na resistência à compressão e durabilidade dos tijolos de solo-cimento.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Tijolo; Solo-cimento.

1. INTRODUÇÃO:

Com o crescimento da construção civil, a preocupação com o desenvolvimento sustentável se tornou gradativamente mais elevada. Assim, medidas ecológicas estão sendo adotadas a fim de proporcionar redução dos impactos ambientais [1]. O tijolo de solo-cimento é considerado um material sustentável, pois satisfaz algumas condições, sendo elas: o uso dos recursos naturais de forma racional, eficiência energética, eliminação ou redução dos resíduos gerados, baixa toxicidade, acessibilidade e conservação de água. Além disso, o estudo e desenvolvimento desse material ecológico está voltado para atender às necessidades essenciais de pessoas que enfrentam dificuldades financeiras quanto ao alto custo dos materiais convencionais [2]. Pois, existe uma variedade de solos que podem ser utilizados na fabricação desse tijolo, facilitando sua produção no próprio local da obra. Também, durante sua confecção as taxas de desperdícios são baixas e é dispensada a etapa da queima do tijolo, como é utilizada em outros tipos de blocos cerâmicos [3].

A compactação dos tijolos de solo-cimento, na umidade ótima, resulta em um produto com elevada resistência mecânica, devido ao maior empacotamento das partículas que se obtém nessa umidade, além da contribuição da hidratação do cimento presente na formulação. Algumas características durante a produção do tijolo de solo-cimento precisam ser consideradas, tais como: o tipo do solo, o traço

(proporção de cimento e solo), o tipo do estabilizante, a compactação, a umidade, a homogeneidade da mistura, a idade e o intervalo de cura, pois são alguns dos fatores que podem afetar diretamente as propriedades do tijolo [4].

Portanto, pesquisadores se propõem a explorar os fatores que influenciam as propriedades desses tijolos. Bryan [5] constatou que o tipo de solo utilizado na mistura de solo-cimento tem influência significativa nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Em sua pesquisa ele analisou os solos argilosos e arenosos e concluiu que solo argiloso apresentou resistências mais baixas em relação ao solo arenoso. Também, concluiu que a rigidez do tijolo é influenciada diretamente pelo teor de cimento.

Uzoegbo [2] observou em seu estudo sobre a produção de tijolo de solo-cimento que a umidade é um fator muito relevante nas propriedades desse material, já que ela propicia boas condições de trabalhabilidade, maiores densidades, uma boa compactação, uma maior resistência e maior durabilidade.

Bhairappanavar, Liu e Shakoor [6] observaram que o aumento na pressão de compactação, juntamente com o acréscimo no tempo de cura, provoca uma melhoria na resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento e diminuição na absorção de água dos corpos de prova. Reddy et al. [7] produziram tijolos com diferentes teores de cimentos e concluíram que uma proporção adequada de cimento eleva a resistência à compressão do tijolo.

Diante do exposto, com o propósito de contribuir com a expansão dos estudos envolvendo o tijolo de solo-cimento, que é um material sustentável e de baixo custo, e da escassez de pesquisas que abordem a influência da pressão de compactação nas propriedades do tijolo de solo-cimento, bem como o estudo da durabilidade desses em solução agressiva, esta pesquisa teve como objetivo investigar a influência da pressão de compactação, umidade e do teor de cimento nas propriedades (massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade) do tijolo de solo-cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Materiais utilizados para produção dos tijolos:

O cimento utilizado na produção da mistura de solo-cimento foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). A caracterização do cimento foi realizada seguindo as normas técnicas: índice de finura [8]; expansibilidade Le Chatelier [9]; massa específica real [10]; pasta de consistência normal [11]; tempos de pega [12]; resistência à compressão [13]. Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento CP V-ARI (Tab.1) atenderam aos requisitos mínimos exigidos pela NBR 16697 [14]. O cimento apresenta na sua composição química (Tab.2) a predominância do óxido de cálcio (CaO 59,99%), que contribui para o desenvolvimento da resistência inicial, em poucos dias após a hidratação do cimento. A composição química, do cimento e do solo, foi determinada pela técnica semiquantitativa de fluorescência de raios X (FRX). A análise foi realizada em vácuo, em um equipamento Rigaku Primini EZScan, utilizando amostras com massa de 12 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 60 mm e espessura de 5 mm, aproximadamente.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI

Propriedades	Resultados	Requisitos normativos
Índice de finura (%)	1,9	≤ 6
Início de pega (min)	170	≥ 60
Massa específica (g/cm ³)	3,1	-
Expansibilidade Le Chatelier a quente (mm)	3,9	≤ 5
Resistência à compressão (MPa)	20,7	≥ 14
(1, 3 e 7 dias)	30,5	≥ 24
	35,7	≥ 34

Tabela 2. Composições químicas (%) do cimento e do solo

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃
Cimento	19,45	4,25	59,99	2,67	0,72	4,27	3,30
Solo	89,33	7,17	0,63	1,97	0,41	-	0,33

O solo utilizado na composição do tijolo de solo-cimento foi coletado nas imediações do terreno do Instituto Federal de Sergipe, localizado no município de Estância, estado de Sergipe, Brasil. Após a coleta, os materiais foram depositados em recipientes metálicos e colocados para secagem em estufa à $(105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$ por 48 h. Após a secagem, o solo coletado foi cominuído em moinho de bolas de porcelana com capacidade de 5 L. Adotou-se esferas de porcelana nas dimensões: 5 cm (60%) e 2,5 cm (40%), sendo que as bolas ocuparam 50% do volume do moinho. O tempo de moagem foi de 30 min, na rotação de 50 rpm e a razão de bolas/massa cerâmica foi de 1,5. Por seguinte, foi adicionada a areia no solo coletado, na proporção de 70% (passante na peneira nº 16 de 1,18 mm) e 30% de solo coletado (passante na peneira de nº 30 de 600 μm), considerando os dados experimentais de Nascimento [15] e Souza [16], que estudaram a melhor proporção para correção do solo coletado nesta pesquisa. Portanto, o solo apresentou elevados teores de sílica 89,33% (Tab.2), confirmada no difratograma de raios X da Fig. 1, onde observa-se a predominância da fase de quartzo, seguida pela ilita e em menor porcentagem o feldspato. A difratometria de raios X (DRX) foi feita um difratômetro de raios X Shimadzu 6000, com radiação $\text{Cu K}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° (2θ), com velocidade de varredura $2^\circ/\text{min}$. A identificação das estruturas cristalinas foi realizada com base nos padrões obtidos no banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e analisados pelo software Match, versão Demo.

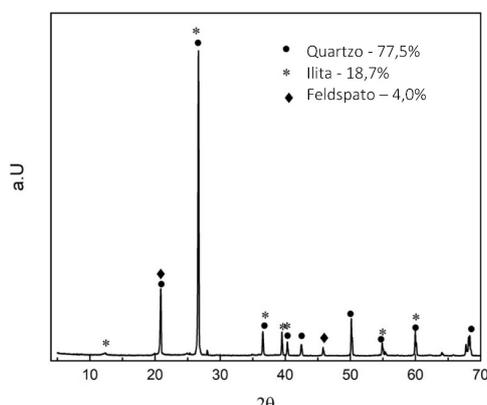


Figura 1. Difratograma de raios X do solo [16]

Os ensaios de caracterização do solo (após a correção com 70% de areia) foram realizados conforme as especificações das normas vigentes: granulometria [17]; limite de liquidez [18]; limite de plasticidade [19]; densidade real [20] e compactação [21]. O solo utilizado, com densidade real de $2,62 \text{ g/cm}^3$, atendeu às especificações da NBR 10833 [22], em que 100% de material deve passar na peneira com abertura de malha de 4,8 mm (nº 4) e 10 a 50% de material deve passar na peneira com abertura de malha de 0,075 mm (nº 200), conforme Fig.2. O índice de plasticidade (IP) e limite de liquidez (LL) foram, respectivamente, 7 e 17%, o que atestaram que o solo utilizado atendeu aos requisitos normativos da NBR 10833, que estabelece um $\text{LL} \leq 45\%$ e $\text{IP} \leq 18\%$ [22]. O solo pode ser classificado como um material de baixa plasticidade, por apresentar $\text{IP}=7\%$, considerado apropriado para a mistura de solo-cimento, segundo Ribeiro [23].

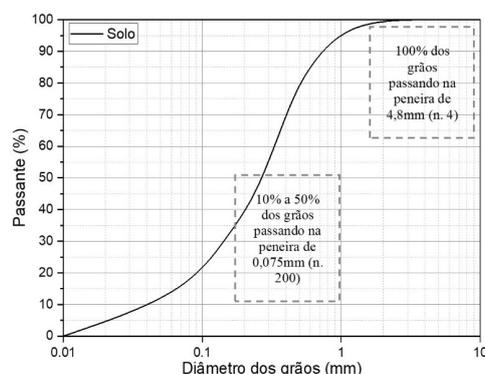


Figura 2. Curva granulométrica do solo

2.2. Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos tijolos:

As variáveis definidas nesta pesquisa foram: três pressões de compactação (1,6, 4,9 e 9,7 MPa), duas umidades (8 e 14%) e dois teores de cimento (12,5% para traço de 1:8 (solo:cimento) e 8,3% para traço de 1:12), estas variáveis foram definidas após a realização dos ensaios de caracterização dos materiais componentes. Inicialmente adotou-se uma pressão de compactação de 1,6 MPa (menor pressão possível de ser medida no equipamento de compactação), seguida da pressão de 4,9 MPa (faixa de pressão aplicada nos equipamentos de prensa manual de tijolos [24]) e 9,7 MPa (pressão adotada na maioria das prensas mecanizadas [24]). Em relação à definição das duas umidades, a umidade ótima para as pressões definidas de 1,6, 4,9 e 9,7 MPa foram 16, 14 e 8%, respectivamente. Portanto, foram definidas as umidades de 8 e 14%, pois menores umidades resultaram em uma maior facilidade de moldagem. Quanto à determinação dos teores de cimento, foram definidos dois traços 1:8 e 1:12, que correspondem a um teor de 12,5 e 8,3%, respectivamente. O traço de 1:8 foi escolhido por ser usual em pesquisas [6, 15-16, 24-27] e o traço de 1:12 (teor de cimento de 8,3%), foi de acordo com o ábaco do teor mínimo de cimento em massa, especificado pela Associação Brasileira de Cimento Portland [28].

Para moldagem dos tijolos de solo-cimento foram dosadas doze formulações (Tab.3), para cada formulação foram produzidas treze amostras: sete foram utilizadas no ensaio de resistência à compressão, três nos ensaios de absorção de água e massa específica aparente seca e três para os ensaios de durabilidade. Ao total foram moldados cento e cinquenta e seis tijolos, com formato cilíndrico, diâmetro de 6,3 cm e altura variável, conforme a aplicação das diferentes pressões de compactação. A preparação da mistura foi realizada de forma manual, após as etapas de destorroamento e peneiramento. Em um recipiente metálico, efetuou-se a homogeneização manual dos materiais (solo, cimento e água), até coloração uniforme, logo em seguida, os tijolos foram conformados em uma prensa manual, modelo Marcon MPH 15. Após a moldagem por prensagem, os corpos de prova passaram por um período de cura durante sete dias, onde foram mantidos úmidos por meio de duas etapas de molhagem por dia, em um intervalo de 12 h, sendo realizada com auxílio de um borrifador (8,75 g de água borrifadas em torno de todo o corpo de prova). Os corpos de prova permaneceram em um local plano e protegidos do sol, com intuito de garantir a cura necessária, conforme prescrições da NBR 10833 [22].

Tabela 3. Formulações dos tijolos de solo-cimento

Nomenclatura	Composição (massa) Cimento: Solo	Cimento (%)	Umidade (%)	Pressão de compactação (MPa)
C1:8M14%P1,6	1:8	12,5	14	1,6
C1:8M8%P1,6	1:8	12,5	8	1,6
C1:8M14%P4,9	1:8	12,5	14	4,9
C1:8M8%P4,9	1:8	12,5	8	4,9
C1:8M14%P9,7	1:8	12,5	14	9,7
C1:8M8%P9,7	1:8	12,5	8	9,7
C1:12M14%P1,6	1:12	8,3	14	1,6
C1:12M8%P1,6	1:12	8,3	8	1,6
C1:12M14%P4,9	1:12	8,3	14	4,9
C1:12M8%P4,9	1:12	8,3	8	4,9
C1:12M14%P9,7	1:12	8,3	14	9,7
C1:12M8%P9,7	1:12	8,3	8	9,7

2.3. Ensaios de caracterização do tijolo de solo – cimento:

Após os 7 dias de cura, os tijolos de solo-cimento foram ensaiados de acordo com as normas técnicas, para determinação da resistência à compressão, absorção de água [29], massa específica aparente seca [21,29]; e durabilidade [30]. Para o ensaio de durabilidade, o lote foi submetido à molhagem em solução agressiva (concentração de 10%, em massa, de sulfato de sódio Na_2SO_4) e secagem, proposta apresentada na presente pesquisa. A proporção escolhida de sulfato de sódio teve como embasamento a NBR 13583 [31].

2.4. Tratamento e análise dos dados:

Os dados dos ensaios de caracterização dos tijolos de solo-cimento foram apresentados considerando a média aritmética dos corpos de prova, seguida do desvio padrão. Após os resultados obtidos nos ensaios, verificou-se a normalidade dos dados e, por seguinte, aplicou-se a metodologia de análise de variância (ANOVA), por meio do software Paleontological Statistics (PAST), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do teste de Tukey. Assim, as análises são apresentadas na seguinte ordem: (a) quanto à influência da pressão de compactação; (b) quanto à influência da umidade e (c) quanto à influência do teor de cimento nas propriedades dos tijolos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na Tab.4 constata-se que para todas as propriedades estudadas existe uma variação significativa entre as médias das formulações ensaiadas. Nos tópicos seguintes estão elencadas quais são essas variações, considerando análise por meio do teste de Tukey.

Tabela 4. Resultados da ANOVA

Propriedade	F	F crítico	valor-p
Resistência à compressão (MPa)	35,96	1,95	2,62.
Absorção de água (%)	66,43	2,31	2,85
Massa específica aparente (g/cm ³)	109,19	2,22	1,00.
Durabilidade (perda de massa (%) em solução agressiva)	13,80	2,85	7,5.

3.1. Ensaios de caracterização dos tijolos:

3.1.1. Resistência à compressão:

Os resultados médios da resistência à compressão dos tijolos estão apresentados na Fig.3.

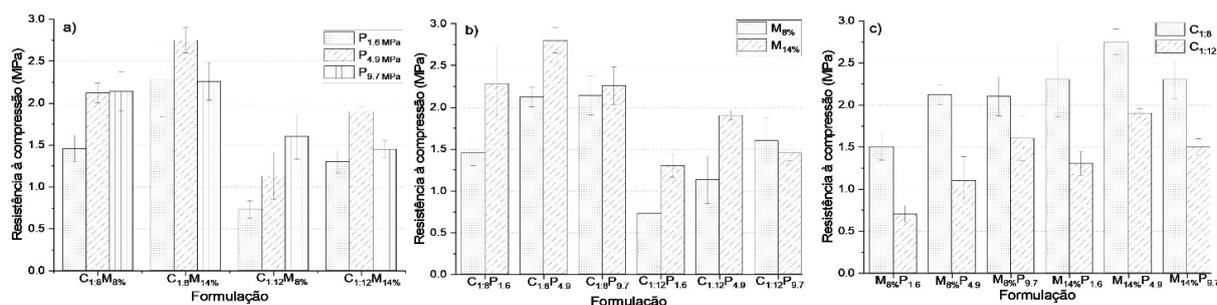


Figura 3. Resultados da influência da pressão de compactação (a), umidade (b) e do teor de cimento (c) na resistência à compressão dos tijolos

(a) Na Fig.3(a) nota-se a influência da pressão de compactação na resistência à compressão. Para as formulações C1:8M8% e C1:12M8% os valores das resistências não apresentaram variações significativas para as pressões de 4,9 e 9,7 MPa. Para C1:8M14% não se constatou variação significativa para as três pressões de compactação estudadas, considerando o desvio padrão. Com relação às formulações de C1:12M14%, observa-se que da pressão de 4,9 para a 9,7 MPa ocorreu a diminuição na resistência.

Verifica-se que a menor pressão de compactação (1,6 MPa) resultou em menores valores de resistência à compressão e para maiores pressões (4,9 e 9,7 MPa) a umidade da mistura e o teor de cimento teve relação direta nesta propriedade. Desta forma, verificou-se, neste estudo, que a pressão

de compactação influenciou a resistência à compressão dos tijolos e que o aumento desta pressão pode resultar em maiores resistências, até certo limite. No entanto, deve-se determinar a pressão de compactação ideal por formulação, para que ocorra o adequado empacotamento e não provoque a deformação (esmagamento) das partículas, e, conseqüentemente, a redução da resistência, conforme sugere-se que ocorreu na formulação C1:12M14%.

Segundo abordaram José e Kasthurba [32] a resistência à compressão atribuída aos tijolos de solo-cimento é decorrente da união das partículas de solo e do preenchimento dos vazios no tijolo, ou seja, um empacotamento dos grãos do solo que é totalmente influenciado pela compactação aplicada.

(b) Na Fig.3(b) observa-se a influência da umidade na resistência à compressão. Para a maioria das formulações, a umidade de 14% resultou em maiores resistências, porém, para uma maior pressão de compactação (9,7 MPa), a umidade não apresentou influência significativa na resistência à compressão. Assim como mencionado em estudos semelhantes [33], verificou-se que a umidade de moldagem (14%) que mais se aproximou do teor de umidade ótima (16% para 1,6 MPa e 14% para 4,9 MPa) foi a que apresentou maiores valores de resistência, o que favoreceu uma boa trabalhabilidade e resistência mecânica. Logo, o teor de umidade é um parâmetro importante nas propriedades do tijolo, pois quando o tijolo fica muito seco, afeta a boa aderência e a hidratação do cimento [34]. A umidade ideal resulta em maiores resistências.

(c) Na Fig.3(c) constata-se a influência do teor de cimento na resistência à compressão. Todas as formulações com traço de 1:12 (8,3%) em relação ao traço de 1:8 (12,5%) apresentaram diferenças significativas, resultando em maiores valores de resistência para um maior teor de cimento (C1:8). Essa diferença foi menos expressiva para o conjunto de formulações M8%P9,7, ou seja, para a menor umidade e a maior pressão de compactação. Portanto, os resultados desta pesquisa validam o que Milani [35] constatou em seu estudo, que a resistência à compressão aumenta em função do aumento do teor de cimento utilizado na mistura de solo-cimento, o que se dá devido às alterações físico-químicas geradas pela relação entre as partículas do solo e do cimento hidratado. Assim como Bhairappanavar, Liu e Shakoore [6], em sua pesquisa sobre o tijolo de solo-cimento, observaram que o aumento do teor de cimento de 8% para 12% no traço favoreceu um acréscimo de 41% na resistência à compressão, no 28º dia, também atribuído às reações químicas que ocorrem no cimento por sua hidratação.

Considerando as prescrições da NBR 8491 [36], onde a média dos valores de resistência à compressão não pode ser menor que 2,0 MPa, e o valor individual menor que 1,7 MPa, as formulações de C1:8M14% atenderam às especificações. Contudo, para as formulações de C1:8M8% apenas as de maiores pressões (4,9 e 9,7 MPa) atenderam aos requisitos normativos, e todas as formulações C1:12 não atenderam os requisitos normativos, com idade mínima de sete dias. Portanto, considerando as variáveis adotadas neste estudo e para idade de 7 dias, o teor mínimo de cimento (7-8%) estabelecido de acordo com o ábaco recomendado pela ABCP [28], não resultou em formulações que atendessem às especificações da NBR 8491 [36] quanto à resistência à compressão.

3.1.2. Absorção de água:

Na Fig.4 estão os resultados obtidos no ensaio de absorção de água realizado nos tijolos de solo-cimento.

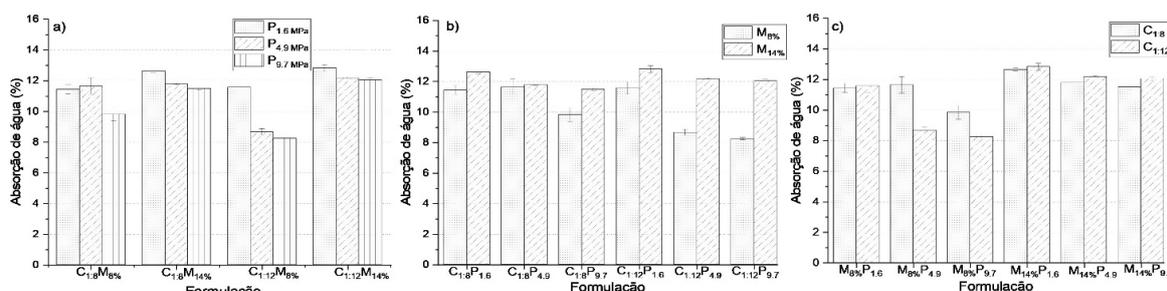


Figura 4. Resultados da influência da pressão de compactação (a), umidade (b) e do teor de cimento (c) na absorção dos tijolos

- (a) Na Fig.4(a) nota-se a influência da pressão de compactação na absorção de água dos tijolos. Assim, verifica-se que os menores resultados de absorção foram alcançados para as maiores pressões de compactação de 4,9 e 9,7 MPa. Apenas para C1:8M8% a pressão de 4,9 MPa resultou em valores de absorção de água semelhantes aos obtidos para pressão de 1,6 MPa. Bhairappanavar, Liu e Shakoor [6], em sua pesquisa, também constataram que o aumento na pressão de compactação (2 – 4 MPa) acarretou a diminuição na absorção de água dos tijolos de solo-cimento. A redução da taxa de absorção de água nos tijolos de solo-cimento está relacionada com a redução da porosidade do tijolo [37], o que pode ser alcançada para uma maior pressão de compactação.
- (b) Na Fig.4(b) observa-se a influência da umidade na absorção de água dos tijolos. Para a maioria das formulações a umidade de 8% resultou em menores valores de absorção, com exceção da formulação C1:8P4,9, que não apresentou variação significativa. Barros [38] estudou a absorção de água nos tijolos de solo-cimento e encontrou resultados semelhantes de absorção. Para Uzoegbo [24] com mais água na composição a argila, presente no solo, tende a se expandir, e conseqüentemente, aumentar a absorção de água.
- (c) Na Fig. 4(c) constata-se a influência do teor de cimento na absorção de água dos tijolos, assim para os três grupos de formulações M14% e nas três pressões adotadas P1,6, P4,9 e P9,7, o teor de cimento não influenciou significativamente na variação dos valores de absorção de água. Já para a umidade de 8% (M8%) apenas para as maiores pressões P4,9 e P9,7 observaram-se variações significativas em função do teor de cimento, onde para um menor teor (8,3% para C1:12) ocorreu em menores taxas de absorção. Portanto, verifica-se que a influência do teor de cimento na absorção de água depende diretamente da umidade e pressão aplicada.

Os resultados de absorção de água obtidos para todas as formulações atenderam às especificações da NBR 8491 [36], ficando com uma média dos valores abaixo de 20% e para os valores individuais abaixo de 22%.

3.1.3. Massa específica aparente seca:

Na Fig.5 estão os resultados do ensaio de massa específica aparente seca realizados nos tijolos.

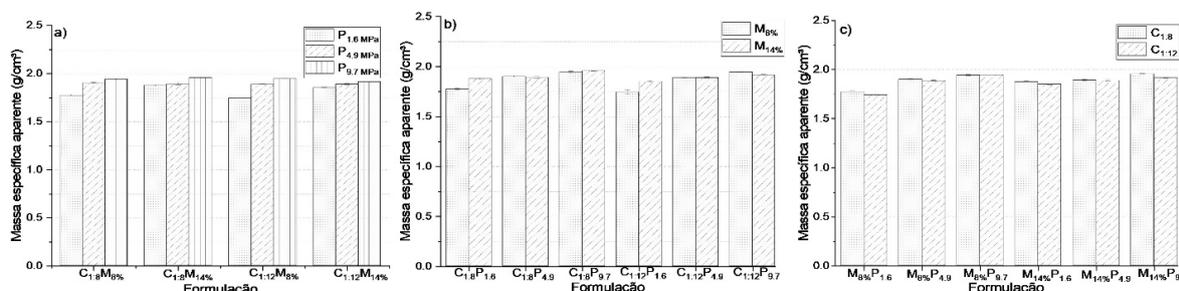


Figura 5. Resultados da influência da pressão de compactação (a), umidade (b) e do teor de cimento (c) na massa específica aparente seca dos tijolos

- (a) Na Fig.5(a) nota-se a influência da pressão de compactação na massa específica aparente seca. Para a maioria das formulações a maior pressão de compactação de 9,7 MPa apresentou maior valor médio de massa específica aparente seca. Para as formulações C1:12M14%, as pressões de 4,9 e 9,7 MPa apresentaram valores semelhantes. Como esperado, uma maior pressão de compactação favorece a uma melhor organização dos grãos e, conseqüentemente, redução dos vazios. Nesta pesquisa os resultados da massa específica aparente seca variaram entre 1,743 e 1,956 g/cm³, semelhantes ao estudo de Bhairappanavar, Liu e Shakoor [6], que em sua pesquisa sobre o tijolo de solo-cimento abordaram que houve uma variação nos resultados da massa específica entre 1,7 e 2,2 g/cm³, para pressões de 2-4 MPa.
- (b) Na Fig.5(b) observa-se a influência da umidade na massa específica aparente seca. A umidade só teve influência para a menor pressão de compactação (1,6 MPa), sendo os maiores valores

obtidos para umidade de 14%. No entanto, para a maior pressão 9,7 MPa a umidade que resultou em maior massa específica aparente seca foi a de 8%. Foi possível analisar que não houve variação significativa para a pressão de 4,9 MPa. Assim, a influência da umidade na massa específica está associada à pressão de compactação aplicada. Sabe-se que o teor de umidade que conduz à máxima massa específica seca não é obrigatoriamente o mesmo teor que alcança a máxima resistência, depende do tipo de solo utilizado [39] e da pressão aplicada.

- (c) Na Fig. 5(c) constata-se a influência do teor de cimento na massa específica aparente seca. Não houve variação significativa nos valores em função do teor de cimento. Somente para as formulações M14%P9,7 foi verificada uma variação significativa (2%). O que pode ser atribuído à reduzida proporção do teor de cimento em comparação ao solo na composição do tijolo de solo-cimento.

3.1.4. Durabilidade (perda de massa):

Na Fig.6 estão os resultados de perda de massa obtidos nos ensaios realizados nos tijolos de solo-cimento imersos em solução agressiva e na Fig.7 as amostras após ciclos de imersão em solução agressiva e secagem.

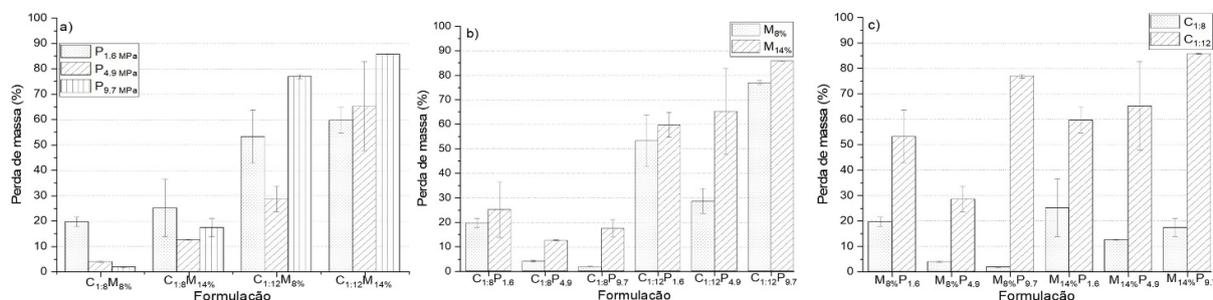


Figura 6. Resultados da influência da pressão de compactação (a), umidade (b) e do teor de cimento (c) na perda de massa dos tijolos imersos em solução agressiva

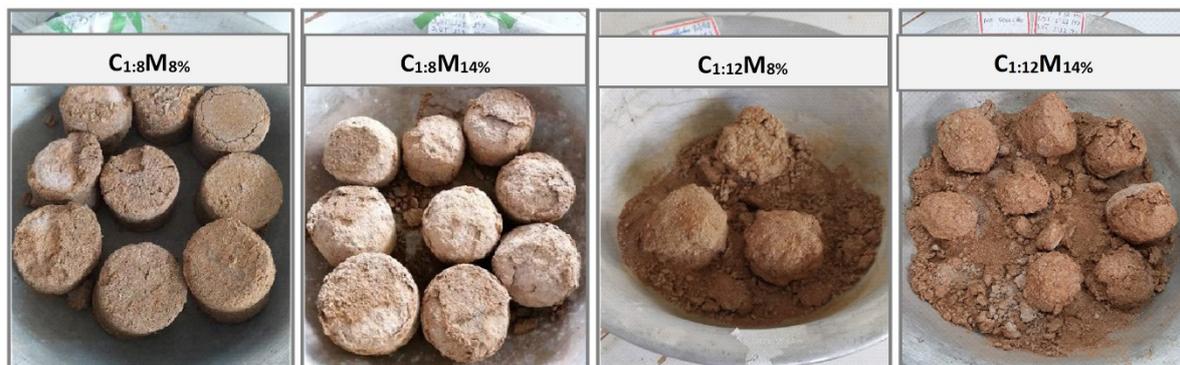


Figura 7. Condição das amostras após ciclos de imersão em solução agressiva e secagem

- (a) Na Fig.6(a) nota-se a influência da pressão de compactação na durabilidade dos tijolos imersos em solução agressiva. Para as formulações C1:8M8% os menores resultados de perda de massa foram obtidos para as maiores pressões, para C1:12M8% um menor valor foi registrado para 4,9 MPa, no entanto, para 9,7 MPa registra-se aumento da perda de massa. Considerando os desvios apresentados, a pressão de compactação não influenciou significativamente na durabilidade das formulações C1:8M14% e C1:12M14%, ou seja, quando a umidade foi de 14%. Portanto, a influência da pressão de compactação na durabilidade está associada à umidade e teor de cimento da mistura. Souza et al. [40] observaram que para as amostras com densidades aparentes maiores apresentaram menor perda de massa, associada a uma melhor compactação e, conseqüentemente, aumento da durabilidade do material.

(b) Na Fig.6(b) observa-se a influência da umidade na durabilidade dos tijolos imersos em solução agressiva. Para as formulações com maiores pressões de compactação (C1:8P4,9, C1:8P9,7, C1:12P4,9 e C1:12P9,7) a umidade de 14% resultou em maiores perdas de massa. Para as formulações com menor pressão de compactação (C1:8P1,6 e C1:12P1,6) a diferença da umidade não influenciou na durabilidade. Kolawole, Olalusi e Orimogunje [34] apontam que mais água na mistura favorece o descascamento na face dos tijolos.

Vilela et al. [37] verificaram que os tijolos de solo-cimento mais resistentes, de maiores densidades e com elevados valores de durabilidade, apresentaram baixos teores de absorção de água. Eles observaram que a redução da taxa de absorção de água nos tijolos de solo-cimento, após o envelhecimento, se deu pela redução da porosidade do tijolo, resultante do aumento do tempo de cura, já que essa extensão propiciou reações de hidratação do cimento, o que dificultou a entrada de água no tijolo, em função da redução dos seus poros. A boa homogeneização da mistura e sua adequada compactação contribuíram para o aumento da durabilidade dos tijolos.

(c) Na Fig.6(c) e Fig. 7 constata-se a influência do teor de cimento na perda de massa dos tijolos imersos em solução agressiva. Um menor teor de cimento (C1:12) resultou em maiores perdas de massa. Logo, o teor de cimento tem influência quanto à perda de massa de tijolos imersos em solução agressiva. No estudo realizado por Abid et al. [41] eles utilizaram o cimento Portland, nas proporções de 10, 15 e 20%, e constataram que um teor adequado garante uma maior durabilidade ao tijolo produzido.

Rabello e Ribeiro [42] observaram que os tijolos ecológicos quando submetidos a soluções ácidas (HCl e H_2SO_4) apresentam considerável redução das propriedades mecânicas e durabilidade, sendo responsáveis por maiores perdas de massa comparadas às amostras submetidas ao ataque de uma atmosfera úmida.

4. CONCLUSÃO:

Nesta pesquisa estudou-se a influência da pressão de compactação, umidade e teor de cimento nas propriedades do tijolo de solo-cimento. Constatou-se, neste estudo, que para alcançar melhores propriedades do tijolo de solo-cimento é indispensável o estudo conjunto das variáveis que influenciam as propriedades desse material. Os resultados experimentais obtidos validam essa conclusão:

- a) A pressão de compactação influenciou de forma significativa a resistência à compressão dos tijolos. Para a maioria das formulações, as maiores pressões de compactação (4,9 e 9,7 MPa) resultaram em maiores valores de resistência, massa específica aparente e menores valores de absorção de água. Conclui-se que esse fato se deu por conta de uma menor quantidade de vazios presentes nos corpos de prova, após receber uma pressão progressiva durante sua prensagem. Sobre a propriedade de durabilidade dos tijolos a influência da pressão de compactação está associada à umidade e teor de cimento da mistura.
- b) A umidade teve influência na resistência à compressão, absorção de água dos tijolos e conjuntamente com a pressão de compactação influenciou na massa específica aparente seca. As formulações com umidade de 14% apresentaram valores mais elevados de resistência à compressão. No entanto, com o aumento da pressão para 9,7 MPa, a umidade não apresentou influência significativa na resistência à compressão. Já para absorção, a umidade de 8% resultou em formulações com menores valores de absorção. Em relação à massa específica aparente seca, a umidade de 14% resultou em maiores valores de massa específica para pressão de 1,6 MPa, enquanto, para a pressão 9,7 MPa, a umidade que sucedeu em maior massa específica aparente seca foi a de 8%. Para durabilidade, verificou-se que as maiores perdas de massa foram obtidas para umidade de 14%.
- c) O teor de cimento apresentou influência na resistência à compressão dos tijolos. Um maior teor (12,5% para C1:8) resultou em maiores valores de resistência. A influência do teor de cimento na absorção de água depende diretamente da umidade e pressão aplicada. No entanto, o teor de cimento não apresentou influência significativa nos valores da massa específica aparente seca. Quanto à influência do teor de cimento na durabilidade dos tijolos observou-se que para um menor teor de cimento resultou em maiores perdas de massa.

Logo, observa-se que o maior valor médio de resistência à compressão foi obtido pela formulação de C1:8M14%P4,9, seguida das formulações C1:8M14%P1,6 e C1:8M14%P9,7; que não apresentaram variação significativa. Já os menores valores de absorção foram alcançados pelas formulações C1:12M8%P9,7, seguida da formulação C1:12M8%P4,9, que não apresentou variação significativa. O maior valor de massa específica aparente seca foi obtido para formulação C1:8M14%P9,7, seguida das formulações que não apresentaram diferenças significativas: C1:8M8%P9,7 e C1:12M8%P9,7, e o menor valor médio da perda de massa foi obtido pela formulação de C1:8M8%P9,7 seguida da formulação C1:8 M8%P4,9.

Considerando que as formulações com teor de cimento de 8,3% (traço 1:12) não atenderam, aos 7 dias, à resistência mínima estabelecida na ABNT NBR 8491 [36] (média $\geq 2,0$ MPa); que todas as formulações atenderam ao limite máximo estabelecido para absorção de água (média $\leq 20\%$), para as variáveis adotadas e as propriedades analisadas neste estudo, o melhor teor de cimento foi de 12,5% (traço 1:8), umidade de 14% e pressão de compactação de 4,9 MPa, correspondente à formulação C1:8M14%P4,9 que resultou em resistência média à compressão de 2,8 MPa, absorção de água de 11,8%, massa específica aparente seca de $1,956 \text{ g/cm}^3$ e perda de massa (em solução agressiva) de 12,5%.

Portanto, conclui-se que a pressão de compactação é um fator determinante para as propriedades estudadas, que a análise da umidade está associada à pressão aplicada e que o teor de cimento influencia principalmente a resistência à compressão e durabilidade dos tijolos de solo-cimento.

AGRADECIMENTOS:

Mizu Cimentos Especiais, Laboratório do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC), Laboratório da Universidade Federal de Sergipe, Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano).

REFERÊNCIAS:

- [1] Motta J C S S, Morais P W P, Rocha G N, Tavares J C, Gonçalves G C, Chagas M A, Mageste J L, Lucas T P B, 2014. Tijolo de solo e cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. *Revista E-xacta* 7, 1, 13-26. <http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v7i1.1038>
- [2] Uzoegbo H C, 2016. Dry-stack and compressed stabilised earth-block construction. ed(s) Harries K A, Sharma B. *Nonconventional and vernacular construction materials*. Woodhead Publishing 205-249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00008-1>
- [3] Souza A H C, Ferrari V J, Rezende M K A, Lorenzoni M Z, Seron C C, 2014. Fabricação de tijolos de solo-cimento com adição de cinza proveniente do bagaço da cana-de-açúcar. *Campo Grande: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*.
- [4] Segantini A A S, Alcântara M A M, 2010. Solo-cimento e solo-cal. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2ª ed. São Paulo: IBRACON 2, 27, 864-891.
- [5] Bryan A J, 1988. Soil/cement as a walling material. *Stress/strain properties*. *Building and Environment* 23, 321-330. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90038-8)
- [6] Bhairappanavar S, Liu R, Shakoor A, 2020. Eco-friendly dredged material-cement bricks. *Construction and Building Materials* 271, e121524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121524>
- [7] Reddy B V V, Kumar P P, 2011. Cement stabilised rammed earth. Part a: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils. *Materials and Structures* 44, 681-693. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9658-9>
- [8] NBR 11579, 2013. Cimento Portland. Determinação do índice de finura por meio da peneira de $75 \mu\text{m}$ ($n^\circ 200$). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [9] NBR 11582, 2016. Cimento Portland. Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [10] NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [11] NBR 16606, 2018. Cimento Portland. Determinação da pasta de consistência normal (água). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [12] NBR 16607, 2018. Cimento Portland. Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [13] NBR 7215, 2019. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] NBR 16697, 2018. Cimento Portland. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] Nascimento E S S, Souza P C, Oliveira H A, Melo Júnior C M, Almeida V G O, Melo F M C, 2021. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. *Journal of Cleaner Production* 321, e129002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002>
- [16] Souza P C, Nascimento E S S, Melo L, Oliveira H A, Almeida V G O, Melo F M C, 2022. Study for the incorporation of wood ash in soil-cement brick. *Cerâmica*. 68, 385. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853052>

- [17] NBR 7181, 2018. Solo. Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] NBR 6459, 2017. Solo. Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] NBR 7180, 2016. Solo. Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] DNER-ME 093, 1994. Determinação da densidade real. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- [21] NBR 12023, 2012. Solo-cimento. Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] NBR 10833, 2013. Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica. Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] Ribeiro S V, 2017. Reutilização de resíduo de cinza de madeira na produção de tijolo solo-cimento: formulação, propriedades e microestrutura. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- [24] Uzoegbo H C, 2020. Dry-stack and compressed stabilised earth-block construction. ed(s) Harries KA, Sharma B. Nonconventional and vernacular construction materials. Woodhead Publishing. 2nd ed. 305-350. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04244-1>
- [25] Ribeiro S V, Holanda J N F, 2014. Soil-cement bricks incorporated with granite cutting sludge. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) 3, 2, 401-408.
- [26] Alexandre J, Assis Paula e Silva C L, Azevedo A R G, Xavier G C, Candido V S, Monteiro S N, 2014. Processing and properties of soil-cement blocks incorporated with natural grit. Materials Science Forum 798–799, 343–346. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.343>
- [27] Milani A P S, Freire W J, 2006. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 26, 1-10. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100001>
- [28] ABCP, 1986. Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland.
- [29] NBR 8492, 2013. Tijolo de solo-cimento. Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [30] NBR 13554, 2013. Solo-cimento. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [31] NBR 13583, 2014. Cimento Portland. Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [32] José A, Kasthurba A K, 2020. Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance. Construction and Building Materials 273, e121991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121991>
- [33] Mellace R F, Alderete C E, Arias L E, 2004. Optimización de mezclas de suelo-cemento para la producción de BTC. Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra. Salvador: Projeto PROTERRA 246-259.
- [34] Kolawole J T, Olalusi O B, Orimogunje A J, 2020. Adhesive bond potential of compressed stabilised earth brick. Structures 23, 812-820. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.12.024>
- [35] Milani A P S, 2008. Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas.
- [36] NBR 8491, 2013. Tijolo de solo-cimento. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [37] Vilela A P, Eugênio T M C, Oliveira F F, Mendes J F, Ribeiro A G C, Brandão Vaz L E V S, Mendes R F, 2020. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. Construction and Building Materials 262, e120883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>
- [38] Barros M M, Oliveira M F L, Ribeiro R C C, Bastos D C, Oliveira M G, 2020. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. Construction and Building Materials 232, e117252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117252>
- [39] Marques G L O, 2010. Estabilização dos solos para fins de pavimentação. Juiz de Fora: UFJF.
- [40] Souza J M, Ramos Filho R E B, Duarte J B, Silva V M, Rêgo S R, Lucena L F L, Acchar W, 2021. Mechanical and durability properties of compressed stabilized earth brick produced with cassava wastewater. Journal of Building Engineering 44, e103290. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103290>
- [41] Abid R, Kamoun N, Jamoussi F, El Feki H, 2021. Fabrication and properties of compressed earth brick from local Tunisian raw materials. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 61, 397-497. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.02.001>
- [42] Rabello L G, Ribeiro R C C, 2021. A novel vermiculite/vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production. Composites Part B. 221, e109035. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109035>