

ESTUDO DA PRESSÃO DO SOLO NO SISTEMA DE FORMAS DURANTE A EXECUÇÃO DE TAIPA DE PILÃO

Isabela Maria Carvalho lunes (isabelamariaiunes@gmail.com); Ana Paula da Silva Milani (ana.milani@ufms.br)

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (UFMS-FAENG) - Brazil

Palavras chave: terra compactada, sistema construtivo, durabilidade.

Taipa de pilão é um processo construtivo feito a partir de solo umedecido compactado, sendo necessárias formas que dêem geometria na construção. Com o passar do tempo, foi se aprimorando a técnica, deixando-a mais eficiente, prática e com maior durabilidade, e a partir dessas inovações, vários modelos de formas foram criados e atualizados. Dos modelos, destacam-se as formas removíveis de pequeno porte, sendo os materiais mais comuns os metálicos (aço, alumínio) e a madeira. Porém, mesmo buscando inovações e melhorias para o sistema, estas normalmente são feitas baseadas na prática, deixando o processo empírico e com pouco embasamento laboratorial. O objetivo do trabalho é fazer um estudo teórico sobre o esforço que a forma sofre durante o processo de compactação do solo, e a partir do resultado, propor um modelo de forma que seja resistente e viável. Foi utilizada a teoria de silos para calcular a pressão do solo exercida na forma, e posteriormente, dimensionado uma relação para a forma de madeira segundo a norma brasileira NBR 15696 - 2009. Foi proposta o sistema fôrma em que a espessura do painel (chapa) correlacionasse com a distância entre os apoios transversais, se assemelhando com alguns sistemas já existentes. Dessa maneira, obtive-se espaçamentos máximos adequados para cada espessura proposta, sendo delimitado pela tensão que a madeira resiste. Os dados obtidos mostram que a técnica baseada no empirismo tem eficiência, como também, os parâmetros encontrados possibilitam deformações menores ou mínimas que podem ser associadas com novas variáveis para a formação de modelo de fôrma padronizado.

1. INTRODUÇÃO

A taipa de pilão é uma técnica construtiva a partir da compactação de terra umedecida, em camadas verticais sucessivas, dentro de fôrmas, com o auxílio de compactador manual ou mecânico. Esta técnica está entre as mais antigas, porém, com o avanço tecnológico da construção civil, a construção de concreto armado e alvenaria foram consideradas mais modernas do que construções com terra e, por isso, a taipa de pilão foi sendo preterida pela falsa associação que os sistemas construtivos mais modernos são mais confiáveis do que os tradicionais rurais (CIB e UNEP – IETC, 2002). No Brasil, ao comparar com a construção convencional, pode-se observar que a taipa de pilão é muito menos recorrente como solução construtiva, havendo possivelmente uma desvalorização por conta do preconceito (associar construção com terra a pobreza) e pela falta de normativas que comprovem o bom desempenho da técnica construtiva. Paralelamente, em busca de preservação do planeta e do ser humano, o mundo tem voltado sua atenção a construções alternativas, visando técnicas mais sustentáveis que a convencional.

Segundo a Agenda 21 para construções Sustentáveis (CIB e UNEP – IETC, 2002), os impactos principais causados pela indústria de construção são o consumo de energia

elevado e emissões de gases que causam o efeito estufa. O cimento utilizado na construção convencional, por exemplo, é considerado um material prejudicial pela sua emissão de carbono no processo de produção, seu alto consumo de energia, e no fim do seu ciclo de vida, o resíduo gerado pela demolição ainda não tem um destino que de fato, resulte em um ciclo completo. Portanto, sistemas construtivos que demandam menos uso de cimento podem ter um desempenho ambiental melhor. Por essa razão, a taipa de pilão tem sido considerada uma alternativa mais sustentável que os convencionais por seu impacto serem menores nesses quesitos. No caso, a execução da parede de taipa de pilão não emite gás carbônico (CO₂) (ou há pouca emissão no caso de solos estabilizados) e a energia incorporada pode ser mais baixa por haver pouco transporte de materiais, já que o solo pode ser retirado no local da obra (CIANCIO, JAQUIN, WALKER, 2013).

Veraldo (2015) mostrou também que a taipa de pilão pode ser considerada sustentável nos aspectos sociais e econômicos, com a geração de emprego digno e saudável e remuneração justa deste trabalho, dando oportunidade e poder de consumo para os trabalhadores, e deixando também a técnica construtiva competitiva no mercado. Além disso, a taipa de pilão é simples e fácil de executar, quando as pessoas estão apropriadas da tecnologia, dando oportunidade de trabalho para as comunidades locais da obra e eliminando os custos de alojamento e transporte dos trabalhadores (CIANCIO, JAQUIN, WALKER, 2013). Ainda, o solo é considerado um material abundante, não-tóxico e reversível, portanto, suas construções não liberam os COVs (componentes orgânicos voláteis), e assim gera maior qualidade do ar interno (TORRALBA, JALALI, 2011).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou uma nova agenda de desenvolvimento sustentável, contemplando 17 OBJETIVOSs de desenvolvimento sustentável (ODS) e que deve ser implantada no mundo pelos próximos 15 anos. A ideia é que os projetos propostos para sociedades busquem, pelo menos em partes, esses 17 OBJETIVOSs, seja direta ou indiretamente. A construção com taipa de pilão tem potencial para alcançar até 8 desses OBJETIVOSs, se considerando o processo de execução até com a construção já em uso. Um OBJETIVOS que se deve se dar destaque é o 9o: Indústria, Inovação e infraestrutura, que ao aplicar a tecnologia na produção da taipa de pilão, gera a possibilidade de ter maior infraestrutura, durabilidade e credibilidade ao sistema construtivo. Pensando nos benefícios sustentáveis que a técnica construtiva da taipa de pilão oferece, são necessários estudos que dêem maior confiabilidade ao sistema para que seja possível o ingresso e competitividade do mesmo no mercado da indústria da construção.

Com o avanço tecnológico, os aspectos físico-mecânicos e durabilidade das construções com taipa de pilão foram aprimorados a partir do melhoramento do material a ser compactado como também nos equipamentos e estruturas utilizados no processo de compactação. Dentro do sistema construtivo de paredes de taipa de pilão deve-se dar o destaque ao sistema de fôrmas, as quais geralmente são feitos modelos personalizados para cada construção, de acordo com suas limitações e prioridades. Para se escolher o tipo de fôrma ideal, algumas características do sistema são importantes como resistência, rigidez, durabilidade, praticidade, entre outros (MANIATIDIS, WALKER, 2003).

Um dos primeiros moldes de sistema de fôrmas consiste em dois painéis de madeira, delimitando a espessura da parede, unidos por uma corda, formando um torniquete (NORTON, 1977). De acordo com Recavarren et al. (2013), também pode ser colocado uma moldura externa dos painéis de fôrma, como reforços longitudinais, para melhor rigidez (figura 1).



Figura 1. Fôrma de madeira tradicional

(fonte: Christine Fiori)

Maniatidis e Walker (2003) classificaram as fôrmas em dois tipos, em fôrmas de pequeno porte (small-unitsformwork) que são painéis com altura média, sendo suas dimensões menores que as finais da parede. Para que se construa a parede, os painéis da fôrma deslizam horizontalmente ou verticalmente e o modelo tradicional de fôrmas pode ser encaixado nessa classificação. O outro tipo de fôrma são as fôrmas integrais (integral formwork) que são os painéis feitos com as dimensões da parede desejada. Maniatidis e Walker (2003) destacam um dos sistemas de fôrmas utilizados na Austrália, que consiste em adicionar os painéis na estrutura de apoio (travas e escoramentos) conforme o solo vai sendo compactado (figura 2).

Outro modelo de fôrma a ser destacado é uma das fôrmas utilizada no Sri Lanka. Este sistema é formada por painéis metálicos deslizantes verticalmente, com travamentos laterais (figura 3). Além disso, a elevação dos painéis é feito por meio de guias que utilizam paredes já formadas de auxílio (JAYASINGHE, KAMALADASA, 2006).



Figura 2. Fôrma encontrada na Austrália

(fonte: Bill Swaney)



Figura 3. Fôrma metálica deslizante

(fonte: Jayasinghe e Kamaladasa)

De acordo com Neves et al. (2011), as fôrmas representam um custo significativo na obra, e também é o procedimento que exige mais trabalho e tempo na execução da parede de taipa de pilão, por isso é importante que haja um estudo dos materiais que serão utilizados, e um projeto de dimensionamento da mesma. Apesar de terem sido criadas varias adaptações para melhorar e agilizar o processo de compactação de uma parede de taipa de pilão, todas as soluções para melhoria do sistema foram obtidas a partir de experiências práticas e empíricas.

Proske et al. (2014) revisaram normativos de vários países sobre fôrmas e escoramentos para concreto armado e constataram que muitas normas estão desatualizadas e limitadas,

pois se preocupam apenas com a vibração no concreto durante o processo construtivo de adensamento. Essa limitação prejudica o desempenho de outros tipos de concreto, como por exemplo, o concreto autoadensável, sendo necessário verificar também as cargas do vento, dos equipamentos, cargas de construção e a pressão do concreto sobre a fôrma (PROSKE et al., 2014). Portanto, poucos estudos laboratoriais ou teóricos se preocupam com a influência das tensões de compactação do solo no desempenho mecânico do sistema de fôrmas e escoramentos, prejudicando a replicação do sistema construtivo e seu emprego em maior escala. O entendimento do comportamento físico-mecânico do sistema de fôrmas a partir das pressões exercidas no processo de compactação do solo dentro deste molde poderá levar à concepção de projetos de fôrmas eficientes para o sistema construtivo taipa de pilão.

Para que esse sistema tenha um embasamento científico, a partir de uma modelagem adaptada da teoria de silos foi estudado um sistema de fôrmas composto por painéis e travamentos laterais (figura 4) para que resista à pressão do solo durante o processo de compactação manual da taipa de pilão. Assim, ao projetar sistema de fôrmas respaldado em cálculos e parâmetros estruturais resultam na potencialidade da taipa de pilão ser reproduzida em larga escala e com maior qualidade, e por consequência um produto final durável e mais sustentável.

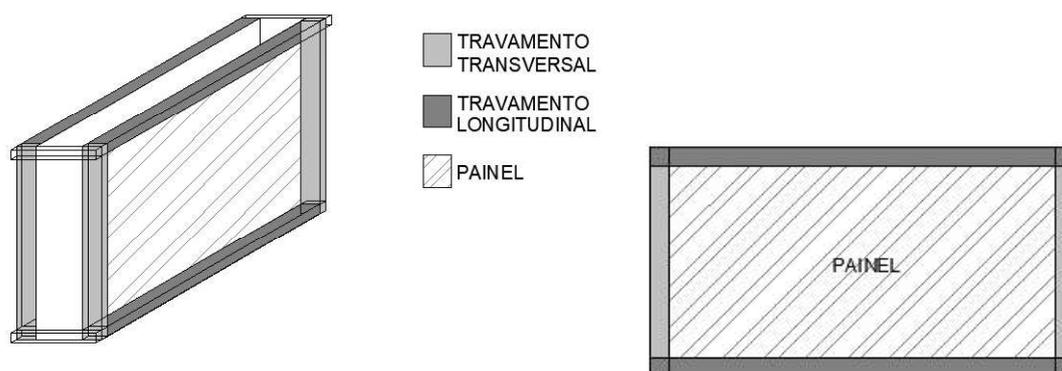


Figura 4. Esquema do sistema de fôrmas (fonte: autor)

2. METODOLOGIA

O estudo de pressões que o solo exerce no sistema de fôrma durante o processo de compactação para execução de taipa de pilão foi estimado a partir da teoria de pressões em silos. Para o cálculo de pressões em silo é preciso primeiramente determinar algumas características do material que será armazenado.

Segundo Walker et al. (2005), a caracterização do solo para a construção de uma parede de taipa de pilão é fundamental no processo, por isso há alguns critérios para escolha do solo. Devem ser solos bem graduados e com maior quantidade de pedregulhos e areias, com argilas também presentes, em proporções menores no solo, agindo na agregação do solo com a água. Desta maneira, os parâmetros do solo adotados para a presente pesquisa seguiram a distribuição granulométrica e os limites de Atterberg (NBR 7180 – ABNT, 2016) apontados na revisão bibliográfica como ideais para moldagem de taipa de pilão (figura 5). A granulometria indicada para areias e pedregulhos são entre 45% a 80% do solo; a porcentagem de silte encontra-se entre 10% a 30% e as argilas com 5% a 20% (WALKER et al., 2005). Por fim, os limites de Atterberg, Walker et al. (2005) indicam que o índice de plasticidade do solo deve ser entre 2 e 30, com limite de liquidez menor que 45.

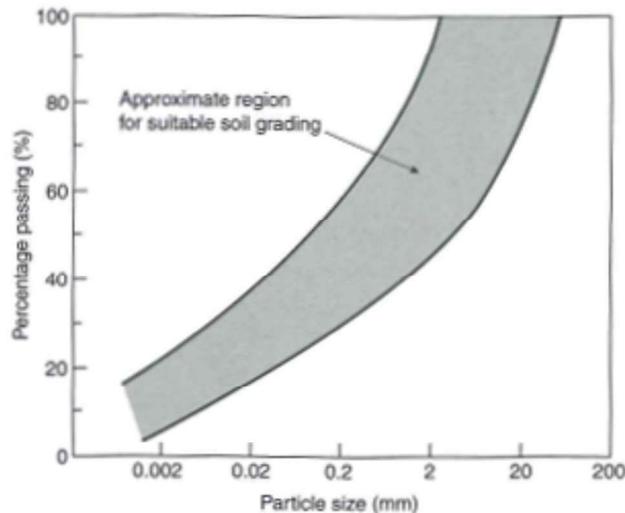


Figura 5. Faixa granulométrica ideal para paredes de taipa de pilão (fonte: Walker et al.)

Com o solo caracterizado, foi utilizada a tabela de classificação do solo – SUCS (VARGAS, 1997), concluindo-se que é areia argilosa. Posteriormente, extraiu-se os valores de coesão (c) e ângulo de atrito (Φ) a partir dos parâmetros hiperbólicos conservativos de solo (MARQUES et al., 2006). A massa específica aparente seca adotada foi de 1700kg/m^3 (WALKER et al., 2005).

Para determinar a pressão do solo, aplicou-se o modelo de JANSSEN (1895), mais utilizado para silos esbeltos, que admite algumas hipóteses. Janssen admite que a pressão horizontal, o ângulo de atrito com a parede e a relação entre pressão horizontal e vertical, são constantes. Além disso, admite que as paredes do silo sejam rígidas e o peso específico do material é uniforme ($\gamma = p \cdot g$). Para o cálculo das fôrmas, adotaram-se as mesmas hipóteses. Utilizando o equilíbrio estático proposto por Janssen, tem-se:

$$\sigma_z \cdot A + \gamma \cdot A \cdot dz = \left(\sigma_z + \frac{d\sigma_z}{dz} dz \right) \cdot A + \sigma_z \cdot U \cdot \mu_{w,c} \cdot dz \quad (1)$$

Substituindo as hipóteses de Janssen, adotou-se uma nova hipótese para o caso de paredes de taipa de pilão. Quando a profundidade (z) for igual a zero, a pressão inicial é diferente de zero ($P_H \neq 0$). Isto porque, no caso do processo de construção da taipa, o solo é compactado com a utilização de um compactador manual ou mecânico (soquete ou pilão). Para a presente pesquisa adotou-se para a compactação do solo a energia do Proctor normal, e conseqüentemente, gera pressões na camada inicial do solo ($z=0$). A fórmula resultante foi (CALIL, CHEUNG, 2007):

$$\sigma_y(z) = P_H(z) = \frac{\gamma \cdot R}{K \cdot \mu_{w,c}} + \left(\sigma_{y0} - \frac{\gamma \cdot R}{\mu_{w,c}} \right) \cdot e^{-\frac{K \cdot \mu_{w,c} \cdot z}{R}} \quad (2)$$

Sendo que:

- $\sigma_y(z)$: Tensão encontrada no solo em uma determinada profundidade (MPa);
- $P_H(z)$: Pressão encontrada no solo em uma determinada profundidade (MPa);
- R : Raio hidráulico inscrito entre as fôrmas de taipa de pilão;
- K : Coeficiente do solo;
- $\mu_{w,c}$: Coeficiente de atrito do solo com o material do painel;
- σ_{y0} : Tensão encontrada no solo na profundidade zero (MPa);
- z : Profundidade do solo (m).

Pinto (2006) propõe que a energia produzida pela compactação (E_c) é obtida com os valores do peso do soquete (m), altura de queda (h), número de golpes (Ng), número de camadas (Nc), volume do cilindro (V), pela seguinte relação:

$$E_c = m * h * Nc * \frac{Ng}{V} \quad (3)$$

Encontrando, desta maneira, uma energia volumétrica. Para o cálculo de pressão das fôrmas, será preciso encontrar a energia do ponto inicial, adaptando a equação para:

$$E_c = m * h * Ng \quad (4)$$

Considerando que a energia utilizada na compactação do solo para a execução da parede de taipa de pilão se equivale com a energia do ensaio de compactação do solo de Proctor normal, foi adotado o mesmo valor do ensaio.

Sabe-se que o solo, ao ser compactado, sofre diminuição do seu volume, portanto criou-se uma nova hipótese, que essa energia de compactação se converte em deformação. Assim, pode-se determinar a tensão resultante (F) dessa energia, a partir da deformação do solo pelo processo de compactação. No caso do processo construtivo da taipa de pilão, coloca-se uma camada de solo solto (na umidade ótima de compactação) com no máximo 25 cm de altura, e após a compactação dentro do sistema de fôrmas, a altura final da camada de solo compactado é de aproximadamente 10 cm menor que a do solo solto (MAIA, 2016). A partir desse processo, a deformação (x) considerada para o caso da taipa de pilão foi de 10 cm. Assim, tem-se que:

$$F = \frac{E_c}{x} \quad (5)$$

Com a tensão encontrada, aplicou-se a mesma para o cálculo da pressão (P) que o solo recebe ao ser compactado. Como a resultante da compactação da camada de solo da taipa de pilão é análoga ao do ensaio de compactação de solo (NBR 7182 – ABNT, 1986), foi adotado para cálculo de pressão inicial a área (A) do painel que se despeja o solo solto. A espessura mínima da parede é de 12 cm e o comprimento utilizado foi de 100 cm, equivalente ao comprimento de um painel. Então, a pressão foi calculada a seguir:

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Essa pressão encontrada será considerada a pressão inicial do solo, isto é, quando a profundidade for igual a zero. Para o cálculo da pressão que o sistema de fôrma recebe foi adotado uma profundidade de até 50 cm de solo a ser compactado. Isto porque na prática de construção com taipa de pilão cada camada de compactação é usual no máximo 25 cm de altura de solo solto, e então é proposto que a altura mínima da fôrma seja de até 2 camadas de compactação para que ocorra o mesmo tipo de procedimento de compactação disposto na normativa de NBR 7182 (ABNT, 1986). Uma altura maior que 50 cm se torna uma solução construtiva em busca de eficiência de montagem/uso/desmontagem do sistema de fôrma, visto que a camada de solo já compactada não transfere mais a mesma pressão que a camada de solo solto, sofrendo compactação. Esta consideração foi aplicada a partir da hipótese que o solo transfere a pressão recebida quando ainda está sendo compactado (solo no estado solto), e posteriormente, quando sua camada terminou a compactação e inicia-se a compactação da camada superior, o solo compactado apresenta maior capacidade de absorção de energia sem a transferência significativa de pressões para

o sistema de fôrmas. Esta hipótese partiu do comportamento mecânico do solo, onde a redução do índice de vazios do solo compactado, e um alto grau de compactação devido à umidade ótima, o torna resistente a uma maior tensão, possibilitando assim que seja retirada a fôrma mesmo ainda sendo construídas as camadas compactadas subsequentes da formação da parede de taipa de pilão (MAIA, 2016).

O cálculo da pressão que o solo exerce no sistema de fôrma durante o processo de compactação para execução de taipa de pilão foi feito no software Mathcad e, a partir da equação 2, o software mostra o comportamento da pressão do solo ao longo da profundidade no sistema de fôrma (z), em um gráfico. A partir do gráfico de pressão foi encontrada uma resultante, sendo essa resultante a tensão que o sistema de fôrmas é submetido pela compactação do solo.

Para o estudo dos painéis do sistema de fôrmas da execução da taipa de pilão foi adotado que o mesmo age como uma placa de altura 50 cm (altura adotada de acordo com a profundidade) e comprimento 100 cm, verificando, assim, as dimensões dos travamentos longitudinais e transversais. Foi verificado também se a placa (o painel) suporta os esforços sofridos pela compactação do solo

Foi utilizada como base para o cálculo dos painéis da fôrma, a norma de fôrmas e escoramentos na construção de concreto (NBR 15696 – ABNT, 2009), dessa maneira, adotaram-se os mesmos coeficientes de segurança para compressão paralela as fibras de madeira industrializada, no caso, chapas de compensado. A partir dessa norma, obtiveram-se as resistências de cada madeira adotada. E por fim, para o cálculo dos momentos sofridos no painel da fôrma, que age como placa, foi utilizada a teoria de carregamentos uniformes e triangulares descarregando sobre a placa apoiada em seus 4 lados, obtendo assim os momentos máximos e deformações de cada lado, para posteriormente dimensionar o travamentos longitudinais e transversais. As dimensões adequadas foram aqueles que ao relacionar com o momento máximo, resultasse uma tensão menor que as resistências das madeiras adotadas para os travamentos (NBR 7190 – ABNT, 1997).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como foi adotado que a energia de compactação era análoga a do ensaio de compactação de Proctor, os dados utilizados para o cálculo da Energia normal de compactação (equação 4), tensão de deformação (equação 5) e da pressão do solo (equação 6) foram:

Tabela 1. Dados dos parâmetros de cálculo

Massa do soquete pequeno:	2,5 kg
Altura de queda:	30,5 cm
Número de golpes por camada:	26 golpes
Deformação do solo:	10 cm
Área de aplicação:	15000 cm ²

Dessa maneira, tem-se que:

i. $E_c = 2,5 * (9,86) * 30,5 * 26 \rightarrow E_c = 195 J$

ii. $F = \frac{195}{10} \rightarrow F = 1,95 kN$

iii. $P = \frac{F}{A} \rightarrow P = 0,013 MPa$

A pressão horizontal, que é a pressão que o painel da fôrma sofre, é calculada por meio dessa pressão encontrada multiplicada pelo coeficiente K. Assim, outros parâmetros que devem ser esclarecidos são o raio hidráulico (R) da fôrma, a constante de permeabilidade (K) e o coeficiente de atrito com do solo com o material ($\mu_{w,c}$). Para o raio hidráulico, foi adotado uma fôrma de comprimento 1,0 m e espessura da parede de 12 cm. Utilizando a equação de hidráulica (PORTO, 2006):

$$R = \frac{Area}{perímetro} \quad (7)$$

O Raio obtido é de 5,36 cm. Para obter o constante K, será necessário o ângulo de atrito interno (Φ_i) característico do solo. A constante é obtida a partir de (JAKY, 1948):

$$K = 1 - \text{sen}\Phi_i \quad (8)$$

A constante encontrada é de aproximadamente 0,5. E por fim, deve-se obter o coeficiente de atrito do solo com a fôrma ($\mu_{w,d}$). Este está relacionado com o ângulo de atrito do solo característico da taipa de pilão com o painel (Φ_w). Ferreira et al. (2013) consideraram que areias argilosas teriam um ângulo de atrito do solo com parede de 24° , independente do material da parede. Assim, temos o coeficiente de atrito a partir de (CALIL, CHEUNG, 2007):

$$\mu_{w,c} = \text{tg}(\Phi_w) \quad (9)$$

Com todos os parâmetros obtidos, pode-se calcular qual a tensão que o sistema de fôrma recebe enquanto o solo está sendo compactado, avaliando somente a pressão que o compactador produz (equação 2). Foi observado que a pressão horizontal exercida pelo compactador na camada inicial, de $6,5 \text{ kN/m}^2$, é muito maior do que a pressão que as camadas de solo exercem no solo mais profundo. Para 50 cm de profundidade, foi obtido que a fôrma sofre uma pressão de $1,7 \text{ kN/m}^2$ (figura 6).

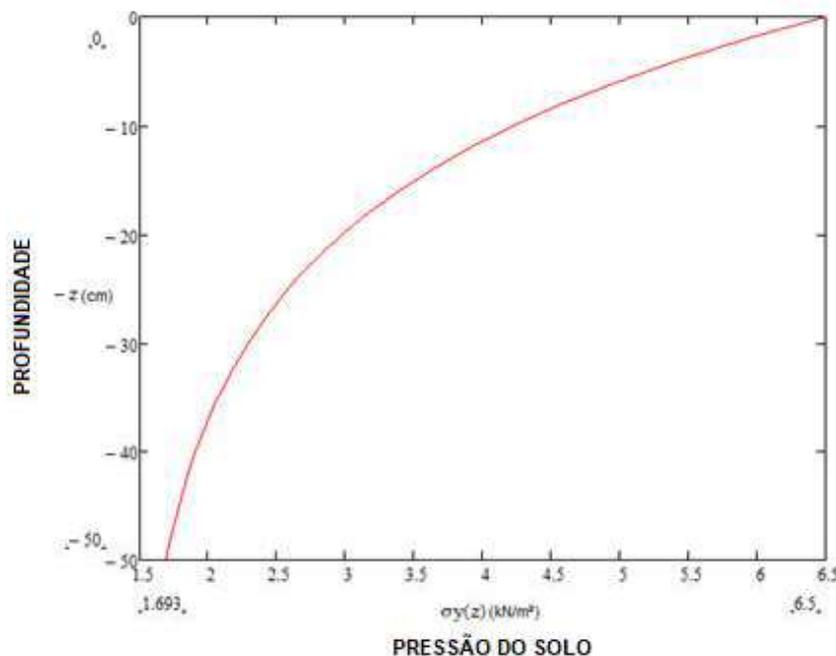


Figura 6. Gráfico de pressão por profundidade (fonte: autor)

Assim, o material da fôrma deve suportar pelo menos até a maior tensão encontrada no gráfico para que a parede de taipa de pilão não fique deformada consideravelmente e perca suas propriedades.

Para o cálculo do painel da fôrma (figura 4), foi escolhida a chapa de compensado de madeira por serem os tipos mais comuns em painéis de sistema de fôrmas. A chapa de compensado é um conjunto de lâminas feitas de madeira, em que se alterna a orientação da fibra, deixando-a mais resistente, para uma menor quantidade material (STAMATO, 2002). Foram utilizados duas resistências encontradas para a chapa de compensado, um compensado da marca madeirite e outro compensado feito de madeira pinus. Para o cálculo da resistência do compensado de madeira (equação 10), foi adotado que o mesmo sofre compressão paralela às fibras durante a compactação do solo. Utilizou-se o coeficiente de estados-limites últimos (γ_w) de 1,4 e K_{mod} de 0,72 por ser material industrializado e de curta duração, obtendo a seguinte equação (NBR 15696 – ABNT, 2009):

$$f_{cod} = 0,514 * f_{ik} \quad (10)$$

Para as chapas de compensado escolhidas, foi obtido que o f_{cod} do compensado da marca madeirite é de 25,71 MPa e o f_{cod} do compensado de pinus é de 12,34 MPa (STAMATO, 2002). Dessa maneira, a tensão máxima encontrada a partir da resultante agindo na fôrma, deve ser menor que os f_{cod} encontrados.

De acordo com Hibbeler (2010) a distribuição da tensão se dá pela integral da Curva de tensão x Profundidade da fôrma (figura 6) neste caso, a do solo (equação 2). Além disso, como o gráfico (figura 6) não é linear ou simétrico, deve se verificar se há momento torsor na fôrma, encontrando a posição (equação 11) em que a resultante age. Como a posição da resultante foi apenas 5 cm de diferença do centróide, foi desconsiderado o momento torsor.

$$posição = \frac{\int \sigma_y(z) * z dz}{\int \sigma_y(z) dz} \quad (11)$$

O estudo do painel da fôrma foi feito considerando que o mesmo age como uma placa, isto porque o painel tem uma relação de comprimento por largura igual a 2, tendo assim que considerar as duas dimensões. As pressões encontradas geram uma tensão por metro quadrado na área da placa, sendo necessário verificar os momentos máximos encontrados em cada direção da placa, para analisar se o compensado resiste a tensão provocada pela compactação. A partir desses dados, e adotando que a espessura do compensado seja 2 cm, pode ser feito o cálculo da tensão máxima atuante na fôrma (NBR 7190 – ABNT, 1997).

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{máx} * 1,2}{W} \quad (12)$$

Sendo que:

$$W = altura * \frac{t^2}{6} \quad (13)$$

A altura da fôrma é de 50 cm conforme profundidade adotada no presente estudo, resultando em uma tensão máxima de 3,61 kN/m², sendo muito menor que a resistência dos compensados de madeira. Além da verificação da resistência do compensado, também é preciso analisar a deformação que a tensão causa no painel. A deformação do painel também é chamada de flecha (equação 14) e necessita de alguns dados do material, como o módulo de elasticidade (E) do compensado, o valor de α encontrado na tabela de Bares, a inércia (I) do painel, a carga aplicada no compensado que são os valores de pressão encontrados, e a altura do painel (l_x):

$$deformação = \frac{\alpha}{100} * \frac{1}{12} * \frac{P * l_x^4}{E * I} \quad (14)$$

A deformação encontrada foi de 7,8 mm, isto é a maior flecha que o painel terá no decorrer dos 50 cm, e conseqüentemente, a parede de taipa de pilão também. A norma da Nova Zelândia (NZS 4298 -1998) adota que até 10 mm de deformação do prumo da parede de

taipa de pilão é aceitável. Pode-se afirmar que a deformação do painel calculado está dentro do limite da norma citada, porém, para reduzir mais ainda sua deformação, é necessário menores espaçamentos entre os travamentos longitudinais e entre os travamentos transversais.

Utilizando ainda a teoria de placas para o cálculo do painel e dos travamentos (figura 4), verificou-se o carregamento que cada travamento recebia da placa. O carregamento que gerou maior momento, e portanto, o travamento mais crítico foi o travamento longitudinal no topo do painel, o qual recebe a maior pressão. Dimensionando-os como ripas de madeira tipo Pinus de seção 2,5 cm por 5 cm, foi calculado a tensão aplicada no travamento (12) e verificado se o mesmo resiste. A resistência (f_{cod}) da Pinus é de 18,25 MPa, portanto resiste a tensão máxima obtida de 17,5 MPa provocada por um momento máximo de 0,15 kNm.

Tabela 2. Resumo dos cálculos estruturais

Componentes	M _{máx} (kNm)	Tensão Máxima (MPa)	Resistência do material (MPa)	Deformação (mm)
Painel 2,0x100,0 x50,0 cm ³	0,126	13x10 ⁻³	12,34	7,8
Travamentos 2,5x5,0cm ²	0,15	17,5	18,25	-

O esquema de fôrma escolhido é semelhante ao descrito como fôrma tradicional (figura 1), mostrando que o sistema funciona e tem eficiência, mesmo obtendo seus conhecimentos por meio da prática e do empirismo. Porém, esse sistema ainda apresenta algumas lacunas como a deformação estar próximo do limite admissível para atingir qualidade no produto final, sendo o ideal que diminuísse o espaço entre os travamentos ou aumentasse a espessura do painel.

5. CONCLUSÕES

A técnica de construção de taipa de pilão é eficaz e quanto maior a qualidade e durabilidade, maior o seu potencial de sustentabilidade ao se comparar com a construção convencional. Para um produto ter qualidade é preciso garantir que sua execução seja correta, e portanto, é fundamental haver controle e verificação dos componentes do processo construtivo. Ao verificar por meio de cálculos e parâmetros estruturais o funcionamento dos painéis e os travamentos do sistema de fôrmas conhecido como tradicional para a taipa de pilão observou-se que o mesmo resiste às pressões do solo compactado sem se romper, porém sofre uma deformação considerável que pode influenciar negativamente na durabilidade da construção.

A teoria de silos tem potencial de aplicabilidade na modelagem de sistemas de fôrmas para taipa de pilão, contudo, testar novos tipos e espaçamentos para os travamentos e diferentes espessuras e tipos de materiais para o painel pode resultar em um sistema de fôrmas que deforme menos e que seja viável no processo de montagem, execução e desmontagem, bem como é necessário o estudo experimental para corroborar os parâmetros teóricos encontrados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15696: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos, 2009.
- Calil Junior, C.; Cheung, A. B. (2007). Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos, SP: Editora Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 240p.
- Ciancio, D.; Jacquin, P.; Walker, P. (2013). Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials*. n.42, p.40–47.
- INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CENTRE - CIB e UNEP- IETC. (2002). *Agenda 21 for Sustainable Constructions in Developing Countries*. Pretoria, RSA. Editora: CSIR Building and construction Technology. 82p.
- Ferreira, S.R.M. et al. (2013). Avaliação do ângulo de atrito solo-muro e da rugosidade da superfície de contato. *Ciência e Engenharia*. n. 22 (2), p. 11-19.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Resistência dos materiais*. São Paulo: Editora Pearson Education, Inc. 7a edição. 637p.
- Jaky, J. (1948). *Pressure in Silos*. Proc., 2nd Int. Conf. on soil Mech. and Found. Engrg., A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, Vol. 1, 103-107.
- Janssen, H.A. (1895). *Versucheuber Getriededruck in Silozellen*. Z. Verein DeutcherIngenieure. v.39, p.95-104.
- Jayasinghe, C.; Kamaladasa, N. (2006). *Compressive strength characteristics for cement stabilized rammed earth walls*. *Construction and Building Materials*, N. 21, p. 1971-1976.
- Maia, L.R. (2016). *Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto*. São Paulo: dissertação – FAUUSP. 137p.
- Marques, H.C.; Ehrlich, M.; Riccio, M.V.F. (2006). *Parâmetros de Resistência e Tensão-Deformação por Análise de Elementos Finitos para Obras de Terra com Solos Tropicais Compactados do Brasil, Relatório Interno, GEOTECNIA/COPPE/UFRJ*.
- Maniatidis, V.; Walker, P.A. (2003). *Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project Developing Rammed Earth for UK Housing*.
- Neves, C. et al. (2011). *Técnicas de Construção com Terra*. Bauru: FEB – UNESP. 79p.
- NEW ZEALAND STANDARD. NZS 4298: *Materials and Workmanship for Earth Buildings*, 1998.
- Norton, J. (1977). *Building with earth. A handbook*. Londres, R.U: Editora Intermediate Technology Publication, 2a ed.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Editora Oficina de textos. 3a ed., 367p
- Porto, R. M. (2006). *Hidráulica Básica*. São Carlos: Editora EESC-USP. 4a ed., 519p.
- Proske, T. (2014). *Form pressure generated by fresh concrete: a review about practice in formwork design*. *Material and Structures*. n. 47, p. 1099-1113.
- Recavarren, G.C. et al. (2013). *Rammed Earth: Construction Lessons from Experience*. *Practice Periodical on Structural Design and Constructions*. n.18 (3), p. 149-154.

- *Stamato, G. C. (2002). Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada. São Paulo: tese – EESC. 159p.*
- *Torgal, F. P.; Jalali, S. (2011). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials. n. 29, p. 512-519.*
- *Vargas, M. (1997). Introdução à Mecânica dos Solos. Editora Mcgraw-Hill. 15a ed., 510p.*
- *Veraldo, A. C. (2015). Análise do processo construtivo de taipa mecanizada: estudo de caso da sede do canteiro experimental da UFMS. Campo Grande: dissertação – UFMS. 121p.*
- *Walker, P. et al. (2005). Rammed earth: design and construction guidelines. Watford, RU: BRE Bookshop. 146p.*