



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES HORIZONTAIS ATUANTES NA FÔRMA DO SISTEMA DE TAIPA DE PILÃO

Rafael Monteiro Mendonça

2023

CAMPO GRANDE | MS

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES HORIZONTAIS ATUANTES
NA FÔRMA DO SISTEMA DE TAIPA DE PILÃO**

RAFAEL MONTEIRO MENDONÇA

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr^a Andrea Naguissa Yuba

Co-Orientador: Prof. Dr. Andrés Batista Cheung

CAMPO GRANDE

JUNHO / 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos Espíritos de Luz por todo o amparo e proteção espiritual até aqui. A crença em algo maior e além desta vida me traz a certeza de que todo o aprendizado, conhecimento adquirido e realizações desta vida, não são em vão.

Agradeço a minha esposa Tayla pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo e apoio prestados ao longo de todo o Mestrado. Obrigado por sempre me lembrar que equilíbrio Trabalho/Estudos/Família/Atividades Físicas é essencial para uma boa saúde mental e está lembrança além de sua companhia foram fundamentais para superar os momentos de dificuldades e desânimo.

Aos professores Dr^a. Andrea Naguissa Yuba e Dr. Andrés Batista Chueng pelo acompanhamento, toda a paciência durante os processos de estudo, ensaios e escrita, por seus questionamentos que me fizeram aos poucos extraírem sempre algo mais do assunto tratado e chegar a resultados além do imaginado inicialmente, além de estarem sempre disponíveis para discussões, orientações e conversar amigáveis.

Ao professor Dr^o Daniel Anijar de Matos, por gentilmente emprestar o equipamento de Speedy Test.

A empresa Taipal, em especial ao Arquiteto Marcio V. Hoffmann, por ter aberto as portas de sua empresa e de suas obras para visitas e a empresa GEOTEC que ensaiou o solo utilizado neste trabalho sem nenhum custo e com boa intenção em participar do desenvolvimento científico.

E por fim agradeço o apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Taipa de pilão ou “taipa”, entre tantos sistemas construtivos disponíveis no mercado de construção de edifícios tem se tornado uma boa opção aos profissionais que desejam edificar com eficiência energética e sustentabilidade. Muitas publicações (normas, manuais, livros, artigos e teses), estabelecem critérios mínimos para execução, desde a escolha do solo, preparação da mistura até a opção ao tipo da fôrma, mas não é clara a informação de como são dimensionadas tais fôrmas, estando oculta ou mesmo desconhecida as pressões horizontais atuantes, principalmente as pressões ocasionadas pelo efeito da compactação da mistura. Para preencher esta lacuna, foi realizada análise teórica e experimental, partindo da analogia dos esforços horizontais atuantes sobre a fôrma de taipa, com teorias para muros de contenção, fôrmas para parede de concreto, e pressões atuantes em silos. Foram realizados dois ensaios e um teste com um molde indeformável e sensores para obtenção de dados de pressão horizontais atuantes no processo de execução da parede de taipa. Foi possível determinar a ordem de grandeza das pressões horizontais, a influência significativa do compactador, a altura de mistura já compactada a partir da qual o compactador já não causa mais influência na fôrma tendo apenas incremento das pressões verticais, possíveis movimentações/deformações da fôrma, relação entre pressão horizontal e pressão vertical de um determinado ponto a uma profundidade qualquer abaixo da superfície de impacto do compactador. Conclui-se que a metodologia proposta para aferição das pressões horizontais **é promissora e singular para o equacionamento do problema, além de delinear um escopo para aferições com equipamentos de diferentes pesos e frequências**, através da aplicação da teoria de silos de Janssen, o que permite a realização de ensaios futuros, semelhantes, para efeito de comparação e que através desta metodologia as hipóteses levantadas ao longo da revisão bibliográfica são plausíveis.

Palavras- chave: tecnologia de baixo carbono, terra, fôrma, taipal, parede, sistema construtivo.

ABSTRACT

Rammed earth or “taipa”, among many construction systems available in the building construction sector, has become a good option for professionals who want to build with energy efficiency and sustainability. Many publications (standards, manuals, books, papers, and thesis), establish minimum criteria for the construction, from soil preparation to formwork type options, however, the information on how these formworks are dimensioned is not clear, and the acting horizontal loads are hidden or unknown, especially those caused by the soil compaction effect. To fill this gap, a theoretical and experimental analysis became relevant, based on the analogy of the horizontal loads acting on the formwork, with theories for retaining walls, formwork for concrete walls, and loads acting on silos. A series of two test and one experiment were performed with undeformable formwork and sensors to obtain horizontal pressure data during the process of executing the rammed earth walls. It was possible to determine the magnitude of the horizontal loads, the significant influence of the tamper, the height of the already compacted mixture, from which the equipment no longer affects the formwork, only increasing vertical loads, possible movements/deformations of formwork, ratio of horizontal pressure to vertical pressure at any depth under the impact surface of the equipment. It is concluded that the proposed methodology for measuring the horizontal loads is promising for the equation of the problem, as well as outlining a scope for measurements with equipment of different weights and frequencies through the application of Janssen’s silo theory, which allows for future similar tests for comparison and through this methodology and the hypotheses raised throughout the literature review are plausible.

Keywords: low carbon technology, earth, soil, formwork, wall, building system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Grandes tópicos de entendimento para uma boa execução de taipa.	14
Figura 2. Etapas de preenchimento de uma fôrma de parede de taipa.	19
Figura 3. Fôrma marroquina.....	20
Figura 4. Fôrma marroquina em uso na atualidade.....	20
Figura 5. Fôrmas para taipa, da Empresa Sirewall.	22
Figura 6. Fôrma da empresa Taipal.	25
Figura 7. Passo a passo de montagem da fôrma II Taipal.	27
Figura 8. Preenchimento e compactação no interior do taipal e taipal sobre andaimes para execução de paredes com mais de 5m de altura.....	28
Figura 9. Misturador de eixo vertical	28
Figura 10. Fôrma contemporânea (placa de compensado e estrutura metálica).....	29
Figura 11. Fôrma contemporânea (estrutura em madeira e placa de compensado naval)	29
Figura 12. Fôrma travada por agulhas e escoras.....	30
Figura 13. Fôrma de concreto da Empresa SYMONS utilizada para parede de taipa.	31
Figura 14. Envoltória de tensões horizontais atuantes devido ao concreto dentro da fôrma.....	34
Figura 15. Pressão lateral após compactação.	40
Figura 16. Representação do estudo dos valores assintóticos da pressão de Janssen.....	42
Figura 17. Gráfico de pressão por profundidade (em relação a superfície compactada).	43
Figura 18. K x altura de aterro	45
Figura 19. Trajetória de tensões propostas por INGOLD (1979).....	46
Figura 20. Comportamento de uma camada de solo submetida a um ciclo de aplicação e retirada de carga vertical.....	47
Figura 21. Distribuição de tensão horizontal proposta por INGOLD (1979)	48
Figura 22. Molde indeformável – versão 1.....	56
Figura 23. Falha e solução para o travamento superior no molde indeformável.....	59
Figura 24. Partes do molde indeformável – versão 2.....	59
Figura 25. Relógio comparador posicionado na superfície externa do molde indeformável..	61
Figura 26. Molde indeformável – medidas e furos para sensores.....	61
Figura 27. Componentes do conjunto de medição	62
Figura 28. Montagem do conjunto de medição.....	63
Figura 29. Fixação dos conjuntos de medição na versão 1	64
Figura 30. Tripé fixado nos furos do molde.....	65

Figura 31. Calibração com peso padrão	66
Figura 32. Sensor posicionado para medição.....	66
Figura 33. Hardware e software para aquisição de dados.....	67
Figura 34. Análise granulométrica segundo a NBR 7181:2016	68
Figura 35. Distribuição granulométrica segundo a NBR 6502.....	68
Figura 36. Curva granulométrica	69
Figura 37 - Dados do ensaio de compactação.....	69
Figura 38. Curva de compactação para o solo utilizado.....	70
Figura 39 - Dados do ensaio de I.S.C	70
Figura 40 - Curva do ensaio de penetração.....	71
Figura 41 - Dados para determinação da Massa específica real média.....	71
Figura 42. Speedy Test (DNER-ME 052/94).....	72
Figura 43. Misturador Horizontal de argamassa.....	72
Figura 44. Compactação da mistura no molde indeformável.....	74
Figura 45. Equipamentos utilizados para o experimento.	75
Figura 46. Ensaio de compactação.....	76
Figura 47 - Grau de compactação e umidade das camadas de mistura lançadas	77
Figura 48. Posicionamento do anel biselado para realização do ensaio de compactação.....	77
Figura 49. Altura de mistura compactado x pressão exercida no sensor B (h = 10 cm a partir da laje de fundo) e no sensor D (h=37 cm acima da laje de fundo) do teste 1.....	80
Figura 50. Altura de mistura compactada x pressão exercida no sensor B (h = 10 cm acima da laje de fundo) e no sensor D (h=37 cm acima da laje de fundo) do Teste 2.....	81
Figura 51. Altura de mistura compactada x pressão exercida no sensor B e no sensor D do ensaio.....	82
Figura 52. Croqui relacionado à altura da camada de terra lançada e compactada com as leituras dos sensores.....	83
Figura 53. Compactador alinhado ao eixo dos conjuntos de medição B, D e E.....	86
Figura 54. Leitura das pressões horizontais atuantes ao longo do eixo vertical e horizontal do plano do molde.....	87
Figura 55. Distribuição das pressões horizontais pela fórmula de Calil e Cheung (2007)	88
Figura 56. Diagrama de pressões atuantes na face interna do molde.....	89
Figura 57 - Perspectiva da superfície de pressões atuantes	90
Figura 58. Pressões máximas no sensor de fundo	90
Figura 59. Ábaco de proporcionalidade entre Ph/Pv	92

Figura 60. Pressões horizontais calculadas (P_h') em função da pressão estática equivalente (P_{eq}) e da relação P_h/P_v .	93
Figura 61. K x profundidade do sensor (ensaio final)	94
Figura 62. Cargas no sensor A (h=10cm), durante a compactação das 7 camadas da massa.	95
Figura 63. Distribuição de pressões horizontais em 3 diferentes modelos e modelo proposto.	98
Figura 64. Esquema estrutural genérico de um painel de fôrma para taipa.	99
Figura 65 - Perspectiva interna da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural	100
Figura 66 - Perspectiva externa da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural	101
Figura 67 - Perspectiva lateral da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural	101
Figura 68. Distribuição das pressões horizontais pela fórmula de Calil e Cheung (2007) sem efeito da compactação.	102
Figura 69 – Perspectiva interna da superfície de pressões sem o efeito do compactador para o elemento 2	102
Figura 70 - Perspectiva externa da superfície de pressões sem o efeito do compactador.	103
Figura 71 - Vista opaca da pior situação da distribuição de pressões para o "elemento 3"	104
Figura 72 - Vista translúcida da pior situação da distribuição de pressões para o "elemento 3"	104
Figura 73 - Perspectiva interna da superfície de pressões sem o efeito do compactador para o elemento 23	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tolerâncias dimensionais presentes nas normas de execução de taipa.	15
Quadro 2. Componentes da fôrma Sirewall.	22
Quadro 3. Componentes da fôrma Taipal.	25
Quadro 4. Comparação entre preenchimento de fôrmas de concreto e fôrmas de taipa.	36
Quadro 5. Comparação entre fatores externos atuantes nas fôrmas de concreto e de taipa.	36
Quadro 6. Resultados de estudos de pressão horizontal do solo atuante nas fôrmas.	49
Quadro 7. Características comparadas de fôrmas para taipa.	53

LISTA DE SÍMBOLOS

cv – Unidade de medida de potência (cavalos)

C – Coesão do solo

d_d – Diâmetro do disco do conjunto medidor;

E – Módulo de Elasticidade

f_{ck} – Resistência característica do concreto

gpm – Golpes por minuto

GC – Grau de compactação

h_s - Altura da camada de solo

K – Coeficiente de empuxo de terra

p_v – Pressão vertical;

p_h – Pressão horizontal;

p_{vm} – Pressão vertical máxima;

p_{hm} – Pressão horizontal máxima;

$p_{máx}$ – Pressão máxima;

$P_H(z)$: Pressão encontrada no solo em uma determinada profundidade (MPa);

R : Raio hidráulico inscrito entre as fôrmas de taipa de pilão;

W – Peso específico do concreto

z : Profundidade do solo (m);

γ_s – Peso específico do solo

μ - Coeficiente de Poisson

μ_s – Massa específica aparente do solo seco, “in situ”;

μ_{sl} – Massa específica aparente do solo seco, obtida em laboratório;

$\sigma_y(z)$: Tensão encontrada no solo em uma determinada profundidade (MPa);

$\mu_{w.c}$: Coeficiente de atrito do solo com o material do painel;

σ_{y0} : Tensão encontrada no solo na profundidade zero (MPa);

GLOSSÁRIO

Fôrma – Molde

Taipa – Taipa de Pilão

Mistura – Mistura de solo com água para execução dos testes e ensaios

Altura – Altura da mistura medida a partir do fundo do molde

Profundidade – Altura da mistura medida abaixo da superfície de impacto do compactador;

Solo – Material heterogêneo extraído direto da jazida.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	14
Resumo	15
ABSTRACT	16
Lista de ilustrações	17
Lista de Quadros	20
Lista de símbolos	21
Glossário	22
Sumário.....	23
1 Introdução	12
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2 Revisão de literatura.....	19
2.1 Tipos de fôrmas	19
2.2 Solicitações do processo executivo às fôrmas	30
2.3 Requisitos para as fôrmas	51
3 Materiais e métodos.....	54
3.1 Obtenção de dados de execução, fôrmas e esforços atuantes.....	54
3.2 Obtenção de valores de pressão atuante nas fôrmas por meio experimental.....	55
3.2.1 Evolução da instrumentação	55
3.2.1.1 Molde indeformável	55
3.2.1.2 Relógios comparadores	60
3.2.1.3 Sensores e conjuntos de medição	61
3.2.1.4 Sistema de aquisição de dados.....	67
3.2.2 Materiais.....	67
3.2.2.1 Solo	67
3.2.2.2 Água	71
3.2.3 Execução	72
3.2.3.1 Homogeneização da mistura	72
3.2.3.2 Lançamento da mistura e preenchimento	73
3.2.3.3 Compactação	73

3.3	Aplicabilidade dos resultados encontrados à um modelo de fôrma genérico	78
4	Resultados e Discussões	79
4.1	Teste 1	79
4.2	Teste 2	81
4.3	Ensaio.....	82
4.4	Proposta de um modelo de distribuição de pressões considerando a compactação em paredes confinadas.	97
4.5	Aplicação dos resultados encontrados em um modelo de fôrma genérico	98
4.5.1	Superfície de pressões atuantes no elemento 2 (barra).....	100
4.5.2	Superfície de pressões atuantes no elemento 3 (montante).....	103
4.5.3	Distribuição de pressão para os elementos 2 e 3 do modelo de fôrma.	105
5	Conclusões.....	106
6	Referências	109

1 INTRODUÇÃO

A grande evolução tecnológica do último século e também a globalização resultaram na oferta de um considerável leque de sistemas construtivos para execução de edificações.

No Brasil, em razão da influência dos imigrantes europeus, a alvenaria de tijolos e blocos cerâmicos difundiu-se até tornar-se o principal sistema construtivo do país por um longo período (TAHARA; PASTA, 2020). Entretanto, novas tecnologias têm sido inseridas e/ou reinseridas na indústria da construção civil brasileira nas últimas décadas, como o *drywall*, *steel frame*, alvenaria estrutural de blocos de concreto, paredes de concreto e estruturas metálicas. Além desses, sistemas mais antigos, como a taipa de pilão, têm sido resgatados, por variadas razões, como o potencial de baixar o impacto ambiental das construções, principalmente das emissões de carbono; a afinidade com o princípio da valorização cultural das técnicas retrospectivas; à boa resposta aos diferentes climas brasileiros; e a correspondência com a estética verde do momento.

A taipa de pilão (ou simplesmente taipa) é um sistema construtivo em que a terra é estabilizada por compactação e, com de modo geral, com acréscimo de algum aglomerante que melhore as características do material compactado.

O processo construtivo consiste em peneirar o solo, secá-lo ao ar e misturar, se for o caso, com o aglomerante. Acrescenta-se água à mistura até o ponto ótimo de umidade, coloca-se essa mistura dentro de uma fôrma reforçada e travada para, finalmente, compactar até a densidade ideal, usando pilões manuais ou compactadores mecânicos.

As técnicas de construção com terra são difundidas mundialmente, tanto que é recorrente a afirmação de que quase 50% da população mundial vive em construções de terra. A maioria destas construções está localizada em países menos desenvolvidos, mas este tipo de construção está presente em vários países, de maior ou menor grau de desenvolvimento – Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia, Brasil, México, Alemanha, França. No Reino Unido, Pacheco-Torgal e Jalali apontam a existência de algo em torno de 500.000 habitações feitas em terra (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

Easton e Easton (2012) ponderam que, ao longo dos séculos, os avanços da tecnologia de taipa têm sido significativos. Se comparada a outras técnicas à base de terra, é nítido que houve incremento de tecnologia, resultando em mais produtividade, uniformidade de acabamento, qualidade construtiva e confiabilidade do produto.

O sistema construtivo de taipa acompanhou e incorporou o desenvolvimento tecnológico de materiais e equipamentos, sem perda do modo de fazer mais tradicional e, atualmente, podem ser encontrados tanto taipas executadas no modo mais ancestral (com fôrma de tábuas de madeira maciça, montada com serrote e martelo, pás e baldes para transporte da mistura e preenchimento de formas, e compactação por pilão manual) quanto taipas mais mecanizadas (com fôrmas multi-materiais - placas de madeira laminada, estrutura metálica em aço/alumínio, correias transportadoras/tratores para transporte da mistura, compressores de ar, compactadores pneumáticos, misturadores e fazendo controle com testes em laboratório).

A taipa deixou de ser totalmente empírica e é hoje, um sistema projetado, de alta resistência mecânica, com oportunidades de redução de impacto ambiental em relação aos sistemas de parede convencionais (no transporte de insumos, nos componentes da mistura, no processo construtivo, no desempenho durante o uso) e executado com a mesma sofisticação das técnicas de construção mais racionalizadas.

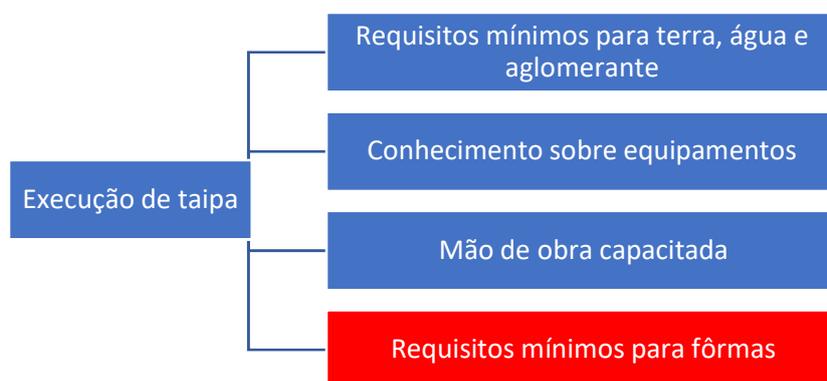
Maniatidis e Walker (2003) elencam vantagens da utilização de taipa:

- o material pode ser extraído em escavações *in situ*;
- a técnica é versátil (uso residencial ou comercial), em paredes internas ou externas;
- dependendo da espessura, admite combinação com materiais isolantes para melhorar a inércia térmica das paredes;
- demanda baixa manutenção;
- na opinião de moradores, paredes de terra criam um ambiente interno agradável, fresco no verão e quente no inverno;
- a taipa tem grande apelo sustentável e estético.

Deve ser mencionado ainda que a taipa está deixando de ser uma técnica construtiva com estereótipo associado a construções de baixa renda ou a locais de acesso restrito a materiais de construção. As construções que usam essa técnica tem tido cada vez mais visibilidade entre o público de grandes centros urbanos, associado a um caráter de exclusividade e ao mesmo de responsabilidade ambiental, tal como é exposto em revistas de “moda e tendência” (DEZEEN, 2017; SUSTENTARQUI, 2020; VOGUE, 2019).

Em manuais e livros sobre o tema (citados adiante), há um entendimento de que a correta execução de paredes de taipa deve se basear no conhecimento de 4 tópicos distintos e que se relacionam, com destaque para o assunto deste trabalho (Figura 1).

Figura 1. Grandes tópicos de entendimento para uma boa execução de taipa.



Fonte: Autor (2021).

Tendo isso em vista, o tema “execução de taipa” ainda apresenta aspectos não completamente esclarecidos, principalmente para aqueles que desejam edificar.

A normatização específica ainda é recente e pouco difundida, como visto na abordagem de Maniatidis e Walker (2003) e, no Brasil, a quantidade de profissionais familiarizados com o material e as técnicas construtivas à base de terra, a julgar pelos currículos das escolas de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, é reduzida não permitindo ainda, de maneira ampliada, a troca de informações, a difusão de tecnologia e o avanço da técnica, de maneira consistente. Segundo Ramos e Yuba (2019) apesar de a arquitetura e construção com terra ser utilizada pelo homem desde os primórdios, a disseminação das técnicas no ensino formal, acontece ainda de maneira restrita e pontual.

São poucos os países que apresentam normas e códigos de práticas sobre taipa: Austrália, Novo México (Estados Unidos), Canadá Sri Lanka, Índia, Nova Zelândia, Quênia, Zimbábue, Espanha, Austrália, (CID; MAZARRÓN; CAÑAS, 2011). Esses documentos tratam de requisitos para os materiais, a mistura e as paredes, mas o conteúdo sobre fôrmas é mínimo, num entendimento de que o detalhamento desse assunto deve ser dedicado a outros tipos de documentos (manuais) ou é questão a ser resolvida pelo produtor.

A montagem, alinhamento e desmontagem da fôrma são considerados as tarefas mais demoradas do processo de construção, responsável por até 80% do tempo no canteiro de obra (MANIATIDIS; WALKER, 2003). Para tais autores, as fôrmas devem ser leves, para facilitar o manuseio, devem ser de rápida montagem e desmontagem, não devem atrapalhar o enchimento e a compactação, devem ter rigidez e resistência suficiente para suportar os esforços de enchimento e compactação e deve ser seguro para os operadores. Porém essa descrição qualitativa não é suficiente para projetar e dimensionar a fôrma.

Considerando-se que os requisitos de desempenho da norma NBR 17014:2022 (ABNT,2022) (as tolerâncias dimensionais) são bastante restritivos (Quadro 1), pode-se afirmar que há gargalos para a prática de construção com taipa, já que as informações necessárias para o projeto e construção das fôrmas (esforços de enchimento e compactação da taipa) são escassas.

Quadro 1. Tolerâncias dimensionais presentes nas normas de execução de taipa.

Espessura – variação (mm)	Prumo (mm)	Curvatura no plano horizontal (mm)	Fonte
-20mm ou +40mm	±25mm/3m de altura	±30mm	Standards Australia (2002)
-20mm ou +40mm	±35mm/3m de altura	±45mm	NZS 4298:1998 (1998)
±10mm	±10mm/3m de altura	±5mm / 5m de comprimento	BS 5628-3:2001 (2001)

Fonte: Autor (2021), a partir de dados de Maniatidis; Walker(2003)

No geral, os livros ou manuais consultados (EASTON, 2007; HALL; LINDSAY; KRAYENHOFF, 2012b, 2012a; KRAHN, 2019; MANIATIDIS; WALKER, 2003) tratam de materiais utilizados, descrição superficial dos componentes das fôrmas (placas, tirantes, escoras, longarinas, vigas etc.), concepção de negativos para criação de vãos ou elementos decorativos, painéis de canto. Não abordam de maneira mais específica, o dimensionamento das fôrmas ou os esforços atuantes devido ao empuxo gerado pelo peso próprio da mistura e

pelo impacto do equipamento de compactação, que são dados necessários para o correto dimensionamento dos painéis e demais elementos do conjunto de fôrmas. As características físicas da mistura (densidade, teor de umidade granulometria) e sua relação com as fôrmas, também não são abordadas. O mesmo nível de generalização é dado no GPB - *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* (SAMUEL et al., 2018) apesar de ser um material elaborado por uma associação de produtores de taipa.

Há lacunas mesmo em patentes: entre as americanas, 6 são disponíveis, sendo o único resultado relevante o da empresa Sirewall (UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, 2013). No texto de introdução dessa patente, Krayenhoff (2008) faz diversas referências a sistemas e patentes de fôrmas de outros países, aborda características relevantes (positivas ou negativas) para justificar a elaboração de seu modelo, mas também não deixa claro como chegou aos resultados dos esforços atuantes sobre suas fôrmas.

Para o produtor, seriam desejáveis instruções de como construir a fôrma, mas esses se apresentam como um conjunto de requisitos apenas, e que, para serem considerados conjuntamente no projeto, tornam-se um problema bastante complexo a ser solucionado. A resolução desse problema pode resultar em um produto muito caro, dependendo do sistema de fôrmas projetados ou escolhidos, um dos motivos alegados para a técnica de construção em taipa, pelo menos no Reino Unido, não ser bem aceita ou estabelecida (MANIATIDIS e WALKER, 2003). Nessa linha, esses autores dizem que se a fonte dos materiais representa o maior impacto de custo e benefícios ambientais, a escolha do sistema de fôrmas representa o segundo maior impacto.

Se numa obra convencional de concreto, a confecção de fôrmas de madeira corresponde a 41,44% do custo da obra, enquanto o aço representa 29,96% e o concreto 28,60% (MARANHÃO, 2000), pode-se estimar que numa obra de taipa, a confecção de fôrmas represente mais de 50% do custo de uma obra, uma vez que não se utiliza aço e que o material de preenchimento (solo ou solo cimento) apresenta um custo muito inferior ao do concreto.

Krahn (2019), que trata de fôrmas para concreto, faz uma análise que cabe também para fôrmas de taipa, e que ajudam a reduzir o impacto do percentual citado acima: o autor diz que o impacto do custo da forma de taipa pode ser menor, pois a quantidade de reuso é maior. Além disso, outros fatores também interferem nessa relativização: custo dos materiais,

custo da mão de obra na confecção, montagem e desmontagem, equipamentos necessários para montar as fôrmas, o possível valor residual destas fôrmas para utilização em outros projetos e o custo de acabamento das superfícies de taipa após a remoção das fôrmas (KRAHN, 2019).

Essa situação ilustra a pouca transferência de informação/conhecimento/tecnologia do meio científico para o meio produtivo, o que pode estar ocorrendo porque:

- as fôrmas continuam sendo desenvolvidas de maneira empírica ou;
- empresas e profissionais guardam esta informação como segredo industrial ou;
- faltam estudos e dados numéricos para definir os esforços atuantes nas fôrmas de taipa.

Dada a falta de informações que possam contribuir com o meio produtivo, este trabalho foi elaborado para tratar da lacuna de dados que são necessários para um projeto de fôrma otimizada para paredes de taipa, resistente ao efeito da compactação da mistura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral é estudar teórica e experimentalmente as pressões horizontais exercidas pela mistura compactada nas fôrmas utilizadas no sistema construtivo de taipa de pilão.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

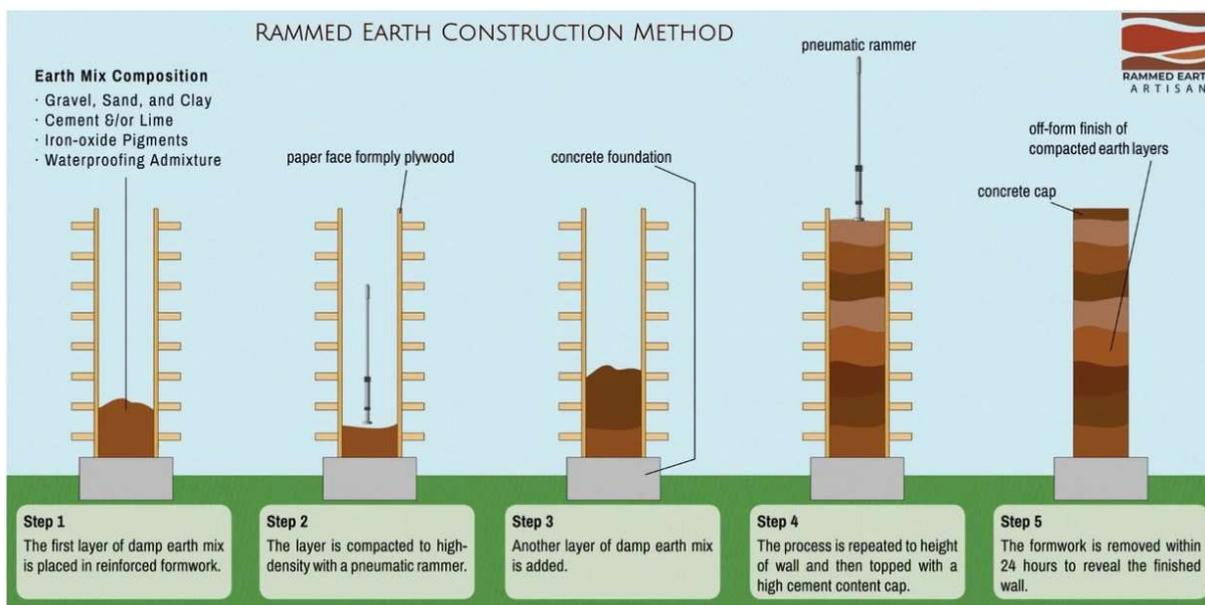
- Obter experimentalmente as pressões horizontais atuantes na fôrma de taipa;
- Definir os esforços atuantes nas fôrmas durante a execução de uma parede de taipa;
- Determinar a altura da taipa, a partir da qual o compactador deixa de influenciar nos esforços horizontais atuantes na fôrma de taipa;

- Analisar os resultados encontrados aplicados a uma tipologia de fôrma.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Paredes de taipa de pilão, ou taipas, são paredes formadas pela compactação de solo entre fôrmas temporárias (MANIATIDIS; WALKER, 2003). Na Figura 2 é explicitado o processo de execução das taipas.

Figura 2. Etapas de preenchimento de uma fôrma de parede de taipa.

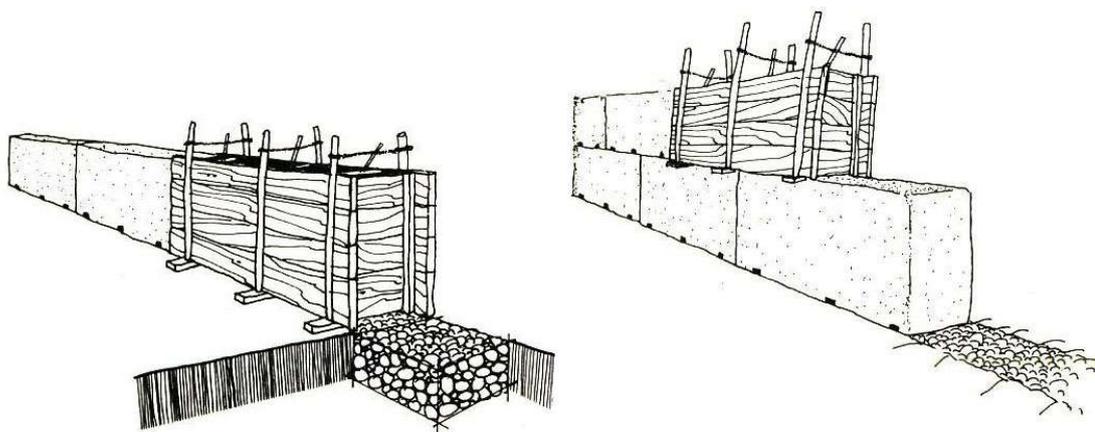


Fonte: rammedearthartisan.ca (2023)

2.1 Tipos de fôrmas

Há, basicamente dois tipos de fôrma: a fôrma marroquina e as fôrmas contemporâneas. O modo mais antigo, e conseqüentemente mais rudimentar, utiliza fôrmas pequenas, que são trasladadas tanto horizontal como verticalmente. O acabamento das paredes é definido pela superfície das pranchas utilizadas nas fôrmas (geralmente tábuas de madeira maciça), resultando em marcas e juntas bem visíveis. A compactação é feita com compactador manual (Figura 3). Apesar de se tratar de uma maneira antiga de produzir taipa, continua a ser utilizada na atualidade (Figura 4).

Figura 3. Fôrma marroquina.



Fonte: Coisas da arquitetura (2010)

Figura 4. Fôrma marroquina em uso na atualidade.



Fonte: Rammed Earth Colombia (2020)

As fôrmas mais atuais, foco deste trabalho, são mais elaboradas e versáteis, com partes que vão sendo agregadas na montagem à medida que se eleva a parede e desmontadas de uma vez, ao final do processo de compactação. A compactação é usualmente feita com compactadores pneumáticos e, no processo, é controlada a umidade, a carga de compactação, para que se atinja a compacidade ideal sem danificar a camada inferior da taipa nem sobrecarregar a fôrma. Esses cuidados melhoram a qualidade do elemento construído e seu desempenho.

O taipal é composto basicamente de 3 conjuntos principais:

- as placas (normalmente de madeira compensada) que conferem bom acabamento à terra compactada e podem servir de gabarito para vãos e aberturas de portas e janelas;
- as estruturas (metálicas ou de madeira), dos mais diferentes formatos e soluções, que variam de acordo com a cultura do país ou preferências dos construtores. Suportam as cargas e impedem a deformação das placas;
- plataformas de trabalho, que permitem aos profissionais acessarem com maior facilidade o interior da fôrma e podem ser montadas diretamente sobre as estruturas, dispensando, na maioria das vezes, a montagem de andaimes, o que economiza tempo e otimiza a utilização do espaço no canteiro de obras.

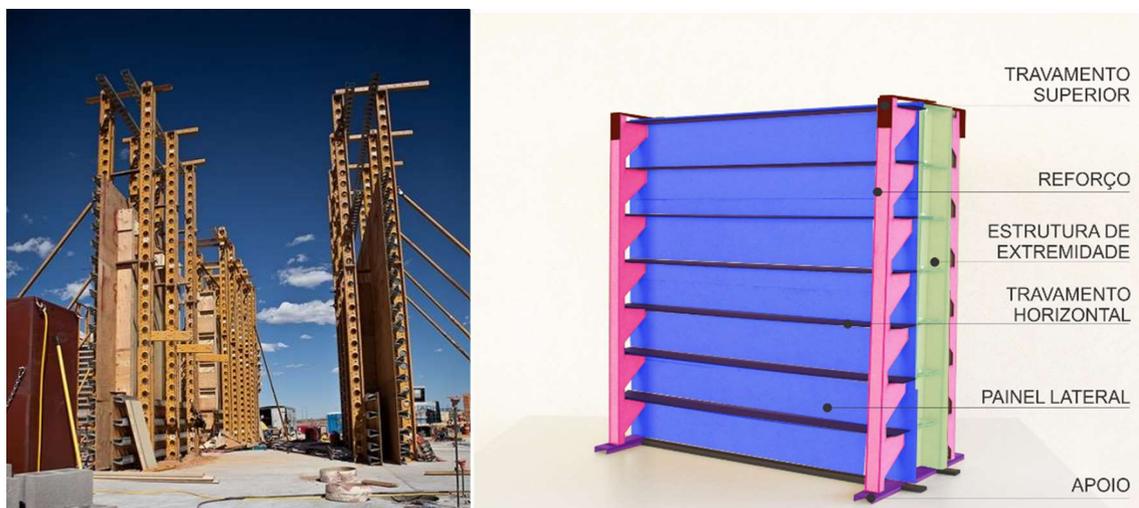
Os produtores de taipa têm atuado com fôrmas variadas, de diferentes materiais, formatos, componentes e processos de montagem. Na América do Norte, a madeira compensada é bastante utilizada nas fôrmas. Os Estados Unidos e Canadá possuem associações que classificam e qualificam compensados fabricados especificamente para aplicação em fôrmas (KRAHN, 2019). É citado ainda pelo autor que há disponibilidade em ambos os países de fôrmas metálicas, mas são pouco usadas por se deformarem facilmente de maneira permanente pelo efeito de impacto dos compactadores, e que são copiados para a parede acabada. O Brasil conta a ABIMCI (Associação Brasileira da indústria de madeira processada mecanicamente) que estimula a melhoria da qualidade e certificação dos produtos.

A canadense SIREWALL trabalha com fôrmas diversificadas (Figura 5 e Quadro 2): placas de madeira compensada e estruturas de suporte em madeira com conexões metálicas; placas de madeira compensada e longarinas metálicas de suporte (SIREWALL, 2021).

A empresa austríaca Lehm Ton Erde (LEHM TON ERDE, 2021) trabalha com paredes moldadas in loco e pré-moldadas, mas não deixa evidente qual o sistema de fôrmas utiliza. A alemã ZRS (ZRS ARCHITEKEN INGENIEURE, 2021) também não deixa claro qual o sistema de fôrmas utilizado. O construtor alemão Thomas Gluck mostra o uso de fôrmas para paredes de

concreto da fabricante NOEalu L, estruturadas em alumínio, tornando os painéis de fôrmas mais leves (NOE INFO, 2011).

Figura 5. Fôrmas para taipa, da Empresa Sirewall.

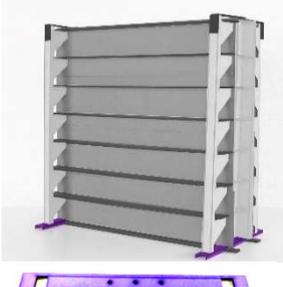


Fonte: Sirewall (s.d.), Lopes; Pereira (2017)

Quadro 2. Componentes da fôrma Sirewall.

FÔRMA SIREWALL				
componentes	qtde	material	dimensão	descrição/função
ESTRUTURA DE EXTREMIDADE	2	Aço	300 x 52 x 19cm	É composto por um conjunto de 4 estruturas metálicas de perfil "L" com comprimento de 3m, unidos duas a duas em cada extremidade lateral por uma combinação de 16 conectores horizontais. Tem como função fazer o fechamento lateral da parede de taipa.

REFORÇO (TRELIÇA)		4	Aço	300 x 34 x 13cm	Estrutura que apoia o painel de extremidade. Nele é possível apoiar tábuas de madeira que servem de travamento para o painel lateral e também servem como escada/andaime.
continua...					
continuação					
FÔRMA SIREWALL					
componentes	qtde	material	dimensão	descrição/função	
TRAVAMENTO SUPERIOR	 	2	Aço	126 x 24 x 10cm	Tem a função de unir o reforço com o painel de extremidade.
'PAINEL LATERAL		6	Madeira laminada compensada	300 x 150 x 1,8 cm e 300 x 75 x 1,8cm	A placa maior constitui o fundo inteiriço e a placa menor é colocada no lado em que o operário compactará a parede.
TRAVAMENTO HORIZONTAL		14	Tábua de madeira maciça	300 x 25 x 1,8cm	Tem a função de evitar a deformação do painel lateral, durante a compactação e serve de andaime para o operário.

APOIO		2	Aço	160 x 16 x 2,5cm	Tem função de apoiar o painel de extremidade e o reforço. Este componente é colocado sobre uma guia fixada na base da construção, servindo de gabarito, para evitar o desalinhamento das paredes.
-------	---	---	-----	---------------------	---

Fonte: Lopes; Pereira (2017).

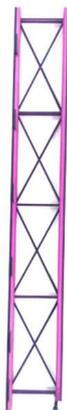
A empresa brasileira Taipal utiliza um sistema misto de placas de madeira compensada e estruturas metálicas treliçadas para suporte dos painéis e montagem de plataformas de trabalho (Figura 6 e Quadro 3).

Figura 6. Fôrma da empresa Taipal.



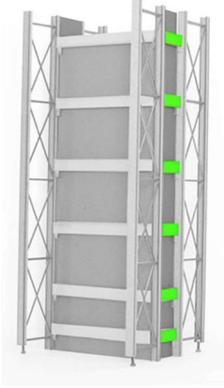
Fonte: Taipal (2020), Lopes; Pereira (2017)

Quadro 3. Componentes da fôrma Taipal.

FÔRMA TAIPAL					
componentes	qtde	material	dimensão	descrição/função	
TRELIÇA		Variável	Perfil C e L de chapa dobrada de aço	300 x 40 x 7,5cm	É composta por dois montantes de aço de perfil "C" na vertical, sendo que um possui 300cm de comprimento e o outro 292cm. Na base do montante mais curto é fixada uma sapata quadrada de rosca ajustável. As diagonais de aço de perfil "L" possuem 75cm de comprimento e a travessa de aço de perfil "L" tem 37,5cm de comprimento. A função da treliça suportar manter no lugar os painéis laterais além de resistir aos esforços de flexão sofridos por estes durante a compactação.
BARRA DE MEIO		Variável	Perfil C de chapa dobrada de aço	102,5 x 10cm (a dobra tem 4cm)	É um componente de perfil "C" que une as treliças adjacentes e apoia os painéis laterais, não permitindo que deformem. O encaixe só ocorre quando a treliça está apurmada, nivelada e alinhada devido seu projeto.

continua...

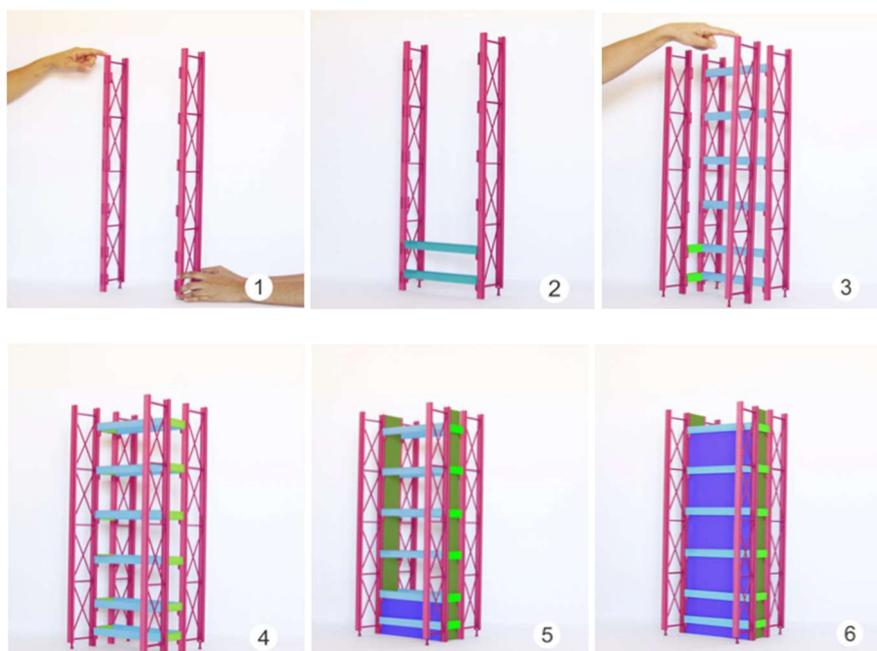
continuação

BARRA DE EXTREMIDADE		Variável	Perfil C de chapa dobrada de aço	30 x 10 x 4cm	É um componente de perfil "C" que faz o travamento das treliças opostas e apoia os painéis de extremidade, não permitindo que se desloquem. Esse componente também tem o mesmo recurso de encaixe da barra de meio.
PAINEL LATERAL		Variável	Madeira laminada compensada	110 x 55 x 2cm	A função das placas é confinar e moldar a massa de terra compactada. A quantidade de painéis é relativa ao tamanho da parede.
PAINEL EXTREMIDADE		2	Madeira laminada compensada ou madeira serrada	300 x Var x 2cm	Tem a função de fazer a vedação da extremidade das paredes. A largura é variável de acordo com a espessura das paredes de taipa.

Fonte: Lopes; Pereira (2017).

O processo de montagem segue o demonstrado por Lopes; Pereira (2017) (Figura 7), ajudam a esclarecer o processo de montagem e as principais diferenças entre as fôrmas apresentadas e servem de parâmetro para um novo projeto de fôrmas.

Figura 7. Passo a passo de montagem da fôrma II Taipal.



- 1- As treliças são dispostas duas a duas, com espaçamento entre uma e outra de 1,05m. É preciso que a base esteja nivelada;
- 2- Coloca-se as barras de meio para dar rigidez. Conforme o nivelamento da superfície e necessário ajustar a sapata roscável, localizado na base da treliça;
- 3- Posicionam-se as treliças opostas (as de canto não diferem, mas para paredes em L há pequenas diferenças) e as barras de extremidade. O vão formado entre as 4 treliças será ocupado pela parede de taipa;
- 4- Todas as barras de meio e de extremidade são encaixadas;
- 5- É posto o painel de extremidade e um painel lateral de cada lado;
- 6- Conforme a compactação das camadas acrescenta-se os painéis laterais, seguindo este processo até a finalização da parede.

Fonte: Lopes; Pereira (2017)

Todo o conjunto de fôrmas e escoramentos vibra muito devido ao processo de compactação, fato importante que orientou a tomada de decisões quanto ao molde que se pretendia usar nos ensaios deste trabalho, a fim de se buscar as informações de pressão atuantes sobre as fôrmas.

No caso da empresa Taipal (Figura 8), uma equipe de 5 pessoas, em média, produz 1,5 m³ de parede em 8 horas de trabalho, utilizando:

- compactador pneumático de 13 kg;
- compressor 5cv com reservatório de 200 litros;

- misturador vertical de 300 litros, com motor 5 cv de potência (Figura 9).

Figura 8. Preenchimento e compactação no interior do taipal e taipal sobre andaimes para execução de paredes com mais de 5m de altura.



Fonte: Autor (2020)

Figura 9. Misturador de eixo vertical



Fonte: Autor (2020)

Apesar de parecerem semelhantes, cada empresa apresenta em suas fôrmas, elementos estruturais das mais variadas geometrias e materiais, alguns sendo travados e apumados por agulhas e escoras (Figuras 10, 11 e 12).

A empresa Rammed Earth Australia Pty LTD fabrica e vende fôrmas, todas no sistema misto de placas compensadas de madeira e estrutura de sustentação metálica. A empresa destaca que muitos são os fatores necessários para garantir que as fôrmas sejam adequadas para qualquer projeto, entretanto não entra em detalhes quanto a estes fatores. A Rammed Earth Australia é uma das únicas empresas dentre as pesquisadas a apresentar uma patente para fôrmas curvas, a Flexi-Form TM (RAMMED EARTH AUSTRALIA PTY LTD, 2021).

Figura 10. Fôrma contemporânea (placa de compensado e estrutura metálica)



Fonte: Base Bio Arquitectura (2020)

Figura 11. Fôrma contemporânea (estrutura em madeira e placa de compensado naval)



Fonte: Earth Dwellings (2013)

Figura 12. Fôrma travada por agulhas e escoras.



Fonte: Rammed Earth Works (s.d.)

2.2 Solicitações do processo executivo às fôrmas

Para compreender melhor o comportamento das fôrmas, quanto a solicitação do lançamento e compactação da mistura, no momento da execução de uma parede de taipa, é necessário o entendimento dos tipos de solicitações atuantes na parede de taipa.

As cargas de piso, estrutura de cobertura, telhas, caixas d'água, esquadrias e qualquer outro elemento fixo, atuam nas paredes de maneira **estática**, pois pouco ou nada variam durante a vida útil de uma estrutura. Assim após sua execução, a parede de taipa trabalha de maneira monolítica e seu comportamento estrutural é semelhante, se não igual, a uma parede de concreto, com os esforços atuantes distribuídos de maneira uniforme.

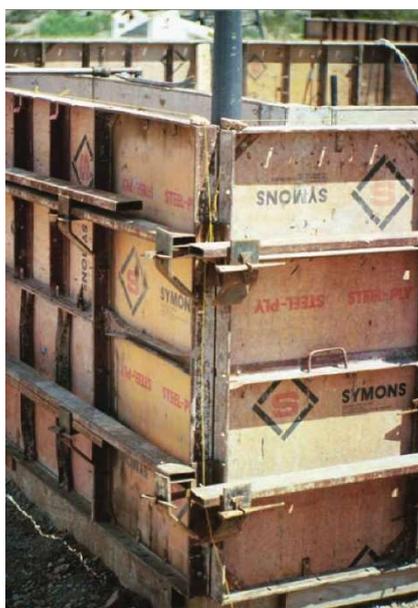
Com base nestas informações e devido à falta de dados quanto ao dimensionamento de fôrmas para paredes de taipa, pressupõe-se inicialmente e toma-se como base as informações e estudo sobre fôrmas para estruturas de concreto, assim como é feito por alguns outros autores.

A norma Neozelandesa, NZS 4297-1998: *Engineering design of earth buildings* (NZS 4297:1998) faz menção à norma Australiana AS 3610-1995: *Formwork for concrete*, como referência para a sua elaboração. Downton (2013) também faz referência a semelhança das

fôrmas para concreto moldado *in loco*, cita a necessidade de requisitos específicos para as paredes de terra, mas não detalha quais seriam estes requisitos.

Easton (2007) aponta a preferência dos construtores no sudoeste dos Estados Unidos para a utilização dos sistemas de fôrma desenvolvidas para a indústria do concreto, tal como as fabricadas pela Symons®, na qual cada placa de madeira compensada é suportada por perfis metálicos (Figura 13).

Figura 13. Fôrma de concreto da Empresa SYMONS utilizada para parede de taipa.



Fonte: Easton (2007)

Easton (2007) ainda cita que a indústria do concreto tem desenvolvido uma ampla variedade de sistemas de fôrmas que podem ser adaptados para construções em taipa de pilão, mas comenta que os projetos precisam ser grandes o bastante para justificar os custos de locação.

Sobre as fôrmas para paredes de concreto, pode-se dizer que é desejável considerar as pressões unitárias mais elevadas para o desenvolvimento do projeto de fôrmas. Para isso é necessário conhecer o comportamento das pressões e cargas que atuam sobre as fôrmas para determinação das tensões admissíveis do material.

“Quando o concreto é lançado, ele exerce sua máxima pressão ou peso sobre as fôrmas de contenção ou suporte. No entanto, em pouco tempo, às vezes menos de 2 horas, a pressão

nas fôrmas da parede ou da coluna atingirá um valor máximo e, em seguida, diminuirá para zero. Portanto as fôrmas estão sujeitas a tensão máxima por períodos relativamente curtos.” (PEURIFOY; OBERLENDER, 2012), (tradução nossa). Isso se deve ao fato de que no momento do lançamento o concreto está no estado fluido, ou seja, a pressão exercida sobre as fôrmas se deve à pressão hidrostática ou empuxo, do material líquido dentro da fôrma, e com o endurecimento do concreto, essa pressão deixa de existir.

No lançamento do concreto ou da mistura para taipa (terra + água + estabilizantes), o empuxo ocasionado pela fluidez ou falta de coesão do material e o adensamento do material atuam nas fôrmas das estruturas de maneira **dinâmica**, ou seja, apresentam grande variação de pressão ao longo da execução. Porém, a existência de uma compactação mecânica nas paredes de taipa, faz com que as suas fôrmas sejam ainda mais solicitadas aos esforços dinâmicos, diferenciando-se assim o comportamento estrutural das fôrmas de paredes de concreto.

Assim como na fôrma para estruturas de concreto, as fôrmas para paredes de taipa também estão sujeitas à tensão máxima por períodos relativamente curtos. Com a diferença de que, os esforços máximos atuantes sobre as fôrmas ocorrem no momento da compactação e duram alguns minutos por camada, e não algumas horas como nas fôrmas para paredes de concreto.

Na taipa de pilão, ao final da compactação de um determinada camada, acredita-se que com a elevação e compactação das camadas superiores, exista uma redução na transmissão de pressões horizontais (p_h) para as fôrmas enquanto os esforços verticais (p_v) se mantém, devido ao peso para as camadas inferiores e devido ao atrito com a superfície das fôrmas, o que é afirmado por KRAHN (2019): “À medida que as camadas superiores vão sendo adicionadas uma em cima da outra, a pressão exercida na parte inferior do sistema da parede é em sua grande parte, vertical, atuando na fundação” (tradução nossa). Esta solicitação vertical (p_v) nos elementos de fundações não interfere no dimensionamento da fôrma, uma vez que esta tem apenas a função de moldar a parede nas dimensões estabelecidas em projeto arquitetônico e de suportar os esforços horizontais (p_h).

Quanto à pressão do concreto atuante em fôrmas para paredes, a APA apresenta a seguinte fórmula (THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2012):

Com taxa de lançamento inferior a 7 pés por hora (2,2m/h) e altura de lançamento não superior a 14 pés (4,2m):

$$P = C_w C_c \left[W + \frac{9R}{T} \right] \quad (1)$$

Na qual:

P – Pressão lateral máxima atuante;

W – Peso específico do concreto;

C_w – Coeficiente relacionado ao peso específico do concreto - tabelado;

C_c – Coeficiente químico (referente ao aditivo) - tabelado;

R – Velocidade de aplicação do concreto (ft/hour);

T – Temperatura do concreto, em Fahrenheit.

Com taxa de lançamento inferior a 7 pés por hora (2,2m/h) e altura de lançamento superior a 14 (4,2m) pés ou para paredes com taxa de lançamento entre 7 e 15 pés por hora (2,2 e 4,5m/h):

$$P = C_w C_c \left[W + \frac{43,400}{T} + \frac{9R}{T} \right] \quad (2)$$

Em ambas as fórmulas apresentadas, a pressão deverá ser sempre inferior à pressão hidráulica atuante $p_{máx}$ e não fazem referências a espessura da parede de concreto:

$$p_{máx} = W \cdot h_c \quad (3)$$

Na qual:

$p_{máx}$ – Pressão lateral máxima;

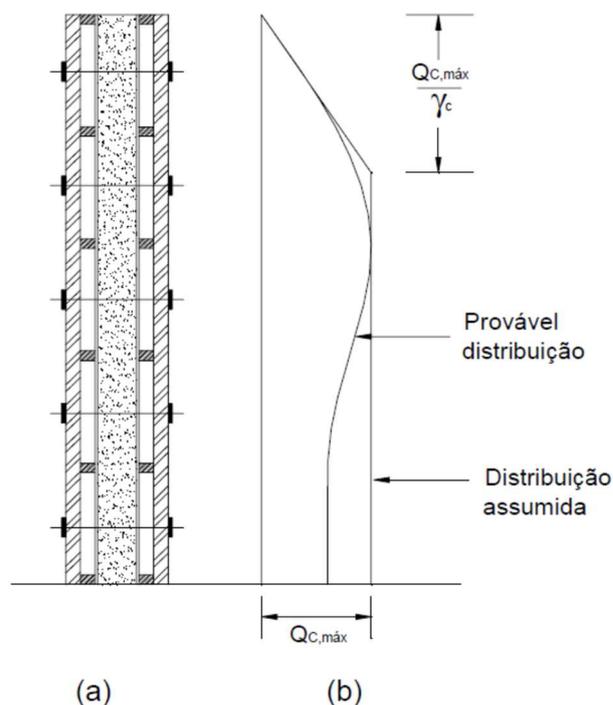
W – Peso específico do concreto;

h_c – Altura da camada de concreto.

Tais fórmulas são também apresentadas pela ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004).

Harrison; Clear (1985 apud Maranhão¹, 2000) apresentam ilustração referente a estudo onde foram avaliadas as pressões do concreto nas faces laterais das fôrmas, após o preenchimento total, ou seja o diagrama apresentado se refere a pressão final, Figura 14.

Figura 14. Envoltória de tensões horizontais atuantes devido ao concreto dentro da fôrma.



Fonte: Maranhão (2000)

Verifica-se que a pressão lateral máxima neste caso se mantém constante a partir de determinada altura.

Maranhão (2000) observa que os fatores que têm influenciado mais sensivelmente as pressões laterais do concreto são a velocidade de concretagem e o Slump. Nestes estudos apresentados, muitos dos fatores utilizados no cálculo das pressões laterais atuantes não são aplicáveis à mistura da taipa e há diferenças no procedimento de preenchimento da fôrma. Isso se deve principalmente ao comportamento distinto entre o concreto fresco e a mistura de taipa e do concreto endurecido e a mistura de taipa compactada, que apresentam coesão, atrito interno, grau de umidade e mobilidade bem distintos (Quadro 4).

¹ HARRINSON, T. A.; CLEAR, C. (1985). Concrete pressure on formwork, Construction Industry Research and Information Association, Report 108, London, September, 32 pp.

Quadro 4. Comparação entre preenchimento de fôrmas de concreto e fôrmas de taipa.

Fator	concreto	taipa
velocidade de lançamento	rápida	lenta
estado físico do material de preenchimento	fluido	coesivo
velocidade de preenchimento da fôrma	rápida	lenta
altura de lançamento	definida pela altura da parede	variável de acordo com elevação da fôrma ou modelo da fôrma
tipo de vibração	interna ou externa	não há
tipo de compactação	não há para paredes	compactador pneumático ou manual
início da diminuição das pressões laterais	com início do endurecimento do concreto (horas)	imediatamente após a compactação
prazo para desforma	fim da cura do concreto e tendo atingido o f_{ck} de projeto (dias)	imediatamente após compactação da última camada
máxima pressão atuante	hidráulica - $p=W.h_c$	hidráulica - $p=W.h_c$, acrescida dos efeitos do compactador

Fonte: Autor (2021)

Além desses fatores, que irão influenciar nos esforços internos atuantes nas fôrmas, há esforços externos, que também influenciam no dimensionamento e projeto das fôrmas (Quadro 5).

Quadro 5. Comparação entre fatores externos atuantes nas fôrmas de concreto e de taipa.

fator	concreto	taipa
vento	atuante	atuante
plataforma de trabalho	raro	comum
impactos/demais cargas acidentais	comum	comum
peso próprio dos materiais	atuante	atuante

Fonte: Autor (2021)

Os fatores elencados acima são de fácil determinação numérica, tendo em vista que é possível mensurar através de normas os esforços atuantes nas fôrmas. Apesar de não serem objetos de investigação neste trabalho, farão parte do escopo de dimensionamento das fôrmas no item Materiais e métodos.

Há estudos para o desenvolvimento de fôrmas para paredes de concreto que serão úteis para a verificação e dimensionamento das peças componentes do sistema de fôrmas, mas é necessário num primeiro momento buscar valores das pressões horizontais atuantes na taipa, proveniente da mistura de solo cimento que é compactada durante a execução da taipa.

Sabe-se pelos trabalhos de Duncan e Seed (1986) e Ehrlich e Mitchell (1994) que a dinâmica da compactação altera significativamente as pressões verticais e horizontais no solo e desta forma é possível afirmar que a utilização das pressões obtidas similarmente ao concreto é equivocada, dando importância para o fato de que o concreto no seu estado inicial é fluido e a massa compactada de solo, um sólido. Logo os empuxos gerados pelo concreto ou pela massa compactada serão diferentes. Assim, pode-se, analogamente, buscar os esforços atuantes através das teorias aplicadas a solos. A hipótese inicial utilizada neste trabalho é de que as fôrmas da taipa possam receber pressões semelhantes às estruturas de contenção, como muros de arrimo e silos.

Dessa maneira, entender o comportamento do solo ou mistura quando compactado e combinar estas informações com as metodologias de dimensionamento de fôrmas para paredes de concreto poderá levar ao dimensionamento, projeto e concepção de fôrmas para taipa mais econômicas e eficientes.

Também observado por DUNCAN et al. (1992): Quando o solo é compactado em camadas por rolos, placas vibratórias ou placas compactadoras, a pressão horizontal da terra dentro da massa do solo compactado aumenta. Durante a compactação, as forças exercidas pelos equipamentos de compactação causam um aumento tanto das pressões verticais quanto das horizontais dentro do solo. Quando o equipamento de compactação é retirado, as pressões verticais diminuem para seus valores normais de sobrecarga. Já as pressões horizontais se mantêm acima dos valores antes da compactação.

A distribuição de pressão durante a execução da taipa é principalmente vertical (p_v), mas também existe a pressão horizontal (p_h) sendo exercida na fôrma, e ela é do tipo dinâmica com vibração considerável e tende a desalinhar tudo que não está fixado ou preso com segurança. Um valor prático sugerido para o projeto de fôrmas, para a pressão horizontal (p_h), exercida durante a compactação pneumática, é de 200 lbf/ft² (9,6 kPa). Na ausência de testes específicos, este é um número razoável para uso, de acordo com Krahn (2019). Entretanto,

esse autor não faz menção à espessura e nem ao sistema estrutura das fôrmas para que se possa considerar a pressão de 9,6 *kPa*.

Talvez a espessura possa não ser tão significativa para as pressões horizontais atuantes nas fôrmas, como é possível observar através da teoria clássica de Rankine. Teoricamente pode-se fazer uma analogia entre a pressão vertical (p_v) e a pressão horizontal (p_h), isto porque em função do coeficiente de empuxo de terra “ K ”, verifica-se a existência de proporcionalidade entre a pressão vertical (p_v) e a pressão horizontal (p_h). Tal relação é dada pela expressão:

$$p_h = K \cdot p_v \quad (4)$$

Na qual K é chamado de coeficiente de empuxo de terra.

$$p_v = \gamma \cdot h_s \quad (5)$$

Na qual γ é o peso específico do solo e h_s altura da camada de solo.

O valor de K depende de vários parâmetros geotécnicos do solo, como ângulo de atrito, índice de vazios e razão de pré-adensamento, entre outros, e situa-se na faixa entre 0,3 e 3 (GERSCOVICH; DANZIGER; SARAMAGO, 2019).

Esta fórmula que leva em conta essa proporcionalidade foi proposta por Rankine (1857) e estabelecida para solos granulares e posteriormente estendida por Rèsal (1910) para solos coesivos. Passa então a ser dada pela expressão:

$$p_h = K \cdot p_v - 2 \cdot c \cdot K \quad (6)$$

Na qual c é a coesão do solo.

A primeira possível contribuição é de Rankine (1857) citado por Gerscovich; Danziger; Saramago (2019).

A teoria de Rankine é fundamentada em algumas hipóteses:

- solo é homogêneo;
- solo é isotrópico;

- a superfície do terreno é plana;
- o contato da estrutura de contenção com o solo é perfeitamente liso, isto é, não há mobilização da resistência no contato solo-muro. Essa hipótese acarreta que a direção do empuxo de terra é paralela à superfície do terreno, e trata-se de uma simplificação;
- a parede da estrutura de contenção é vertical.

Chen; Fang (2008) estudaram o efeito da compactação e da vibração, na variação da pressão lateral exercida contra uma parede de contenção não deformável e verificaram após a compactação, que a pressão lateral medida próxima ao topo de molde não deformável foi praticamente idêntica à pressão passiva proposta pela teoria de Rankine.

Pelo fato de não considerar o atrito entre o solo e a estrutura de contenção e de levar em conta apenas o solo em repouso, não considerando o efeito da compactação no solo, a teoria de Rankine não seria a mais apropriada para a determinação das pressões horizontais atuantes nas fôrmas de taipa, apesar de poder oferecer valores aproximados que serviriam com uma estimativa inicial, não cabe descartar ou refutar a formulação de Rankine, podendo esta ser utilizada para efeito de comparação ou até mesmo estabelecer um limite inferior ao qual se pretende levantar em experimento explicado no item Materiais e métodos, uma vez que ainda se tem, além do empuxo o efeito do compactador agindo sobre a fôrma com os valores que

Ainda do entendimento da teoria de Rankine ao se fazer correlação com o que diz Ehrlich e Becker (2010), “a construção das camadas seguintes resultará em acréscimos nas tensões. No entanto, ter-se-á o efeito da compactação apagado somente quando a tensão vertical devido ao peso próprio das camadas acima ultrapassar a tensão vertical máxima induzida durante a operação de compactação ($\sigma'_{zc,i}$)”. Ainda segundo Ehrlich e Becker (2010) no caso de uma placa vibratória o valor de $\sigma'_{zc,i}$ pode ser estimado como a tensão média atuante no contato solo/placa.

$$\sigma'_{zc,i} = \frac{Q}{B \cdot L}$$

Sendo:

Q – carga estática equivalente do compactador (peso vezes o fator de amplificação dinâmica);

B – largura da placa;

L – comprimento da placa;

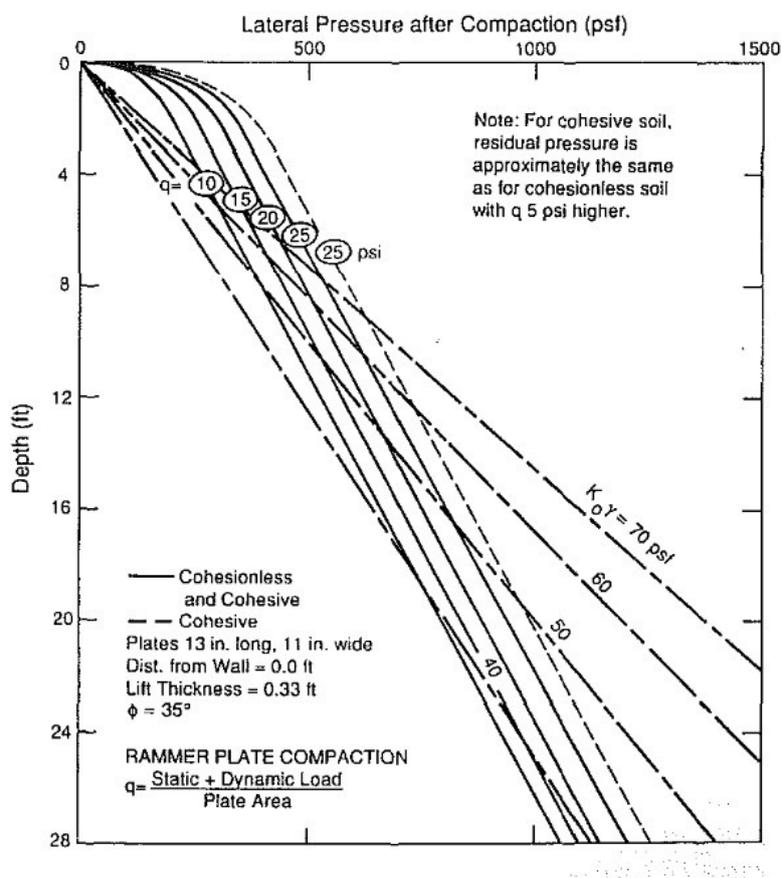
A carga estática equivalente deve ser considerada composta pelo peso próprio do equipamento de compactação somada ao efeito dinâmico, gerado pela vibração.

A determinação teórica desta tensão vertical máxima, será importante para a determinação da altura/profundidade crítica de compactação. Ou seja, a altura/profundidade a partir da qual os efeitos da compactação já não atuam mais sobre o maciço de solo e conseqüentemente sobre as fôrmas;

DUNCAN et al. (1992) também expuseram o efeito da compactação na pressão lateral devido às placas compactadoras (

Figura 15).

Figura 15. Pressão lateral após compactação.

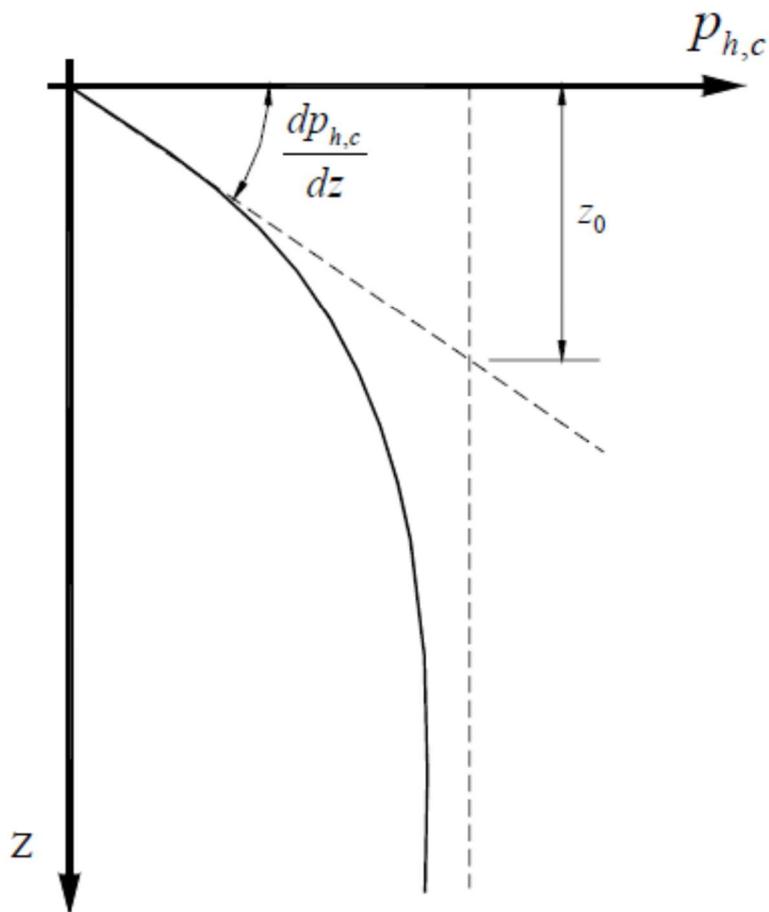


Fonte: DUNCAN et al. (1992)

O fato de se extrapolar a altura, dos muros, para a teoria de Rankine (1857), e das fôrmas, para a teoria de Duncan (1992), resultariam valores cada vez maiores de pressão horizontal, o que parece pouco provável para fôrmas de taipa, o que define a segunda **hipótese** deste trabalho: à medida que as camadas vão sendo compactadas, acredita-se que exista uma altura crítica/limite em que a pressão horizontal atinge seu valor máximo e passa a diminuir, semelhante ao proposto nas fôrmas para paredes de concreto (Figura 14).

Janssen (1985) ao estudar as pressões horizontais para silos muito esbeltos determina que a partir de uma determinada altura Z_0 o valor da pressão horizontal não depende da constante K , dependerá apenas do peso específico e do ângulo de atrito com a parede, a representação deste estudo é apresentada na

Figura 16. Representação do estudo dos valores assintóticos da pressão de Janssen.



Fonte: Cheung (2007)

Cheung (2007) realizou um estudo abrangente das pressões exercidas por materiais granulares sobre as paredes e no fundo dos silos verticais esbeltos, avaliando e adaptando as teorias de pressões já existentes. É possível fazer uma correlação entre seu estudo e as pressões exercidas devido a compactação da mistura sobre a fôrmas de taipa. É importante salientar que em seu estudo, leva em consideração o atrito do material granular com as paredes do silo.

É fato que exista uma relação (K), não necessariamente constante como determinada por Rankine (1857), entre pressão horizontal e pressão vertical. Se o atrito entre fôrma e for considerado, parte das pressões verticais tendem a ser transferidas diretamente para os elementos de fundação ou suporte das fôrmas, e não transmitidas para o material

compactado, logo esta diminuição de pressão vertical também resultaria em uma perda de pressão horizontal. Ou seja, quanto maior for o atrito entre fôrma/solo menor seria a eficiência do compactador em camadas mais profundas.

Iunes e Milani (2019) analisaram os esforços atuantes nas fôrmas de taipa, fazendo analogia a paredes laterais de silos, com aplicação da fórmula de Janssen (CALIL; CHEUNG, 2007² apud IUNES; MILANI, 2019a).

$$\sigma_y(z) = p_H(z) = \frac{\gamma \cdot R}{K \cdot \mu_{w.c}} + \left(\sigma_{y0} - \frac{\gamma \cdot R}{\mu_{w.c}} \right) \cdot e^{\frac{-K \cdot \mu_{w.c} \cdot z}{R}} \quad (7)$$

Na qual:

$\sigma_y(z)$ - 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;

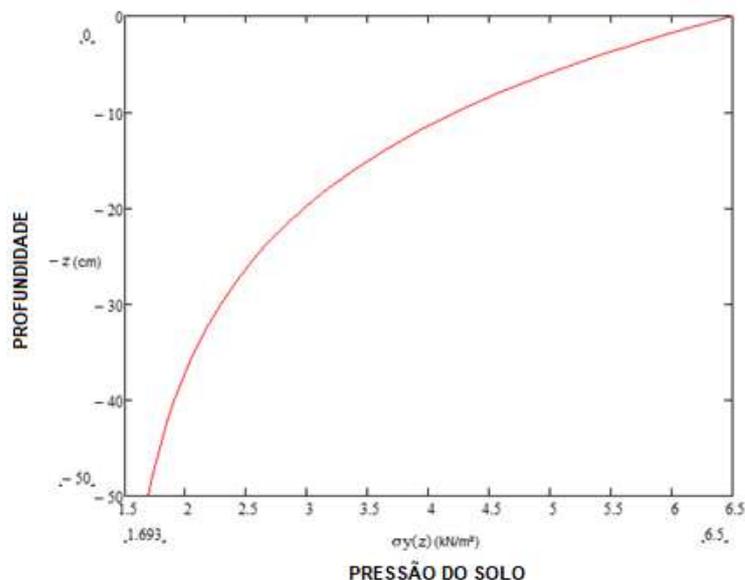
σ_{y0} - Tensão encontrada no solo na profundidade zero (MPa);

z - Profundidade do solo (m).

As autoras levam ainda em consideração que a energia utilizada na compactação do solo para a execução da taipa equivale à energia do ensaio de compactação do solo de Proctor Normal, com o modelo de fôrma utilizado é semelhante à fôrma marroquina (Figura 4), logo a profundidade/altura da camada de solo é limitada a 50 cm e a pressão máxima atuante é de 6,5 KPa, para a energia de Proctor Normal, Figura 17.

Figura 17. Gráfico de pressão por profundidade (em relação a superfície compactada).

² 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.



Fonte: Iunes; Milani (2019b)

Para efeito de comparação, ao extrapolar os valores obtidos por Iunes; Milani (2019b) para uma parede de 3m por exemplo, resultaria em um gráfico com pressão horizontal máxima na altura de aplicação da carga vertical e de valor igual ao da energia de aplicação do ensaio de Proctor (6,5 KPa). Resultando interessante, pois mostra o comportamento da curva de pressões horizontais atuantes na fôrma ao longo da compactação, para diferentes alturas, mas válido apenas para esta energia de compactação.

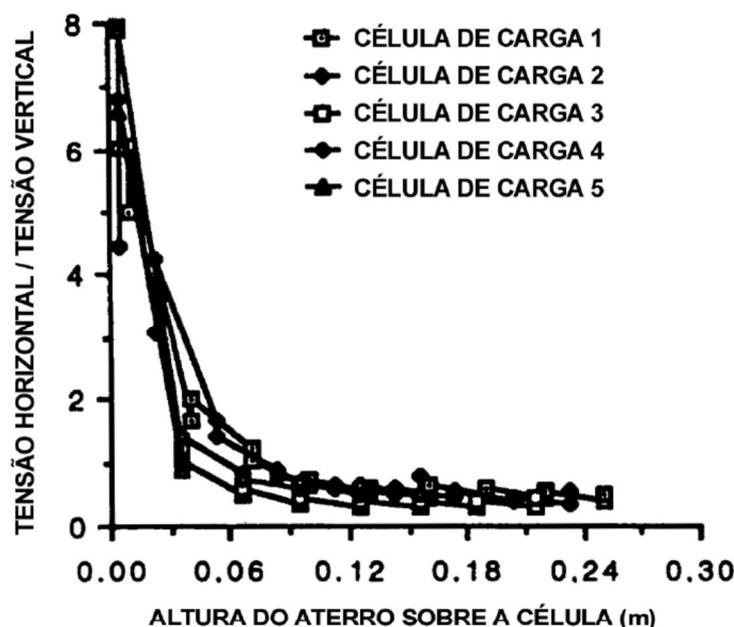
Saramago (2002) cita Cousens e Pinto (1996) os quais afirmam que a compactação aumenta a tensão horizontal nas proximidades da camada na qual está atuando, sendo seu efeito rapidamente reduzido em grandes profundidades. Logo observa-se que diferentemente do empuxo que cresce com a profundidade, o efeito dinâmico da compactação decresce com a profundidade. O que vem ao encontro da segunda hipótese proposta neste trabalho.

Saramago (2002) ainda apresenta gráfico de Cousens e Pinto (1996), Figura 18, o que demonstra que o coeficiente de empuxo é inicialmente alto e, à medida que o reaterro vai prosseguindo, há uma diminuição do seu valor até um ponto, a partir do qual o efeito da compactação mostra-se desprezível.

Sendo o coeficiente de empuxo (K) a proporcionalidade entre tensão horizontal e tensão vertical, fica explicitado que à medida que se aumenta a camada da mistura, ou a

tensão vertical aumenta muito em relação a tensão horizontal, ou a tensão horizontal diminui muito em relação à tensão vertical, ou ambas se alteram em sentidos opostos.

Figura 18. K x altura de aterro



Fonte: Cousens e Pinto (1996) apud Saramago (2022).

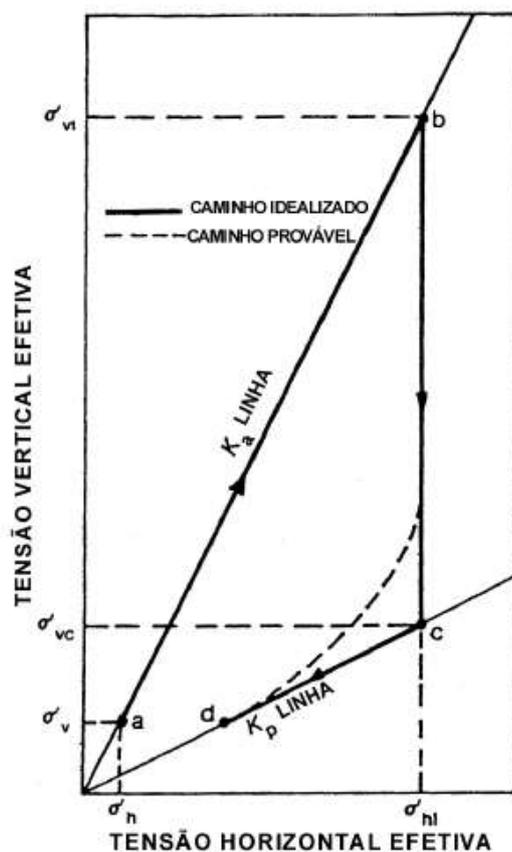
Talvez, por essa razão, Krahn (2019) não tenha feito menção sobre a altura das paredes para que as pressões atinjam o valor sugerido de $9,6 \text{ kPa}$. Isso se considerado que as camadas inferiores, por estarem já compactadas, deixam de transmitir esforços horizontais por se tornarem elementos resistentes e mais rígidos, ou seja servindo de apoio para as camadas superiores.

Alvarado (2019) informou que a Empresa *Rammed Earth Works*, que atualmente utiliza fôrmas de alumínio desenvolvidas para a indústria de concreto, utiliza uma regra prática para o dimensionamento da fôrma, que consiste em considerar que a terra compactada coloca uma pressão sobre a fôrma na base da taipa ($h=0\text{m}$) semelhante ao que o concreto fluido faz ao se concretar uma parede de altura de $12'$ ($3,65\text{m}$) e que tal pressão não é cumulativa e tende a ser aplicada em diferentes alturas, conforme há elevação da terra compactada dentro do taipal. Porém não informou qual é a altura relevante de aplicação desta pressão, ou seja se

ela irá atuar somente na base, ao longo de parte da altura da fôrma ou ao longo de toda a fôrma.

Saramago (2002) apresenta em seu trabalho, Figura 19, a trajetória de tensões idealizada por INGOLD (1979).

Figura 19. Trajetória de tensões propostas por INGOLD (1979).



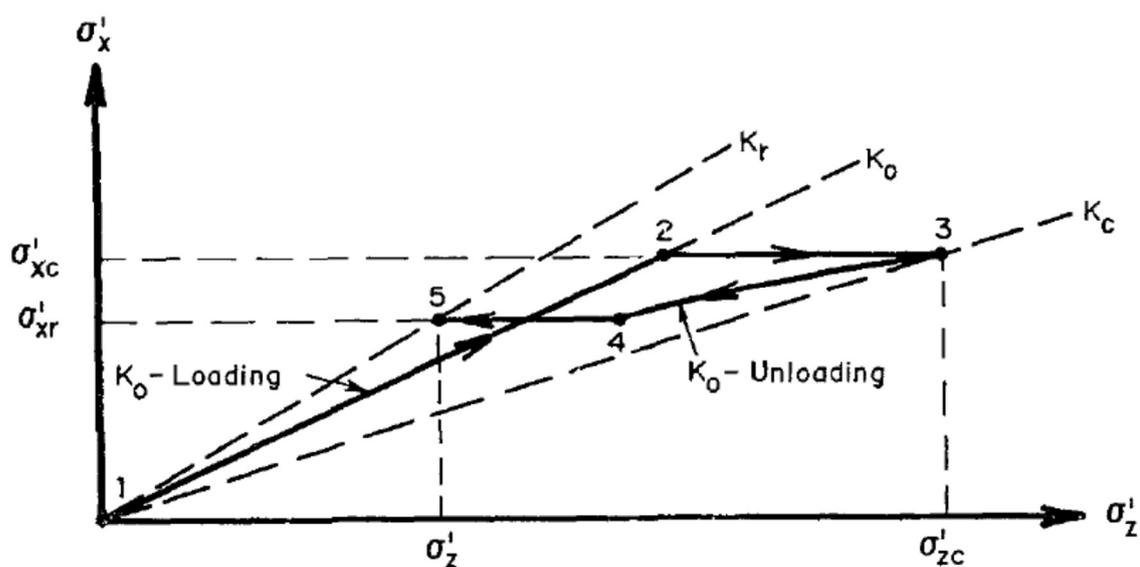
Fonte: Saramago (2002). Autor: Ingold (1979)

O que o autor propõe em seu gráfico é que a tensão vertical induzida no maciço de solo (ponto "b"), é recuperável, ou seja, ao eliminar a carga induzida do compactador tende-se a retornar a leitura de tensões verticais ao seu estado inicial (ponto "a"). Porém em sua análise está explicitado que caso haja atrito entre a superfície do solo e da contenção (fôrma) há uma parcela destas tensões verticais que não é recuperável (ponto "c"), ainda que por se tratar de um material com deformações plásticas, o solo apresentará grandes deformações

laterais (pressão horizontal), induzidas e irrecuperáveis, que só tendem a diminuir caso haja ruptura do solo (ponto “d”).

Ehrlich e Mithcell (1994), apresentam gráfico semelhante em seu estudo sobre estudo de solos reforçados (Figura 20) com os eixos trocados em relação à anterior (Figura 19).

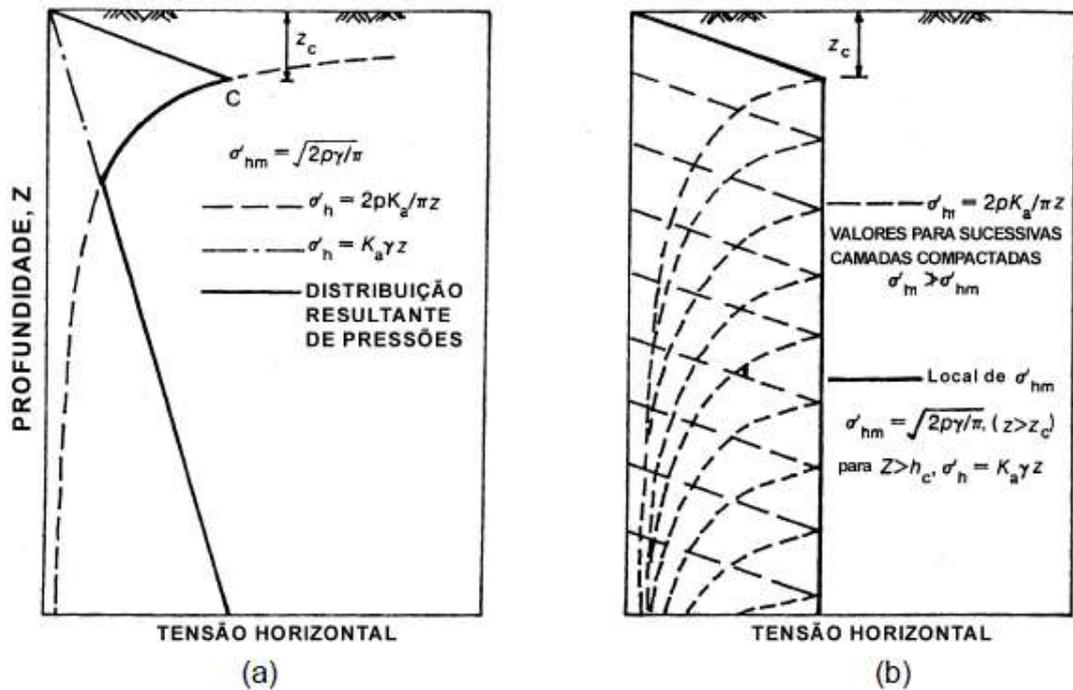
Figura 20. Comportamento de uma camada de solo submetida a um ciclo de aplicação e retirada de carga vertical.



Fonte: Ehrlich e Mitchell (1994)

INGOLD (1979) apresenta sua hipótese de comportamento de uma camada de solo Figura 21(a) e para camadas sucessivas Figura 21(b).

Figura 21. Distribuição de tensão horizontal proposta por INGOLD (1979)



Fonte: Saramago (2002). Autor: Ingold (1979)

Assim como para o concreto existem fatores (como peso específico, Slump, velocidade de concretagem, temperatura de trabalho e altura de lançamento do concreto) que afetam a pressão horizontal atuante nas fôrmas, para a taipa os fatores abaixo podem influenciar nos valores de pressão horizontal atuantes nas fôrmas:

- a granulometria do material;
- porcentagem de ligante na mistura;
- peso e potência do soquete mecânico;
- altura da camada a ser compactada;
- grau de compactação da mistura.
- espessura da parede;
- grau de umidade da mistura;
- ângulo de atrito com o material da parede;

- ângulo de atrito interno do material.

Sendo assim, para efeito de estudo no item Materiais e métodos, a caracterização granulométrica da mistura da taipa é importante, porém, com o intuito apenas de registrar e relacionar os valores que se pretende obter com uma dada mistura, sem que sejam feitas investigações da pressão para diferentes tipos de composição granulométrica.

Quadro 6. Resultados de estudos de pressão horizontal do solo atuante nas fôrmas.

dados/metodologia	tensão horizontal (kPa)
Krahn (2019) (a)	9,6
Duncan (1992) - h=3,6 m	23,94
Rankine - h=3,6 m (b)	30,24
Calil; Cheung apud Lunes; Milani (2019) - h=0,50 m (c)	6,5
Rammed Earth Works (2020) - h=3,6 m (d)	28,78

(a) Não fornece dados como altura da parede, nem caracterização do solo

(b) $K=0,4$; $h_s=3,6$ e $\gamma=21$ - Considera somente o peso próprio do maciço de terra

(c) Estudo feito para fôrmas móveis de altura 0,50m extrapolado para 3,6m, considerado uma energia de compactação igual ao do ensaio de proctor.

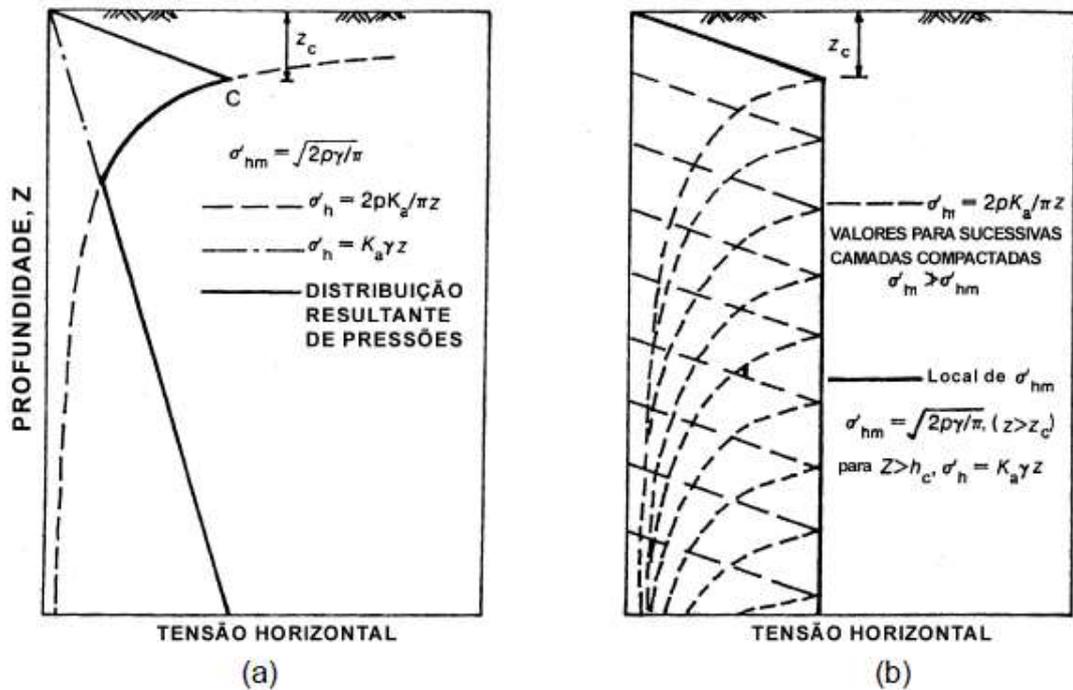
(d) Utilizando a formulação de APA (2012), recomenda o mínimo de 600.Cw *psf*

Fonte: Autor (2021)

Tomando um dos valores apresentados no

Ehrlich e Mithcell (1994), apresentam gráfico semelhante em seu estudo sobre estudo de solos reforçados (Figura 20) com os eixos trocados em relação à anterior (Figura 19).

Figura 21. Distribuição de tensão horizontal proposta por INGOLD (1979)



Fonte: Saramago (2002). Autor: Ingold (1979)

ou outro valor encontrado através de resultados em ensaios apresentados no item Materiais e métodos, tem-se um dado importante para o dimensionamento das fôrmas. Novamente, a analogia a fôrmas convencionais pode ser aplicada, tendo em vista que o cálculo de resistência, das peças componentes da fôrma, deve ser feito pelo método dos estados-limites ou método das tensões admissíveis, desde que o fator de segurança usado assegure o atendimento das mesmas condições dos estados-limites (ABNT NBR 15696:2009).

2.3 Requisitos para as fôrmas

As fôrmas conferem estabilidade ao material solto ao longo da compactação e prumo e acabamento à parede final, havendo requisitos mínimos para sua execução.

A norma Neozelandesa, NZS 4297-1998: *Engineering design of earth buildings* (NZS 4297:1998) orienta que o sistema de fôrmas deve ser adequado para conter o material compactado, ser devidamente escorado e apoiado para suportar as pressões do solo, bem como a atividade de construção do entorno.

O GPB recomenda apenas que as fôrmas sejam suficientemente resistentes para não permitir deformações, suportar o efeito da umidade do material e do compactador, e sejam suficientemente lisas para facilitar a desforma (SAMUEL et al., 2018). HEISE et al (2012), na mesma linha, reforçam que a fôrma (ou taipal) deve ser altamente resistente, leve e de fácil desmontagem, para que possa ser desmontada sem pancadas ou grandes esforços.

De uma maneira geral, ainda podemos citar alguns requisitos que se deve ter em mente ao escolher as fôrmas (MANIATIDIS e WALKER, 2003):

- força e rigidez das fôrmas para suportar a pressão do volume de terra e para manter a fôrma sem distorção excessiva durante a compactação, ou seja, não permitir o desaprumo, abaulamento e desalinhamento da taipa;
- durabilidade (anos), adaptabilidade para manutenção adequada (versátil a diferentes imposições arquitetônicas);
- as fôrmas não podem ser muito pesadas e devem permitir o manuseio por no máximo dois operários e evitar montagens e desmontagens difíceis e demoradas;
- as fôrmas não devem ser volumosas, a fim de permitir que sejam utilizadas em ambientes pequenos e de mobilidade restrita (corredores e escadas por exemplo);
- as fôrmas devem conter furos horizontais e verticais para parafusos que permitam alinhamento e nivelamento;
- qualquer sistema de fôrmas deve conter: painéis de ambos os lados, gravatas e parafusos, montantes verticais usados para fixação dos painéis e cunhas para ajustes das fôrmas.

Como já brevemente discutido na introdução, a falta de dados pode gerar fôrmas super ou subdimensionadas. Cada uma tem pontos positivos e negativos, dando a oportunidade de criação de um terceiro tipo de fôrma, otimizado, que consiga reunir todas as boas qualidades (Quadro 7). Em verde estão destacados os pontos positivos de cada um dos tipos, sendo a fôrma otimizada uma compilação e melhoria das características apresentadas nas fôrmas subdimensionadas e superdimensionadas.

Quadro 7. Características comparadas de fôrmas para taipa.

fôrma subdimensionada	fôrma superdimensionada	fôrma otimizada
mais leve do que os padrões ergonômicos	mais pesada do que o limite dos padrões ergonômicos	carga dentro dos limites dos padrões ergonômicos (60 kg conforme CLT)
menos esforço de montagem e desmontagem	mais esforço de montagem e desmontagem	esforço nos limites para padrões ergonômicos
vida útil aquém do aceitável	vida útil além do aceitável	vida útil aceitável
potencialmente mais barata	potencialmente mais cara	custo justo
déficit de material	desperdício de material	consumo justo de materiais
deforma além do aceitável (abaúla, desapruma, perde eixo)	não deforma (não abaúla, não desapruma, não perde eixo)	não deforma ou deforma dentro de limites aceitáveis em norma
requer retrabalho, ajustes e reforços da fôrma	não requer retrabalho, ajustes e reforços da fôrma	não requer retrabalho, ajustes e reforços da fôrma
muita manutenção	pouca manutenção	frequência de manutenção aceitável

Fonte: Autor (2021), a partir de dados de CLT (2021), Easton (2007) e Maniatidis; Walker (2003).

Para cada uma das características elencadas, à exceção dos limites ergonômicos, há pouca informação quantitativa que dê base para a concepção e cálculos no dimensionamento da fôrma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste em um estudo teórico e experimental, tendo sido composto por 3 etapas.

3.1 Obtenção de dados de execução, fôrmas e esforços atuantes

A revisão de literatura e uma visita técnica preliminar proporcionaram a obtenção de dados de:

- Execução de paredes de taipa: visita (agosto/2019) a uma obra executada pela empresa Taipal, na cidade de Montemor/SP. A edificação, residencial, teve a obra observada por 2 dias quanto a tipologia das fôrmas utilizadas, dimensões dos seus componentes, processo de montagem, comportamento da fôrma durante a execução das taipas, tempo de execução, equipamentos utilizados e limitações.
- Os dados sobre as solicitações impostas às fôrmas, utilizados por fabricantes e construtores de taipa, foram buscados em artigos científicos, base de dados de patentes internacionais, livros e manuais, com as palavras-chave “taipa de pilão” e “fôrmas” em diferentes línguas: Português do Brasil (Taipa e Fôrmas), Português de Portugal (*Taipal e cofragem*), Espanhol (*Tierra apisonada e encofrado*), Francês (*Pisée e coffrage*), Alemão (*Stampflehm e Schalung*) e Italiano (*terre battuta e cassaforma*).
- Para informações quanto aos consumos e custos que envolvem o processo de execução e quanto ao dimensionamento das fôrmas, foram feitas entrevistas por e-mail com 3 empresas:
 - Taipal (Piracicaba, SP, Brasil) - Arquiteto Marcio V. Hoffmann;
 - Rammed Earth Works (Napa, California, EUA) – Dan Alvarado;
 - Building Alternative Incs. (Canada) – Engenheiro Tim Krahn.
- Além desses caminhos, buscou-se através da analogia à diferentes teorias, obter valores de pressão horizontal (p_h) atuantes que, por semelhança, pudessem fornecer os valores de pressão horizontal (p_h) atuante num sistema de taipa:

- Analogia com teorias de contenção de solo: o entendimento inicial é de que as fôrmas atuam como um elemento de contenção do solo inicialmente solto e posteriormente compactado. Desta maneira buscou-se fazer uma analogia a estruturas de contenção tais como muros de arrimo. Assim foram levantados possíveis dados de tensão atuante nas fôrmas através das teorias de Rankine (1857), Duncan (1992) e Ehrlich e Becker (2010).
- Analogia com a teoria de determinação das pressões horizontais atuantes em fôrmas para paredes de concreto: alguns autores fazem analogia entre fôrmas de taipa e fôrmas de concreto. Desta maneira foram estudados artigos científicos, livros e normas específicas para dimensionamento e elaboração de projetos de fôrmas para paredes de concreto, a fim de se obter os valores de pressão atuante na fôrma ao longo da concretagem.

3.2 Obtenção de valores de pressão atuante nas fôrmas por meio experimental

Após Revisão de literatura em que ficou evidenciada a grande variação de valores obtidos através dos diferentes métodos apresentados anteriormente e, como nenhum estudo específico para determinação da pressão horizontal (p_h) atuante nas fôrmas para paredes de taipa foi encontrado na literatura, foi definida a realização de experimento para coleta de dados de pressões horizontais (p_h) atuantes nas fôrmas para paredes de taipa.

Como não há um roteiro para realizar o experimento, foi elaborado um especificamente para este trabalho, razão pela qual é detalhado o processo.

3.2.1 Evolução da instrumentação

Dado que a vibração de uma fôrma usual para taipa poderia interferir na medição de pressão, optou-se pela construção de um molde indeformável. Compõem ainda a instrumentação básica os sensores de carga.

3.2.1.1 Molde indeformável

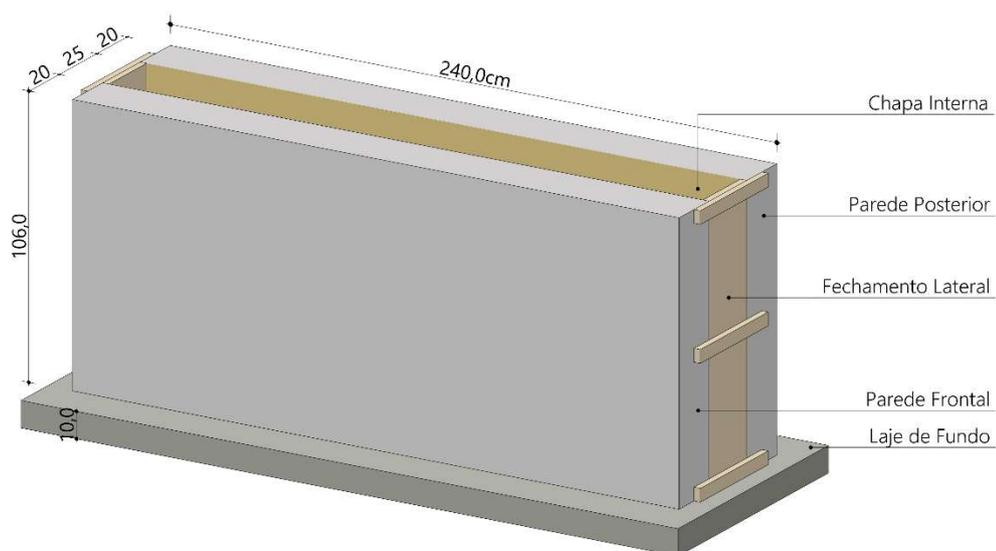
A necessidade de não deformação advém da pretensão de anular qualquer ondulação, abaulamento, desaprumo ou excesso de vibração ao longo do processo de compactação da

mistura em seu interior. Optou-se também por um molde não desmontável para anular qualquer articulação que pudesse interferir na coleta de dados.

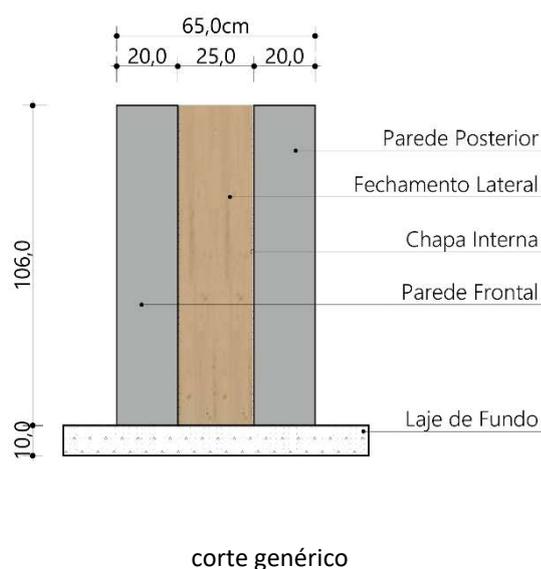
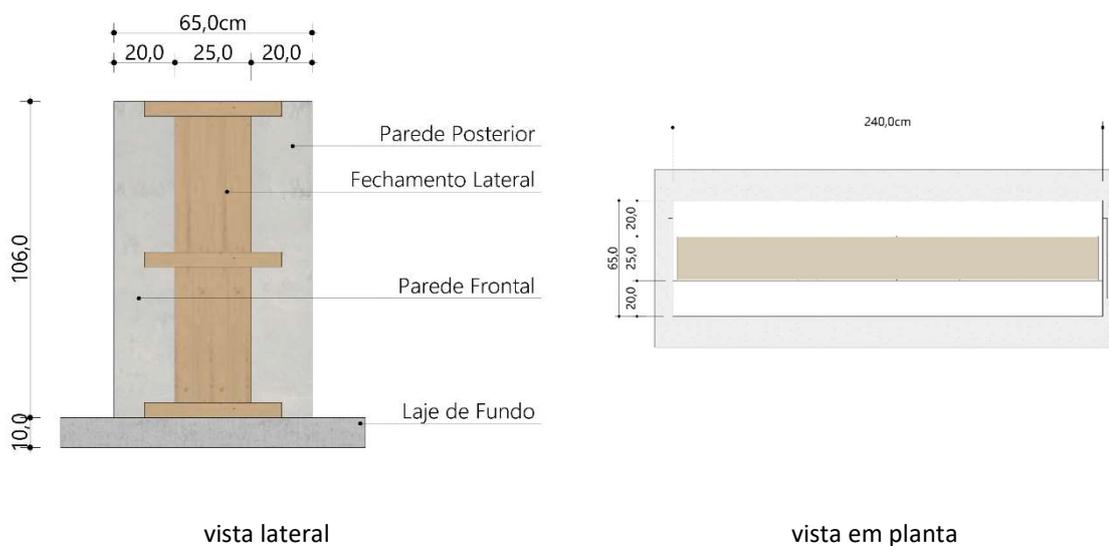
Esta opção de molde foi escolhida por ser uma alternativa mais econômica em relação à construção de uma fôrma robusta de aço, semelhante ao apresentado por Chen et al (2008).

O molde é composto por 2 paredes de alvenaria de blocos cerâmicos de 8 furos, de dimensões 9 x 19 x 19 cm, assentados de uma vez (deitado), rebocadas internamente, ficando cada parede com espessura final de 20 cm e altura de 1,06 m e afastadas uma da outra em 25 cm (Figura 22).

Figura 22. Molde indeformável – versão 1



vista em perspectiva



Fonte: Autor (2022)

Essas paredes foram executadas sobre um radier de concreto armado, com espessura de 10 cm. São consideradas indeformáveis pois, se comparadas ao conjunto de peças, já apresentados na Figura 6, e principalmente às espessuras de placas de madeira compensada (18 a 20mm), a alvenaria é aproximadamente 15 vezes maior. Além disso, é um material frágil/pouco dúctil, ou seja, não permite grandes deformações sem que se frature, diferentemente das placas de madeira compensada, que podem apresentar grandes

deformações antes de se romperem, o que poderia interferir de maneira prejudicial nas leituras que se pretende realizar.

Essa escolha de molde determinou que a cada teste, todo o material compactado devesse ser removido do seu interior.

A geometria está adequada aos parâmetros de esbeltez (relação altura/espessura) de uma parede de taipa (esbeltez máxima de 25 para paredes com adição de estabilizante para a NBR 17014:2022 (ABNT, 2022)).

$$\lambda = \frac{alt}{esp} = \frac{106 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = 5,3 < 25 \therefore OK$$

Uma placa de compensado laminado de madeira, com 5 mm de espessura, foi colocada na face interna do molde para simular uma rugosidade mais próxima a de uma fôrma de taipa. Isso decorreu da análise de Cheung (2007), que destacou a relevância do atrito entre o solo granular e as paredes de contenção, para determinação dos esforços horizontais atuantes. Ainda que as fôrmas de taipa possam ter diferentes acabamentos superficiais (das mais rugosas como uma tábua de madeira maciça às mais lisas como uma chapa metálica), essa superfície foi considerada mais apropriada do que a superfície original de reboco de areia e cimento.

Os fechamentos laterais são de tábuas de madeira de 2,5 cm de espessura, sendo no teste 1, presas ao molde indeformável com ripas de 2,5 x 5 cm, parafusadas com buchas plásticas na alvenaria. Depois de verificada a falha descrita no item 4.2, no teste 2, as tábuas são fixadas lateralmente através de barras roscadas chumbadas na alvenaria, ao invés de parafusos com buchas plásticas.

Por essa mesma razão, barras de travamento superior foram adicionadas ao molde (Figura 23).

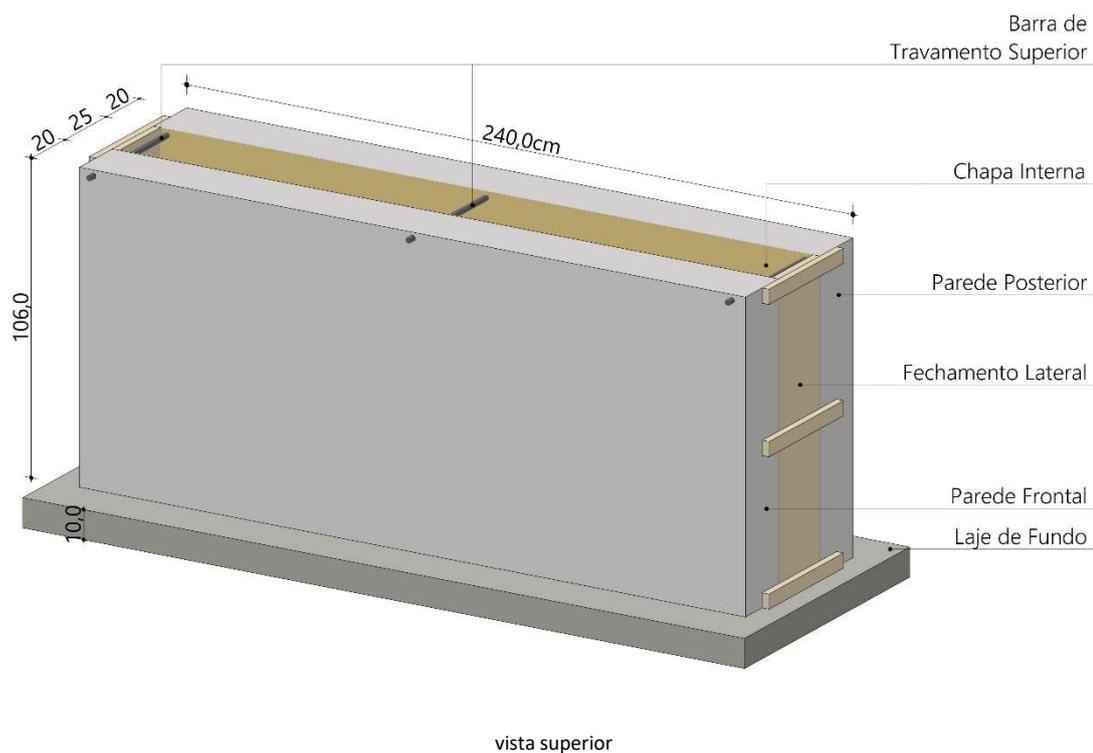
Figura 23. Falha e solução para o travamento superior no molde indeformável.

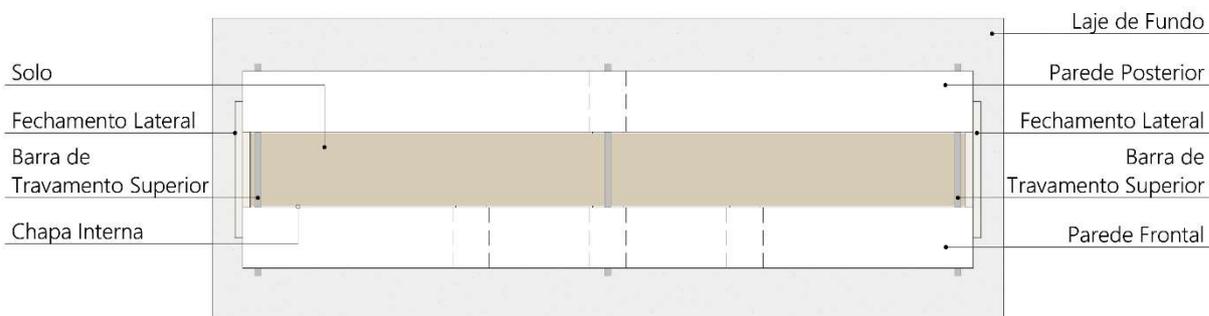


Fonte: Autor (2022)

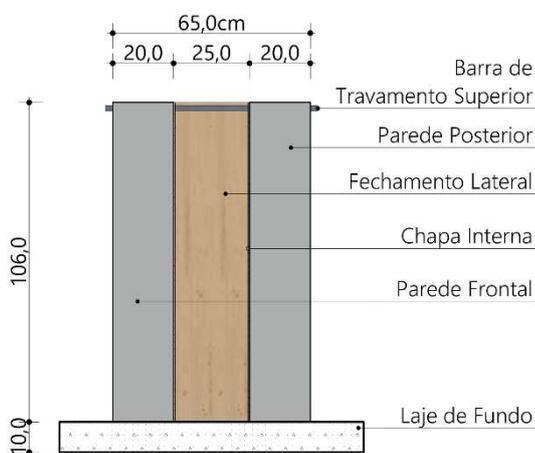
Com o mesmo intuito de impedir deformações excessivas, as paredes do molde foram travadas pelo topo com barras roscadas e porcas (Figura 23), depois de verificadas falhas de leitura ocorridas durante os testes.

Figura 24. Partes do molde indeformável – versão 2.





vista superior



Corte genérico

Fonte: Autor (2022)

3.2.1.2 Relógios comparadores

Uma vez que a movimentação (de dentro para fora) do processo de preenchimento do molde poderia fazer com que os sensores perdessem o contato com a mistura compactada (e causando diminuição de pressões exercidas), foram utilizados relógios comparadores analógicos (resolução de 0,01 mm) para indicar se as paredes do molde não sofreriam movimentações. Tais aparelhos tiveram leituras realizadas após a compactação de cada camada (Figura 25).

Figura 25. Relógio comparador posicionado na superfície externa do molde indeformável.

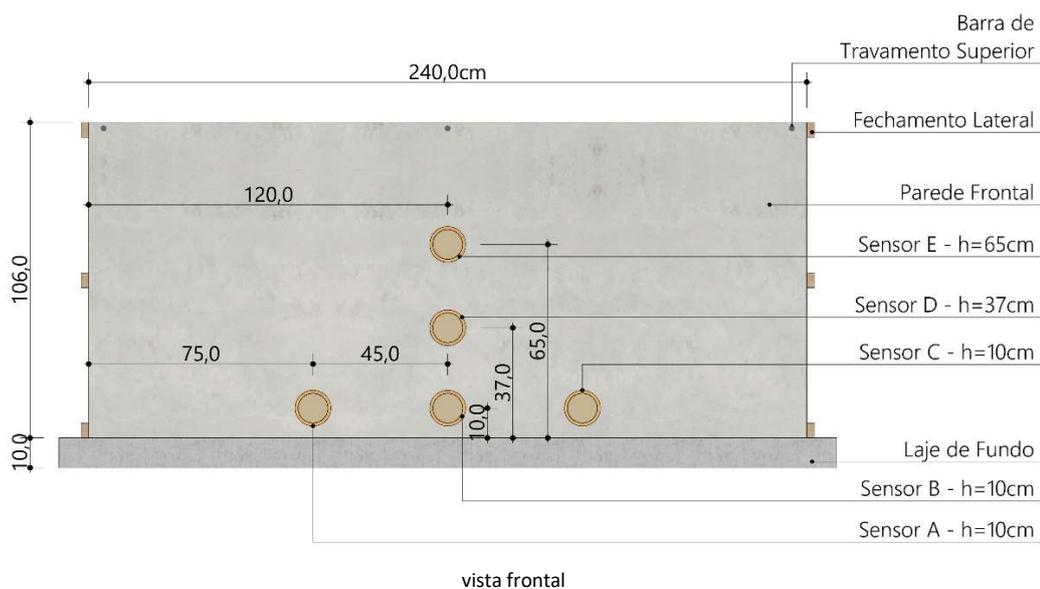


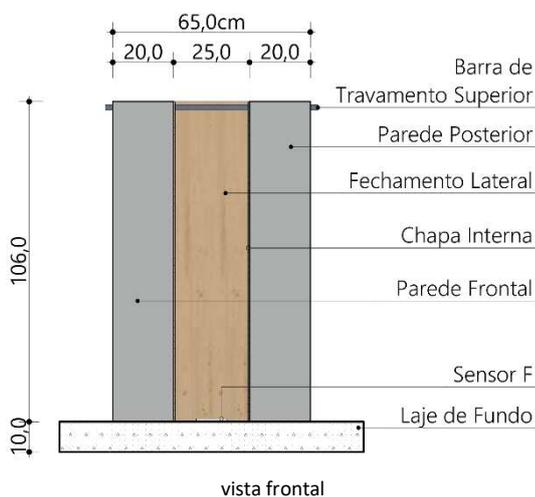
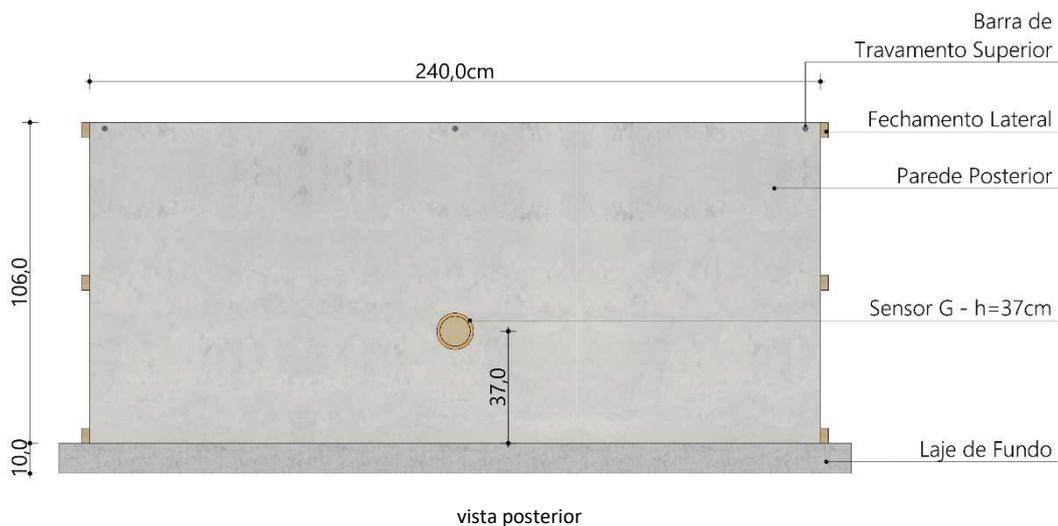
Fonte: Autor (2022)

3.2.1.3 Sensores e conjuntos de medição

Os conjuntos medidores (Figura 27) foram instalados em furos de 200 mm de diâmetro no molde indeformável. São os furos A, B, C, D e E da parede frontal (Figura 26), e o furo G da parede posterior. Cada sensor foi nomeado respectivamente com o nome dos furos. Logo não foi nomeado nenhum furo como “F” para não haver confusão com o sensor de fundo “F”.

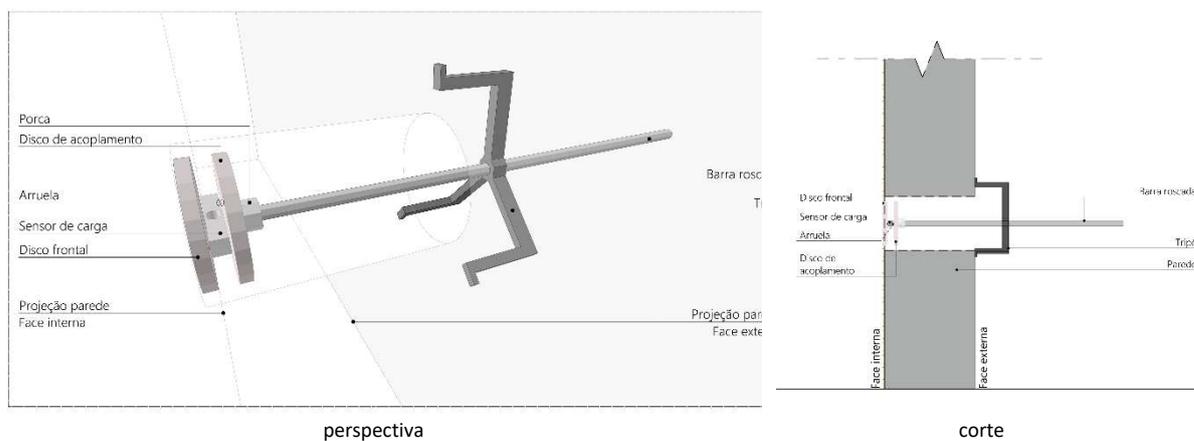
Figura 26. Molde indeformável – medidas e furos para sensores.





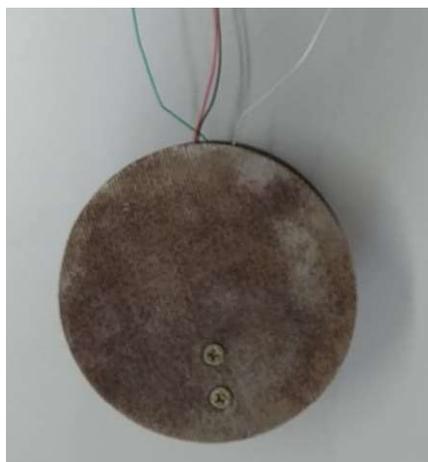
Fonte: Autor (2022)

Figura 27. Componentes do conjunto de medição



Para compor o conjunto de medição foram utilizados dois discos de aço com 100mm de diâmetro, instalados em lados opostos das células e com auxílio de calços (arruelas) também instalados em lados opostos e em sentidos diagonais (Figura 28).

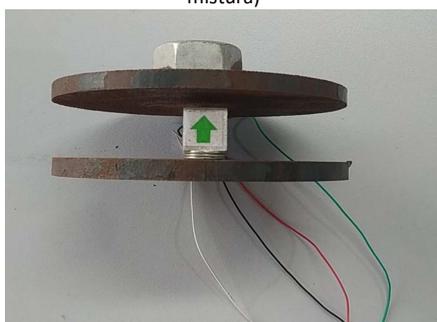
Figura 28. Montagem do conjunto de medição



Vista frontal (onde haverá contato direto com a mistura)



Vista posterior (onde é acoplado braço de fixação e posicionamento)



Vista lateral (com indicação do sentido de aplicação da carga)



Calços para flexão do sensor, na imposição de um esforço na superfície do conjunto de medição



Sensor de carga

Fonte: Autor (2021)

O disco frontal metálico é o elemento que recebe o contato e a aplicação dos esforços da mistura compactada de forma direta, e tem diâmetro menor do que o do furo da parede

(200 mm), para evitar atrito entre o conjunto medidor e o molde de alvenaria. Tal diferença também se destina a possibilitar o manuseio e ajuste de posição dos sensores.

A célula de carga utilizada de 200N foram escolhidas devido a geometria, custo e facilidade de aquisição, bem como pela versatilidade no uso. É um transdutor de força que converte a carga que atua sobre ele em uma saída elétrica mensurável. A célula de carga utilizada é baseada em sensores de deformação (extensômetro), e sua geometria é conhecida como *bending beam*. Neste tipo de sensor, para que surja um sinal elétrico, é necessário que ocorra o momento devido à flexão através de um ponto de aplicação da carga. O sensor em si, sem adaptações, impossibilita a leitura de dados e é preciso uma estrutura de suporte para que se possa garantir que o ponto de aplicação da carga seja constante e assim transformar a pressão exercida pela mistura em dados numéricos.

A um dos discos foi soldada uma porca MB 20 – 2.5, chave 30, para (Figura 28), que tem como função acoplar o conjunto de medição a um braço (barra roscada de 20 mm). Na versão 1, o braço era fixado em um suporte (viga de madeira) independente do molde indeformável (engastado no chão), com o intuito de minimizar a interferência de vibrações do molde nas leituras (Figura 29).

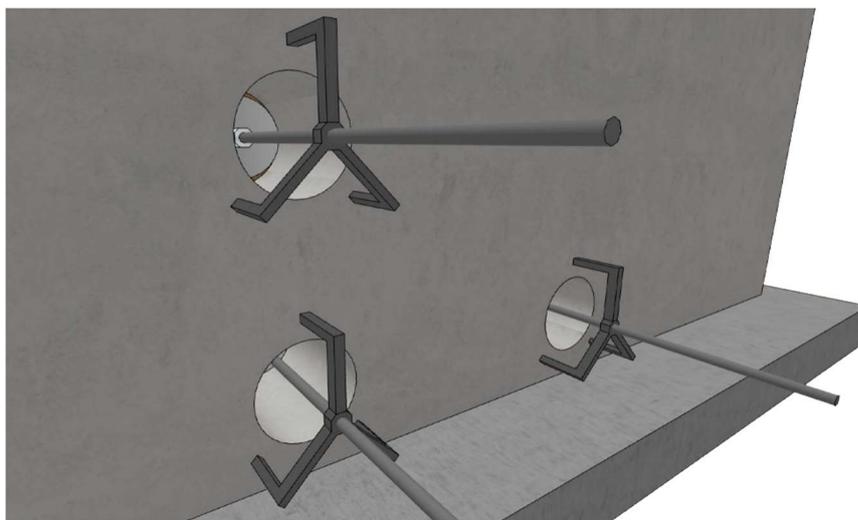
Figura 29. Fixação dos conjuntos de medição na versão 1



Com os resultados do teste 1 (ver item 4.1), foi entendido que seria mais viável fazer os sensores vibrarem em conjunto com o molde na mesma frequência e orientação do que

tentar anular tais interferências. Assim, a versão 2 é um tripé, fixado nas paredes de alvenaria, com buchas e parafusos (Figura 30), mas foi aprimorado para colagem com adesivo epóxi depois de outras falhas encontradas (alívio na pressão medida, por movimentação do conjunto) nos dados dos testes 1 e 2 (ver item 4.1 e 4.2).

Figura 30. Tripé fixado nos furos do molde.



Fonte: Autor (2023)

Previamente ao posicionamento dos conjuntos medidores no molde, os sensores foram calibrados (Figura 31), seguindo os passos:

- a. posicionar os conjuntos de medição sobre bancada com a face posterior para baixo;
- b. tarar a leitura da carga atuante sobre o sensor antes da calibração, pois o peso próprio dos discos exerce esforço sobre os sensores de carga, mesmo sem o peso da mistura ou do compactador;
- c. colocar os padrões de 10 kg, 5 kg e 1 kg, um a um, sobre a face frontal dos conjuntos de medição e armazenar a leitura correspondente a cada padrão no software.

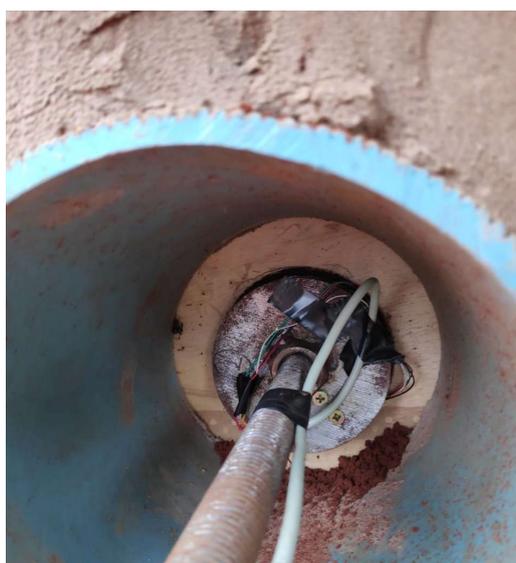
Figura 31. Calibração com peso padrão



Fonte: Autor (2020)

O posicionamento do conjunto de medição é mostrado na Figura 32 onde também é vista a placa de madeira compensada, com 2 funções no experimento: delimitar o contorno do conjunto de medição que apresenta diâmetro menor (100mm) do que a executada no molde indeformável (200 mm) e a simulação de uma superfície mais semelhante ao de uma fôrma de taipa (apesar de existir “n” possibilidades quanto ao acabamento dos tipos de fôrmas, as quais podem apresentar acabamento mais ou menos rugosos e devem ter sua influência estudadas em trabalhos futuros) e eliminar as aspereza da parede rebocada que, sem dúvida, irá oferecer um atrito maior à mistura ao ser compactada.

Figura 32. Sensor posicionado para medição.



visto pelo lado externo do molde



visto pelo lado interno do molde

Fonte: Autor (2021)

3.2.1.4 Sistema de aquisição de dados

O hardware utilizado para interligação dos sensores foi o QuantumX MX840B/MX440B com 8 canais de leitura e o software utilizado foi o CATMAN (Figura 33). Foram utilizados apenas 4 canais, com coleta de dados a cada 0,2 segundos, sendo a leitura paralisada sempre entre o fim da compactação de uma camada e o início da compactação da camada subsequente.

Figura 33. Hardware e software para aquisição de dados.



Fonte: www.hbm.com (2021)

3.2.2 Materiais

3.2.2.1 Solo

O material foi caracterizado de acordo com NBR 6459:2016 (ABNT, 2016), NBR 7180:2016 (ABNT, 2016), NBR 7181:2016 (ABNT, 2016) e NBR 6457:2016 (ABNT, 2016) e apresentado nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34. Análise granulométrica segundo a NBR 7181:2016

UMIDADE HIGROSCÓPICA			PENEIRAMENTO GROSSO					ϕ do grão (mm)	
Cápsula nº	162	119	Peneiras		Peso da amostra seca (g)		% que passa da amostra total		
			nº	mm	Retido	Passado			
Solo úmido+tara (g)	114,42	117,80	2"	50,0	0,00	962,6	100,0%		
Solo seco + tara (g)	110,85	114,08	1 ½"	37,5	0,00	962,6	100,0%		
Tara da cápsula (g)	19,21	18,30	1"	25,0	0,00	962,6	100,0%		
Água (g)	3,57	3,72	¾"	19,0	0,00	962,6	100,0%		
Solo seco (g)	91,64	95,78	3/8"	9,50	0,00	962,6	100,0%		
Umidade (%)	3,9%	3,9%	4	4,75	0,00	962,6	100,0%		
Umidade Média (%)	3,9%		10	2,00	0,00	962,6	100,0%		
AMOSTRA TOTAL SECA			PENEIRAMENTO FINO						
Amostra total úmida (g)	1.000,0		Peneiras		Amostra seca (g)		% que Passa da am.		
Solo seco ret. pen. nº 10	0,00		nº	mm	Retido	Passado	Parcial	Total	
Solo úm.pass.pen.nº 10	1.000,0		16	1,19	0,00	115,63	100,00%	100,0%	
Solo seco pass.pen.nº 10	962,56		30	0,59	0,57	115,06	99,51%	99,5%	
Amostra total seca	962,6		40	0,42	3,07	111,99	96,85%	96,9%	
PENEIRAMENTO FINO			50	0,30	23,00	88,99	76,96%	77,0%	
Peso da am. úmida:	120,13		100	0,15	39,02	49,97	43,22%	43,2%	
Peso da am. seca:	115,63		200	0,08	19,87	30,10	26,03%	26,0%	

SEDIMENTAÇÃO									
Hora	Leitura	Temp. (°C)	Correção	Leitura Corrigida	Altura de queda	Alt. de queda (Corrigida)	tempo (seg)	ϕ do grão (mm)	% < ϕ
30 segundos	13,00	29,0	0,50	13,50	18,0	15,57	30	0,072	19,3%
1 minuto	13,00	29,0	0,50	13,50	18,00	15,57	60	0,051	19,3%
2 minutos	13,00	29,0	0,50	13,50	18,00	15,57	120	0,036	19,3%
4 minutos	12,00	29,0	0,50	12,50	17,20	14,95	240	0,025	17,9%
8 minutos	12,00	29,0	0,50	12,50	17,20	14,95	480	0,018	17,9%
15 minutos	12,00	29,0	0,50	12,50	17,20	14,95	900	0,013	17,9%
30 minutos	11,00	29,0	0,50	11,50	17,20	15,13	1800	0,009	16,4%
1 hora	11,00	29,0	0,50	11,50	17,20	15,13	3600	0,006	16,4%
2 horas	10,00	29,0	0,50	10,50	17,20	15,31	7200	0,005	15,0%
4 horas	10,00	30,0	0,80	10,80	17,20	15,26	14400	0,003	15,4%
8 horas	10,00	30,0	0,80	10,80	17,20	15,26	28800	0,002	15,4%
24 horas	10,00	30,0	0,80	10,80	17,20	15,26	86400	0,001	15,4%

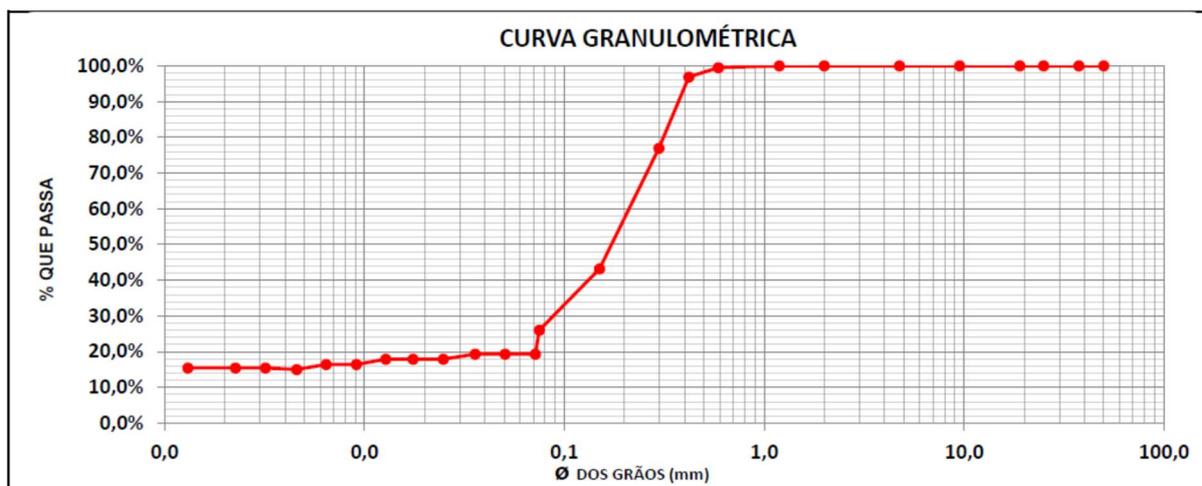
Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Figura 35. Distribuição granulométrica segundo a NBR 6502

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CONFORME NBR 6502							
Argila e argila coloidal	Silte	Areias			Pedregulhos		
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
15,44%	3,86%	23,92%	56,29%	0,49%	0,00%	0,00%	0,00%
CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL:		AREIA MÉDIA, ARGILOSA COM VESTÍGIOS DE SILTE					

Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Figura 36. Curva granulométrica



Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Para o material coletado também foi realizado ensaio de compactação Proctor regido pela NBR 7182:2016 (ABNT, 2016), a fim de determinar a umidade ótima da mistura e garantir assim o grau de compactação máximo - 100% do Proctor Normal (Figura 37 e Figura 38), também ensaios de Índice de Suporte Califórnia I.S.C (Figura 39 e Figura 40) e massa específica real (NBR 6508) (Figura 41).

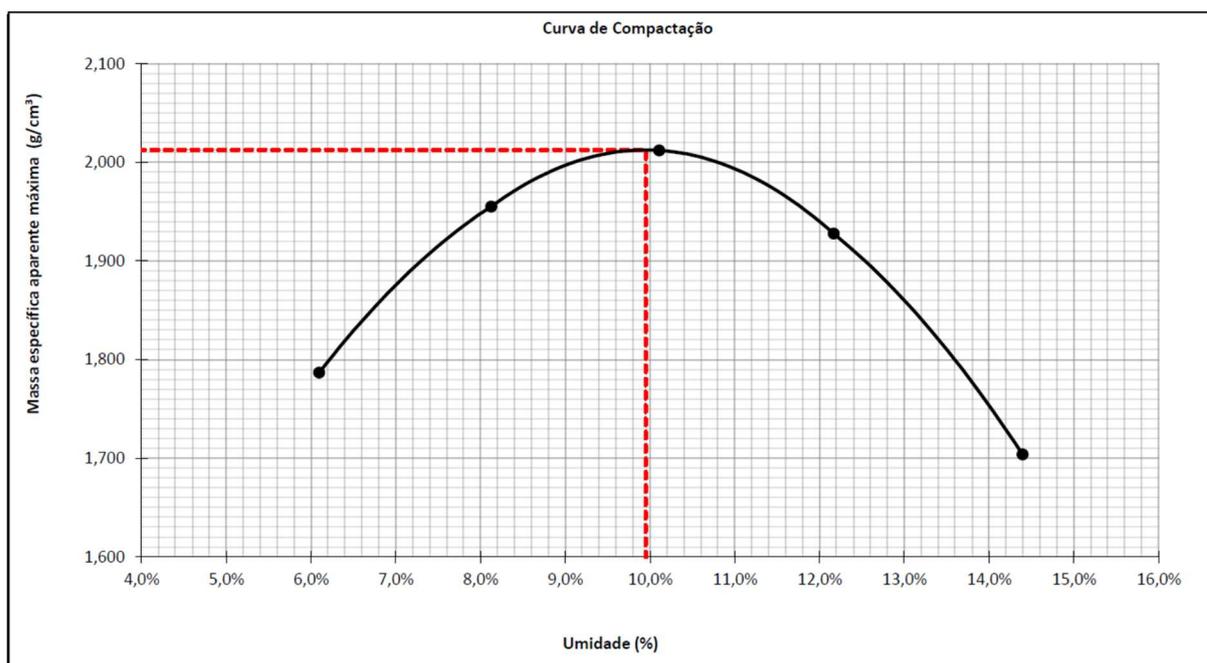
Figura 37 - Dados do ensaio de compactação

Item	Unidade	1	2	3	4	5	6	Um. Higroscópica	
Cápsula	nº	31	154	214	123	203		119	73
Peso Bruto Úmido	g	83,48	52,08	48,50	55,32	51,35		87,49	91,78
Peso Bruto Seco	g	79,59	49,16	45,15	50,84	46,49		84,79	88,90
Peso da Água	g	3,89	2,92	3,35	4,48	4,86		2,70	2,88
Peso da Cápsula	g	15,79	13,22	12,01	14,02	12,73		18,30	16,07
Peso do Solo Seco	g	63,80	35,94	33,14	36,82	33,76		66,49	72,83
Umidade "Cápsulas" <input checked="" type="checkbox"/>	%	6,1%	8,1%	10,1%	12,2%	14,4%		4,1%	4,0%
Umidade Média "Cálculada" <input type="checkbox"/>	%							4,0%	
Água Total	g							Peso do Material g	
Água Adicionada	g							3.000,00	
% Água Adicionada	%							P. Mat. Seco g	
Cilindro	nº	1	1	1	1	1		2.884	
Peso Bruto Úmido	g	4.215,0	4.432,0	4.533,0	4.480,0	4.268,0		Peso Água g	
Peso do Cilindro	g	2.330	2.330,0	2.330	2.330	2.330		116	
Volume do Cilindro	cm ³	994	994	994	994	994		% Adic. p/ ponto	
Peso do Solo Úmido	g	1.885	2.102	2.203	2.150	1.938		2,0%	
Massa do Solo Úmido	g / cm ³	1,896	2,114	2,216	2,162	1,949		Soquete	
Massa do Solo Seco	g / cm ³	1,787	1,955	2,012	1,928	1,704		GRANDE	

RESULTADOS			
MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA (g/cm ³)	2,013	ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA (%)	25,2%
UMIDADE ÓTIMA (%)	9,9%	EXPANSÃO (%)	0,00%

Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Figura 38. Curva de compactação para o solo utilizado.



Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

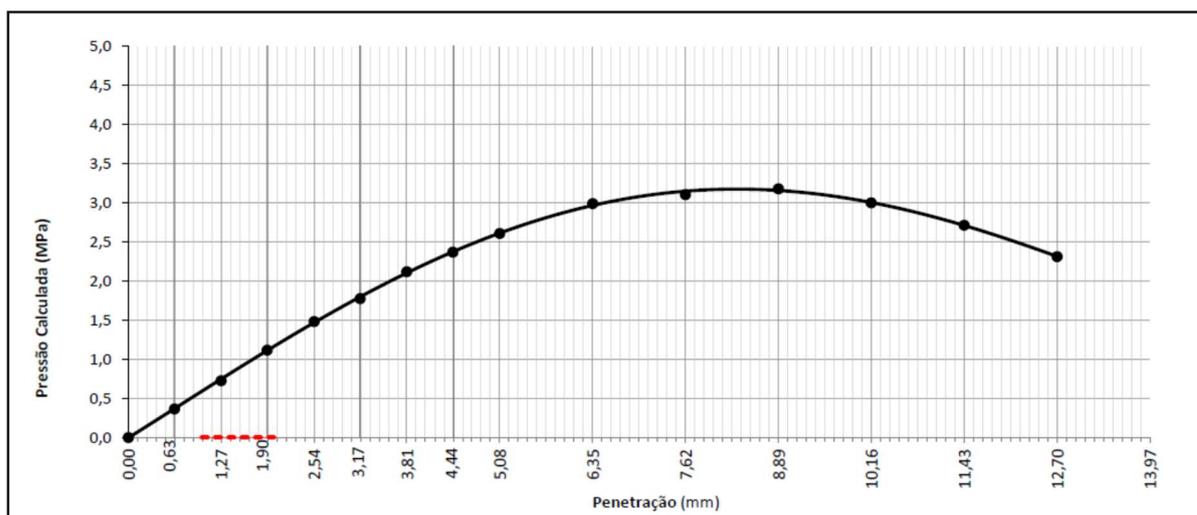
Figura 39 - Dados do ensaio de I.S.C

Cápsula Nº:	129	26	Cilindro nº:	56
Tara da Cápsula + Solo + Água (g):	60,23	53,87	Peso do Cil. + Solo + Água (g):	10.002,7
Peso do Solo Seco + Cápsula (g):	56,01	50,51	Tara do cilindro (g):	5.452,0
Tara da Cápsula (g):	12,97	16,26	Peso do Solo + Água (g):	4.550,7
Peso da Água (g):	4,22	3,36	Volume do cilindro (cm³):	2.057,9
Peso do Solo Seco (g):	43,04	34,25	M. Esp. do Solo Úmido (g/cm³):	2,211
Umidade (%):	9,8%	9,8%	Altura Inicial (mm):	112,370
Umidade Média (%):	9,8%		Enc. Compact. Aasho (Proctor):	INTERMEDIÁRIO
Fator de Correção:	0,9107		Camadas (nº):	5
Massa Específica do Solo Seco (g/cm³):	2,014		Golpes/Camada (nº):	26
(Após 96 h) Peso do Cil.+Solo+Água (g):	10020,0		Soquete Grande Peso (Kg):	4,536
Absorção (%)	0,38%		Disco espaçador (Pol):	2 ½

Ensaio de Penetração (Constante CBR) 0,0974								Ensaio de Expansão			
Tempo (Min.)	Penetração (mm)	Leitura (mm)	Carga (N)	Pressão Calculada (MPa)	Pressão Corrigida (MPa)	Pressão Padrão (MPa)	ISC (%)	Data	Hora	Leitura (mm)	Expansão (%)
0,5	0,63	38	701	0,4				31/10/19	7:14	1,00	
1,0	1,27	76	1403	0,7				1/11/19	7:20	1,00	
1,5	1,90	117	2159	1,1				2/11/19	7:22	1,00	
2,0	2,54	155	2861	1,5		6,90	21,5%	3/11/19	7:16	1,00	
2,5	3,17	186	3433	1,8				4/11/19	7:22	1,00	0,00%
3,0	3,81	222	4097	2,1				RESUMO DO ENSAIO			
3,5	4,44	248	4577	2,4				EXPANSÃO EM DIAS (%):		0,00%	
4,0	5,08	273	5038	2,6		10,35	25,2%	ABSORÇÃO (%):		0,4%	
5,0	6,35	313	5777	3,0				M. ESP. SOLO SECO (g/cm³):		2,014	
6,0	7,62	325	5998	3,1				I.S.C. (%):		25,2%	
7,0	8,89	333	6146	3,2							
8,0	10,16	314	5795	3,0							
9,0	11,43	284	5241	2,7							
10,0	12,70	242	4466	2,3							

Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Figura 40 - Curva do ensaio de penetração



Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

Figura 41 - Dados para determinação da Massa específica real média

DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL (NBR 6508)			
Picnômetro nº	9	10	3
(P1) Peso do Picnômetro (g)	98,75	85,17	98,80
(P2) Peso do Picnômetro + Solo (g)	149,00	136,33	149,57
(P3) Peso do Picnômetro + Solo + Água (g)	370,72	389,07	373,73
(P4) Peso do Picnômetro + Água (g)	340,28	358,10	342,96
Peso do Solo (g)	50,25	51,16	50,77
Volume do Solo (cm ³)	19,81	20,19	20,00
Temperatura de Ensaio:	28,0 °C	28,0 °C	28,0 °C
Fator de Correção devido à temperatura:	0,9981	0,9981	0,9981
Massa específica real do agregado (g/cm ³)	2,532	2,529	2,534
Massa específica real média (g/cm³)	2,531		

Fonte: Geotec Consultoria e Serviços Tecnológicos Ltda (2021)

O solo para preenchimento foi obtido na jazida de arenito as margens da BR 262, ao lado do Autódromo Internacional de Campo Grande – MS.

Como o molde não é desmontável e nem transportável, optou-se por não utilizar estabilizantes, a fim de facilitar a retirada da mistura da taipa após cada preenchimento e coleta de dados, e permitir assim a repetição do experimento quando necessário sem a necessidade de confecção de um novo molde.

3.2.2.2 Água

Foi utilizada água que atende à norma NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009). Para a verificação do teor de umidade foi utilizado Speedy Test (Figura 42), normatizado pela norma

rodoviária DNER-ME 052/94, para se obter a umidade da mistura. Esta verificação foi feita para cada nova camada de mistura lançada dentro do molde.

O procedimento permite a verificação e correção imediata do teor de umidade, quando necessário. Nos testes 1 e 2 e no ensaio, para validação, após a correção, foram retiradas amostras e guardadas em embalagens herméticas para posterior determinação do teor de umidade em laboratório com base na norma NBR 6457:2016 (ABNT, 2016) (Figura 42).

Figura 42. Speedy Test (DNER-ME 052/94)



Fonte: Autor (2022)

3.2.3 Execução

Foram executados 2 testes para ajustes e 1 ensaio para coletar os dados das pressões horizontais (p_h) e verticais (p_v). Os testes definiram ajustes no molde, sensores, quantidade ideal de passadas do compactador para a mistura utilizada e para realizar leituras preliminares de pressões. O ensaio, em conjunto com o que foi observado nos testes, serviu para a análise dos dados e conclusões do trabalho.

3.2.3.1 Homogeneização da mistura

A mistura da massa para taipa foi realizada com misturador horizontal de argamassa, com motor de 5HP (Figura 43) que, em testes preliminares, apresentou boa homogeneização.

Figura 43. Misturador Horizontal de argamassa.



Fonte: www.aecweb.com.br (2021)

3.2.3.2 Lançamento da mistura e preenchimento

O preenchimento do molde seguiu as recomendações das NMAC 14.7.4.1 (NMAC, 2015):

- A mistura preparada foi colocada no molde em camadas relativamente uniformes;
- essas camadas (h_{cs}) tinha em média 15 cm de altura;
- cada camada foi compactada antes do lançamento da próxima camada.

3.2.3.3 Compactação

A mistura, conforme descrito no item 3.2.2.1, necessita atingir um grau de compactação máximo. Assim, preliminarmente ao ensaio foram realizados testes de compactação para que se pudesse determinar o número de “passadas” do compactador, sobre a área de mistura a ser compactada, com intuito de obter a compactação ótima por camada.

Nos testes foi determinado em 4 a quantidade de passadas necessárias para a obtenção do peso específico obtido no ensaio de compactação.

Figura 44. Compactação da mistura no molde indeformável.



Fonte: Autor (2021)

Para a compactação da mistura da taipa (Figura 44), foi utilizado o compactador pneumático da marca Chicago Pneumatics – Série CP 0200, modelo CP0200BXXL, com frequência de compactação de 720 gp/m, diâmetro da sapata de 127 mm e 13kg, semelhante ao da Figura 45.

A carga estática equivalente (Q) do compactador que está sendo aplicado sobre a mistura, foi obtida de forma simplificada, através das leituras de pressão com o compactador em funcionamento, atuando sobre uma célula de carga do fundo, já que não se dispunha de equipamentos de instrumentação para leitura de frequência e intensidade do equipamento a leitura da carga estática equivalente.

Figura 45. Equipamentos utilizados para o experimento.



Compactador pneumático

Compressor de ar, capacidade 250 litros

Lubrificador de 1/2

Fonte: cp.com (2022), www.chiaperini.com.br (2021), www.bozza.com (2021)

O compactador pneumático demanda a utilização de um compressor de ar de grande capacidade. Foi utilizado nos experimentos o compressor de 2 estágios de alta pressão (175 lbf/pol²), motor trifásico, reservatório de 250 litros e de um equipamento com filtro regulador de ar e lubrificador para manter a lubrificação do compactador (Figura 45).

O ensaio de compactação foi feito através da cravação de um cilindro metálico vazado e biselado em uma das pontas (Figura 46), de volume e peso conhecidos, que após ser extraído juntamente com a mistura compactada foi pesado. Com a informação do peso de material compactado e do volume interno do cilindro, obteve-se o peso específico do material compactado através da relação:

$$\gamma_{solo\ compactado} = \frac{M_{solo\ compactado}}{V_{cilindro}} \quad (8)$$

Figura 46. Ensaio de compactação.



Cravão do anel biselado



Retirada do anel biselado



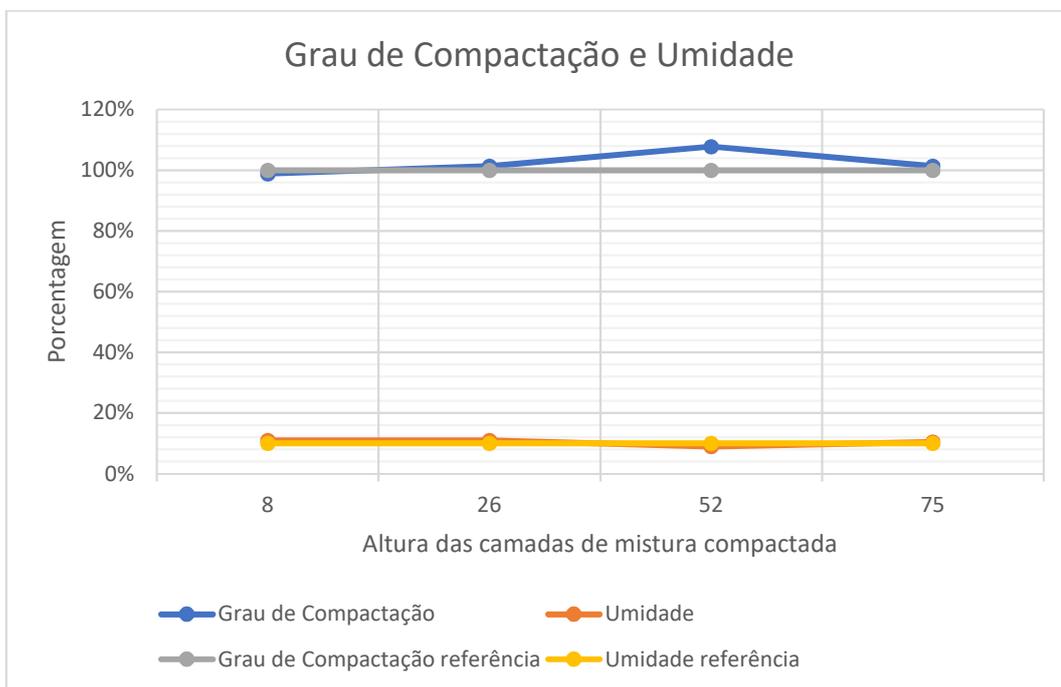
Pesagem do anel biselado vazio



Pesagem do anel biselado cheio

Fonte: Autor (2022)

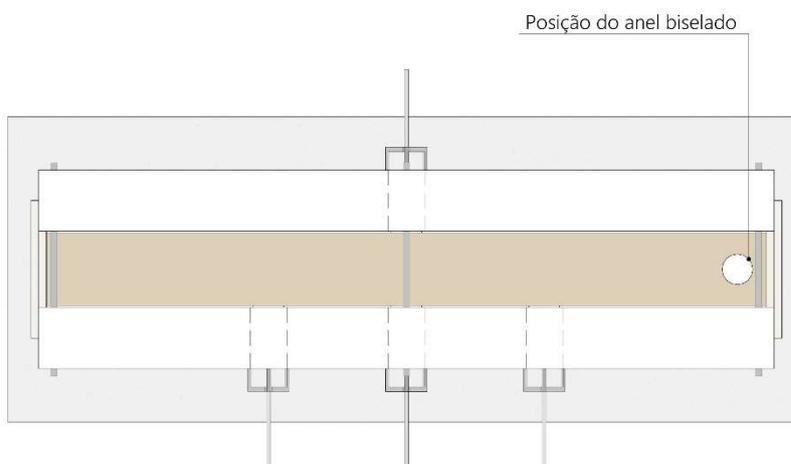
Figura 47 - Grau de compactação e umidade das camadas de mistura lançadas



Fonte: Autor (2023)

A posição do cravamento do anel biselado foi definida pela facilidade de acesso (Figura 48). O ensaio de compactação foi repetido a cada 3 camadas para garantir que as 4 passadas tivessem o grau de compactação esperado, fazendo com que a massa de mistura e consequentemente os sensores, fossem expostos aos máximos esforços de compactação.

Figura 48. Posicionamento do anel biselado para realização do ensaio de compactação.



Fonte: Autor (2022)

3.3 Aplicabilidade dos resultados encontrados à um modelo de fôrma genérico

Com foco na obtenção de uma fôrma econômica e que atenda aos parâmetros e requisitos estabelecidos em normas, manuais e na boa prática, pretende-se correlacionar as cargas e pressões encontradas a um modelo isostático de uma fôrma genérica, a fim de ilustrar a aplicabilidade dos resultados encontrados, para fins de dimensionamento das fôrmas.

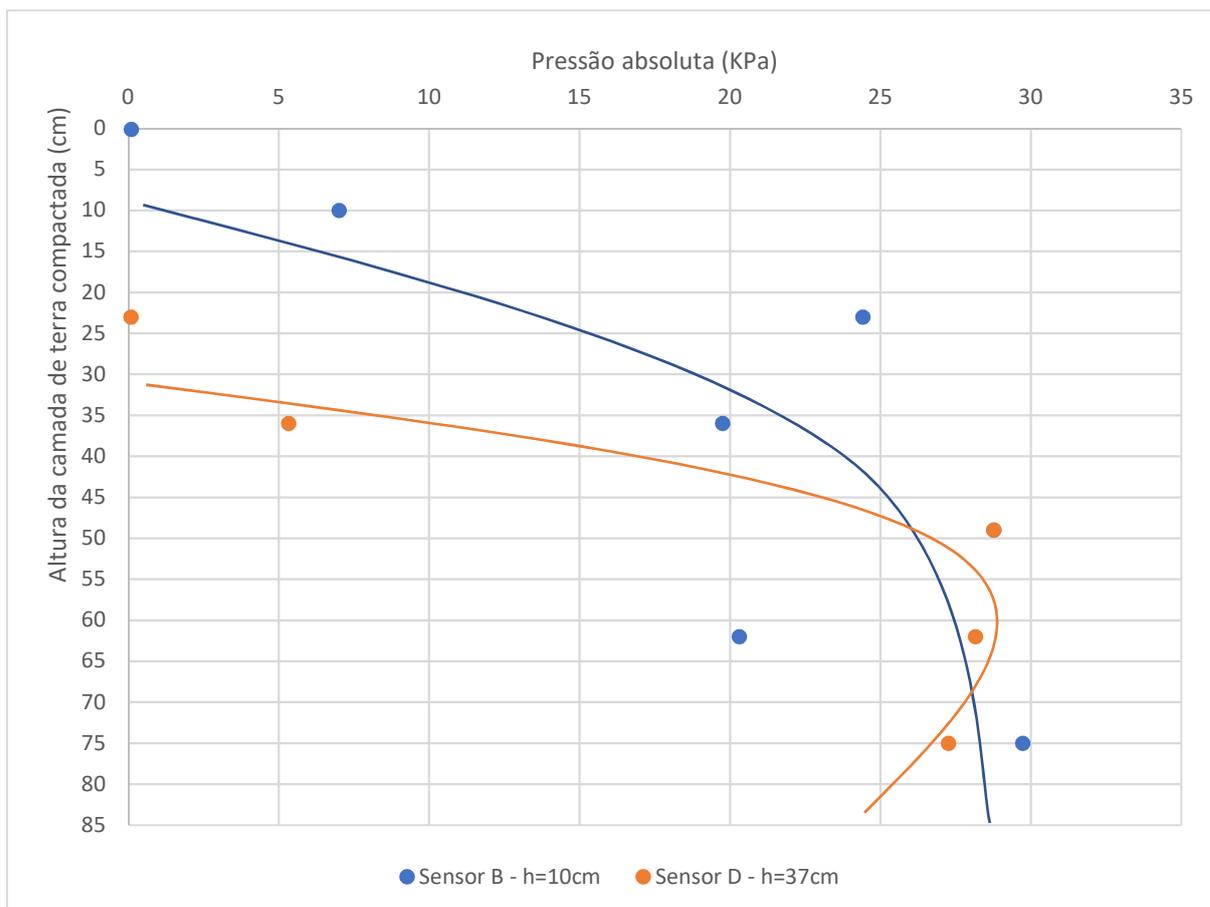
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados 2 testes, para ajustes, e um ensaio. Os resultados dos testes também são apresentados neste item porque suas análises colaboraram para a evolução da análise dos dados obtidos, bem como da própria instrumentação. Em seguida os resultados encontrados foram correlacionados analiticamente à um esquema estrutural do modelo de fôrma convencional de taipa, para se obter um modelo matemático de aplicação cargas e pressões, que possa servir para dimensionamentos de todos os elementos do conjunto de fôrmas.

4.1 Teste 1

No teste 1, foram lançadas e compactadas 6 camadas de mistura ao todo. O ensaio foi finalizado quando os sensores apresentaram estabilidade na leitura da pressão, tendo sido verificado que a compactação já não causava mais interferência significativa nas leituras de pressão (Figura 49).

Figura 49. Altura de mistura compactado x pressão exercida no sensor B (h = 10 cm a partir da laje de fundo) e no sensor D (h=37 cm acima da laje de fundo) do teste 1.



Fonte: Autor (2022)

Com esses resultados, verificou-se que o comportamento dos sensores (independente da sua altura), são semelhantes e apresentam valores máximos semelhantes também. Isso indicou que cada trecho (na altura do molde), em algum momento da compactação, está sujeito a uma pressão máxima que, aparentemente, se mantém constante à medida que novas camadas são compactadas.

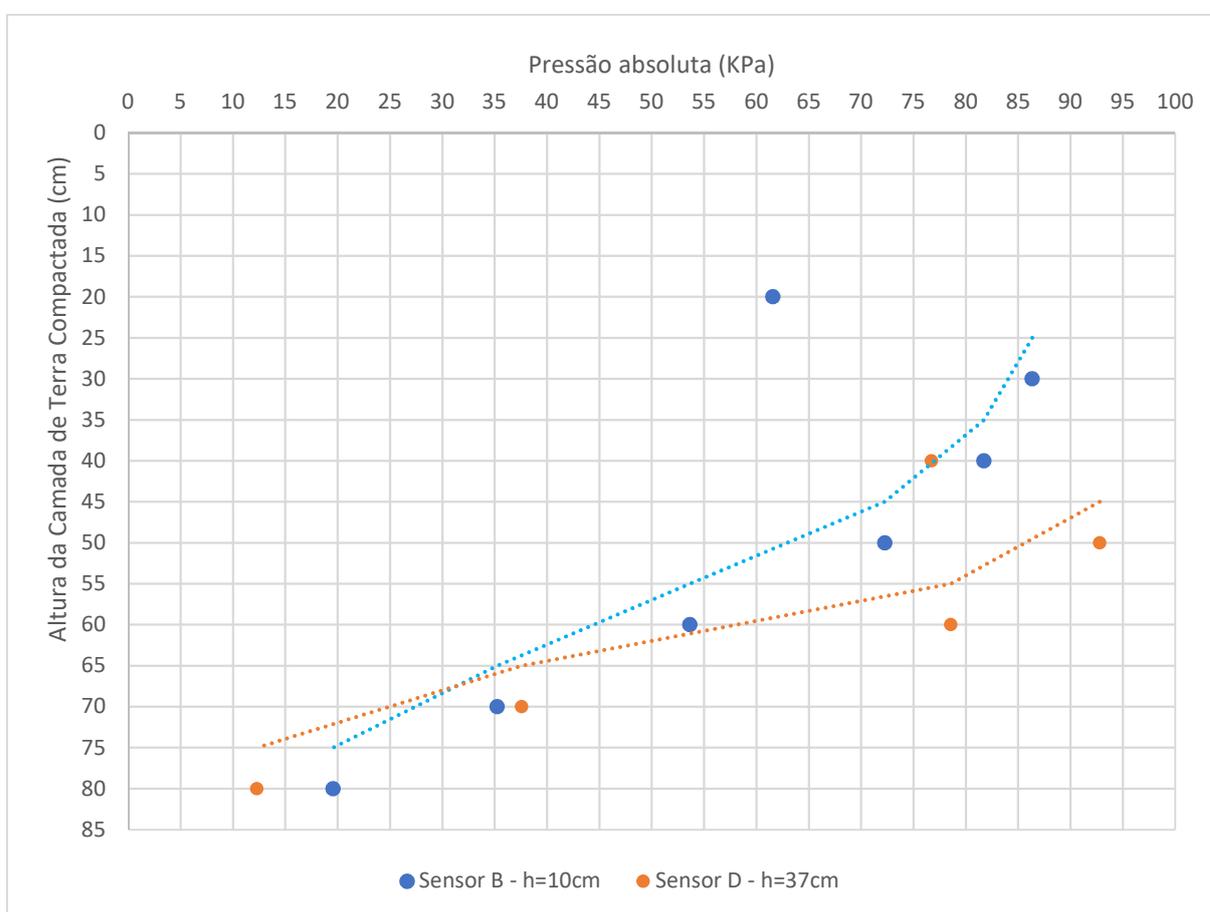
Cada conjunto de dados mostrou a tendência de que o acréscimo de novas camadas praticamente não altera a pressão nos sensores. Mas, observou-se que a constância da pressão talvez não tivesse relação com o comportamento da mistura compactada e sim com o comportamento da versão 1 do suporte dos sensores (viga de madeira) que não estava acoplado à parede (Figura 29) e que poderia ter se movimentado a ponto de não ser mais sensível às pressões atuantes na mistura compactada. Isso também explicaria a grande

oscilação nas leituras do senso B. Assim, foi demandada nova concepção para a fixação dos conjuntos de medição.

Além desses resultados, foram verificadas algumas necessidades de aprimoramento, quanto a: controle de compactação da mistura (ver item 3.2.3.3), quantidade de conjuntos de medição (ver item 3.2.1.3), travamento superior do molde (ver item 3.2.1.1) e controle e acompanhamento das deformações (ver item 0).

4.2 Teste 2

Figura 50. Altura de mistura compactada x pressão exercida no sensor B (h = 10 cm acima da laje de fundo) e no sensor D (h=37 cm acima da laje de fundo) do Teste 2.



Fonte: Autor (2022)

Com a versão 2 do suporte (tripé), procedeu-se ao teste 2, com a compactação de 7 camadas, tendo sido controladas as espessuras das camadas, umidade e a compactação da mistura.

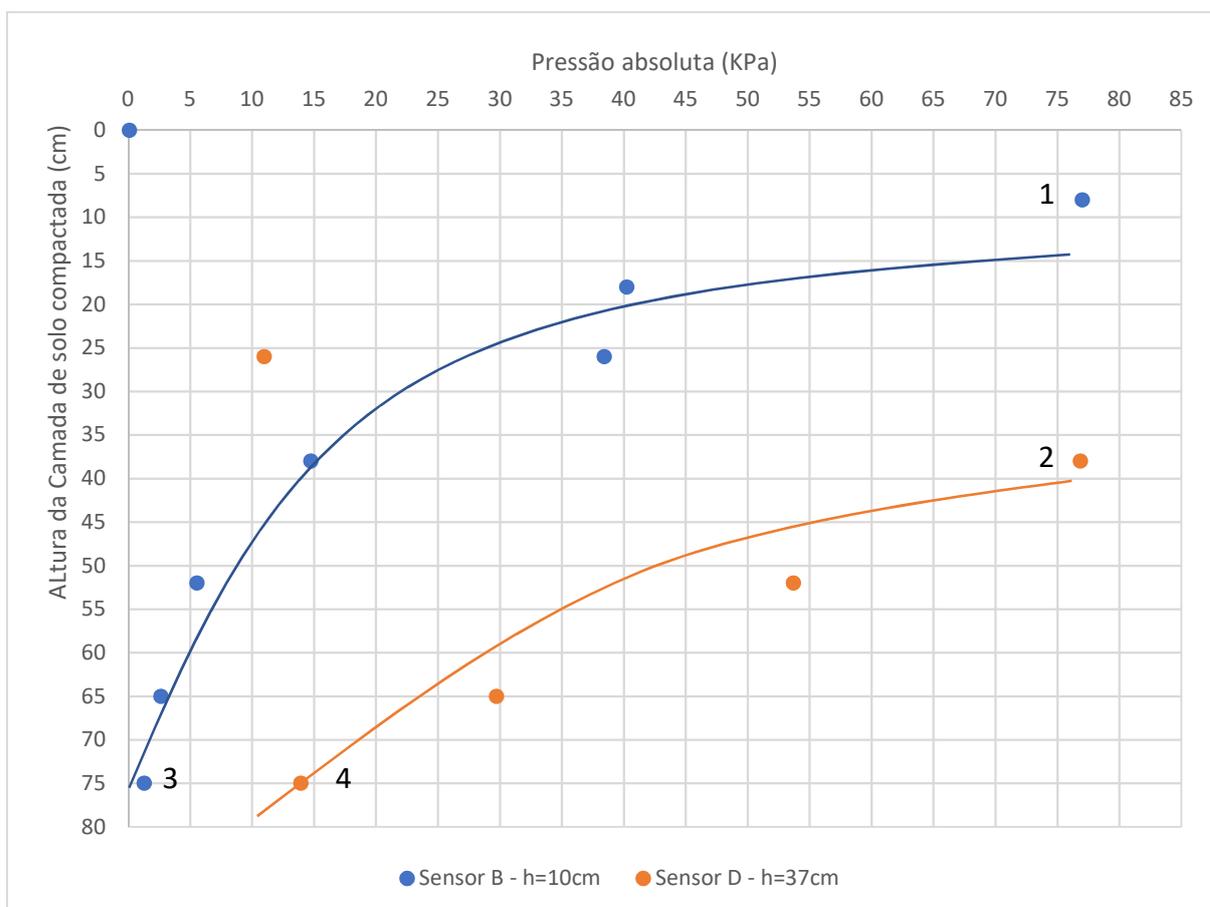
O comportamento da curva de pressão já não apresentou as oscilações observadas no teste 1 e os valores máximos encontrados para ambos os sensores, no teste 2, apresentaram ordem de grandeza semelhantes (Figura 50) porém muito acima dos encontrados anteriormente (praticamente 3 vezes maior).

É plausível atribuir essas diferenças à mudança da versão 1 para versão 2 do suporte dos conjuntos medidores (do chão para a parede), eliminando o problema das movimentações diferentes entre conjunto medidor e paredes (ver item 3.2.1.3).

O teste 2 precisou ser interrompido devido à evidente movimentação excessiva do topo (giro) das paredes do molde, verificada após a compactação da 7ª camada (Figura 23) e as leituras dos relógios comparadores.

4.3 Ensaio

Figura 51. Altura de mistura compactada x pressão exercida no sensor B e no sensor D do ensaio.



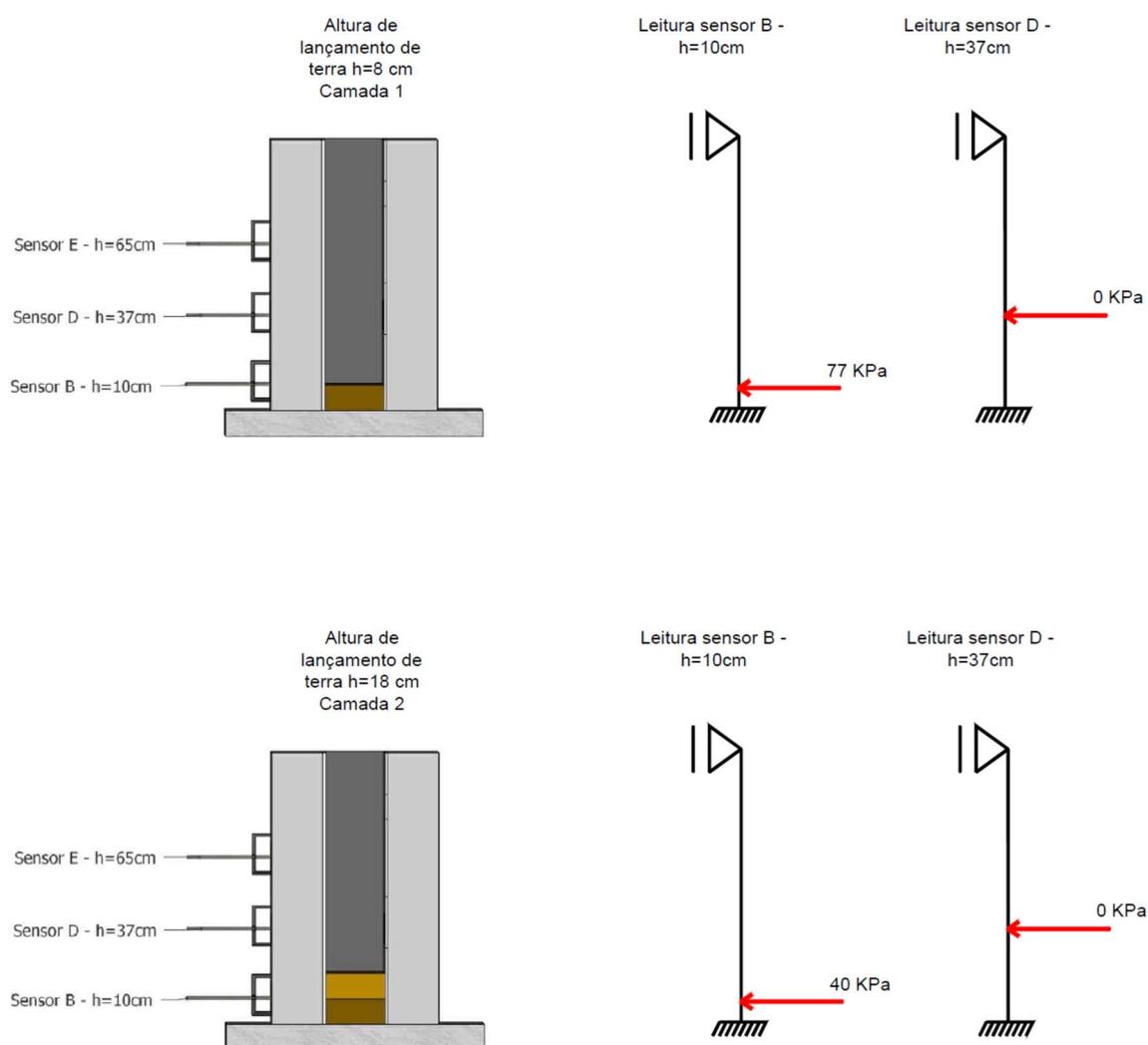
Fonte: Autor (2022)

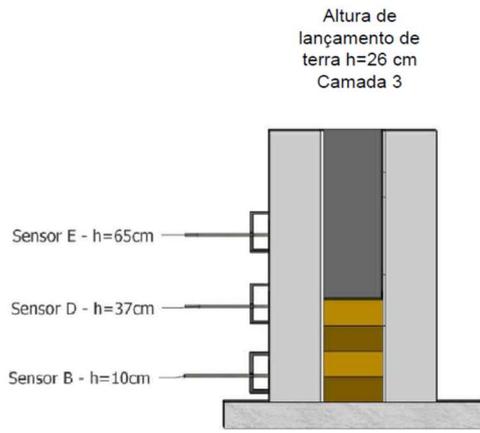
Com a instrumentação reelaborada, foi realizado o ensaio, com os resultados mais coerentes, que são apresentados a seguir.

Os valores máximos encontrados no ensaio apresentam ordem de grandeza semelhante aos observados anteriormente (Figura 51).

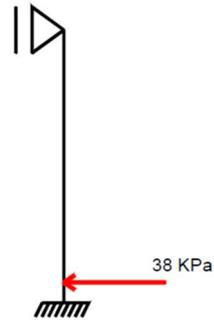
As pressões são maiores nos sensores posicionados imediatamente abaixo do compactador (pontos 1 e 2) e tendem a zero quanto mais afastados do compactador (pontos 3 e 4). A Figura 52 ilustra as leituras dos sensores de acordo com a altura da camada de mistura compactada.

Figura 52. Croqui relacionado à altura da camada de terra lançada e compactada com as leituras dos sensores.

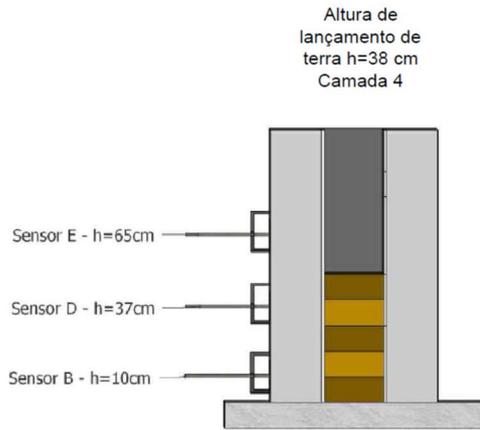
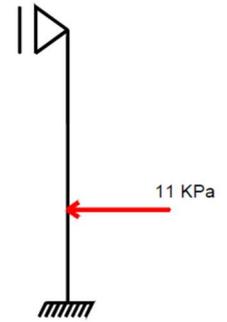




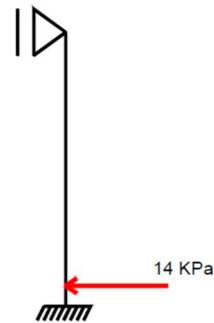
Leitura sensor B - h=10cm



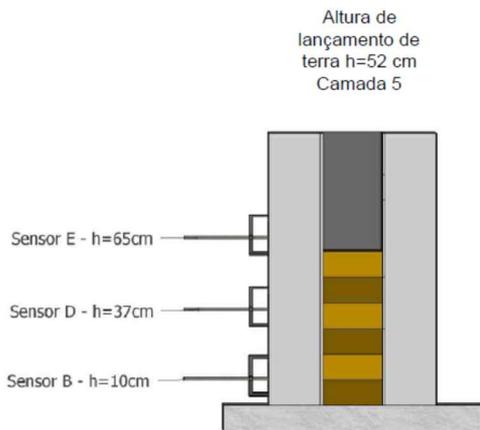
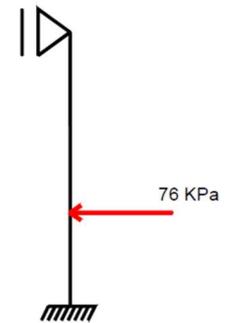
Leitura sensor D - h=37cm



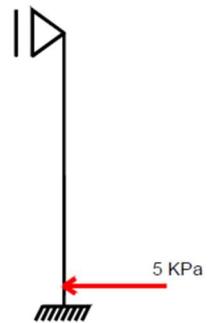
Leitura sensor B - h=10cm



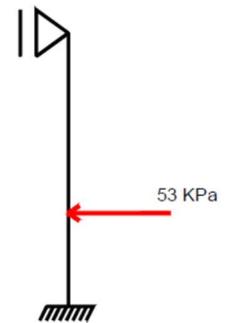
Leitura sensor D - h=37cm

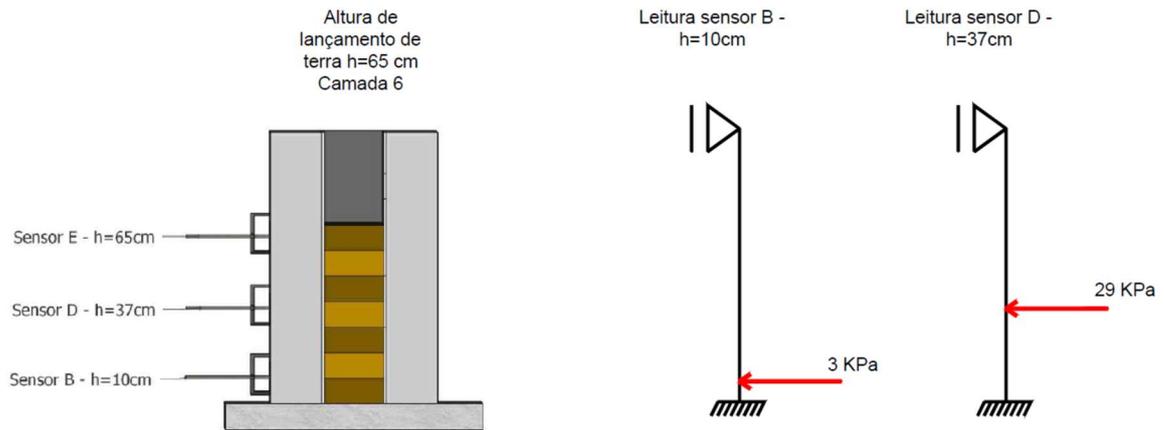


Leitura sensor B - h=10cm



Leitura sensor D - h=37cm



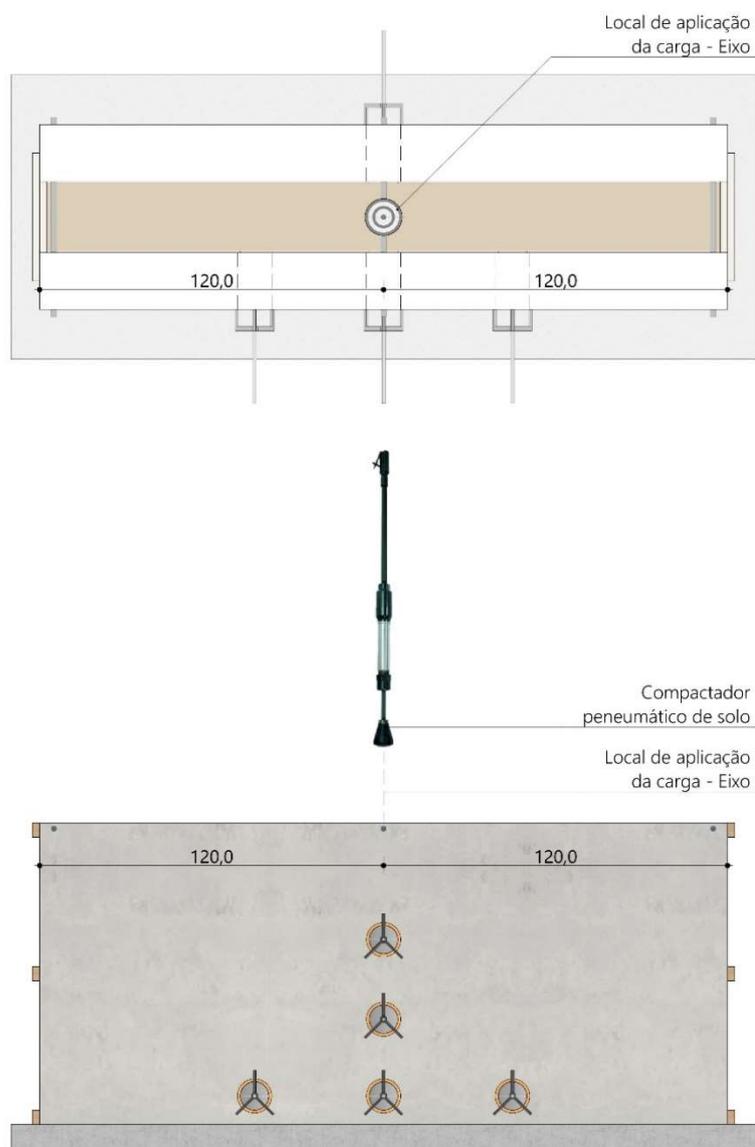


Fonte: Autor (2022)

Entretanto, essa análise de máximos deve ser cuidadosa, tendo em vista que tais valores são pontuais e atuam na fôrma de maneira localizada e não constante, diferente do verificado no teste 1. No ensaio, após atingir um valor máximo, em algum momento (a depender da distância vertical do ponto de aplicação da carga do compactador) a pressão tende a diminuir e não ser constante como indicado anteriormente, e parte deste resultado é devido a recuperação elástica do solo.

Sendo esta dúvida legítima e de grande importância para um dimensionamento (sem superdimensionamento) das fôrmas, foi realizado outro levantamento que não havia sido feito nos testes: registrar os dados dos sensores para $h=70$ cm com o compactador nas seguintes posições em relação ao eixo dos sensores B, D e E: sobre o eixo e a 10 cm, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a 20 cm, a 30 cm e a 40 cm do eixo (Figura 53**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

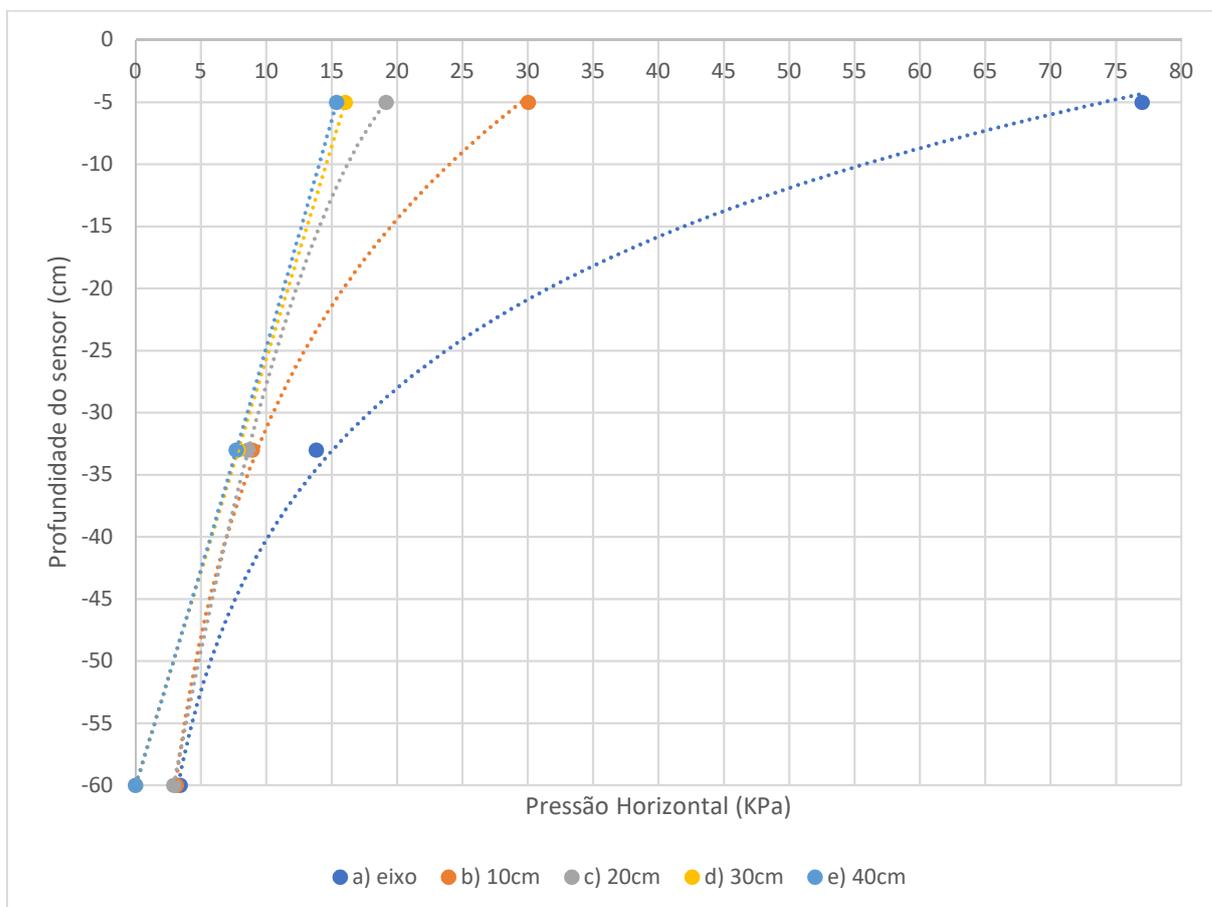
Figura 53. Compactador alinhado ao eixo dos conjuntos de medição B, D e E.



Fonte: Autor (2022)

A Figura 54 ilustra a pressão horizontal nos moldes tanto no eixo vertical quanto no horizontal. Assim tem-se uma distribuição de pressões no plano do molde, o que facilita o cálculo de dimensionamento de seus componentes posteriormente.

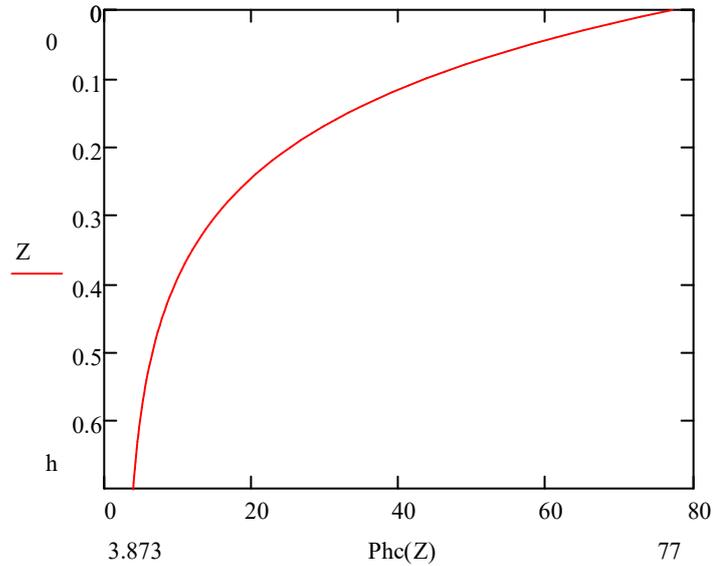
Figura 54. Leitura das pressões horizontais atuantes ao longo do eixo vertical e horizontal do plano do molde.



Fonte: Autor (2022)

A Figura 55 mostra um comportamento semelhante ao resultado do ensaio apresentado na Figura 54 e o resultado da aplicação da fórmula de Calil e Cheung (2007) proposta para silos.

Figura 55. Distribuição das pressões horizontais pela fórmula de Calil e Cheung (2007)



Fonte: Autor (2022)

A equação (7), proposta por Calil e Cheung (2007), com os valores respectivos das variáveis utilizadas, é apresentado a seguir.

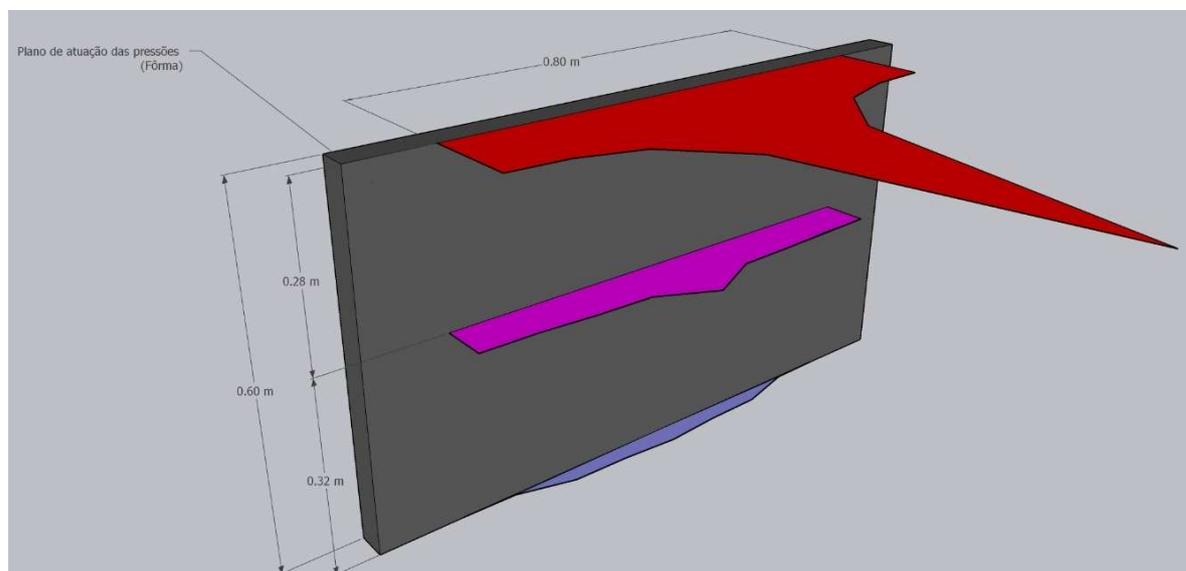
$$p_h(z) = \frac{\gamma \cdot R}{\mu_w} + \left(\sigma_{yo} - \frac{\gamma \cdot R}{\mu_w} \right) \cdot e^{\frac{-K \cdot \mu_w \cdot z}{R}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \phi &= 30 \text{ deg} \\ \gamma &= 20,4 \\ \phi_w &= 25 \text{ deg} \\ \mu &= \text{tang}(\phi_w) \\ k &= 0,8 \\ p_{h_0} &= 77 \text{ KPa} \end{aligned}$$

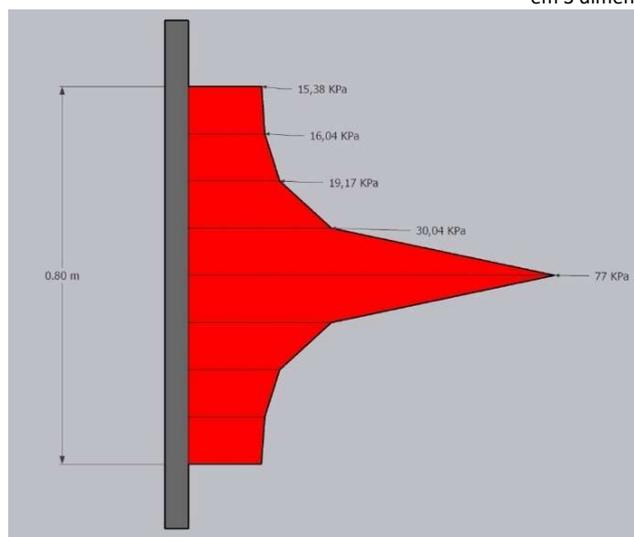
$$\begin{aligned} D &= 0,25 \text{ (espessura da parede)} \\ h &= 0,70 \text{ m (altura de solo compactado)} \\ R &= D/4 \\ Z &= 0,01 \cdot h \end{aligned}$$

A Figura 56 apresenta, figurativamente, a atuação das cargas de pressão do gráfico da Figura 54, sobre um plano vertical, em 3 alturas diferentes, correspondentes à posição dos sensores B, D e E. A Figura 57 apresenta uma superfície de pressões atuantes, resultado da interligação dos pontos apresentado na Figura 56.

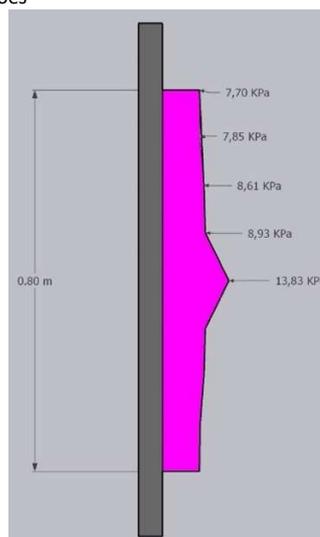
Figura 56. Diagrama de pressões atuantes na face interna do molde.



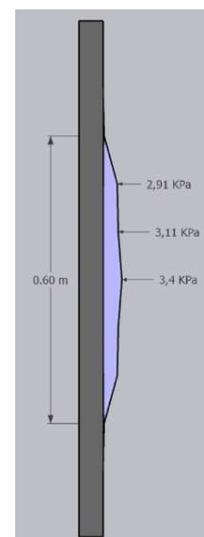
em 3 dimensões



em planta, no nível do impacto



em planta, 28cm abaixo do nível de impacto



em planta, 60cm abaixo do nível de impacto

Fonte: Autor (2022)

Figura 57 - Perspectiva da superfície de pressões atuantes

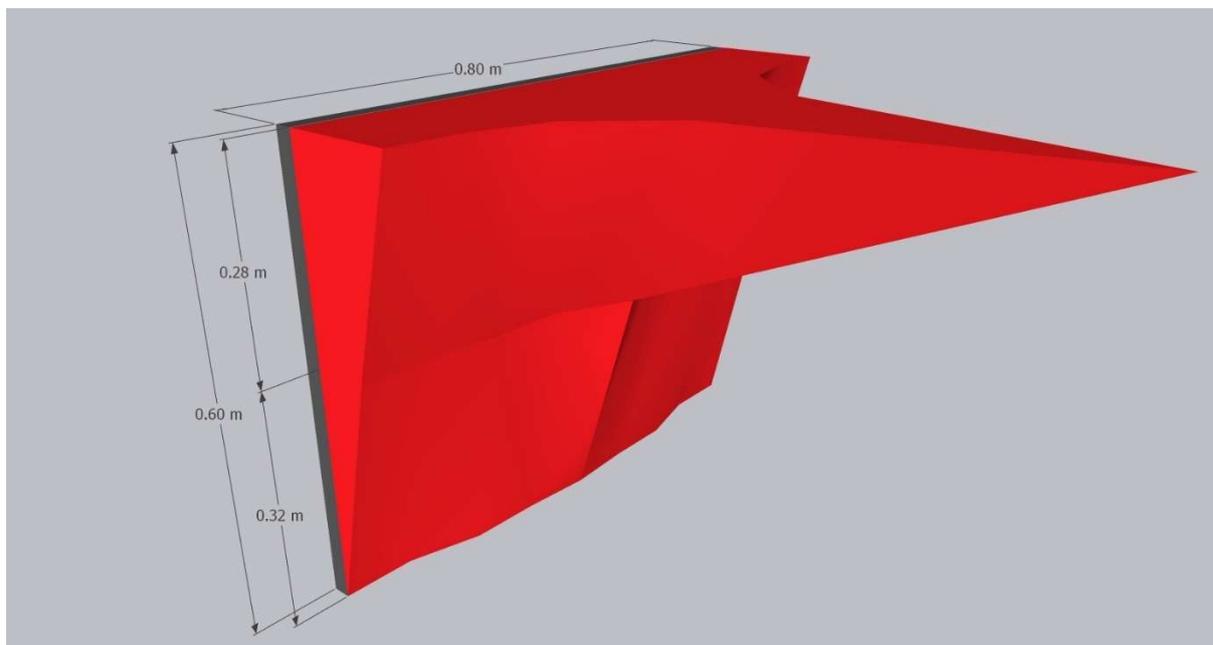
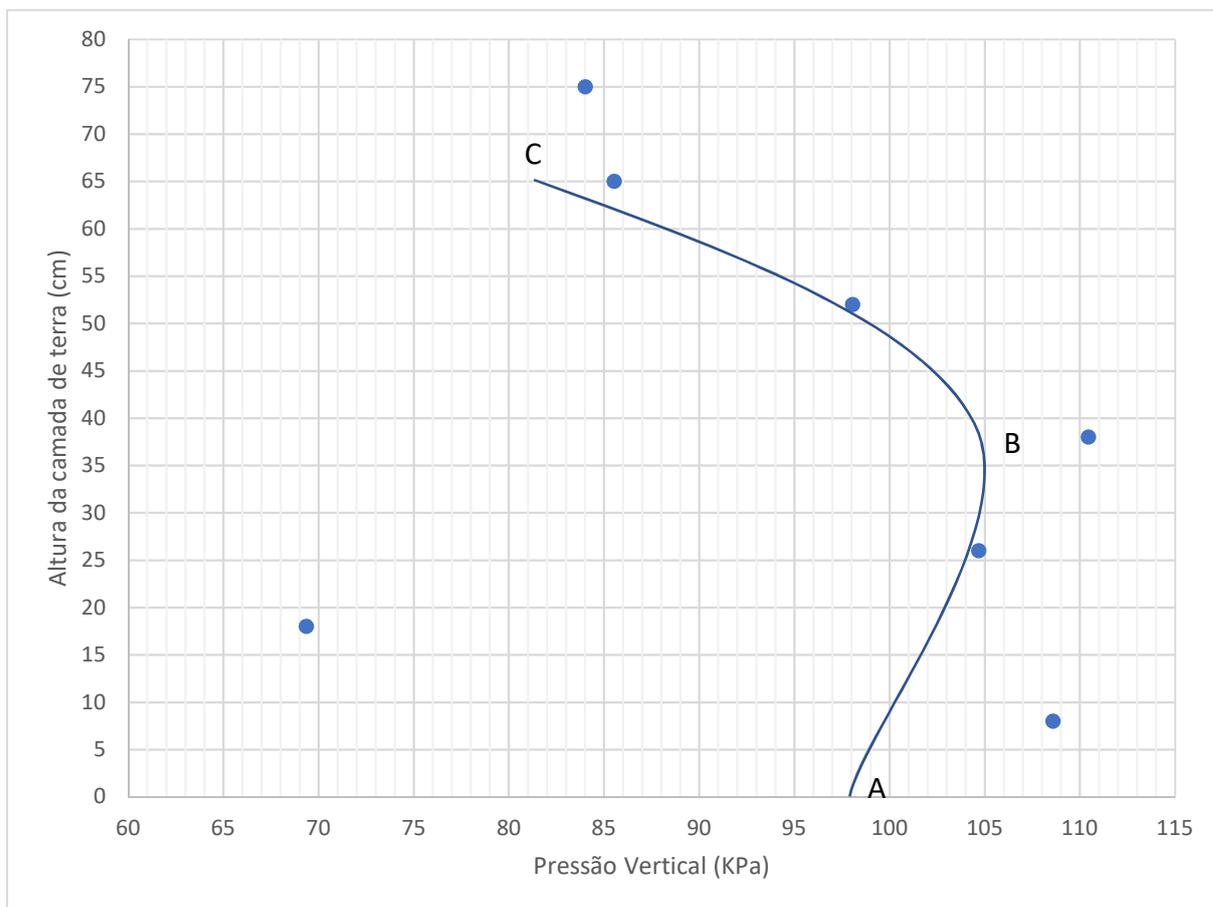


Figura 58. Pressões máximas no sensor de fundo



Fonte: Autor (2022)

A Figura 58 apresenta as pressões máximas observadas no sensor de fundo durante a compactação em $h=75\text{cm}$. Teoricamente, os valores encontrados para as camadas subsequentes à primeira camada (aproximadamente 8 cm) deveriam ser cada vez maiores, tendo em vista que mesmo que o compactador deixe de influenciar as camadas mais profundas, há ainda a adição de novas camadas de mistura sobre estas, o que elevaria o peso próprio de mistura depositado sobre o sensor de fundo, porém não é isso que se observou neste momento do teste, como se observa entre os pontos A e B, houve um acréscimo de pressões, porém não é o que ocorre entre os pontos B e C. Duas possibilidades são cogitadas: 1) parte da energia de compactação é absorvida pelo atrito lateral existente entre o molde e a mistura em compactação ou 2) A mistura apresenta resistência à compactação.

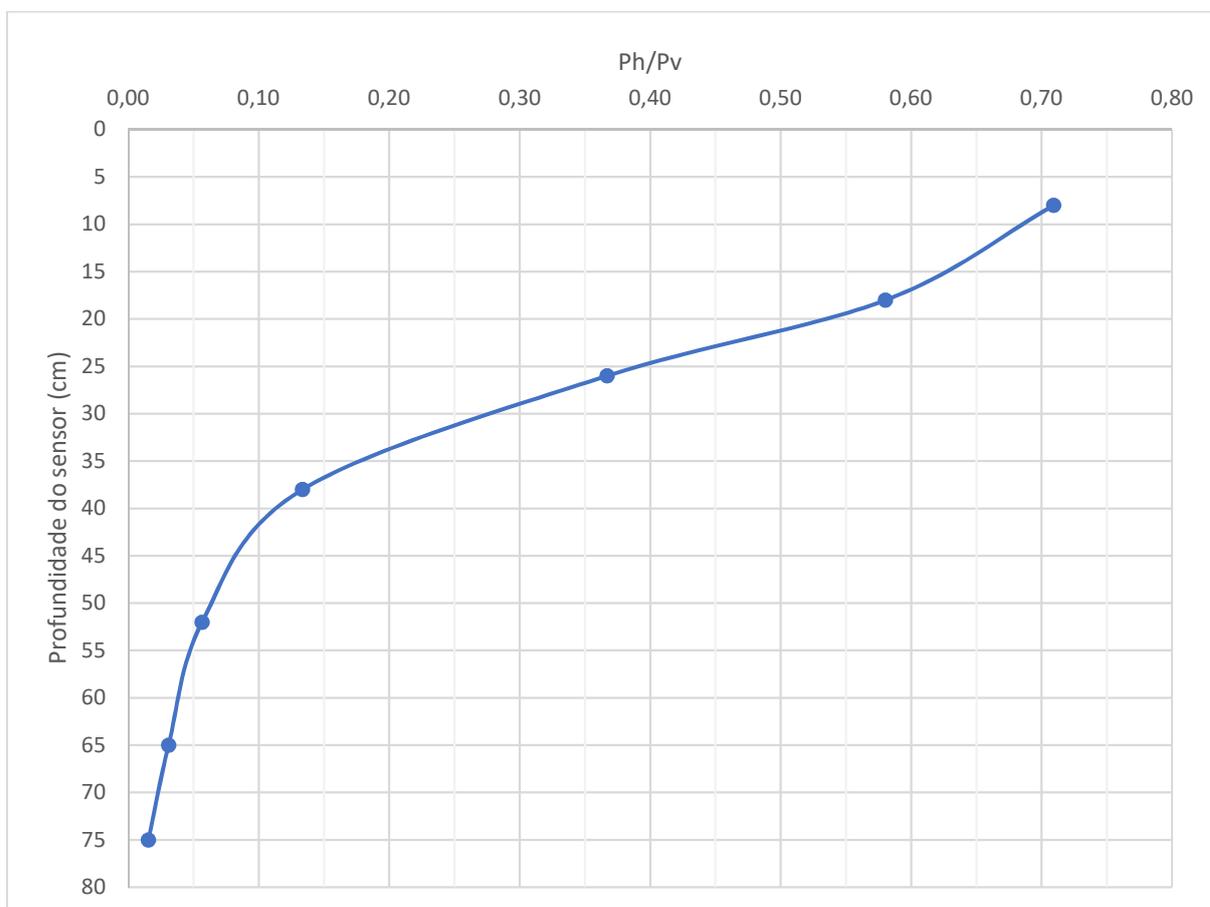
Considerando-se a possibilidade 1), refuta-se a aplicação da teoria de Rankine, pois a teoria considera que o contato entre solo/mistura e a contenção são perfeitamente lisos, o que não é a realidade. Além disso, considera que o esforço horizontal atuante é uma grandeza proporcional (parâmetro K) ao esforço vertical atuante, o que pode valer para uma carga estática, mas não para uma carga dinâmica, caso contrário a tendência entre os pontos B e C seria a mesma dos pontos A e B (Figura 58), ou seja cada vez maior com a profundidade. Ainda sobre a possibilidade 1), Calil e Cheung (2007) comparam diversos autores e demonstram como o valor K pode ser obtido de diversas maneiras ao longo da literatura, ainda constam citando (KAMINSKI; WIRSKA, 1998) que tal parâmetro possa depender de quase quarenta fatores, dentre eles a interação entre a estrutura do silo com o produtor granular é caracterizado como um dos seis grupos primários de classificação destes 40 fatores.

Sobre a possibilidade 2), o processo de compactação mecânico, através de aplicação de repetidas cargas a mistura, fará com que o volume inicial seja reduzido através da diminuição dos espaços vazios entre as partículas da mistura (o que trará aumento do seu peso específico), diminuirá sua deformabilidade e aumentará sua resistência. Segundo SENÇO (2007) a obtenção da maior massa específica aparente possível de um solo por meio da aplicação de energia mecânica implica-se obter a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, o que resulta aumentar a resistência desse solo. Desta maneira, ao atingir sua compactação máxima, uma determinada camada não mais sofrerá deformações a ponto de não exercerem mais, no sensor de fundo, novos esforços além dos já aplicados

anteriormente, o que indica que tal camada, se bem compactada passará a trabalhar apenas como um “suporte” para as novas camadas

Mas, é possível a partir dos resultados colhidos, propor um ábaco de proporcionalidade entre altura da parede, pressão vertical e pressão horizontal (Figura 59). Para sua aplicação, é necessário que se conheça a pressão estática equivalente gerada pelo efeito dinâmico do compactador.

Figura 59. Ábaco de proporcionalidade entre P_h/P_v



Fonte: Autor (2022)

No caso do ensaio realizado neste trabalho, para a primeira camada compactada (8 cm), em que a influência do atrito molde/mistura ainda podia ser considerada pequena, pode-se fazer a seguinte analogia:

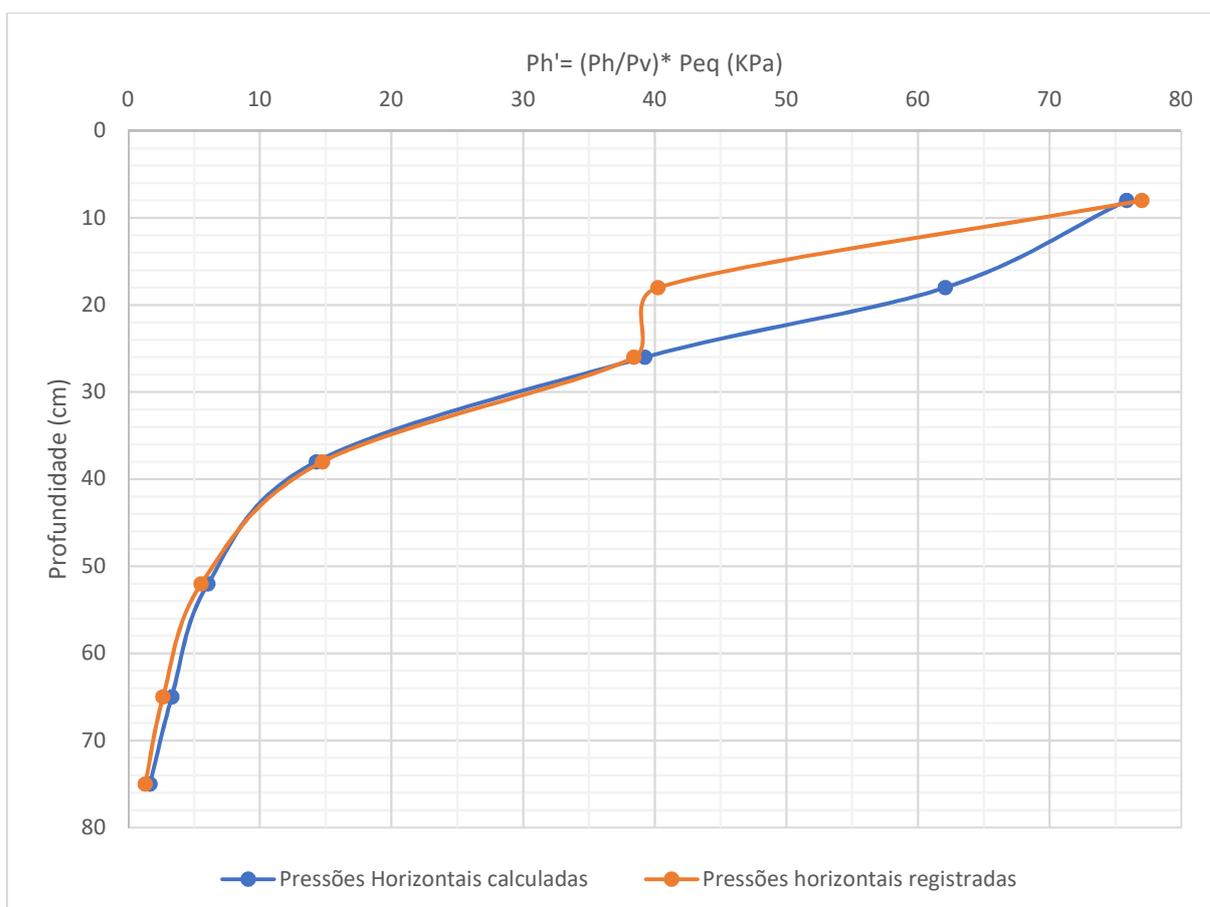
A leitura de pressão vertical máxima ($P_{vm\acute{a}x}$) foi de 108,58 KPa (Figura 58). Tendo a informação da altura da camada de mistura, a área de contato do sensor e o peso específico

da mistura compactada, pode-se determinar a pressão da camada compactada (P_{SC}) e determinar a pressão estática equivalente (P_{eq}) com a equação (10).

$$P_{vmáx} = P_{SC} + P_{eq} \quad (10)$$

O valor que se tem, nestas condições (atrito molde/mistura, peso e frequência do compactador), para a pressão estática equivalente é de 106,94 KPa. A Figura 60 mostra as curvas das pressões horizontais calculadas sobre a curva das pressões horizontais registradas no ensaio, sendo evidente a semelhança e proximidade.

Figura 60. Pressões horizontais calculadas (P_h') em função da pressão estática equivalente (P_{eq}) e da relação P_h/P_v .

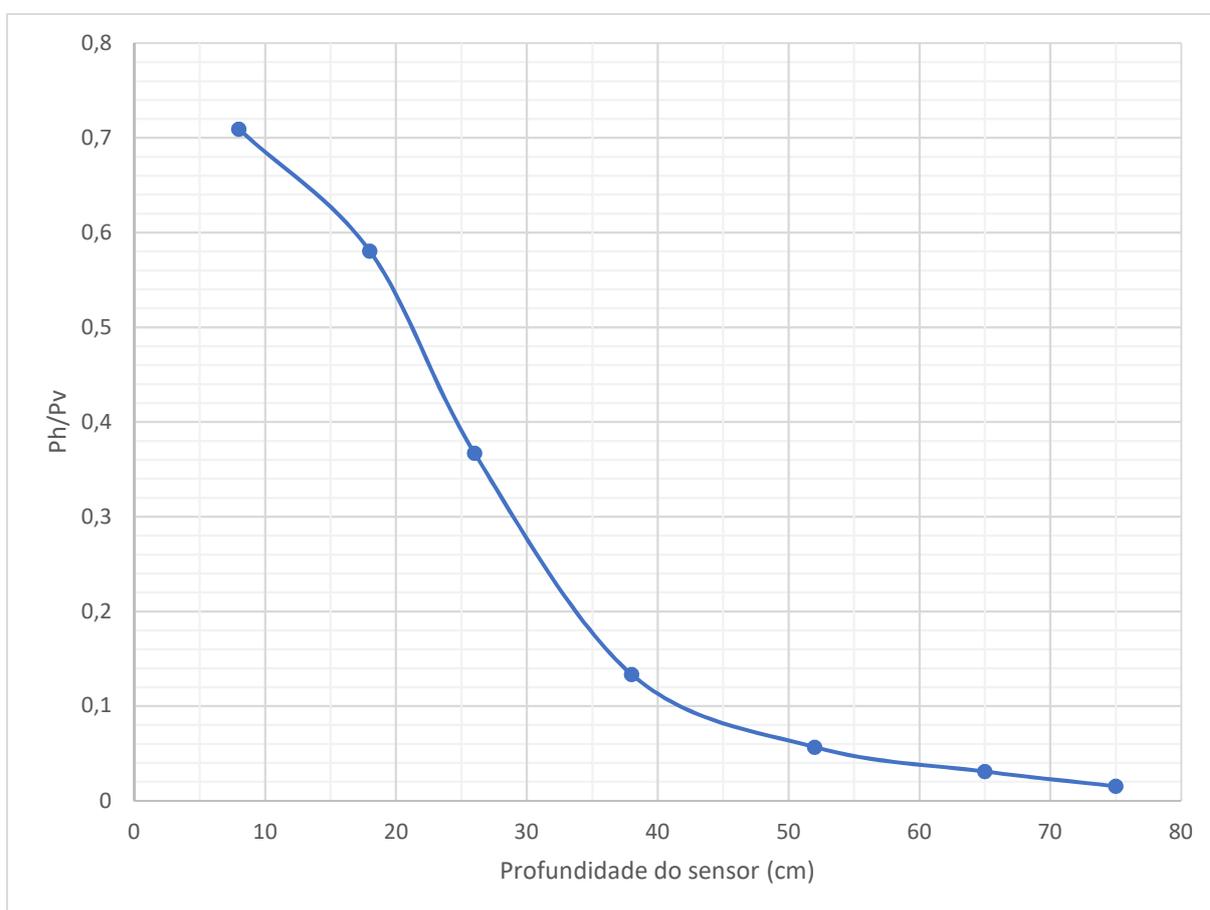


Fonte: Autor (2022)

A importância deste gráfico se dá no fato de que, para diferentes tipos de equipamentos de compactação (frequência e pesos distintos do utilizado nos ensaios), desde que as demais variáveis sejam as mesmas (peso específico do material compactado e coeficiente de atrito entre mistura e parede) é possível determinar as pressões horizontais atuantes multiplicando (P_h/P_v) pela pressão estática equivalente do equipamento.

Invertendo-se os eixos, tem-se o gráfico da Figura 61, que se assemelha com o proposto por Cousens e Pinto (1996) (Figura 18).

Figura 61. K x profundidade do sensor (ensaio final)



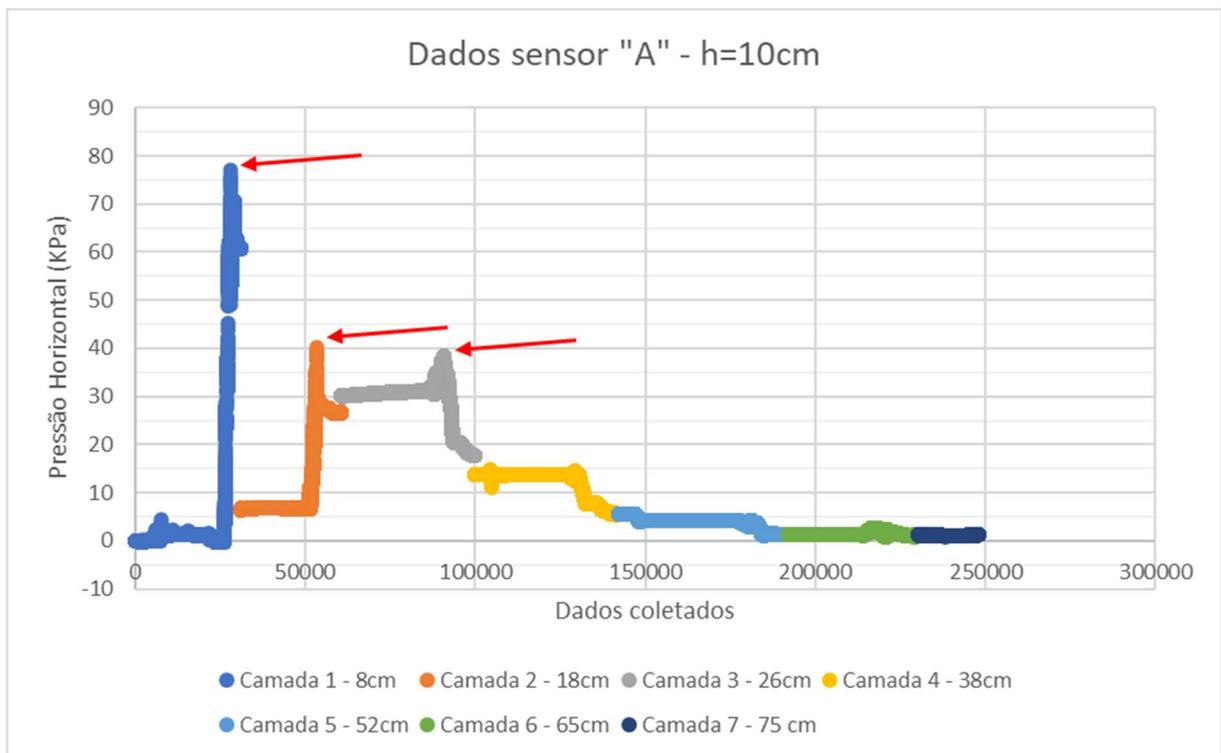
Fonte: Autor (2022)

A partir de $h=50\text{cm}$, a proporção entre p_h/p_v torna-se quase constante ou com variação desprezível conforme aumenta-se a profundidade analisada.

Ao fazer uma análise mais individual dos sensores também é possível chegar a informações interessantes. As camadas 1, 2 e 3 têm um comportamento linear até que em

determinado momento apresentam um pico (Figura 62). Tal pico representa o efeito do compactador no eixo do sensor A, de forma decrescente, até que nas camadas subsequentes (4 a 7) tornam-se insignificantes, seja pela absorção e transmissão de energia para as paredes no atrito molde/mistura ou deformação elástica do solo.

Figura 62. Cargas no sensor A (h=10cm), durante a compactação das 7 camadas da massa.



Fonte: Autor (2022)

Diferente do teste 1 (ver item 4.1), não houve grandes oscilações nas leituras (indício de movimentação do molde ou do suporte dos sensores), evidenciando que as correções no molde indeformável foram efetivas (Figura 23).

Ao longo da Revisão de literatura foram levantadas algumas hipóteses:

- I- Fôrmas para taipa podem ser dimensionadas analogamente a fôrmas para paredes de concreto;
- II- Fôrmas para taipa recebem pressões semelhantes a estruturas de contenção de solos ou outros materiais granulares, como muros de arrimo e silos;

- III- À medida que as camadas são compactadas, há uma altura crítica/limite em que a pressão horizontal atinge seu valor máximo e passa, então, a diminuir.

Com base nos resultados pode se afirmar que as hipóteses I, II e III se mostram coerentes.

Foram observados os seguintes fatos:

- O grau de compactação a que a camada foi submetida irá influenciar os esforços horizontais atuantes na fôrma;
- Devido o método executivo preconizar o lançamento e compactação de camadas com espessura controlada e consecutivamente, haverá cargas de pressão máxima em toda a altura da fôrma, conforme lançamento e compactação das camadas;
- As fôrmas devem ter travamento no topo e na base para evitar movimentação e deformações em excesso;
- A pressão horizontal máxima p_{hm} a que uma célula de carga foi submetida é de 80 kPa aproximadamente;
- Todas as células de carga, independentemente da posição no molde, em algum momento do experimento, receberam pressão horizontal máxima p_{hm} ;
- Com o acréscimo de camadas, o efeito da compactação tende a diminuir nas camadas inferiores e a pressão horizontal p_h aplicada na fôrma torna-se praticamente irrelevante (Figura 51);
- A Figura 54 mostra que a pressão horizontal máxima apresenta uma variação, tanto no eixo vertical quanto no eixo horizontal da face da fôrma, evidenciando que o diagrama de tensões atuantes não pode ser considerado uniformemente distribuído;
- O sensor de fundo deveria apresentar valores cada vez maiores a cada camada da mistura acrescentada, o que não foi observado, atribuindo-se o comportamento ao atrito molde/mistura (Figura 58);

- O efeito dinâmico da compactação age na fôrma de maneira inversa ao efeito do empuxo da mistura compactada;
- Para a mesma mistura e mesmo compactador, é possível obter, para uma determinada profundidade, a relação P_h/P_v , e conseqüentemente conhecer o valor de P_h , uma vez conhecendo o valor de P_v ;
- O efeito da compactação passa a ser irrelevante a partir do momento que P_h/P_v tende a se manter estável, independente da profundidade da camada de mistura (Figura 59).

4.4 Proposta de um modelo de distribuição de pressões considerando a compactação em paredes confinadas.

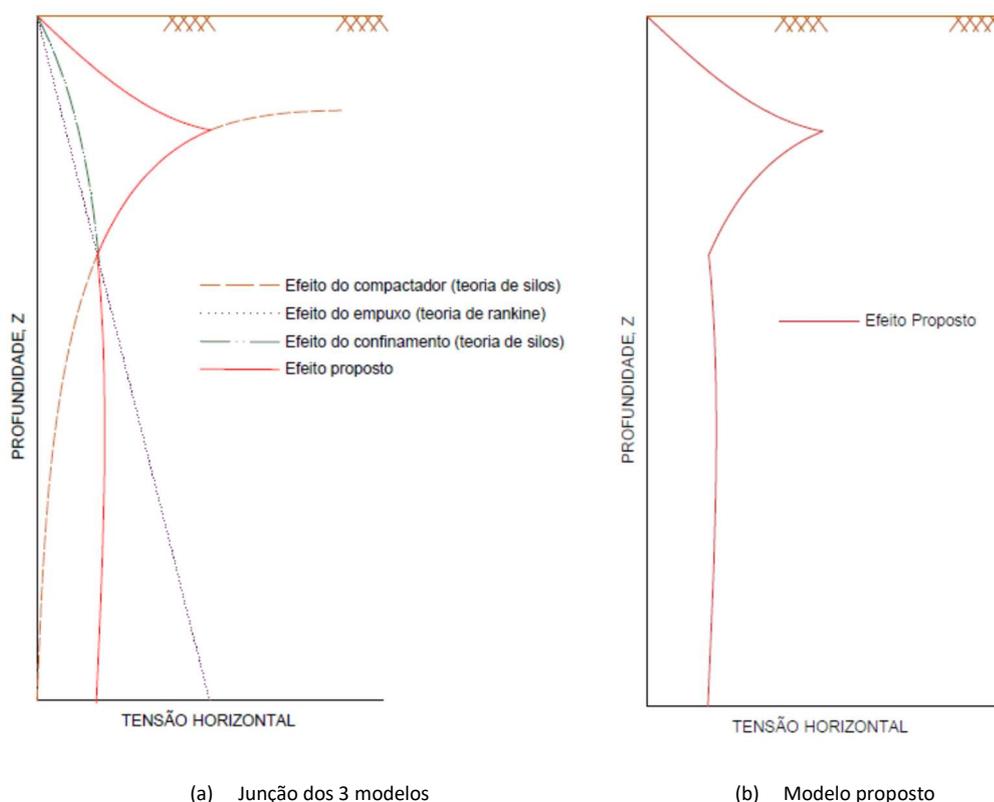
A distribuição de pressões horizontais pela teoria de Rankine **(a) apresenta o efeito do empuxo do solo crescente com a profundidade**. Já a teoria dos silos sem efeito de compactação **(b) tende a ter um comportamento constante a partir de determinada profundidade** e pelos ensaios realizados **(c) pode-se observar que o efeito dinâmico do compactador tende a ter menos influência quanto mais profunda for a camada de mistura**. Estes três diferentes tipos de distribuição horizontal estão traçados no gráfico a da Figura 63.

Na figuram, também é apresentado o modelo de distribuição de pressões proposto, de acordo com os resultados dos ensaios:

- até determinada profundidade o modelo se comporta como a curva apresentada pelo modelo da teoria de silos considerando o efeito da compactação;
- a partir de determinada profundidade a curva do modelo proposto se comportaria como a apresentada pelo modelo da teoria de silos, sem o efeito da compactação e apenas com o efeito do confinamento.

A junção dos 2 modelos resulta no modelo proposto no gráfico b da Figura 63.

Figura 63. Distribuição de pressões horizontais em 3 diferentes modelos e modelo proposto.



4.5 Aplicação dos resultados encontrados em um modelo de fôrma genérico

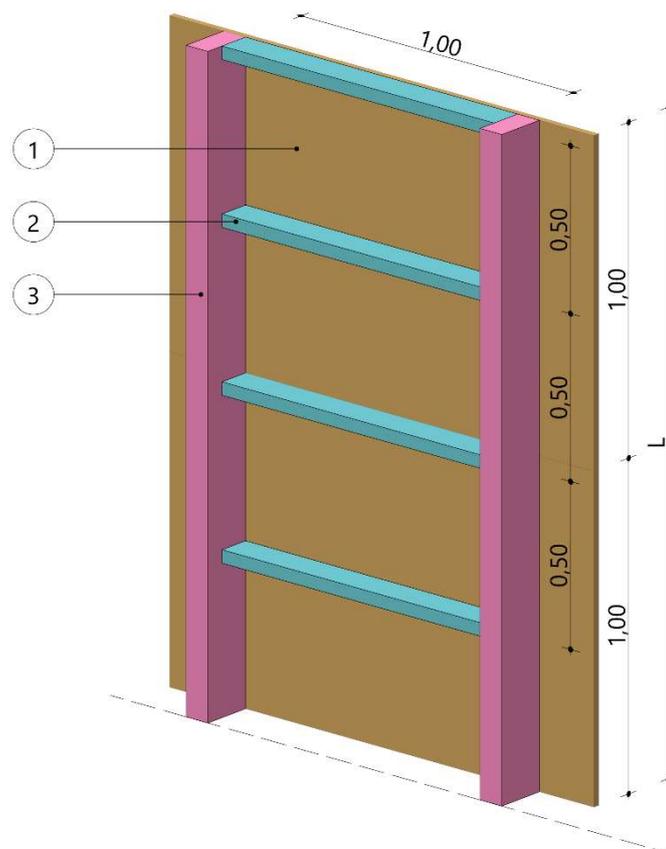
Existem muitas possibilidades de dimensionamento de fôrmas, a depender da disponibilidade de material (placas de compensado, chapas metálicas, fôrmas para concreto), mão de obra (carpinteiros, serralheiros) e espaço de trabalho (construções novas, reformas, pé direito disponível, distância de outras paredes).

Porém o quesito mais importante é conhecer as pressões atuantes e com base no esquema estrutural da fôrma disponível, distribuir tais esforços corretamente e dimensionar todas as peças. Cada elemento de um sistema de fôrmas deve ser calculado e projetado individualmente de acordo com a pior situação (maior carregamento), ou seja, cada uma desses elementos terá um diagrama de pressões atuantes diferente.

A Figura 64 apresenta um esquema estrutural para um painel de um sistema de fôrmas genérico e que se assemelha a muitos sistemas de fôrmas citados na Revisão de literatura:

- O elemento tipo 1, placa de madeira compensada, é submetida à pressão da mistura compactado e dos efeitos do compactador.
- Os elementos tipo 2, barras, impedem a deformação das placas de madeira e absorvem a carga de maneira uniforme (análogo a uma viga que recebe a carga de uma laje), distribuída por unidade de comprimento (KN/m).
- Os elementos tipo 3, montantes, posicionam as barras e as travam. Estão submetidos a cargas pontuais (KN) advindos das reações de apoio das barras (quando o compactador estiver atuando ao longo do vão entre travas, análogas a vigas que recebem cargas de outras vigas) ou a cargas uniformemente distribuídas (KN/m) (quando o compactador estiver atuando alinhado aos montantes), sendo a segunda, a pior situação para o elemento 3.

Figura 64. Esquema estrutural genérico de um painel de fôrma para taipa.



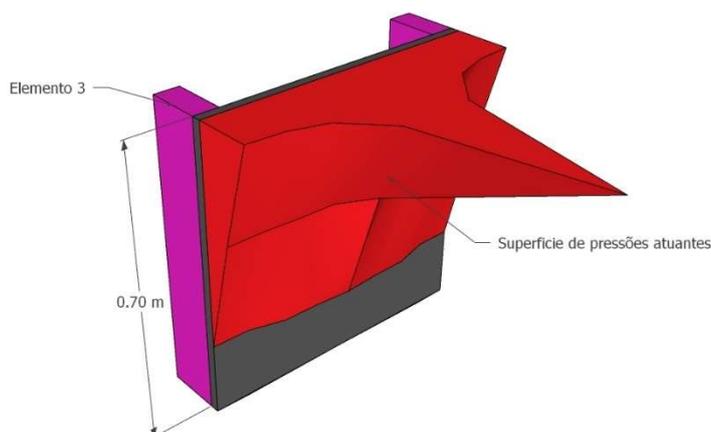
Fonte: Autor (2022)

4.5.1 Superfície de pressões atuantes no elemento 2 (barra).

As pressões horizontais atuantes não são uniformes ao longo da superfície de aplicação (contato entre a mistura de taipa e a chapa interna da fôrma), assim é preciso entender e relembrar a Figura 56, aplicada ao modelo estrutural genérico, apresentados em perspectiva interna (Figura 65), externa (Figura 66) e lateral (Figura 67).

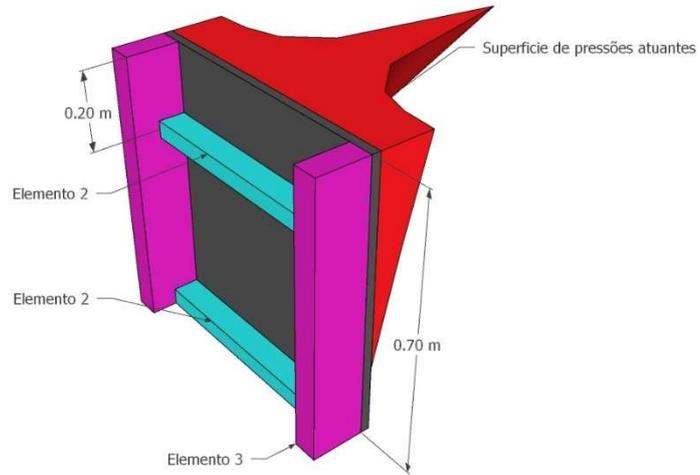
Considerando que as pressões fossem aplicadas em uma área de (100x50cm), que é a distância entre os elementos 3 (100cm) e os elementos 2 (50 cm), é possível observar que a partir da profundidade de 50 cm, as pressões passam a ser insignificantes. Isso mostra como a forma marroquina é empiricamente bem resolvida, já que sua altura normalmente é de aproximadamente 50 ~ 60cm.

Figura 65 - Perspectiva interna da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural



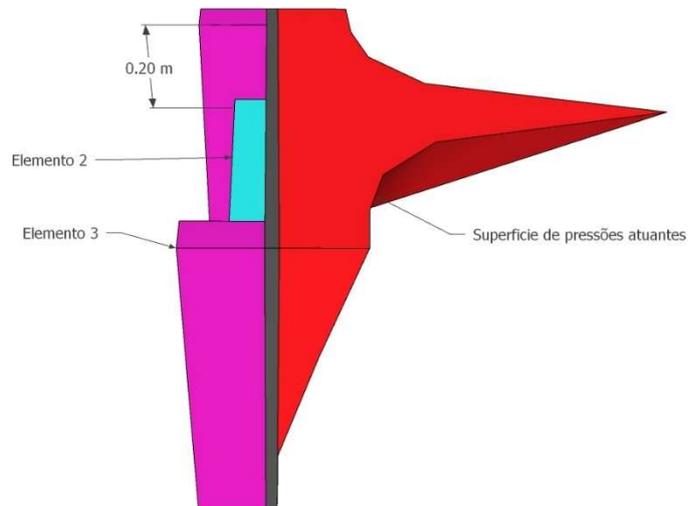
Fonte: Autor (2023)

Figura 66 - Perspectiva externa da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural



Fonte: Autor (2023)

Figura 67 - Perspectiva lateral da superfície de pressões com efeito do compactador aplicado ao modelo estrutural

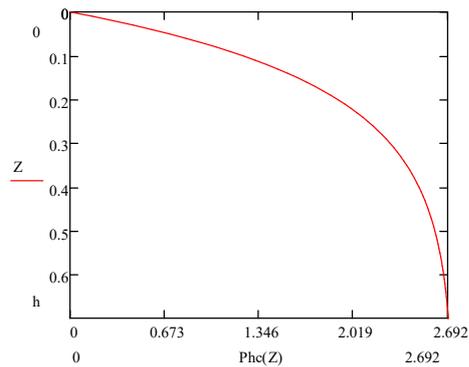


Fonte: Autor (2023)

As pressões apresentadas são oriundas do efeito do compactador atuando na forma, sendo necessário realizar a sobreposição destas com as pressões oriundas do solo sem o efeito do compactador.

O gráfico e resultados obtidos desta formulação são apresentados a seguir (Figura 68).

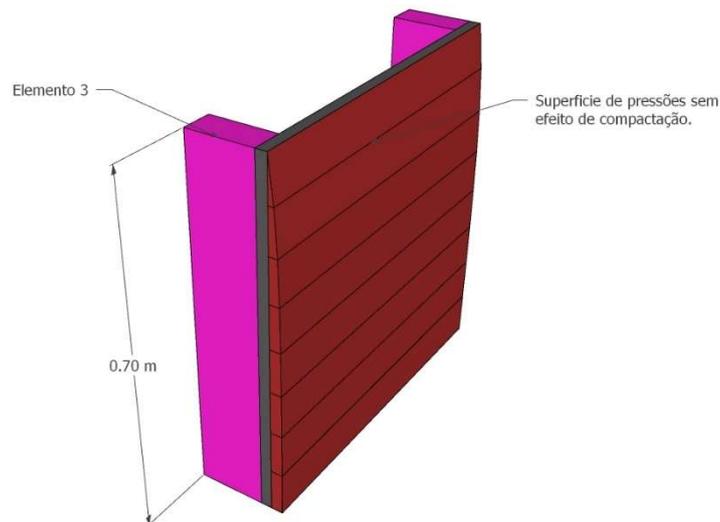
Figura 68. Distribuição das pressões horizontais pela fórmula de Calil e Cheung (2007) sem efeito da compactação.



Fonte: Autor (2023)

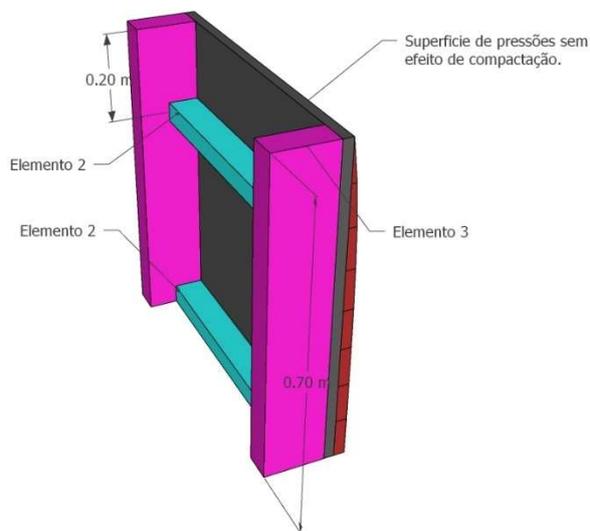
Abaixo na Figura 69 e Figura 70 são apresentadas perspectivas da distribuição de pressões sem o efeito de compactação para uma profundidade de aproximadamente 70 cm.

Figura 69 – Perspectiva interna da superfície de pressões sem o efeito do compactador para o elemento 2.



Fonte: Autor (2023)

Figura 70 - Perspectiva externa da superfície de pressões sem o efeito do compactador.

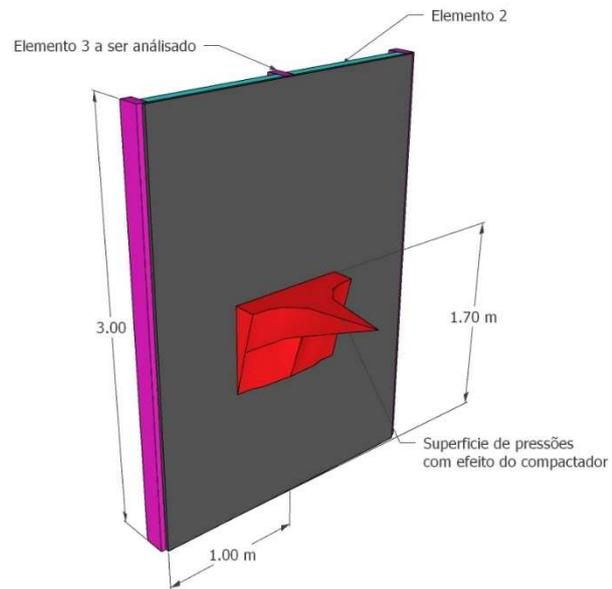


4.5.2 Superfície de pressões atuantes no elemento 3 (montante).

A superfície de pressões atuantes no elemento 3 (montante) será a mesma do elemento 2, neste caso sendo apenas reposicionada, para que se obtenha a pior situação para o elemento 3. Obviamente que o modelo estrutural influencia nesta pior situação. E no caso em questão para o posicionamento apresentado, foi considerado um montante travado apenas em sua base e no seu topo, o que pode ser considerada uma situação intermediária (a pior situação seria um travamento somente na base). E quanto mais travamentos intermediários forem inseridos menos crítica será a situação para este elemento.

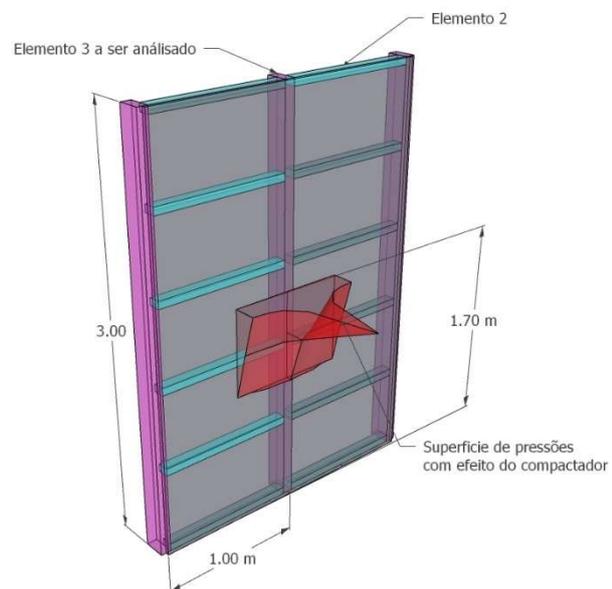
Para esta situação (travamento apenas inferior e superior) a pior situação dá-se com a aplicação da superfície de pressões 20 cm acima do meio do elemento 3 Figura 71 e Figura 72.

Figura 71 - Vista opaca da pior situação da distribuição de pressões para o "elemento 3".



Fonte: Autor (2023)

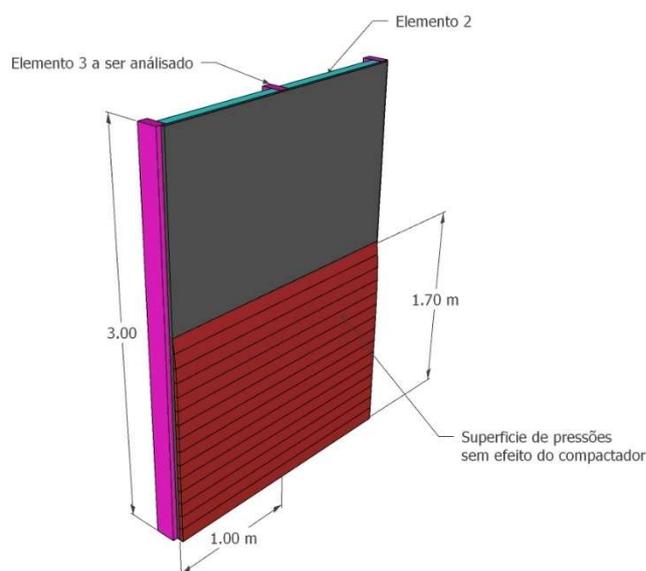
Figura 72 - Vista translúcida da pior situação da distribuição de pressões para o "elemento 3".



Fonte: Autor (2023)

Assim como para o elemento 2 (barra) também há de se considerar os efeitos do peso do solo sem o efeito do compactador, para o elemento 3 (montante) também se faz esta consideração (Figura 73).

Figura 73 - Perspectiva interna da superfície de pressões sem o efeito do compactador para o elemento 23



4.5.3 Distribuição de pressão para os elementos 2 e 3 do modelo de fôrma.

Como simplificação, as superfícies de pressões encontradas e apresentadas anteriormente, podem ser divididas em faixas verticais e horizontais de dimensões pré-definidas (quanto menor estas dimensões mais próximas da realidade ficará a simplificação). Tais faixas podem ser substituídas por geometrias regulares de volume semelhante (a qual resultará em uma nova altura equivalente, e seu valor corresponderá à pressão a ser considerada). A demonstração passo a passo será demonstrada em uma publicação à parte. Trata-se de uma simplificação de cálculo e pode ser feita de forma mais elaborada com utilização de softwares que utilizem a metodologia dos elementos finitos.

Com as superfícies apresentadas anteriormente é possível determinar os valores de cortante, momentos e tensões normais aplicadas a cada um dos elementos de uma fôrma. O posicionamento destas superfícies deve ser estudado para a pior situação, que vai depender do modelo estrutural e das particularidades de cada fôrma.

5 CONCLUSÕES

Sobre o objetivo específico 1 (“obter experimentalmente as pressões horizontais atuantes na fôrma de taipa”), as conclusões são:

- Os resultados obtidos no experimento com o molde indeformável foram bem-sucedidos, dando indícios de que as três hipóteses apresentadas na Revisão de literatura são plausíveis;

Sobre o objetivo específico 2 (“definir os esforços atuantes nas fôrmas durante a execução de uma parede de taipa;”), as conclusões são:

- Os valores máximos encontrados não podem ser considerados atuantes na fôrma de maneira distribuída, o que levaria a um superdimensionamento. A distribuição de pressões ao longo da fôrma ficou evidenciada na Figura 54;
- Para esta mesma condição de trabalho do experimento (mistura com características semelhantes e compactador com peso e frequência semelhantes) pode-se afirmar que os diagrama de pressões atuante na fôrma se comporta de maneira análoga às indicadas na Figura 54;
- A utilização de sensores conforme proposto em Materiais e métodos apresentou comportamento dentro do esperado e pode ser um instrumento de verificação e determinação de tensões atuantes para diferentes tipos de materiais de preenchimento (argila, areia, solo-cimento, pedregulho);
- A distribuição de esforço horizontal apresentada no item 4.3, Figura 54 demonstrou similaridade de comportamento entre este ensaio e as curvas propostas por Ingold (1979) e Calil e Cheung (2007) segundo a formulação de

Janssen (1895), o que indica que para as mesmas condições deste ensaio, as pressões atuantes podem ser obtidas através destas formulações;

Sobre o objetivo específico 3 (“determinar a altura da taipa, a partir da qual o compactador deixa de influenciar nos esforços horizontais atuantes na fôrma de taipa”):

- Os resultados obtidos no experimento com o molde indeformável foram bem-sucedidos, dando indícios à medida que as camadas vão sendo compactadas, há uma altura limite em que a pressão horizontal atinge seu valor máximo e a fôrma passa então a não sofrer grande influência do efeito de compactação
- De acordo com a Figura 59, a relação P_h/P_v passa a ser irrelevante a partir de 50 cm de altura de camada de mistura compactada, abaixo do compactador, o que vai de encontro com o empirismo, já que fôrmas marroquinas possuem em média 50 cm de altura;
- Pela análise da Figura 62, pode-se observar também que a partir da camada 5 (52 cm de altura a partir do fundo), a pressão horizontal atuante é praticamente constante no nível do sensor $h=10\text{cm}$;

Sobre o objetivo específico 4 (“Analisar os resultados encontrados aplicados a uma tipologia de fôrma.”):

- Com base nos resultados aplicados a um esquema genérico, é possível dizer que cada um dos elementos que compõe um sistema de fôrma pode ser analisado e dimensionado individualmente, de acordo com a pior situação ao qual estará submetido. E enfatiza-se que os critérios de dimensionamento vão depender do sistema estrutural do conjunto de fôrma adotado por cada construtor.
- Os resultados apresentados são válidos para a frequência e carga do compactador utilizado no experimento e a extrapolação ou não destes resultados para outros tipos de compactadores dependerão de validação através de mais ensaios.

Para futuros trabalhos são dadas as seguintes proposições:

- Repetição dos ensaios com alteração das placas de laminado compensado por placas de laminado compensado plastificado, ou outros materiais com diferentes rugosidades;
- Repetição dos ensaios com alteração do compactador e possível validação do ábaco apresentado na Figura 59;
- Repetição dos ensaios com alteração do tipo de mistura utilizados;
- Repetição dos ensaios com utilização de aglomerantes;
- Repetição dos ensaios com alteração da espessura da parede;
- Aplicação dos resultados encontrados, em planilha eletrônica para facilitar o cálculo dos elementos de um sistema de fôrma;
- Projeto, cálculo e detalhamento de um sistema de fôrmas;
- Utilização dos sensores e equipamentos de leitura na execução de uma parede real.
- Demonstração passo a passo da simplificação das superfícies de pressão.
- Cálculo individualizado e passo a passo de um modelo específico de forma.
- Utilização de software de elementos finitos (PLAXIS, FLAC 3D, ANSYS MECHANIAL, entre outros) para validação dos resultados apresentados referente às pressões atuantes horizontalmente.
- Utilização de software de elementos finitos para validação da distribuição de pressões no modelo de fôrma.
- Verificação do ângulo de atrito do solo com a parede do molde indeformável através do Jenike Shear Tester.

6 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 15696 - Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 17014 - Taipa de pilão - Requisitos, procedimentos e controle**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016

Associação Brasileira de Norma Técnica. **NBR 7182 - Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 347 - GUIDE TO FORMWORK FOR CONCRETE**. Farmington Hills, MI American Concrete Institute (ACI), 2004.

APA - THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Concrete Forming: Design/Construction Guide** Tacoma The Engineered Wood Association, 2012.

CHEN, T.-J.; FANG, Y.-S. Earth Pressure due to Vibratory Compaction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 134, n. 4, p. 437–444, 2008.

CHEUNG, A. B. **Modelos Estocástico de pressões de produtos armazenados para estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.

CID, J.; MAZARRÓN, F. R.; CAÑAS, I. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. **Informes de la Construcción**, v. 63, n. 523, p. 159–169, 2011.

DEZEEN. **Waugh Thistleton's cemetery has rammed-earth walls and colonnade**. Disponível em: <<https://www.dezeen.com/2017/11/22/waugh-thistleton-bushey-cemetery-rammed-earth-colonnade-extension-cemetery-hertfordshire-uk/>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

DOWNTON, P. **Australia Guide to Environmentally sustainable homes**. Disponível em: <<https://www.yourhome.gov.au/materials/rammed-earth>>. Acesso em 23 jan. 2021.

DUNCAN, B. J. M. et al. Estimation Earth Pressures Due to Compaction. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, n. 12, p. 1833–1847, 1992.

DUNCAN, J. M.; SEED, R. B. **Compaction-induced earth pressures under K 0-conditions**.

Journal of Geotechnical Engineering, v. 112, n. 1, p. 1-22, 1986.

EASTON, D. **The rammed earth house - Revised Edition**. Primeira ed. White River Junction: Chelsea Green Publishing Company, 2007.

GERSCOVICH, D.; SARAMAGO, R.; DANZIGER, B.R. **Contenções: teoria e aplicações em obras**. Oficina de Textos, 2019.

- EHRLICH, M.; BECKER, L.; **Soil reinforcement interaction**. In: **Reinforced soil walls and slopes- design and construction**. Oficina de textos. p.23-46, 2010.

EHRLICH, M.; MITCHELL, J.K.; **Working stress design method for reinforced soil wall**, Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n. 04, p. 625-645, 1994.

HALL, M. R.; LINDSAY, R.; KRAYENHOFF, M. (EDS.). Modern rammed earth construction techniques. In: **Modern earth Buildings - Material, engeneering, construction and applications**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2012a. p. 364–384.

HALL, M. R.; LINDSAY, R.; KRAYENHOFF, M. **Modern earth buildings**. Primeira ed. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012b.

IUNES, ISABELA M. C.; MILANI, A. P. DA S. ESTUDO DAPRESSÃO DO SOLO NO SISTEMA DE FÔRMAS DURANTE A EXECUÇÃO DE TAIPA DE PILÃO. **EURO ELECS 2019**, p. 253–259, maio 2019a.

IUNES, I. M. C.; MILANI, A. P. DA S. **Estudo da pressão no solo no sistema de fôrmas durante a execução de taipa de pilão**. Euro elecs 2019. **Anais...**Santa Fé y Praná: maio 2019b

KRAHN, T. **Essential Rammed Earth Constrution: The Complete step-by-step guide**. Gabriola Island: New Society, 2019.

KRAYENHOFF, M. **FORMWORK AND METHOD FOR CONSTRUCTING RAMMED EARTH WALLS** Canada, 2008.

LEHM TON ERDE. **Lehm Ton Erde Baukunst GmbH**. Disponível em: <<https://www.lehmtonerde.at/en/earth/earth.php?aID=48>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

LOPES, C. A.; PEREIRA, D. P. **RELATÓRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA EDITAL PIBIC / PIBIC – AF / PIBITI CNPq / UFMS E VOLUNTÁRIOS 2016 APRIMORAMENTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO DE TAIPA MECANIZADA** Camila Ajiki Lopes Colaboração : Delis Paulo Pereira Vigência : Julho de 2016 a julho de 2017 Agos. Campo Grande: [s.n.].

MANIATIDIS, V.; WALKER, P. **A review of rammed earth construction**. Bath: Natural Building

Technology Group, 2003.

MARANHÃO, G. M. **Fôrmas para Concreto: Subsídios para a Otimização do Projeto Segundo a NBR7190/97**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2000.

SENÇO, WLASTERMILER DE. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1, 2ª edição ampliada**. São Paulo: Pini, 2007.

STANDARD NEW ZELAND. **New Zealand Engineering design of earth buildings - NZS 4297:1998**. New Zeland, 1998.

NEW MEXICO ADMINISTRATIVE CODE. **NMAC 14.7.4: New Mexico earthen building materials code**. New Mexico: NMAC, 2015

NOE info. **05/2011 - Betonschalung auf Abwegen**, maio 2011.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, n. 1, p. 512–519, 2011.

PEURIFOY, R. L.; OBERLENDER, G. D. **Formwork for Concrete Structures**. Fourth ed. [s.l.] Mc Graw-Hill, 2012.

RAMMED EARTH ARTISAN, **Rammed Earth Construction Method** Disponível em: <<https://rammedearthartisan.ca/what-is-rammed-earth%3F>>. Acesso em: 08/02/2023.

RAMMED EARTH AUSTRALIA PTY LTD. **Rammed Earth Australia PTY LTD**. Disponível em: <<https://www.rammedearthaustralia.com.au/formwork.htm>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

RAMOS, R. B. M. N.; YUBA, A. N. **ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE CONTEÚDO PARA DISCIPLINA DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA**. III Encuentro Latinoamericano y Europeo sobre Edificaciones y Comunicades Sostenibles. **Anais...**Santa Fé y Praná: 2019

SAMUEL, D. (coord). **Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue**. Bauge, 2018.

SARAMAGO, R. P. **Estudo da influência da compactação no comportamento de muros de solo reforçado com a utilização de modelos físicos**. Diss. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

SUSTENTARQUI. **Taipa de pilão: O que é? Como fazer? Quais são suas vantagens?** Disponível em: <<https://sustentarqui.com.br/taipa-de-pilao-o-que-e-como-fazer-quais-sao-suas-vantagens/>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

TAHARA, C. S.; PASTA, A. ESTUDO BIBLIOMÉTRICO ACERCA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA ENVOLVENDO O ESTUDO DAS NOVAS METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **REVISTA DE EXTENSÃO E INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNISOCIESC**, v. 1, n. 5(2), p. 20–36, 2020.

VOGUE. **Taipa de pilão: 6 projetos de arquitetura que aplicam a técnica - Casa Vogue | Arquitetura.** Disponível em: <<https://casavogue.globo.com/Arquitetura/noticia/2019/09/taipa-de-pilao-6-projetos-de-arquitetura-que-aplicam-tecnica.html>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

ZRS ARCHITEKEN INGENIEURE. **ZRS Architekten Ingenieure.** Disponível em: <<https://www.zrs.berlin/earth-building/>>. Acesso em: 17 jan. 2021.