

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

FRANCISCO MACIEL BARBOSA DE ALENCAR

**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMAS DE MADEIRA PARA PILARES DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Cajazeiras-PB

2022

FRANCISCO MACIEL BARBOSA DE ALENCAR

**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMAS DE MADEIRA PARA PILARES DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação da Prof. Me. Natalia Cibely Bezerra Santana Vêras.

Cajazeiras-PB

2022

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Suellen Conceição Ribeiro CRB-2218

A368d Alencar, Francisco Maciel Barbosa de

Dimensionamento de fôrmas de madeira para pilares de concreto armado: estudo de caso / Francisco Maciel Barbosa de Alencar. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

56f.:il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

Orientador(a): Prof. Me. Natalia Cibely Bezerra Santana Vêras.

1. Concreto Armado. 2. Fôrmas de madeira. 3. Pressão de Concreto.

I. Alencar, Francisco Maciel Barbosa de. II. Título.

CDU: 624 A368d

FRANCISCO MACIEL BARBOSA DE ALENCAR

**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMAS DE MADEIRA PARA PILARES DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 22 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Natalia Cibely Bezerra Santana Vêras

Natalia Cibely Bezerra Santana Vêras – IFPB-*Campus* Catolé do Rocha

Orientadora

José Lucas Pessoa de Oliveira

José Lucas Pessoa de Oliveira – Engenheiro Civil

Examinador 1

Iarly Vanderlei da Silveira

Iarly Vanderlei da Silveira – IFPB-*Campus* Cajazeiras

Examinador 2

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional.

Aos amigos e professores que me ajudaram durante toda a minha formação.

Enfim, a todos, que tornaram este caminho mais fácil de ser percorrido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus pelo dom da vida e por ter me dado saúde, força e coragem para superar todas as adversidades.

Aos meus amados pais, Maria e Jozimar (Mazim), pela vida, amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos meus irmãos Marlone e Marcondes, que sempre me apoiaram e me aplaudiram diante das minhas conquistas, e também estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, dando exemplo de companheirismo e amizade.

A meus tios, tias, primos e primas que me ampararam e incentivaram.

À minha Madrinha Aurinete, que também fez parte dessa caminhada, sempre me dando forças e jamais esquecendo do significado do apadrinhamento.

Aos meus familiares que residem na paraíba, em especial a Raimunda (Mundinha), Odair e Clenilda, pelo suporte e receptibilidade, meu eterno obrigado.

A meus companheiros de apartamento, Cícero, Iarly, Augusto, Lucca e Iago, que estiveram ao meu lado em momentos difíceis e me ajudaram a superar os desafios da vida.

Aos amigos de turma, que me ajudaram a chegar até aqui, que me auxiliaram nessa caminhada, sou grato por todo o aprendizado e ainda mais pela amizade de cada um.

À minha orientadora, Natalia Cibely Bezerra Santana Vêras por ter aceitado a me orientar e me ajudar nessa jornada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, pela oportunidade de ampliar meu conhecimento.

Aos professores e funcionários, que estiveram comigo, me auxiliando e ajudando a conquistar esse objetivo.

E a todos que me apoiaram, direta ou indiretamente na minha formação, o meu eterno agradecimento a vocês.

RESUMO

As empresas do ramo da construção civil estão sempre buscando novas tecnologias e métodos para redução de prazos e custos. Assim, para execução das mais variadas obras em concreto armado, é necessário o uso de estruturas provisórias para moldar e sustentar o concreto até que se torne autoportante. Além disso, devem ser dimensionadas para atender às solicitações específicas de execução para garantir a modelagem projetada. Porém, é comum nos canteiros de obras a predominância do dimensionamento dessas fôrmas baseado em métodos empíricos, muitas vezes sendo superdimensionadas ou subdimensionadas, ocasionando prejuízos às empresas. Pretendendo aprimorar o dimensionamento de fôrmas para pilares, nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo de cálculo baseado em métodos simplificados de cálculo e otimizado por meio de fatores de correções para dimensionar elementos e espaçamentos necessários para montagem das fôrmas. Ademais, os resultados obtidos pelo modelo de cálculo foram comparados ao dimensionamento encontrado em cinco obras vistoriadas. Após as verificações, concluiu-se que quatro das cinco obras poderiam ter reduções significativas dos travamentos, o que traria reduções dos custos e prazos, enquanto que uma das obras foi subdimensionada e as fôrmas não resistiram a pressão que lhes foi imposta.

Palavras-chave: dimensionamento de fôrmas; fôrmas de madeira; pressão do concreto.

ABSTRACT

Companies in the construction industry are always looking for new technologies and methods to reduce deadlines and costs. Thus, for the execution of the most varied works in reinforced concrete, it is necessary to use temporary structures to mold and support the concrete until it becomes self-supporting. In addition, they must be scaled to meet specific execution requests to ensure the designed modeling. However, it is common in construction sites the predominance of the dimensioning of these forms based on empirical methods, often being oversized or undersized, causing losses to companies. Intending to improve the dimensioning of formwork for pillars, in this research a calculation model was developed based on simplified methods of calculation and optimized by means of correction factors to dimension elements and spacing necessary for assembling the formwork. Furthermore, the results obtained by the calculation model were compared to the design found in five works surveyed. After the verifications, it was concluded that four of the five works could have significant reductions in blocking, which would bring reductions in costs and deadlines, while one of the works was undersized and the forms did not withstand the pressure imposed on them.

Keywords: sizing of forms; wooden forms; concrete pressure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -Montagem dos sistemas de fôrmas.	19
Figura 2 – Subsistema de fôrmas para lajes.	20
Figura 3 – Subsistema de fôrmas para pilares.	21
Figura 4 – Subsistema de fôrmas para vigas.	22
Figura 5 – Tipos de chapas compensadas.....	23
Figura 6 – Barras de ancoragem.	24
Figura 7 –Demonstrativo de um sistema de fôrma para pilar.....	25
Figura 8 – Ilustração de deslocamento devido à aplicação de carga.	29
Figura 9 – Diagrama para escolha da pressão do concreto.....	32
Figura 10 – Simplificação do carregamento.....	33
Figura 11 – Diagrama de pressões do concreto.....	38
Figura 12 – Roteiro de cálculo.	41
Figura 13 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 1.....	42
Figura 14 – Laterais de algumas fôrmas com sarrafos de enrijecimento da obra 1.	43
Figura 15 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 2.....	44
Figura 16 – Sistema de fôrma pronto da obra 2.	45
Figura 17 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 3.....	46
Figura 18 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 4.....	47
Figura 19 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 5.....	48
Figura 20 – Redução dos travamentos.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Subsistemas gerais de fôrmas, componentes e elementos.....	22
Tabela 2 – Classes de umidade para as madeiras.	25
Tabela 3 –Valores para escolha do $k_{mod,1}$	26
Tabela 4 – Valores para escolha do $k_{mod,2}$	26
Tabela 5 – Classes de consistência.	31
Tabela 6 – Resistência à flexão estática do compensado de Pinus Brasileiro.....	34
Tabela 7 – Dados da obra 1.	42
Tabela 8 – Dados da obra 2.	43
Tabela 9 – Dados da obra 3.	45
Tabela 10 – Dados da obra 4.	46
Tabela 11 – Dados da obra 5.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

MOE – Módulo de elasticidade

MOR – Módulo de ruptura

NBR – Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

b - Largura da seção transversal de viga

e_{comp} - Espessura da chapa compensada

E - Módulo de elasticidade

$E_{c0, m}$ - Módulo de elasticidade médio na compressão normal às fibras

f_{cd} - tensão característica do material e o módulo de resistência w

w - Módulo de resistência

f_{c0k_chapa} - Resistência característica à compressão paralela às fibras da chapa

f_{c0m_chapa} - Resistência média à compressão paralela às fibras da chapa

f_{c0d_chapa} - Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da chapa

f_{c90d_chapa} - Resistência de cálculo à compressão perpendicular às fibras da chapa

f_{c90m_chapa} - Resistência média à compressão perpendicular às fibras da chapa

F_d - Ação atuante de cálculo

$F_{Q1, k}$ - Valor característico para ação variável principal

$F_{Qj, k}$ - Valor característico para ação variável secundária

$FC_{u, máx}$ - Fator de correção para deslocamentos

$FC_{\sigma, máx}$ - Fator de correção para tensões

h - Altura do painel da fôrma

h_s - Altura hidrostática

I - Momento de inércia da seção de um elemento

$I_{compensado}$ - Momento de inércia do compensado

$I_{sarrafo}$ - Momento de inércia do sarrafo de enrijecimento

$I_{estruturado}$ - Momento de inércia do compensado estruturado

k_{mod} - Coeficiente de modificação

$k_{mod,1}$ - Coeficiente parcial de modificação 1

$k_{mod,2}$ - Coeficiente parcial de modificação 2

$k_{mod,3}$ - Coeficiente parcial de modificação 3

k_{mod_chapa} - Coeficiente de modificação da chapa

L - Comprimento/ Distância entre apoios

$larg_{sar}$ - Largura do sarrafo de enrijecimento

$larg_{total_comp}$ - Largura total do compensado do lado maior do pilar

$L_{máx}$ - Distância de espaçamento

L_{maior_pilar} - Largura do pilar

$M_{máx}$ - Momento fletor máximo

n - Número de sarrafos de enrijecimento

P_b - Pressão do concreto fluido

q - Força atuante de cálculo linear

R_d - Resistência de cálculo

u_{lim} - Deformação limite de um elemento

$u_{máx}$ - Deslocamento máximo de uma viga biapoiada

u_{total} - Máxima deformação ocorrida em um elemento

v_b - Velocidade de concretagem

w - Módulo de resistência

X_d - Valor de cálculo para propriedades da madeira

X_{ik} - Valor característico para propriedades da madeira para diversos esforços

w - Módulo de resistência

γ - Peso específico do concreto

γ_Q - Coeficiente de majoração de ações

γ_w - Coeficiente de minoração das propriedades da madeira

Ψ_{0j} - Fatores de combinação e utilização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	SISTEMA DE FÔRMAS PARA OBRAS CONVENCIONAIS.....	18
3.1.1	Divisão do sistema de fôrmas convencionais de madeira.....	19
3.1.2	Subsistema de fôrmas usado em pilares.....	23
3.2	CRITÉRIOS DA ABNT NBR 7190:1997 PARA FÔRMA DE MADEIRA	25
3.3	CRITÉRIOS DA ABNT NBR 15696:2009	27
3.3.1	Projeto para fabricação de fôrmas.....	27
3.3.2	Ações atuantes nas fôrmas	27
3.3.3	Métodos de cálculo	27
3.3.4	Execução de estrutura de fôrmas e escoramentos	29
3.3.5	Parâmetros de cálculo do empuxo do concreto nas fôrmas verticais	30
3.4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE CÁLCULO.....	32
3.4.1	Método para desenvolvimento do modelo de cálculo.....	32
3.4.2	Critérios para aplicação do modelo.....	33
3.4.3	Desenvolvimento final do modelo de cálculo simplificado.....	36
3.4.4	Otimização do método simplificado	38
4	METODOLOGIA	40
4.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	40
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS OBRAS	40
4.3	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO.....	40
5	RESULTADOS E ANÁLISES	42

6	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – PLANILHA ELETRÔNICA	52
	ANEXO A – PROPRIEDADES DA MADEIRA DOS SARRAFOS.....	55

1 INTRODUÇÃO

As fôrmas são projetadas e produzidas para moldar a geometria da obra. Dessa maneira, são estruturas provisórias e devem ser dimensionadas para atender às solicitações específicas de execução para garantir a modelagem projetada.

Dessa maneira, conforme Salgado (2014), é necessário que as fôrmas atendam aos preceitos como, execução fiel ao projeto, resistência adequada às cargas e que a rugosidade superficial atenda o projeto, como também prever os reaproveitamentos na mesma obra, visto que há dificuldades no trabalho de desforma.

Porém, é trivial nos canteiros de obras a predominância da montagem dessas fôrmas baseada em métodos empíricos. Isso pode acarretar prejuízos financeiros e estruturais, visto que, segundo Peurifoy e Oberlender (2010), os sistemas de fôrmas representam o maior custo na execução de estruturas de concreto armado em geral.

O tema dimensionamento de fôrmas é pouco ministrado nas universidades, fazendo com que os discentes entrem para o mercado de trabalho com uma lacuna em relação ao tema e acabam aderindo à montagem instruída por carpinteiros e mestres de obra baseados na experiência, isso pode trazer prejuízos à obra. Outro aspecto relevante é a não clareza de informações das normas técnicas que regem o dimensionamento.

Diante do exposto, este estudo se justifica, pois tem o intuito de esclarecer informações de pesquisas e normas referentes ao tema, com o intuito de sintetizar e automatizar os cálculos para um correto dimensionamento respeitando a norma. Segundo Müller (2016) de todos os custos de uma obra, as fôrmas possuem valores expressivos, assim se o sistema for estudado e adaptado ao mercado de forma prática será possível uma melhora no custo das obras e consequentemente um maior lucro.

O capítulo 2 deste trabalho apresenta o objetivo principal que a criação de um modelo automatizado de cálculo para o dimensionamento de fôrmas de madeira para execução de pilares de concreto armado, como também os objetivos específicos para que se possa alcançar o principal. O capítulo 3 aborda as literaturas que respaldam o modelo de cálculo criado no presente trabalho. O capítulo 4 apresenta de forma detalhada a criação do modelo de cálculo e o capítulo 5 aborda a metodologia utilizada neste trabalho, enquanto o capítulo 6 expõe os resultados obtidos por meio de gráficos e ilustrações, como também realiza uma análise dos

resultados obtidos e por último o capítulo 7 traz todas as conclusões obtidas por meio da pesquisa realizada.

2 OBJETIVOS

Nesse capítulo serão apresentados os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

Criar um modelo automatizado de cálculo para o dimensionamento de fôrmas de madeira para execução de pilares.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão teórica sobre o dimensionamento do sistema de fôrmas;
- Apresentar o roteiro de cálculo para criação do modelo;
- Desenvolver o modelo automatizado por meio de planilhas eletrônicas;
- Comparar os resultados do modelo em relação ao dimensionamento encontrado em cinco obras.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados concepções e conceitos sobre os sistemas de fôrmas convencionais utilizados nas estruturas em concreto armado, com destaque para dimensionamentos do sistema de fôrmas de madeira para pilares.

3.1 SISTEMA DE FÔRMAS PARA OBRAS CONVENCIONAIS

Segundo Müller (2016), as fôrmas servem para moldar e dar geometria ao concreto armado, com uma função básica de suportar o concreto fresco até que ele possa se autossuportar.

De acordo com Maranhão (2000), o sistema de fôrmas é o conjunto de fôrmas utilizadas para modelar a estrutura de concreto armado de um edifício.

A ABNT NBR 15696:2009, define fôrmas como estruturas não permanentes utilizadas para suportar e moldar o concreto fresco, em que suportam as pressões que lhe são impostas, até que o concreto se autossuporte.

Segundo Azevedo (2008), a fôrma possui uma particularidade que é iniciar todo o processo construtivo, assim, passa a ser a referência para as demais etapas, estabelecendo e padronizando a exigência para a obra. O autor ainda destaca que o desempenho do sistema de fôrma exerce forte influência no prazo, qualidade e custo do empreendimento.

Dessa forma, é notória a importância do tema em questão para as estruturas de concreto. No presente trabalho, será estudado o sistema convencional de madeira, sendo utilizadas chapas compensadas plastificadas para fabricação dos painéis. A posteriori, são apresentadas algumas particularidades mais importantes dos componentes dos sistemas de formas de madeira. A Figura 1 apresenta a montagem dos sistemas de fôrmas em execução.

Figura 1 -Montagem dos sistemas de fôrmas.



Fonte: Oliveira, 2017.

3.1.1 Divisão do sistema de fôrmas convencionais de madeira

Segundo Fajersztajn (1992), o sistema de fôrmas é dividido em subsistemas.

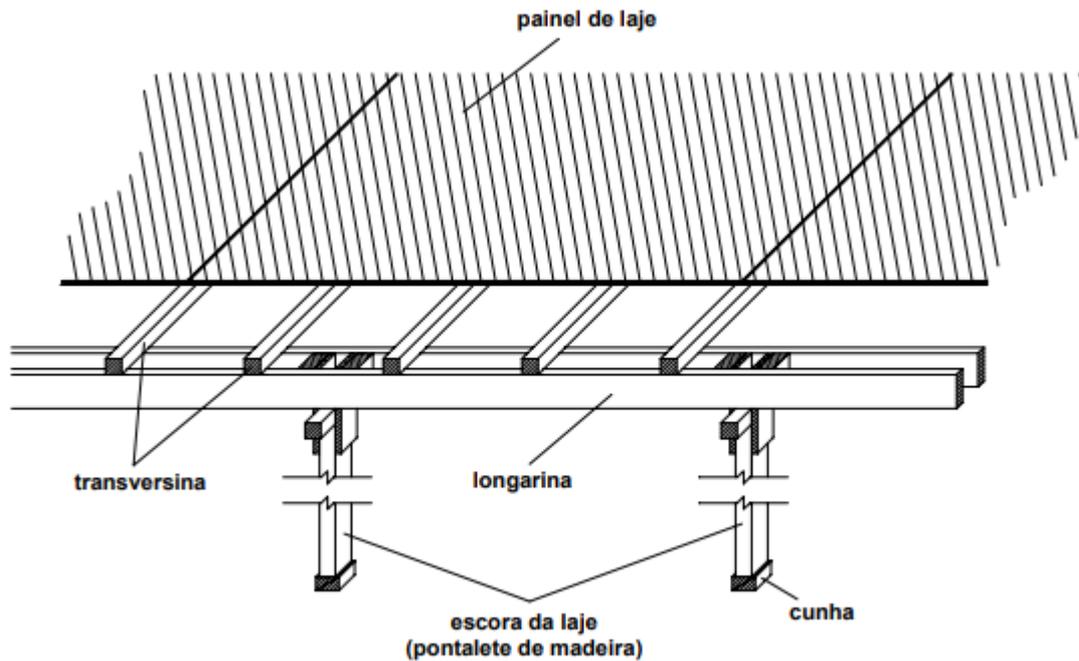
O subsistema de fôrma é definido por Maranhão (2000), como sendo o conjunto das fôrmas usadas para partes específicas da estrutura de concreto armado. Logo, há um subsistema para lajes, pilares e vigas, conforme a função e característica de cada uma. Ainda segundo o autor, os elementos são conjuntos de peças que possuem determinadas funções no subsistema de fôrmas.

Já o escoramento conforme Pfeil (1987), são elementos utilizados para suportar o concreto fresco e os demais componentes necessários para montagem do sistema de fôrmas.

De acordo com Maranhão (2000), os painéis de laje são apoiados sobre as transversinas que são apoiadas nas longarinas que assim transmitem as cargas para o escoramento. Todos esses elementos descritos fazem parte do subsistema de fôrma para laje.

A posteriori, é exibido na Figura 2 um subsistema de lajes conforme retratado anteriormente.

Figura 2 – Subsistema de fôrmas para lajes.



Fonte: Maranhão, 2000.

De acordo com Oliveira (2017), o subsistema de pilar é composto por painéis, gravatas, gualhos, sarrafos para rigidez da chapa de compensado, os tensores ou tirantes e acessórios para nivelamento. Os gualhos têm como principal função locar a fôrma e suportar a pressão na base do pilar. Os painéis geralmente são feitos de madeira compensada e enrijecidos com sarrafos. As gravatas fazem parte do travamento da fôrma e podem ser metálicas ou de madeira, normalmente para as de madeira são utilizados sarrafos, caibros ou barrotes. A escolha de qual usar vai depender dos cálculos para cada situação. Na Figura 3 foram utilizados caibros e tirantes para o travamento, onde os tensores são de aço e usados para travar a fôrma do menor lado do pilar. Para o nivelamento geralmente são utilizados apumadores que podem ser metálicos ou de madeira.

A Figura 3 mostra um subsistema de pilares de acordo com o retratado anteriormente.

Figura 3 – Subsistema de fôrmas para pilares.



Fonte: Oliveira, 2017.

Conforme Maranhão (2000), de maneira sucinta, o subsistema de vigas possui painéis de face e fundo da viga, sarrafos, garfos e acessórios para nivelamento. Os painéis, tanto os de face quanto os de fundo, normalmente, são confeccionados em chapas de madeira compensada. Os sarrafos servem como reforço para os painéis laterais resistirem aos esforços horizontais da concretagem e também como apoio do molde da viga nos garfos, que trabalham como escora para os painéis de fundo de viga e como travamento para os laterais, evitando deformações horizontais excessivas. Ademais, são eles que transmitem os esforços verticais para os pontos de apoio na superfície.

Na Figura 4 é ilustrado um subsistema de vigas de acordo com o retratado anteriormente.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos subsistemas, de seus elementos e componentes.

Figura 4 – Subsistema de fôrmas para vigas.



Fonte: Oliveira, 2017.

Tabela 1 – Subsistemas gerais de fôrmas, componentes e elementos.

SISTEMA DE FÔRMAS		
SUBSISTEMAS	ELEMENTOS	COMPONENTES
LAJES	MOLDE	Painéis
	ESTRUTURA DO MOLDE	Transversinas e longarinas
	ESCORAMENTO	Pontaletes de madeira/ escoras metálicas/ travamentos/ torres/ contraventamentos
	ACESSÓRIOS	Para estruturação e nivelamento
VIGAS	MOLDE	Painéis de face e fundo
	ESTRUTURA DO MOLDE	Sarrafos
	ESCORAMENTO	Garfos/ pontaletes de madeira/ escoras metálicas/ torres
	ACESSÓRIOS	Para estruturação e nivelamento
	MOLDE	Painéis laterais

PILARES	ESTRUTURA DO MOLDE	Guias de amarração/ gravatas
	ESCORAMENTO	Aprumadores/ mão francesa/ niveladores
	ACESSÓRIOS	Para estruturação e nivelamento

Fonte: Maranhão, 2000.

3.1.2 Subsistema de fôrmas usado em pilares

Na maioria das vezes, os sistemas de fôrmas de madeira utilizam elementos e componentes parecidos entre si, isso contribui para que a madeira seja o material de construção civil mais utilizado para fabricação dessas fôrmas. Além disso, possui elevado módulo de elasticidade e uma razoável resistência.

Em relação aos pilares, segundo Oliveira (2017), são produzidos com painéis de madeira compensada. Onde os painéis são fabricados com a junção de lâminas de madeira prensada em que a direção das fibras é posicionada em sentidos opostos entre si, promovendo ao painel de compensado uma grande resistência mecânica.

A Figura 5 exibe alguns tipos de chapas compensadas de madeira usuais na execução de estruturas de concreto armado convencionais.

Figura 5 – Tipos de chapas compensadas.



Fonte: Morikawa, 2003.

O compensado resinado possui uma resina fenólica líquida, o que o torna com uma qualidade inferior aos painéis compensados plastificados que possuem a proteção de um filme fenólico.

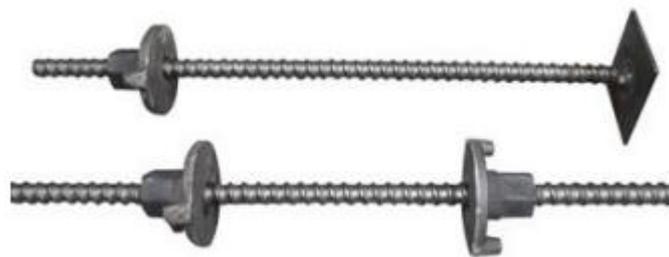
Hoje no mercado, são encontrados dois tamanhos padrões, que são as chapas de 1,10m x 2,20m e 1,22m x 2,44m. O que varia é a espessura da chapa e o número de lâminas, isso acarreta mudança do índice de reaproveitamento dos painéis.

Para Müller (2016), ao utilizar painéis de chapas de compensado, é conveniente reforçar as chapas a fim de obter um melhor rendimento pelo aumento da rigidez delas.

Para isso, conforme Oliveira (2017), são utilizadas peças de madeiras serradas, tais como, sarrafos, tábuas, ripas, pontaletes e caibros em diferentes medidas. Estas peças são posicionadas e fixadas junto às chapas compensadas enrijecendo e travando os painéis com o intuito que o sistema suporte as pressões do concreto durante e após a concretagem da estrutura. Além disso, é obrigatório que o concreto fresco mantenha as dimensões projetadas e executadas até o seu estado final. Ainda segundo o autor, é trivial nas montagens das fôrmas a utilização de pregos de diversos tamanhos e modelos, como os de cabeça dupla para facilitar a desforma.

Geralmente são usadas barras de ancoragem para o travamento das fôrmas dos pilares em relação ao lado menor, mas o travamento pode ser feito pelo próprio sarrafo de travamento também. A Figura 6 exemplifica como são essas barras.

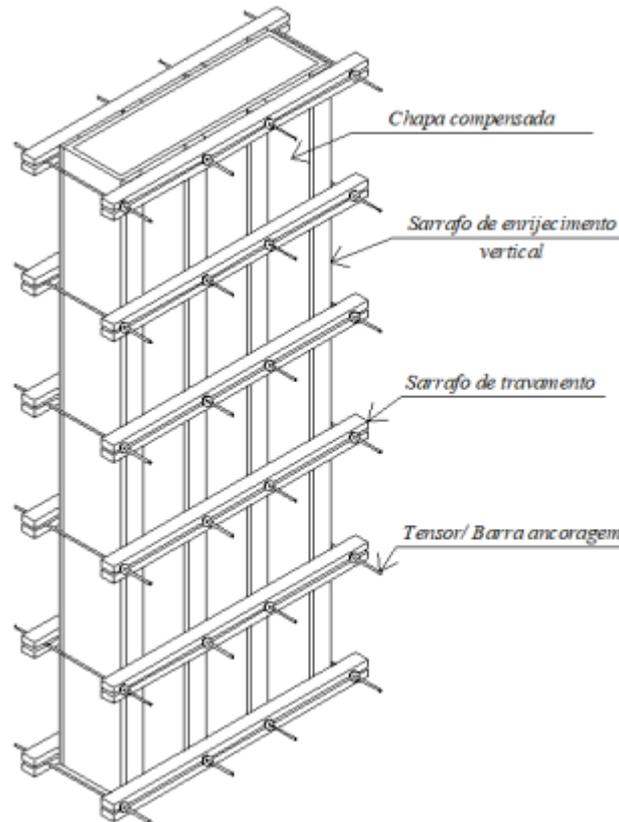
Figura 6 – Barras de ancoragem.



Fonte: Amcore, 2017.

A Figura 7 demonstra um sistema de fôrmas para pilares.

Figura 7 – Demonstrativo de um sistema de fôrma para pilar.



Fonte: Oliveira, 2017.

3.2 CRITÉRIOS DA ABNT NBR 7190:1997 PARA FÔRMA DE MADEIRA

A ABNT NBR 7190:1997 orienta sobre os parâmetros e condições a serem respeitados para se calcular e executar estruturas de madeira, como pontes, cimbres e pisos que são definitivos, ou sistemas de fôrmas e escoramentos que são provisórios. Ela também traz alguns tópicos de suma importância que contribuem para segurança da estrutura, como a aferição dos estados limites (último e de utilização) da estrutura, combinações de ações, carregamentos atuantes e análise das situações de projeto.

Outro assunto de extrema importância exposto nesta norma diz respeito às propriedades das madeiras. Em que é necessária uma divisão dos valores encontrados em relação a aplicação de cargas paralelas às fibras e perpendiculares às fibras. Para o dimensionamento, são apresentadas na Tabela 2, as classes de umidade em que são divididas as madeiras.

Tabela 2 – Classes de umidade para as madeiras.

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	65%	12%

2	65% < U _{amb} < 75	15%
3	75% < U _{amb} < 85%	18%
4	U _{amb} > 85% durante longos períodos	≥ 25%

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

As propriedades da madeira são caracterizadas conforme a classe a que pertencem (Coníferas ou Dicotiledôneas) e o tipo de madeira utilizada (laminada, serrada, compensada ou recompostas). Para os efeitos da duração do carregamento e da umidade do meio ambiente, a ABNT NBR 7190:1997 orienta utilizar um coeficiente de modificação (k_{mod}) representado pela Equação 1. Ele é utilizado para determinação de alguns valores de cálculo como, resistência e módulo de elasticidade.

$$k_{mod} = k_{mod,1} \times k_{mod,2} \times k_{mod,3} \quad (1)$$

O $k_{mod,1}$ na Equação 1 é determinado pela classe de carregamento e o tipo de madeira utilizada, conforme exibido na Tabela 3. Já o coeficiente parcial de modificação $k_{mod,2}$, leva em conta a classe de umidade e o tipo de madeira também, conforme é apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Valores para escolha do $k_{mod,1}$.

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Tabela 4 – Valores para escolha do $k_{mod,2}$.

Classes de umidade	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Ainda na Equação 1, há o coeficiente parcial de modificação $k_{mod,3}$, que é determinado pela categoria da madeira. Ela é de primeira categoria quando as peças não possuírem defeitos. Para as de primeira categoria o $k_{mod,3} = 1,0$ e as de segunda adota-se o $k_{mod,3} = 0,8$.

Ademais, a ABNT NBR 7190:1997 ainda orienta vários outros parâmetros a serem seguidos, como também detalha como devem ser as ligações entre as peças de madeira.

Todavia, muitos dos critérios e orientações exibidos na ABNT NBR 7190:1997 não são totalmente aplicáveis às estruturas provisórias. Com isso, foi necessário a implementação da ABNT NBR 15696:2009 para tratar de forma específica o tema.

3.3 CRITÉRIOS DA ABNT NBR 15696:2009

A ABNT NBR 15696:2009, aborda os critérios e condições a serem respeitados para o cálculo e execução de fôrmas em geral.

3.3.1 Projeto para fabricação de fôrmas

Segundo a norma, o projeto para fabricação de fôrmas deve:

- a) Informar quais materiais serão usados;
- b) Mostrar a posição em que os elementos utilizados vão ficar;
- c) Exibir os critérios adotados para o dimensionamento da fôrma.

3.3.2 Ações atuantes nas fôrmas

Dentre as solicitações existentes ou atuantes sobre o sistema estão:

- a) Peso próprio de todo o sistema de fôrmas;
- b) Impacto do lançamento do concreto;
- c) vibrações do concreto, como também as decorrentes de equipamentos de adensamento do concreto;
- d) Pressões de vento, onde não podem ser inferiores a $0,6 \text{ kN/m}^2$.

3.3.3 Métodos de cálculo

A ABNT NBR 15696:2009 orienta os procedimentos a serem adotados nos cálculos.

3.3.3.1 Estados limites últimos

Segundo a ABNT NBR 15696:2009, a estrutura será considerada em seu estado limite último quando a resistência de cálculo (R_d) for maior ou igual as solicitações de cálculo geradas pelas ações atuantes (F_d). Estas ações são determinadas normalmente como se fossem para estruturas convencionais, usando as mesmas combinações. A Equação 2 apresenta como são determinadas as combinações de ações.

$$F_d = \gamma_Q \times [F_{Q1,k} \times \sum_{j=2}^n \Psi_{0j,ef} \times F_{Qj,k}] \quad (2)$$

Em que, $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como principal para a situação transitória, sendo igual a 1; $\Psi_{0j,ef}$ é igual ao fator Ψ_{0j} considerado em combinações normais como sendo 1,0 e $\gamma_Q = 1,4$. Substituindo os valores na Equação 2, obtém-se a Equação 3.

$$F_d = 1,4 \times \sum_{j=1}^n F_{Qj,k} \quad (3)$$

Como os sistemas de fôrmas são de caráter transitório, as ações permanentes não são consideradas, já as ações variáveis são consideradas para o peso próprio.

O X_d é o valor de cálculo das propriedades da madeira e é determinado conforme a Equação 4:

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_{ik}}{\gamma_w} \quad (4)$$

Onde, X_{ik} é o valor característico, o γ_w é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira e k_{mod} é o coeficiente de modificação que leva em conta influências não consideradas por γ_w .

Em relação ao caso estudado, o coeficiente $k_{mod,1}$ é 0,9, já que a ação é de curta duração. O coeficiente $k_{mod,2}$ é 0,8 para madeira maciça e em relação a madeira industrializada é 1,0. Por último, o coeficiente $k_{mod,3}$ é igual a 0,8.

O coeficiente γ_w é 1,8 para tensões de cisalhamento e 1,4 para tensões de compressão paralelas às fibras da madeira.

3.3.3.2 *Estados limites de utilização*

A ABNT NBR 15696:2009 define como o estado limite de utilização quando a estrutura se encontra fora do conforto do usuário, seja por vibrações excessivas, trincas, deformações além do limite aceitável, etc.

Assim, é necessário que a inequação dada pela Equação 5 seja respeitada.

$$u_{total} \leq u_{lim} \quad (5)$$

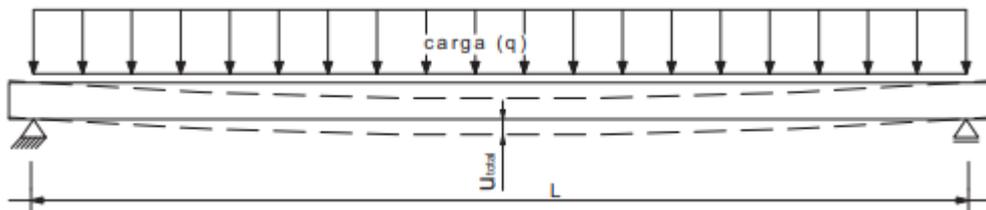
Em que, u_{total} é o deslocamento que ocorre devido à pressão que o concreto causa na fôrma acrescida de uma sobrecarga de $1,0 \text{ kN/m}^2$. Já o u_{lim} é o maior deslocamento possível e pode ser determinado pela Equação 6.

$$u_{lim} = 1 \text{ mm} \times \frac{L}{500} \quad (6)$$

Sendo L dada em milímetros e considerada como a distância entre os apoios.

A Figura 8 exibe o esquema de deformação devido à aplicação de carga.

Figura 8 – Ilustração de deslocamento devido à aplicação de carga.



Fonte: ABNT NBR 15696:2009.

3.3.4 *Execução de estrutura de fôrmas e escoramentos*

A priori, a ABNT NBR 15696:2009 aborda que todos os procedimentos de montagem, concretagem, desmontagem, armazenamento e transporte de materiais devem seguir as instruções das normas regulamentadoras NR 18 e ABNT NBR 7678.

Alguns requisitos são exigidos em relação as fôrmas, como:

- a) Possuir rigidez suficiente para manter as dimensões das peças da estrutura projetada, respeitando as tolerâncias admissíveis.
- b) Ser estanques e ter como limite o surgimento do agregado miúdo da superfície do concreto.

Como também, outros cuidados devem ser tomados como os listados a seguir:

- a) Toda estrutura de fôrmas e escoramentos deve ser executada diante de um projeto específico;
- b) As fôrmas e/ou escoramentos industrializados, necessitam serem montados conforme orientações disponibilizadas pelos fornecedores;
- c) Deve-se proteger o sistema utilizado de risco contra incêndio.
- d) A utilização de barras de ancoragem, tubulações entre outros, devem obedecer a critérios impostos pela norma.

Para concretagem, a norma também aborda alguns parâmetros a serem seguidos, tais como:

- a) Antes do lançamento do concreto, as dimensões e nivelamento das fôrmas devem ser conferidas, para que estejam conforme o estabelecido no projeto.
- b) Verificar se a superfície interna das fôrmas está limpa, como também se não há espaços por onde o concreto possa sair.
- c) Para as fôrmas construídas com materiais que absorvam umidade ou facilitem a evaporação devem ser molhadas até a saturação.

A norma também orienta que as fôrmas e escoramentos devem ser removidos seguindo o plano de desforma estabelecido pelo responsável pela obra, de modo que não comprometa a segurança e o desempenho em serviço da estrutura.

3.3.5 Parâmetros de cálculo do empuxo do concreto nas fôrmas verticais

Para o dimensionamento de fôrmas verticais para concreto, que são utilizadas nas laterais de vigas, paredes de concreto, pilares, etc. Deve-se considerar como ação variável o empuxo que o concreto fluido exerce sobre a fôrma.

3.3.5.1 Definições

A ABNT NBR 15696:2009, define alguns conceitos sobre o tema estudado que são listados a seguir:

- a) Empuxo do concreto fluido: é a pressão exercida sobre a fôrma e é representada por P_b e dada em KN/m²;
- b) Velocidade de concretagem: indica o quão rápido o nível do concreto sobe em função do tempo, ela é simbolizada por v_b e dada em m/h;

- c) Altura hidrostática: pode ser entendida como a subtração entre a altura do nível máximo onde se encontra o concreto e a altura onde se encontra a pressão máxima. Ela é representada por h_s e dada em metro (m);
- d) Tempo de endurecimento: consiste no momento em que as tensões cisalhantes no concreto devido ao início da pega aumentam diminuindo o empuxo que o concreto fluido exerce sobre a fôrma. Sendo simbolizada por t e dada é em horas (h).
- e) Consistência: está relacionada com a fluidez e a capacidade de moldar o concreto. Ele pode ser classificado usando o abatimento, como abordado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de consistência.

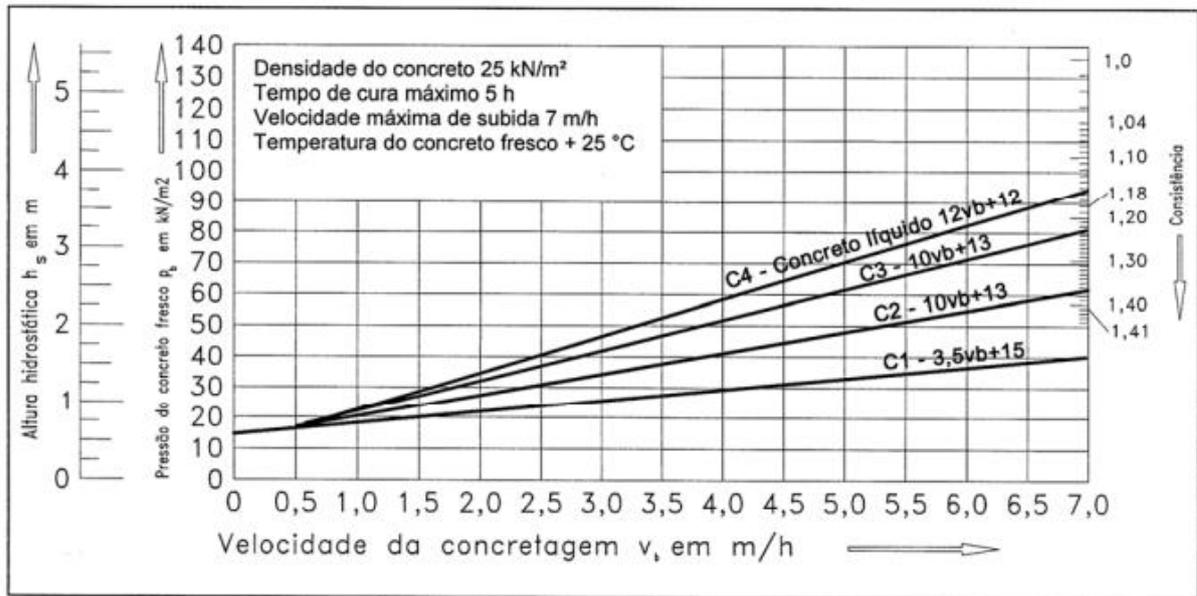
Classe de consistência	Abatimento (mm)
C1	abatimento ≤ 20
C2	$20 < \text{abatimento} \leq 80$
C3	$80 < \text{abatimento} \leq 140$
C4	abatimento > 140

Fonte: ABNT NBR 15696:2009.

3.3.5.2 Cálculo da pressão do concreto fluido

A ABNT NBR 15696:2009 exhibe um diagrama onde podem ser extraídas a P_b e a h_s , conforme a velocidade (v_b) de concretagem e as classes de consistência do concreto. A Figura 9 mostra este diagrama.

Figura 9 – Diagrama para escolha da pressão do concreto.



Fonte: ABNT NBR 15696:2009.

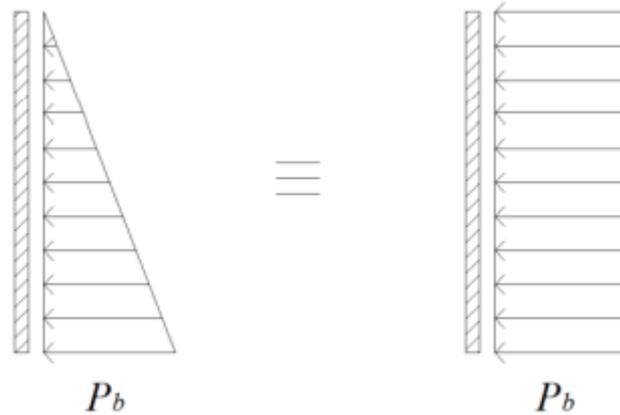
3.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE CÁLCULO

A posteriori, é abordado um método para desenvolvimento do modelo de cálculo.

3.4.1 Método para desenvolvimento do modelo de cálculo

Segundo Oliveira (2017), na literatura é trivial o uso de uma simplificação da distribuição dos carregamentos, visto que é quase impossível calcular manualmente devido à complexidade da distribuição dos carregamentos reais que possuem infinitos valores diferentes, por isso a justificativa dessa simplificação que consiste na alteração de um possível carregamento triangular para um retangular tendo como base o valor máximo da pressão que depende da altura até onde vai ser concretada a peça. A ilustração de como fica essa simplificação é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Simplificação do carregamento.



Fonte: Oliveira, 2017.

Com esta simplificação, o painel é considerado uma viga biapoiada e tem como vão a distância entre os apoios, que podem ser os sarrafos de enrijecimento. Dessa forma, a continuidade das placas compensadas não é levada em conta, porém por meio de equações dos fatores de correção que serão expostas a posteriori é possível corrigir essa disparidade.

Baseado na ABNT NBR 15696:2009, o carregamento retangular pode ser obtido por meio da Equação 7, a posteriori será explicado quando usar esse carregamento.

$$P_b = \gamma \times h \quad (7)$$

3.4.2 Critérios para aplicação do modelo

Para dar prosseguimento ao método, alguns parâmetros são definidos. A classe de consistência pode ser obtida pela tabela 5, as dimensões do pilar são determinadas pelo projeto estrutural, já v_b é calculada pela Equação 8.

$$v_b = \frac{\textit{Altura pilar}}{\textit{Volume de concreto}} \times \textit{Vazão da bomba} \quad (8)$$

Onde, a altura do pilar é dada em metros, o volume de concreto em metros cúbicos e a vazão da bomba em metros cúbicos por hora, assim como apresentada na Equação 9.

$$\textit{Vazão da bomba} = \frac{\textit{Volume de concreto}}{\textit{Tempo de lançamento}} \quad (9)$$

Tomando-se por base que a vazão média para bomba é equivalente à 18 m³/h. Assim, é possível o cálculo. Quando a velocidade de concretagem for maior que 7 m/h que é a máxima

apresentada pela ABNT NBR 15696:2009, adota-se a da norma, visto que velocidades acima disso produzem carregamentos superdimensionados.

Para o cálculo da P_b e da h_s , será escolhida a curva representativa dos concretos classe C3, por ser a classe de consistência usada nas obras vistoriadas, porém de acordo com cada obra ela pode mudar, assim é só consultar a Figura 9. A seguir, é apresentada a Equação 10 que traz como determinar a pressão para classe C3.

$$P_b = 10 \times v_b + 13 \quad (10)$$

Com isso, determina-se altura hidrostática por meio da Equação 11.

$$h_s = \frac{P_b}{\gamma} \quad (11)$$

Onde, γ é peso específico do concreto. Com isso, se altura hidrostática for maior que a altura do pilar, a determinação de P_b será dada pela Equação 7, caso contrário pela Equação 10 ou pelas outras equações apresentadas na Figura 9 de acordo com cada classe de consistência.

Com relação as características das chapas de compensado, algumas são descritas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Resistência à flexão estática do compensado de Pinus Brasileiro.

Espessura da chapa (mm)	Quantidade de lâminas	Valores para resistência à flexão da chapa (KN/cm ²)				
			Paralela		Perpendicular	
			MOE	MOR	MOE	MOR
9	5	Máximo	1.157,34	6,70	298,29	3,01
		Médio	838,24	4,88	222,94	2,20
		Mínimo	519,15	3,07	147,61	1,39
12	5	Máximo	874,87	5,17	370,12	3,41
		Médio	676,56	3,74	278,40	2,48
		Mínimo	478,25	2,29	186,68	1,55
15	5	Máximo	903,51	4,32	347,50	3,31
		Médio	679,90	3,23	258,25	2,23
		Mínimo	456,29	2,13	169,00	1,14
15	7	Máximo	882,38	5,18	448,55	3,97
		Médio	677,93	3,87	330,77	2,89
		Mínimo	473,48	2,58	212,99	1,80
18	7	Máximo	798,00	4,50	475,88	4,02
		Médio	621,57	3,40	355,28	2,94
		Mínimo	445,14	2,29	234,68	1,85
18	9	Máximo	806,12	4,57	437,43	3,44
		Médio	695,77	3,62	356,34	2,65
		Mínimo	585,42	2,68	275,26	1,85

20	7	Máximo	727,54	4,35	465,64	3,63
		Médio	594,87	3,23	357,42	2,69
		Mínimo	462,21	2,09	249,21	1,74
20	9	Máximo	749,48	4,11	569,41	4,30
		Médio	583,69	3,20	430,21	3,22
		Mínimo	417,89	2,28	291,00	2,14

MOE – Módulo de elasticidade à flexão

MOR – Tensão resistente à flexão

Fonte: ABIMCI, 2002.

Já para as peças de madeira a serem utilizadas para o enrijecimento da chapa de madeira compensada e para o travamento dos painéis, serão adotados alguns parâmetros para a madeira dos sarrafos de travamento nos quais serão apresentados no anexo A.

Dando prosseguimento, é fundamental a determinação da resistência de cálculo à compressão. Assim, faz-se necessário o cálculo dessa resistência da chapa na direção paralela e perpendicular às fibras, sendo escolhida a menor delas.

A Equação 12 mostra como determinar a resistência na direção paralela às fibras.

$$f_{c0d_chapa} = \frac{k_{mod_chapa} \times f_{c0k_chapa}}{\gamma_w} \quad (12)$$

Em que, γ_w é o coeficiente de minoração da madeira em relação as suas propriedades e é tido como 1,4. Outro sim, o k_{mod_chapa} é dado pela Equação 1 e a resistência característica da chapa f_{c0k_chapa} é determinada pela Equação 13.

$$f_{c0k_chapa} = 0,7 \times f_{c0m_chapa} \quad (13)$$

Onde, o f_{c0m_chapa} é obtido na Tabela 6.

Por outro lado, a resistência de cálculo à compressão da chapa na direção perpendicular às fibras é calculada pela Equação 14.

$$f_{c90d_chapa} = \frac{f_{c90m_chapa}}{f_{c0m_chapa}} \times f_{c0d_chapa} \quad (14)$$

Em que, o f_{c90m_chapa} é obtido na Tabela 6.

No tocante ao módulo de elasticidade, pode ser tido como o médio $E_{c0, m}$ paralelo às fibras, visto que é o que mais se aproxima da situação real em as fibras são justapostas em direções perpendiculares entre si, ou seja, estão em um conjunto de paralelas e perpendiculares em relação ao carregamento imposto.

3.4.3 Desenvolvimento final do modelo de cálculo simplificado

Como abordado no início da seção 4.1, o painel de chapa compensada de madeira funciona como uma viga biapoiada. Assim, é possível calcular o espaçamento máximo entre os sarrafos de enrijecimento pela flexa máxima, igualando a Equação 15 a Equação 16, obtendo a Equação 17 para o Estado Limite de Serviço (ELS), no qual é acrescida na pressão uma sobrecarga de 1,0 kN/m² sem a utilização do coeficiente de majoração, como indica a ABNT NBR 15696. Em relação a Equação 16, ela é indicada por Gebur *et al* (2015) para determinação da flecha máxima ($u_{máx}$), com isso já é atendido o critério da ABNT NBR 15696:2009 exposto na Equação 6.

$$u_{máx} = \frac{5}{384} \times \frac{P_b \times L^4}{E \times I} \quad (15)$$

$$u_{máx} = \frac{L}{350} \quad (16)$$

$$L_{máx} = \sqrt[3]{\frac{0,256 \times E \times I}{P_b + 1}} \quad (17)$$

Assim, o $L_{máx}$ é a máxima distância entre os elementos, seja os enrijecimentos ou de travamento, já o E é o módulo de elasticidade e o I é momento de inércia do elemento que se está calculando.

Para o Estado Limite último (ELU), o cálculo da distância máxima é determinado pela Equação 18, em que a P_b é pressão é multiplicada pelo coeficiente de majoração 1,4. Essa equação foi obtida isolando o L da Equação 19.

$$L_{máx} = \sqrt{\frac{8 \times M_{máx}}{P_b \times 1,4}} \quad (18)$$

$$M_{máx} = \frac{P_b \times L^2}{8} \quad (19)$$

Onde, o $M_{máx}$ é o momento máximo admissível e pode ser obtido pela Equação 20.

$$M_{máx} = f_{cd} \times w \quad (20)$$

Em que, f_{cd} é a tensão característica do material e o módulo de resistência w pode ser calculado pela Equação 21.

$$w = \frac{b \times h^2}{6} \quad (21)$$

Onde, b é a base e h é a altura do elemento que estar sendo calculado.

E para todos os casos o momento de inércia é calculado pela Equação 22, onde os valores de b e h mudam de acordo para cada tipo de elemento do sistema.

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (22)$$

Para o cálculo do espaçamento máximo entre os sarrafos de travamento, De acordo com Gebur *et al* (2015), inicialmente é necessário determinar o número de sarrafos de estruturação n que é dado pela Equação 23.

$$n = \left(\frac{larg_{total_comp}}{L_{m\acute{a}x} + larg_{sar}} \right) + 1 \quad (23)$$

Onde, $larg_{total_comp}$ é a largura total do compensado em relação ao maior lado do pilar que é determinada pela Equação 23, o $L_{m\acute{a}x}$ é a distância entre os sarrafos de enrijecimento calculada anteriormente e a $larg_{sar}$ é a largura destes sarrafos citados anteriormente, o resultado obtido para n é arredondado para cima e para determinar a largura total do compensado para o lado maior do pilar pode ser usada a Equação 24.

$$larg_{total_comp} = L_{maior_pilar} + 2 \times larg_{sar} + 2 \times e_{comp} \quad (24)$$

Em que, L_{maior_pilar} é o maior lado do pilar e o e_{comp} é a espessura do compensado.

A distância entre os sarrafos de travamento é determinada também por meio das Equações 16 e 17. Porém, são usados dados do compensado estruturado com os sarrafos de enrijecimento. Assim, são somados os momentos máximos admissíveis e os momentos de inércia do compensado e dos sarrafos de enrijecimento.

O momento de inércia do compensado ($I_{compensado}$) é determinado pela Equação 22, com b sendo igual ao resultado da Equação 24 e o momento de inércia dos sarrafos é determinado pela equação 25.

$$I_{sarrafo} = n \times \frac{b \times h^3}{12} \quad (25)$$

Onde, n é o número total de sarrafos e momento do compensado estruturado é dado pela Equação 26 e h a altura do sarrafo de enrijecimento.

$$I_{\text{estruturado}} = I_{\text{compensado}} + I_{\text{sarrafo}} \quad (26)$$

Para o cálculo da carga distribuída (q) em função do lado maior do pilar, há a Equação 27.

$$q = (P_b + 1) \times L_{\text{maior_pilar}} \quad (27)$$

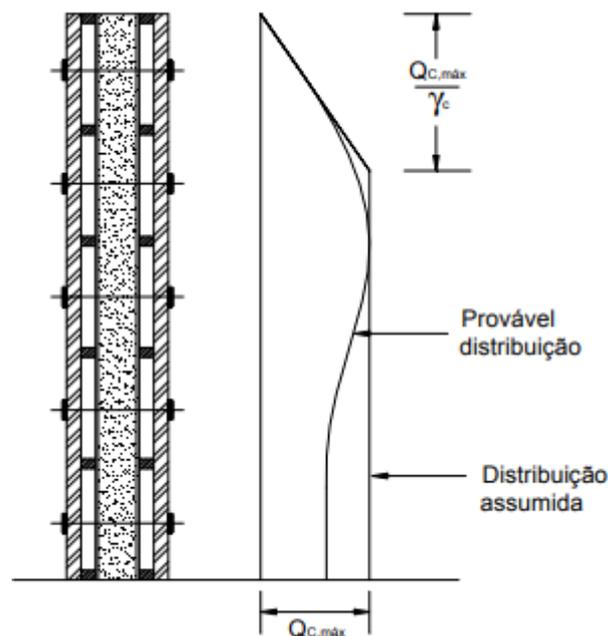
O módulo de elasticidade será escolhido como sendo o menor entre o do sarrafo e do compensado.

Além disso, ainda há o cálculo do espaçamento pelo momento fletor, em relação ao do compensado poder ser usada a Equação 20 e para o sarrafo é dado pela multiplicação do número de sarrafos de enrijecimento pelo momento fletor máximo admissível obtido no anexo A. Dessa forma, o resultado dessa multiplicação é usado na Equação 18, o resultado será comparado com o obtido pela flexa e o menor será escolhido.

3.4.4 Otimização do método simplificado

Como abordado na seção 4.1, o método simplificado de cálculo padroniza o carregamento triangular para um retangular, fugindo muito do que acontece na realidade. A Figura 11 mostra uma provável distribuição que melhor representa a realidade.

Figura 11 – Diagrama de pressões do concreto.



Fonte: Maranhão, 2000.

Com isso, faz-se necessário um novo cálculo das pressões para que se aproximem da realidade. Diante disso, Oliveira (2017) criou equações para o cálculo de fatores de correção que possibilitem otimizar os resultados obtidos pelo método simplificado. Para validar o método, foi realizada uma simulação baseada em um estudo experimental de Maranhão (2000), onde o resultado obtido pelo método foi satisfatório, respeitando os limites da norma e sendo semelhante ao colhido na situação real em obra pelo estudo. Assim, para uso dessas equações é necessário fazer o cálculo simplificado primeiro para obtenção das distâncias entre os sarrafos de enrijecimento e depois aplicar na Equação 27 para os deslocamentos e na Equação 28 para as tensões atuantes.

$$FC_{u, máx} = 0,605030894 - (0,004882284 \times \text{Espaçamento}) \quad (28)$$

$$+ (0,0000929649 \times \text{Altura})$$

$$FC_{\sigma, máx} = 0,5873448 - (0,004915505 \times \text{Espaçamento}) \quad (29)$$

$$+ (0,000534056 \times \text{Altura})$$

Onde, $FC_{u, máx}$ é o fator de correção para deslocamento máximo, o $FC_{\sigma, máx}$ é o fator de correção para tensão máxima e a *Altura* é a do pilar que é dada em centímetros, como também o *Espaçamento* que é a distância entre os sarrafos de enrijecimento e é dado em centímetros também. Assim, depois da obtenção das novas pressões são aplicados os mesmos coeficientes de majoração citados anteriormente e segue o mesmo roteiro de cálculo do método simplificado, porém com pressões diferentes. Por fim, todos os parâmetros e equações foram inseridos em uma planilha eletrônica, que está em anexo no Apêndice A, para automatização dos cálculos.

4 METODOLOGIA

A posteriori, é descrito como e de onde foram obtidos os dados para realização do estudo de caso, como também o roteiro seguido para criação do modelo de cálculo.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Tendo em vista a complexidade e variedade do tema estudado, o presente trabalho delimita-se ao estudo de cinco obras de diferentes empresas situadas na região do Araripe, especificamente nas cidades de Exu-PE e Ouricuri-PE. Assim, o dimensionamento se limitou às formas com chapas de compensado plastificado para pilares, no qual foi possível verificar se as obras atendiam ao dimensionamento correto e quais os possíveis custos poderiam ser reduzidos. A metodologia de cálculo foi baseada na ABNT NBR 15696:2009 e na ABNT NBR 7190:1997, como também nos estudos de Silva (1998), Gebur *et al* (2015) e Oliveira (2017). Foram analisados todos os componentes do sistema de fôrmas como dimensões, espaçamentos e tipo de madeira dos elementos. Essas informações foram organizadas em tabelas e por meio de registro fotográfico das fôrmas. Após a criação do modelo de cálculo, foram dimensionados, com auxílio de planilha eletrônica, os espaçamentos entre os sarrafos de enrijecimento, como também entre os de travamento, após isso foi feita a comparação entre o calculado pelo método e o encontrado nas obras, os resultados foram apresentados por meio de gráficos. Ademais, foi realizado um levantamento de custos das reduções dos travamentos das fôrmas.

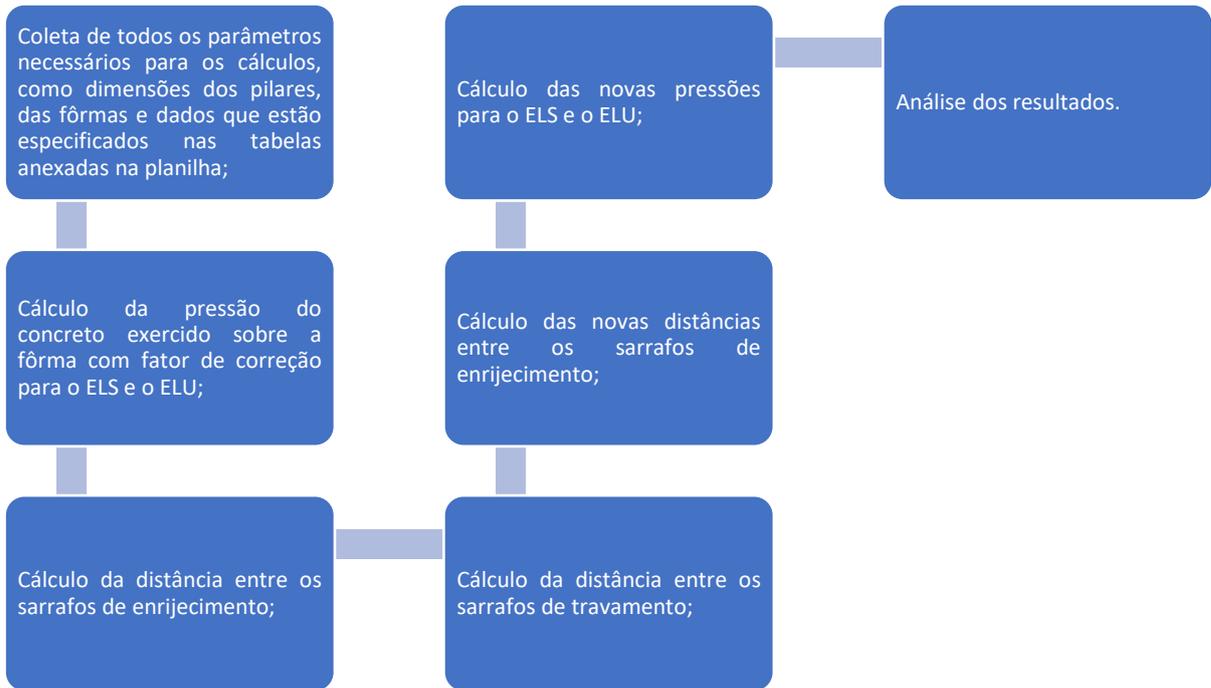
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS OBRAS

A obra 1 trata-se da construção de uma escola técnica na cidade de Exu-PE, onde foi coletado dados sobre as fôrmas de dois pilares de dimensões diferentes. A obra 2 situa-se na mesma cidade e é a construção reservatório elevado, ela possui quatro pilares de mesma dimensão e altura. Já as outras obras são na cidade de Ouricuri-PE, sendo a obra 3 a reforma do Posto Rodoviário Federal, onde foi obtido dados das fôrmas de dois pilares diferentes. A obra 4 é construção de um estabelecimento comercial térreo, em que foi analisado as fôrmas de dois pilares também e a última é uma ampliação de uma oficina que possui seis pilares de mesma dimensão.

4.3 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

As etapas da metodologia para o dimensionamento do sistema de fôrma para pilares por meio de planilha eletrônica ocorreram após uma revisão bibliográfica realizada no google acadêmico, onde foram escolhidos os estudos que embasam o presente trabalho. A seguir, no fluxograma é apresentado o passo a passo do roteiro de cálculo utilizado:

Figura 12 – Roteiro de cálculo.



Fonte: Autor, 2022.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

As informações colhidas nas visitas técnicas e os cálculos determinados com auxílio da planilha eletrônica foram organizados em tabelas que serão apresentadas a posteriori. Para melhor visualização e entendimento dos resultados, foram criados gráficos comparando os espaçamentos obtidos em obra com os calculados. A seguir, é apresentada a Tabela 7.

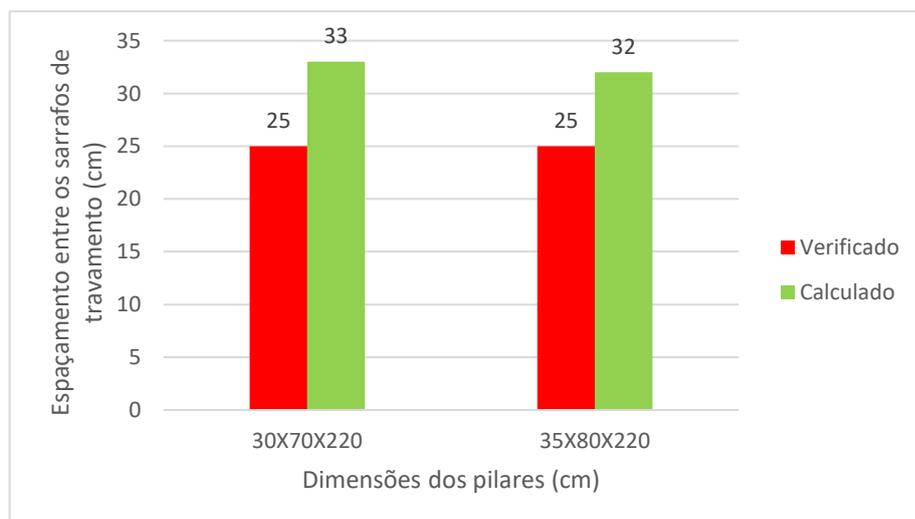
Tabela 7 – Dados da obra 1.

OBRA 1			
Dimensões do pilar (cm)		30X70X220	35X80X220
Espessura do compensado (mm) e número de lâminas		15-5	15-5
Consistência e velocidade de concretagem (m/h)		C3-7	C3-7
Dimensões do sarrafo de enrijecimento (cm)		2,5X7	3X5
Espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento (cm)	Verificado	24,5	20
	Calculado	19	19
Dimensões do sarrafo de travamento (cm)		2,5X10	2,5X10
Espaçamento entre os sarrafos de travamento (cm)	Verificado	25	25
	Calculado	33	32

Fonte: Autor, 2022.

A partir dos dados expostos, é possível perceber que poderia ter uma redução significativa dos sarrafos de travamento, assim como apresentado no Figura 12. Em relação ao distanciamento entre os sarrafos de enrijecimento serem um pouco acima do calculado, pode ser explicado pelos coeficientes de majoração utilizados nos cálculos, como também foi adotado parâmetros médios para as propriedades das madeiras a fim de dar uma margem de segurança.

Figura 13 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 1.



Fonte: Autor, 2022.

É comum nas obras adotarem um espaçamento padrão para todos os pilares como visto no gráfico, porém pilares diferentes exigem espaçamentos diferentes.

Na Figura 13, é possível perceber como foi realizada a montagem de algumas laterais de fôrmas com sarrafos de enrijecimento para os pilares de dimensões 35x80x220, na imagem em questão ainda não estavam posicionados os sarrafos de travamento, mas o carpinteiro informou as dimensões e os espaçamentos que serão usados.

Figura 14 – Laterais de algumas fôrmas com sarrafos de enrijecimento da obra 1.



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 8 expõe os dados em relação à obra 2.

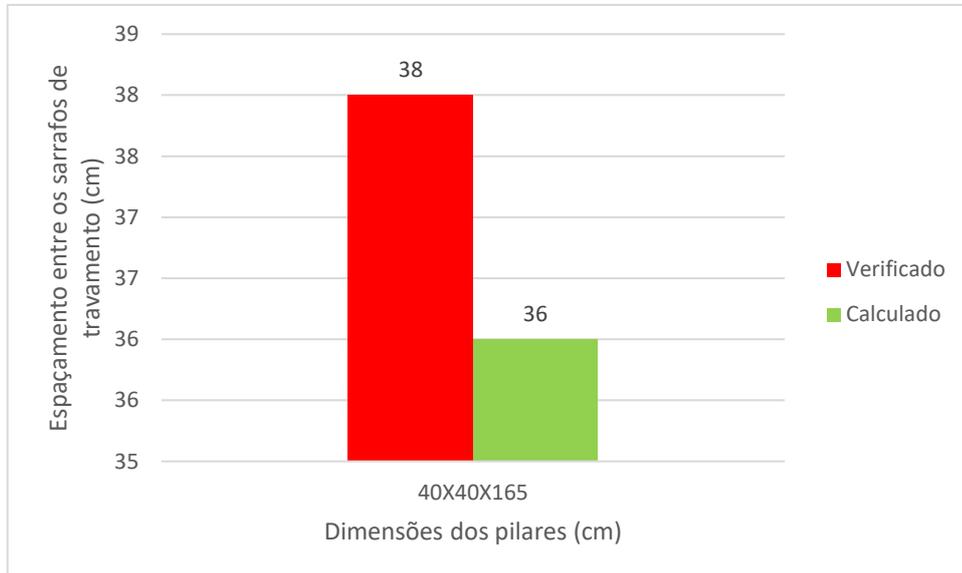
Tabela 8 – Dados da obra 2.

OBRA 2		
Dimensões do pilar (cm)	40X40X165	
Espessura do compensado (mm) e número de lâminas	15-5	
Consistência e velocidade de concretagem (m/h)	C3-7	
Dimensões do sarrafo de enrijecimento (cm)	2X5	
Espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento (cm)	Verificado	20
	Calculado	23
Dimensões do sarrafo de travamento (cm)	2X5	
Espaçamento entre os sarrafos de travamento (cm)	Verificado	38
	Calculado	36

Fonte: Autor, 2022.

Essa obra apresentou espaçamentos entre os sarrafos de travamento maiores que os calculados como pode ser visto no Gráfico 14.

Figura 15 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 2.



Fonte: Autor, 2022.

E o resultado obtido é que a fôrma não resistiu a concretagem e rompeu, dando um prejuízo estimado em 4000 mil reais. Isso mostra que o método criado no estudo é válido e o espaçamento calculado ainda seria menor, visto que foram usados nas fôrmas sarrafos de travamentos com dimensões menores que as usadas para o cálculo e mesmo assim o estudo ainda mostra que as fôrmas não aguentariam a pressão. Outro fator que contribuiu para o rompimento foi a utilização de sarrafos pequenos demais, não tendo espaço para o apoio de um sarrafo sobre o outro para que haja a fixação por meio de pregos. A seguir, a Figura 15 apresenta como estavam montadas essas fôrmas.

Figura 16 – Sistema de fôrma pronto da obra 2.



Fonte: Autor, 2022.

Para obra 3, os dados serão apresentados a seguir na Tabela 9.

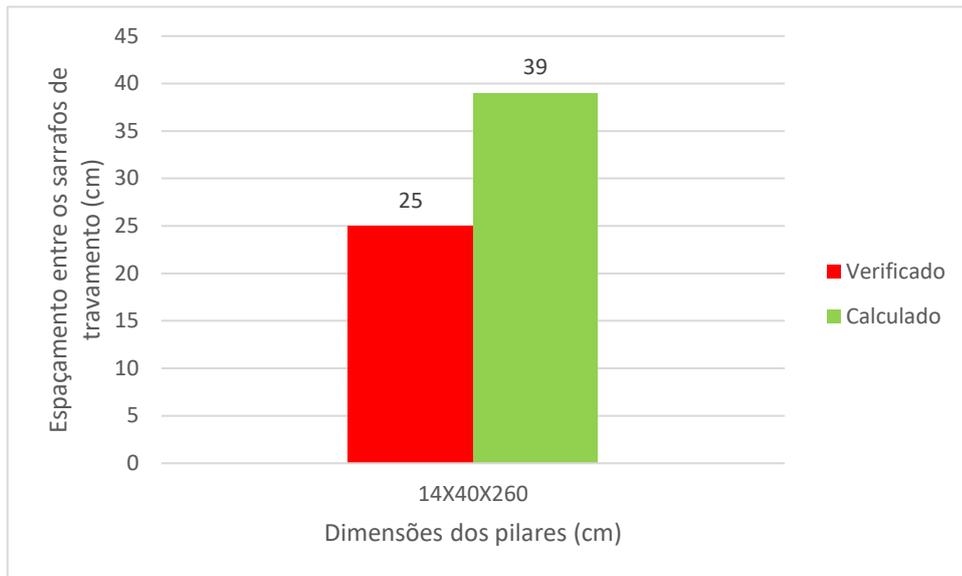
Tabela 9 – Dados da obra 3.

OBRA 3		
Dimensões do pilar (cm)		14X40X260
Espessura do compensado (mm) e número de lâminas		15-5
Consistência e velocidade de concretagem (m/h)		C3-7
Dimensões do sarrafo de enrijecimento (cm)		2,5X7
Espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento (cm)	Verificado	18
	Calculado	18
Dimensões do sarrafo de travamento (cm)		2X6
Espaçamento entre os sarrafos de travamento (cm)	Verificado	25
	Calculado	39

Fonte: Autor, 2022.

É possível perceber que a distância entre os sarrafos de enrijecimento se encontra no limite do que foi calculado, já os sarrafos de travamentos poderiam ser reduzidos conforme apresentado na Figura 16.

Figura 17 – Espaços verificados e calculados da obra 3.



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 10 mostra os dados referente à obra 4.

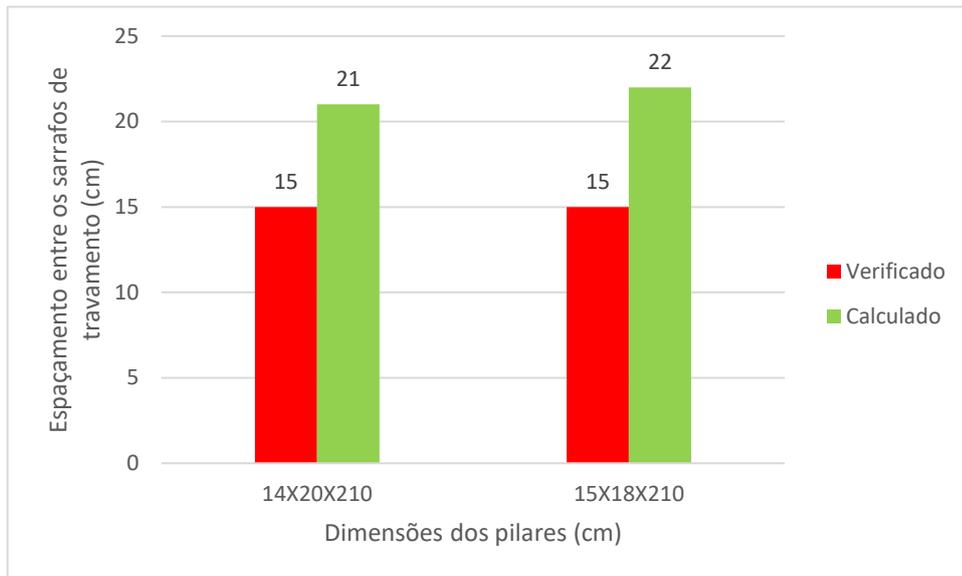
Tabela 10 – Dados da obra 4.

OBRA 4			
Dimensões do pilar (cm)		14X20X210	15X18X210
Espessura do compensado (mm) e número de lâminas		15-5	15-5
Consistência e velocidade de concretagem (m/h)		C3-7	C3-7
Dimensões do sarrafo de enrijecimento (cm)		0	0
Espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento (cm)	Verificado	0	0
	Calculado	0	0
Dimensões do sarrafo de travamento (cm)		2,5X7	2,5X7
Espaçamento entre os sarrafos de travamento (cm)	Verificado	15	15
	Calculado	21	22

Fonte: Autor, 2022.

Como pode ser visto, não houve necessidade de sarrafos de enrijecimento, visto que os pilares não possuem dimensões tão grandes, assim só a chapa de compensado conseguiu suportar a pressão sem a necessidade de enrijecimento. Ainda assim, os de travamento poderiam ser reduzidos como mostra a Figura 17.

Figura 18 – Espaçamentos verificados e calculados da obra 4.



Fonte: Autor, 2022.

Por último, a Tabela 11 traz os dados obtidos sobre a obra 5.

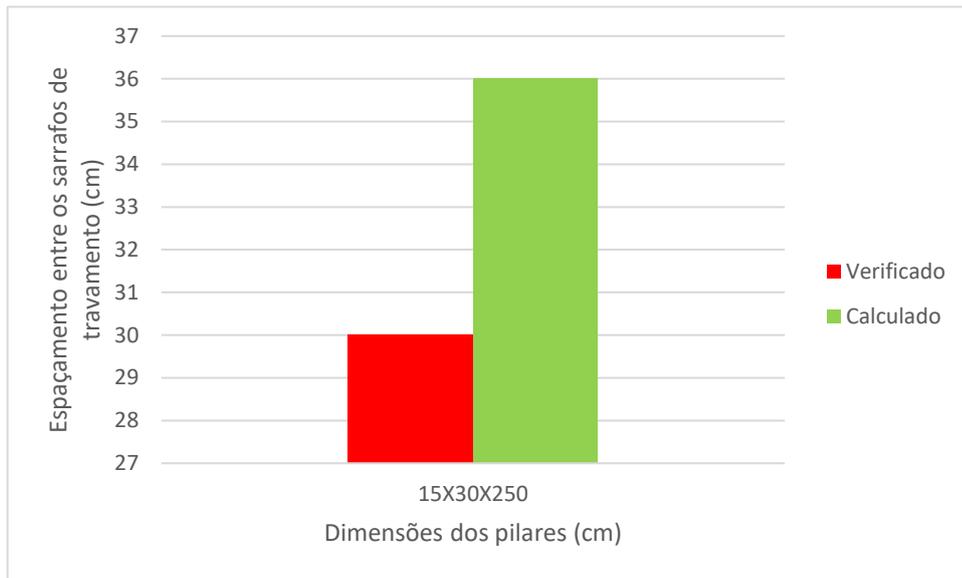
Tabela 11 – Dados da obra 5.

OBRA 5		
Dimensões do pilar (cm)		15X30X250
Espessura do compensado (mm) e número de lâminas		15-5
Consistência e velocidade de concretagem (m/h)		C3-7
Dimensões do sarrafo de enrijecimento (cm)		2X5
Espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento (cm)	Verificado	15
	Calculado	18
Dimensões do sarrafo de travamento (cm)		2,5x7
Espaçamento entre os sarrafos de travamento (cm)	Verificado	30
	Calculado	36

Fonte: Autor, 2022.

Em relação a essa obra, todos os espaçamentos poderiam ser aumentados, sendo que os de enrijecimento um pouco menos que os de travamento, o Figura 18 mostra onde podia ter esse maior aumento.

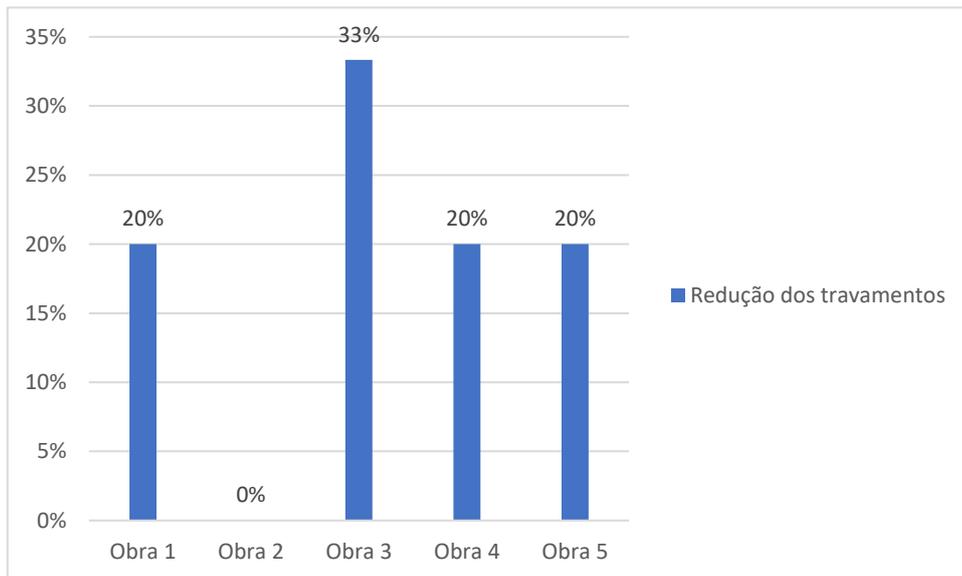
Figura 19 – Espaços verificados e calculados da obra 5.



Fonte: Autor, 2022.

Após a análise dos resultados, foi possível estimar as possíveis reduções nas obras estudadas conforme apresentado no Figura 19.

Figura 20 – Redução dos travamentos.



Fonte: Autor, 2022.

6 CONCLUSÃO

O dimensionamento de fôrmas é um assunto pouco abordado nas literaturas e nas universidades. Já a ABNT NBR 15696:2009 que regulamenta o tema em questão não é muito clara em alguns aspectos. Dessa forma muitos engenheiros recém formados chegam ao mercado de trabalho sem o conhecimento necessário para executar o sistema de fôrmas, buscando resolver esse problema, o presente trabalho sintetizou e corrigiu alguns métodos de cálculo para a criação do modelo de cálculo automatizado com auxílio de planilhas eletrônicas. Os resultados mostraram, para esse estudo de caso, a possibilidade de reduzir significativamente os travamentos e o enrijecimento das fôrmas, isso traria uma redução de custos e prazos nas obras, principalmente em obras de médio a grande porte onde são necessárias muitas fôrmas. Outro fator importante constatado, foi o subdimensionamento em uma das obras que acarretou um prejuízo estimado de 4000 mil reais, isso considerando que eram poucos pilares, caso fossem muitos o valor seria bem mais expressivo. Com isso, o modelo de cálculo se mostrou eficiente fazendo o dimensionamento do estudo de caso proposto.

REFERÊNCIAS

- AMCORE. Disponível em: <http://www.amcore.com.br/produtos_ver.php?id=6>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- ASSAHI, P. N. Sistema de fôrma para estrutura de concreto. Boletim Técnico, São Paulo, 2004.
- AZEVEDO, Gilmar A. T. **Avaliação técnica para definição de fôrmas na construção civil**. São Paulo: Universidade Anhembi Morumbi, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. Compensado de Pinus. Curitiba: Programa Nacional de Qualidade da Madeira, 2002. Catálogo técnico.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 7678**: segurança na execução de obras e serviços de construção. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 15696. Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro, 2009.
- FAJERSZTAJN, H. **Fôrmas para concreto armado**: aplicação para o caso do edifício. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- GEBUR et al., 2015. Manual SH de fôrmas para concreto e escoramentos metálicos. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.
- MARANHÃO, M. G. **Fôrmas para concreto: subsídios para otimização do projeto segundo a NBR 7190/ 97**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MORIKAWA, M. S. **Materiais alternativos utilizados em fôrmas para concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- MÜLLER, Guilherme Luiz. Dimensionamento de fôrmas de madeira para estruturas de concreto armado: uma proposta teórica. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 06 jul. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/1275>.

OLIVEIRA, Rodrigo Rezende. Análise numérica de sistemas de fôrmas de madeira para pilares de concreto armado. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PEURIFOY, R.L.; OBERLENDER, G. D. Formwork for Concrete Structures. McGraw Hill Professional, USA, 2010.

PFEIL, W. **Cimbramentos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 1987. 431p.

SALGADO, Julio. Técnicas e práticas construtivas para edificação. 3. ed. São Paulo: Érica, 2014.

SILVA, Francisco A. F. **Estruturas de concreto**: formas e escoramentos. SãoPaulo, 1998.

APÊNDICE A – PLANILHA ELETRÔNICA

DADOS PARA INSERIR DE ACORDO COM AS TABELAS EM ANEXO		RESULTADOS	
RESULTADOS			
Dimensões do pilar			
	cm	m	
Altura	240	2,4	
Maior lado	50	0,5	
Menor lado	20	0,2	
Tensão média resistente à flexão do compensado			
		3,23	KN/cm ²
		2,23	KN/cm ²
Tensão admissível e módulo de elasticidade do compensado			
Tensão característica resistente à flexão			
		2,261	KN/cm ²
		1,561	KN/cm ²
Tensão de cálculo			
		1,1628	KN/cm ²
		0,8028	KN/cm ²
		0,8028	KN/cm ²
Módulo de elasticidade do compensado			
		679,9	KN/cm ²
Módulo de elasticidade à flexão adotado			
Nova pressão adotada para tensão (ELU)			
	47,649979		KN/m ²
Pressões			
		7	m/h
Velocidade de concretagem		39,5	KN/m ²
Pressão para C1		62	KN/m ²
Pressão para C2		83	KN/m ²
Pressão para C3		96	KN/m ²
Pressão para C4		3,32	m
Altura hidrostática		60	KN/m ²
Pressão adotada			
Fator de correção para os deslocamentos		0,5296968	
Fator de correção para tensões		0,7941663	
Nova pressão adotada para flexa (ELS)		31,781807	KN/m ²
Nova pressão adotada para tensão (ELU)		47,649979	KN/m ²
Distância entre os sarrafos de enrijecimento (MÉTODO ELEMENTOS FINITOS)			
		24	cm
Pela flexa máxima		19	cm
Pelo momento Máximo		19	cm
Distância entre os sarrafos de travamento (MÉTODO ELEMENTOS FINITOS)			
		38	cm
Pela flexa máxima		49	cm
Pelo momento Máximo		38	cm
Adotada			
		19	cm
Adotada			
		38	cm
Adotada			
		19	cm

MODELO DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE S

Coeficientes de modificações		Módulo médio de elasticidade à flexão do compensado	
Kmod1	0,9	Paralela às fibras	679,9 KN/cm ²
Kmod2	1		
Kmod3	0,8		

Coeficiente de modificação e espaçamento entre sarrafos de enrijecimento		Módulo de resistência do compensado	
Coeficiente de modificação		Módulo	0,375 cm ³
kmod	0,72		
Distância entre os sarrafos de enrijecimento (MÉTODO SIMPLIFICADO)			
Pela flexa máxima	20		
Pelo momento Máximo	16		
Adotada	16		

--	--	--	--

ANEXO A – PROPRIEDADES DA MADEIRA DOS SARRAFOS

PEÇA (cm)		PEÇA (pol)		M. Inércia	Mod. Resist.	Mom. Resist.	E. Cortante	MEIO DO VÃO						BALANÇO	
b	h	b	h	J (m ⁴)	M (m ³)	M (tm)	V (t)	FLECHA (m)	MOMENTO (m)	FLECHA (m)	MOMENTO (m)	FLECHA (m)	MOMENTO (m)	FLECHA (m)	MOMENTO (m)
2,5	7	1	3	9,37E-07	2,46E-05	2,14E-02	1,23E-01	2,16E-01	1,71E-01	1,35E-01	8,55E-02	1,58E-02	4,28E-02		
2,5	10	1	4	2,22E-06	4,37E-05	3,80E-02	1,63E-01	5,13E-01	3,04E-01	3,20E-01	1,52E-01	3,74E-02	7,60E-02		
2,5	15	1	6	7,49E-06	9,83E-05	8,55E-02	2,45E-01	1,73E+00	6,84E-01	1,08E+00	3,42E-01	1,26E-01	1,71E-01		
2,5	23	1	9	2,53E-05	2,21E-04	1,92E-01	3,68E-01	5,84E+00	1,54E+00	3,65E+00	7,70E-01	4,26E-01	3,85E-01		
2,5	30	1	12	5,99E-05	3,93E-04	3,42E-01	4,90E-01	1,38E+01	2,74E+00	8,65E+00	1,37E+00	1,01E+00	6,84E-01		
7	7	3	3	2,81E-06	7,37E-05	6,42E-02	3,68E-01	6,49E-01	5,13E-01	4,05E-01	2,57E-01	4,73E-02	1,28E-01		
7	12	3	4,5	9,48E-06	1,66E-04	1,44E-01	5,52E-01	2,19E+00	1,15E+00	1,37E+00	5,77E-01	1,60E-01	2,89E-01		
7	15	3	6	2,25E-05	2,95E-04	2,57E-01	7,35E-01	5,19E+00	2,05E+00	3,24E+00	1,03E+00	3,78E-01	5,18E-01		
7	30	3	12	1,80E-04	1,18E-03	1,03E+00	1,47E+00	4,13E+01	8,21E+00	2,59E+01	4,11E+00	3,03E+00	2,05E+00		
2,5	2,5	1	1	3,47E-08	2,73E-06	2,38E-03	4,09E-02	8,01E+03	1,90E-02	5,01E-03	9,50E-03	5,84E+00	4,75E-03		
7	2,5	3	1	1,04E-07	8,19E-06	7,13E-03	1,23E-01	2,40E-02	5,70E-02	1,50E-02	2,85E-02	1,75E-03	1,43E-02		
10	2,5	4	1	1,39E-07	1,09E-05	9,50E-03	1,63E-01	3,20E-02	7,60E-02	2,00E-02	3,80E-02	2,34E-03	1,90E-02		
15	2,5	6	1	2,08E-07	1,64E-05	1,43E-02	2,45E-01	4,81E-02	1,14E-01	3,00E-02	5,70E-02	3,50E-03	2,85E-02		
30	2,5	12	1	4,16E-07	3,28E-05	2,85E-02	4,90E-01	9,61E-02	2,28E-01	6,01E-02	1,14E-01	7,01E-03	5,70E-02		
12	7	4,5	3	4,21E-06	1,11E-04	9,62E-02	5,52E-01	9,73E-01	7,70E-01	6,08E-01	3,85E-01	7,10E-02	1,92E-01		
15	7	6	3	5,62E-06	1,47E-04	1,28E-01	7,35E-01	1,30E+00	1,03E+00	8,11E-01	5,13E-01	9,46E-02	2,57E-01		
30	7	12	3	1,12E-05	2,95E-04	2,57E-01	1,47E+00	2,59E+00	2,05E+00	1,62E+00	1,03E+00	1,89E-01	5,13E-01		