



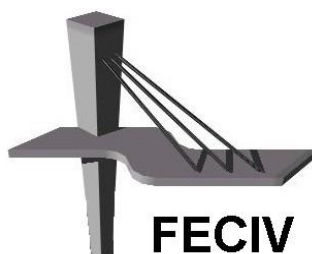
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE NUMÉRICA DE SISTEMAS DE FÔRMAS
DE MADEIRA PARA PILARES DE CONCRETO
ARMADO**

RODRIGO REZENDE OLIVEIRA

UBERLÂNDIA, 05 DE DEZEMBRO DE 2017

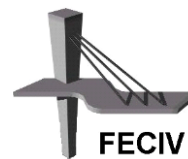


FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Rodrigo Rezende Oliveira

**ANÁLISE NUMÉRICA DE SISTEMAS DE FÔRMAS DE MADEIRA
PARA PILARES DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

UBERLÂNDIA, 05 DE DEZEMBRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48a
2017 Oliveira, Rodrigo Rezende, 1987
 Análise numérica de sistemas de fôrmas de madeira para pilares de
 concreto armado / Rodrigo Rezende Oliveira. - 2017.
 121 f. : il.

 Orientador: Francisco Antonio Romero Gesualdo.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.63>
 Inclui bibliografia.

 1. Engenharia civil - Teses. 2. Madeira - Teses. 3. Método dos
 elementos finitos - Teses. 4. Concreto armado - Estruturas - Teses. I.
 Gesualdo, Francisco Antonio Romero. II. Universidade Federal de
 Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
 Título.

CDU: 624



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC**

ATA Nº: 199/2017

CANDIDATO: Rodrigo Rezende Oliveira

Nº. Matrícula: 11522ECV015

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

TÍTULO: "Análise numérica de sistemas de fôrmas de madeira para pilares de concreto armado".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

PROJETO DE PESQUISA: Sistemas Estruturais Em Madeira Para Aplicações Na Construção Civil

DATA DA DEFESA: 05 de dezembro de 2017

LOCAL: Sala de Projeções, bloco 1Y. **HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 14:00 h / 17:00 h

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Prof. Dr. Gerson Moacyr Sisniegas Alva – FECIV/UFU; Nilson Tadeu Mascia – FEC/UNICAMP e Francisco Antonio Romero Gesualdo** orientador do candidato. Ressalta-se todos os membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia – FEC/UNICAMP**

Membro interno: **Prof. Dr. Gerson Moacyr Sisniegas Alva – FECIV/UFU**

Uberlândia, 05 de DEZEMBRO de 2017.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Luiz e Ângela, que sempre me apoiam e não medem esforços para que possamos atingir juntos, nossos objetivos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Francisco Gesualdo, pelo seu apoio, dedicação, orientações e ensinamentos passados ao longo de todo o curso.

A Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar o Mestrado.

Aos meus colegas de curso, que contribuíram de maneira direta e indireta para a realização das disciplinas e deste trabalho.

A Universidade Federal do Triângulo Mineiro e ao Departamento de Engenharia, por permitir que eu tivesse jornada de trabalho diferenciada para cursar as disciplinas.

A todas as pessoas, que de alguma forma apoiaram e incentivaram para que eu continuasse a caminhada dos estudos, em especial agradeço ao meu avô, João Rodrigues de Oliveira (*In memoriam*), que sempre foi um exemplo para todos.

Oliveira, R. R. Análise numérica de sistemas de fôrmas de madeira para pilares de concreto armado. 121 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

RESUMO

Na execução de diversas estruturas de concreto armado, desde as mais simples até as mais complexas, são necessárias estruturas provisórias para dar forma e sustentação a estas estruturas até que sejam autoportantes. Estas estruturas provisórias são compostas de sistemas de fôrmas, que podem ser de madeira, metal, plástico, mistos entre outros. Visando contribuir para otimização dos sistemas de fôrmas de madeira comumente utilizados nas construções, nesta pesquisa foram feitas análises e simulações numéricas, que se baseiam no método dos elementos finitos, de diversas configurações de sistemas de fôrmas para pilares de concreto armado. Além disso, o estudo busca também soluções eficientes dos pontos de vista técnico, financeiro e prático para utilização de fôrmas de madeira na execução de pilares, tomando como ponto de partida, orientações da ABNT NBR 15696:2009. Foram estipulados fatores para a realização de dimensionamentos de fôrmas para pilares, inclusive com o desenvolvimento de equações, que possibilitem a simplificação dos cálculos. Também, foram realizadas comparações de diferentes configurações de fôrmas, definindo-se os modelos mais viáveis para execução.

Palavras-chave: Sistema de fôrmas. Madeira. Pilar de concreto armado. Simulação numérica. Método dos elementos finitos.

Oliveira, R. R. Numerical analysis of wooden formwork systems for concrete pillars. 121 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017.

ABSTRACT

In the execution of several structures of concrete, from the simplest to the most complex, temporary structures are needed to shape and sustain these concrete structures until they are self-supporting. These structures are composed of formwork systems, which can be wooden, metallic, plastic, mixed, among others. In order to contribute to the optimization of the wooden formwork systems commonly used in constructions, this research makes numerical analyzes and simulations, based on the finite element method, of various configurations of formwork systems for concrete pillars. In addition, the study also seeks efficient solutions from the technic, financial and practical points of view for the use of wood structures in the execution of pillars, taking as a starting point, guidelines in ABNT NBR 15696:2009. Factors were stipulated for the realization of sizing of formworks for pillars, including the development of equations, that make simplification of calculations possible. Also, comparisons of different formworks configurations were made, defining the most viable models for execution.

Keywords: Formwork system. Wood. Reinforced concrete pillar. Numerical simulation. Finite element method.

SÍMBOLOS E SIGLAS

Letras romanas

| | |
|--------------------|--|
| b | Largura da seção transversal de viga |
| e_{chapa} | Espessura da chapa compensada |
| E | Módulo de elasticidade de um material |
| $E_{c0,m}$ | Módulo de elasticidade médio na compressão normal às fibras |
| E_{c0ef} | Módulo de elasticidade efetivo normal às fibras da madeira serrada |
| E_{c0_chapa} | Módulo de elasticidade normal às fibras da chapa |
| E_{c90_chapa} | Módulo de elasticidade perpendicular às fibras da chapa |
| f_{c0k} | Resistência característica à compressão paralela às fibras |
| f_{c0k_chapa} | Resistência característica à compressão paralela às fibras da chapa |
| f_{cod} | Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras |
| f_{c0d_chapa} | Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da chapa |
| f_{c0m_chapa} | Resistência média 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_{vk} | Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras |
| 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 | Fator de correção para deslocamentos |
| FC_σ | Fator de correção para tensões |
| FC_x | Fator de correção para variável em análise |
| G_0 | Módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras |
| G_{90} | Módulo de elasticidade transversal perpendicular às fibras |
| h | Altura do painel da fôrma |
| h_s | Altura hidrostática |
| I | Momento de inércia da seção de um elemento |
| k_{mod} | Coefficiente de modificação |
| k_{mod_chapa} | Coefficiente de modificação da chapa |
| k_{mod_mad} | Coefficiente de modificação da madeira serrada |
| L | Comprimento/ Distância entre apoios |
| L_{es} | Distância de espaçamento |
| L_{pilar} | Largura do pilar |
| $M_{\text{máx}}$ | Momento fletor máximo |
| P_b | Pressão do concreto fluido |
| $P_{b,d}$ | Pressão de cálculo do concreto fluido |
| $P_{b,\text{mín}}$ | Pressão mínima do concreto fluido |
| $P_{b,\text{máx}}$ | Pressão máxima do concreto fluido |

| | |
|--------------------|---|
| $P_{b,retangular}$ | Pressão retangular aproximada do concreto fluido |
| q_{d_s} | Força atuante de cálculo – ELS |
| q_{d_u} | Força atuante de cálculo – ELU |
| 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 |
| X_d | Valor de cálculo para propriedades da madeira |
| X_k | Valor característico para propriedades da madeira |
| X_{MEF} | Variável calculada pelo método dos elementos finitos |
| X_{MS} | Variável calculada pelo método simplificado |
| y | Distância entre a borda e o eixo de uma determinada seção |

Letras gregas

| | |
|-------------------|--|
| γ | Peso específico do concreto |
| γ_Q | Coeficiente de majoração de ações |
| γ_w | Coeficiente de minoração das propriedades da madeira |
| ν | Coeficiente de Poisson |
| $\rho_{aparente}$ | Densidade aparente |
| $\rho_{bas,m}$ | Densidade básica média |
| $\sigma_{máx}$ | Tensão máxima atuante |
| Ψ_{0j} | Fatores de combinação e utilização |

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 |
| CG | Centro de Gravidade |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MOE | Módulo de elasticidade |
| MOR | Módulo de ruptura |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| PVC | Policloreto de Vinila |

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura de sistema de fôrmas de madeira em execução | 20 |
| Figura 2 – Subsistemas de fôrmas de lajes | 22 |
| Figura 3 – Subsistemas de fôrmas de pilares..... | 23 |
| Figura 4 – Subsistemas de fôrmas de vigas | 24 |
| Figura 5 – Chapas compensadas resinada (a) e plastificada (b) | 25 |
| Figura 6 – Barras de ancoragem para fôrmas de pilares..... | 26 |
| Figura 7 – Esquema geral sistema de fôrma para pilar..... | 26 |
| Figura 8 – Esquema de deslocamento aplicada em função da distância entre apoios..... | 32 |
| Figura 9 – Diagrama para determinação da pressão do concreto e a altura hidrostática..... | 36 |
| Figura 10 – Distribuição da pressão do concreto fluido sobre painel vertical | 37 |
| Figura 11 – Distribuição da pressão do concreto fluido para alturas especiais | 38 |
| Figura 12 – Simplificação do carregamento atuante sobre fôrma vertical | 40 |
| Figura 13 – Visão geral do carregamento atuante sobre sistema de fôrma vertical | 42 |
| Figura 14 – Seção transversal dos sarrafos de travamento do sistema de fôrma..... | 46 |
| Figura 15 – Fôrma com elementos de enijecimento horizontal (a) e vertical (b)..... | 47 |
| Figura 16 – Esquema estrutural geral para os modelos estudados | 48 |
| Figura 17 – Carregamento para MEF para sarrafos na horizontal (a) e na vertical (b)..... | 49 |
| Figura 18 – Tela de início de um projeto no sistema computacional ANSYS® | 50 |
| Figura 19 – Modelo em construção no sistema computacional ANSYS® | 51 |
| Figura 20 – Modelo com apoios inseridos..... | 52 |
| Figura 21 – Carregamento aplicado sobre o modelo | 53 |
| Figura 22 – Definição da malha para simulação do modelo | 54 |
| Figura 23 – Carregamento para MEF (a) e método simplificado (b) | 59 |
| Figura 24 – Esquema geral do sistema de fôrma para cálculos simplificados | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 – Resultado de deslocamento do painel para 5 vãos (pilar 20 cm × 40 cm) | 63 |
| Figura 26 – Deslocamentos máximos – Enrijecimentos horizontais..... | 65 |
| Figura 27 – Tensões máximas – Enrijecimentos horizontais | 66 |
| Figura 28 – Coeficiente de comparação para deslocamentos – Enrijecimentos horizontais | 67 |
| Figura 29 – Coeficiente de comparação para tensões – Enrijecimentos horizontais..... | 67 |
| Figura 30 – Esquema geral fôrma com espaçamento variável entre sarrafos | 70 |
| Figura 31 – Deslocamentos – modelo com espaçamento variável entre sarrafos (20 cm × 40 cm) | 71 |
| Figura 32 – Deslocamentos – modelo com espaçamento variável entre sarrafos (20 cm × 110 cm) | 73 |
| Figura 33 – Esquema geral do sistema de fôrma para cálculos simplificados | 75 |
| Figura 34 – Detalhe da distribuição das chapas de madeira compensada | 76 |
| Figura 35 – Resultado de deslocamento do painel para 5 vãos verticais (Pilar A) | 78 |
| Figura 36 – Deslocamentos máximos método simplificado – Enrijecimentos verticais..... | 80 |
| Figura 37 – Deslocamentos máximos por MEF – Enrijecimentos verticais | 81 |
| Figura 38 – Tensões máximas pelo método simplificado – Enrijecimentos verticais..... | 81 |
| Figura 39 – Tensões máximas por MEF – Enrijecimentos verticais | 82 |
| Figura 40 – Fatores de correção para deslocamentos – Enrijecimentos verticais | 83 |
| Figura 41 – Fatores de correção para tensões – Enrijecimentos verticais | 83 |
| Figura 42 – Comportamento de deslocamento do modelo vertical dimensionado..... | 88 |
| Figura 43 – Detalhe da modelagem dos tensores no programa ANSYS® | 91 |
| Figura 44 – Montagem final – Sistema de fôrma dimensionado..... | 91 |
| Figura 45 – Deslocamento fôrma vertical – Simulação MEF | 92 |
| Figura 46 – Modelo dimensionado e deslocamento ocorrido..... | 94 |
| Figura 47 – Deslocamento fôrma vertical ajustada | 96 |
| Figura 48 – Modelo dimensionado e deslocamento ocorrido..... | 98 |

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Subsistemas de fôrmas e seus componentes..... | 24 |
| Tabela 2 – Classes de umidade..... | 27 |
| Tabela 3 – Valores de $k_{mod,1}$ | 28 |
| Tabela 4 – Valores de $k_{mod,2}$ | 28 |
| Tabela 5 – Classificação do concreto quanto à consistência: ABNT NBR 15696:2009..... | 35 |
| Tabela 6 – Classificação do concreto quanto à consistência: ABNT NBR 8953:2015..... | 36 |
| Tabela 7 – Dados gerais do compensado de Pinus Brasileiro | 46 |
| Tabela 8 – Classes de resistência das coníferas..... | 46 |
| Tabela 9 – Variações de modelos para pilares com sarrafos de enrijecimento horizontais | 56 |
| Tabela 10 – Variações de modelos para pilares com sarrafos de enrijecimento verticais... | 57 |
| Tabela 11 – Resultados dos cálculos simplificados (Pilar 1) | 61 |
| Tabela 12 – Resultados por MEF (Pilar 1)..... | 62 |
| Tabela 13 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 1)..... | 63 |
| Tabela 14 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 1)..... | 64 |
| Tabela 15 – Dados do dimensionamento do modelo..... | 70 |
| Tabela 16 – Comparativo entre métodos de cálculo – Deslocamentos | 72 |
| Tabela 17 - Comparativo entre métodos de cálculo – Tensões | 72 |
| Tabela 18 – Detalhamento do carregamento atuante em cada modelo | 74 |
| Tabela 19 – Resultados dos cálculos simplificados (Pilar A) | 77 |
| Tabela 20 – Resultados por MEF (Pilar A)..... | 77 |
| Tabela 21 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar A)..... | 78 |
| Tabela 22 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar A)..... | 79 |
| Tabela 23 – Parâmetros de ajuste de curva..... | 85 |
| Tabela 24 – Parâmetros de ajuste de curva..... | 85 |
| Tabela 25 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma vertical | 93 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 26 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma vertical simplificada | 96 |
| Tabela 27 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma horizontal simplificada | 98 |
| Tabela 28 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 2)..... | 109 |
| Tabela 29 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 2)..... | 109 |
| Tabela 30 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 3)..... | 109 |
| Tabela 31 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 3)..... | 110 |
| Tabela 32 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 4)..... | 110 |
| Tabela 33 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 4)..... | 110 |
| Tabela 34 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 5)..... | 111 |
| Tabela 35 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 5)..... | 111 |
| Tabela 36 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 6)..... | 111 |
| Tabela 37 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 6)..... | 112 |
| Tabela 38 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 7)..... | 112 |
| Tabela 39 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 7)..... | 112 |
| Tabela 40 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 8)..... | 113 |
| Tabela 41 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 8)..... | 113 |
| Tabela 42 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar B)..... | 115 |
| Tabela 43 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar B)..... | 115 |
| Tabela 44 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar C)..... | 115 |
| Tabela 45 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar C)..... | 116 |
| Tabela 46 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar D)..... | 116 |
| Tabela 47 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar D)..... | 116 |
| Tabela 48 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar E) | 117 |
| Tabela 49 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar E) | 117 |
| Tabela 50 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar F) | 117 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 51 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar F) | 118 |
| Tabela 52 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar G)..... | 118 |
| Tabela 53 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar G)..... | 118 |
| Tabela 54 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar H)..... | 119 |
| Tabela 55 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar H)..... | 119 |
| Tabela 56 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar I) | 119 |
| Tabela 57 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar I) | 120 |
| Tabela 58 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar J) | 120 |
| Tabela 59 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar J) | 120 |
| Tabela 60 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar K)..... | 121 |
| Tabela 61 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar K)..... | 121 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 | 14 |
| INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES | 14 |
| 1.2 OBJETIVOS | 16 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO | 17 |
| CAPÍTULO 2 | 19 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 SISTEMA DE FÔRMAS PARA ESTRUTURAS CONVENCIONAIS | 19 |
| 2.2 CRITÉRIOS DA ABNT NBR 7190:1997 PARA FÔRMA DE MADEIRA..... | 27 |
| 2.3 CRITÉRIOS DA ABNT NBR 15696:2009 | 29 |
| CAPÍTULO 3 | 39 |
| PROGRAMA DE PESQUISA | 39 |
| 3.1 METODOLOGIA..... | 39 |
| 3.2 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS..... | 44 |
| 3.3 CASOS ESTUDADOS | 47 |
| 3.4 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS..... | 49 |
| CAPÍTULO 4 | 56 |
| RESULTADOS E ANÁLISES | 56 |
| 4.1 ORGANIZAÇÃO DOS MODELOS | 56 |
| 4.2 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DOS MODELOS COM ENRIJECIMENTOS HORIZONTAIS | 57 |

| | |
|--|-----|
| 4.3 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DOS MODELOS COM ENRIJECIMENTOS VERTICAIS | 74 |
| 4.4 DIMENSIONAMENTO COMPLETO DE SISTEMA DE FÔRMAS DE PILARES . | 89 |
| CAPÍTULO 5 | 101 |
| CONCLUSÃO..... | 101 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES | 101 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 104 |
| REFERÊNCIAS | 105 |
| APÊNDICE A | 108 |
| APÊNDICE B..... | 114 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A madeira é um material que apresenta um grande leque de utilização no dia a dia da sociedade, variando desde uma folha de papel que é produzida a partir da madeira, passando por pequenos objetos decorativos, mobiliário, até elementos de madeira com grandes funções estruturais como, por exemplo, construções de edifícios inteiros de madeira.

Falando especificamente da utilização da madeira em obras de engenharia, além da construção de edificações, esta também é bastante utilizada na execução de estruturas permanentes como fundações, estruturas aparentes ou embutidas de suporte para telhados, pontes e passarelas entre outros. Além disso, também é bastante utilizada na construção de estruturas provisórias como na execução de sistemas de fôrmas e cimbramentos para infraestrutura e superestrutura de pontes e de edificações térreas ou de múltiplos pavimentos. Segundo Pfeil (2003), as madeiras utilizadas nas construções podem ser divididas em duas categorias, madeiras maciças e madeiras industrializadas.

Na execução de estruturas de concreto é necessária a utilização de sistemas de fôrmas e escoramentos para que sejam estabelecidas as dimensões de acordo com o projeto, bem como para que ofereça suporte e sustentação à estrutura nos primeiros dias após a concretagem.

Segundo Valente e Gesualdo (2014), o concreto armado se consagrou ao longo dos anos como o material estrutural preferido dos projetistas para a construção civil no Brasil. Isto pode ser justificado por um conjunto de fatores destacando-se a disponibilidade de matéria-

prima para produção de cimento e agregado no país, normas técnicas regulamentadoras bem estabelecidas, flexibilidade arquitetônica permitida pelo material, resistência à água, resistência a altas temperaturas sem que ocorra combustão ou perda instantânea de resistência e durabilidade mesmo com pouca manutenção.

Para Jha (2012), um sistema de fôrmas tem o propósito de suportar seu peso próprio e do concreto fresco, bem como as cargas provenientes de materiais, equipamento e trabalhadores.

Pode-se chamar de sistema de fôrma o conjunto completo dos elementos que o compõem, incluindo-se a própria fôrma, os escoramentos, elementos de escoramento remanescentes, equipamentos de transporte, de apoio e de manutenção etc. Pode-se obtê-lo confeccionando-os totalmente ou parte dele no canteiro de obra mediante um projeto específico de produção de fôrma. Necessitam-se, neste caso, dos insumos básicos como a chapa compensada, madeiras serradas e pregos, como também, dos equipamentos e ferramentas de carpintaria, tais como, serra circular de bancada, serra manual, furadeiras, bancada de carpintaria, etc.

Peurifoy e Oberlender (2010) destacam a grande importância dos sistemas de fôrmas por representar o maior custo na execução de estruturas de concreto armado em geral.

Entre os vários sistemas de fôrmas ofertados, a diferença reside principalmente no material utilizado nas suas partes, tanto na fôrma como no escoramento, além das particularidades que personaliza cada sistema quanto à adequabilidade, praticidade, durabilidade e principalmente, ao preço. Estes sistemas de fôrmas podem ser feitos com elementos de madeira, materiais metálicos ou plásticos, ou com a combinação entre os diversos tipos. A madeira apresenta importantes características que a torna apropriada para este tipo de aplicação, pois é leve, resistente e tem facilidade de adaptação às diferentes formas geométricas.

Um aspecto importante a respeito da utilização de madeira para montagem do sistema de fôrmas está relacionado ao elevado volume de material utilizado. Mesmo assim, em grande parte dos casos são utilizadas peças de madeira de maneira aleatória, sem se preocupar

com um possível reaproveitamento para confecção de outras fôrmas ou em diferentes situações da obra.

Assim, os sistemas de fôrmas são extremamente importantes para execução da estrutura. A ocorrência de erros na montagem não obedecendo aos projetos de fôrmas, ou a falta destes, podem provocar deformações excessivas dos componentes, além de poder ocasionar acidentes, que implicam em atrasos no cronograma da obra, assim como gastos extraordinários, frutos de retrabalhos, de adaptações ou de reforços da estrutura. Pensando nestes aspectos, muitas pesquisas a respeito do tema foram desenvolvidas até o momento visando garantir a execução de um sistema de fôrmas eficiente, com garantia de segurança para a estrutura e para as pessoas, gerando o menor gasto possível para toda a obra e buscando sempre a otimização da utilização dos materiais visando minimizar os impactos ambientais oriundos desta utilização.

1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos deste estudo.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é criar um modelo prático para elaboração de projetos e verificação de diversos sistemas de fôrmas de madeira ou misto para pilares, quanto à sua estabilidade e segurança.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar as diversas possibilidades de montagem do sistema de fôrmas para pilares de concreto armado variando o posicionamento e dimensões dos componentes da fôrma;
- Comparar custos para utilização de cada configuração de fôrmas estudada, para auxílio na escolha do modelo de fôrmas mais apropriado;

- Propor, a partir da análise dos resultados gerados ao longo do estudo, uma composição de fôrmas para pilares que ofereça maior padronização e confiabilidade ao sistema proporcionando maior praticidade para sua execução.

1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto armado caracteriza-se por depender inicialmente do sistema de fôrma e escoramento até que se torne autoportante. Este aspecto confere às fôrmas grande importância para a execução destes sistemas. Porém esta execução muitas vezes é feita baseada na experiência de canteiro de obras que mestres e encarregados de obra adquiriram ao longo da vida sem que sejam seguidas instruções normativas. Algumas normas abordam aspectos relativos à utilização da madeira na engenharia, tais como, a ABNT NBR 7190:1997 que trata do projeto de estruturas de madeira em geral e a ABNT NBR 15696:2009, que trata dos diversos aspectos específicos relativos à elaboração de projetos e execução de fôrmas e escoramentos. Entretanto vários aspectos da sua aplicação não se encontram suficientemente claros, o que dificulta a expansão do seu uso no meio da indústria da construção.

Devido à grande importância do sistema de fôrmas, este estudo se justifica, pois visa esclarecer alguns aspectos, presentes em pesquisas e normas relacionadas ao tema. Também tem a finalidade de aprimorar a utilização de sistemas de fôrmas de madeira, procurando gerar propostas para execução destes sistemas que sejam práticas para os projetistas destes sistemas dentro das exigências normativas.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução: é feita uma breve abordagem da importância do estudo de sistemas de fôrmas para estruturas de concreto e são apresentados os objetivos desta pesquisa.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta uma visão geral da utilização de sistemas de fôrmas de madeira para estruturas de concreto armado.

- Capítulo 3 – Programa de pesquisa: apresenta os procedimentos que serão realizados no estudo, bem como a modelagem dos casos a serem analisados por métodos numéricos.
- Capítulo 4 – Resultados e análises: descreve os resultados obtidos pela pesquisa, com suas respectivas análises.
- Capítulo 5 – Considerações finais: relaciona as conclusões e considerações pertinentes aos resultados gerados pela pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA DE FÔRMAS PARA ESTRUTURAS CONVENCIONAIS

Um sistema de fôrmas pode ser definido, segundo Fajersztajn (1992) como uma estrutura que atua no processo de moldagem e sustentação do concreto fresco até que o mesmo atinja resistência suficiente para suportar as ações que lhes são submetidas, devendo o sistema suportar o seu peso próprio, peso do concreto, peso do aço e do tráfego de operários e equipamentos.

Já para Morikawa (2003), a fôrma tem o objetivo de dar ao concreto armado, em sua etapa construtiva, a geometria estipulada no projeto, até que o mesmo adquira suficiente resistência.

De acordo com Assahi (2004), podemos chamar de sistema de fôrma ao conjunto completo dos elementos que o compõem, incluindo-se a própria fôrma, elementos de escoramento e reescoramento, equipamentos de transporte, de apoio e de manutenção etc.

A ABNT NBR 14931:2004, que instrui sobre diversos aspectos a respeito da execução de estruturas de concreto, relata que o sistema de fôrmas, que compreende as fôrmas, o escoramento e os andaimes, incluindo seus apoios, deve ser projetado e construído de modo a ter resistência às ações que possam surgir durante o processo de construção, e apresente rigidez suficiente para assegurar que as tolerâncias e especificações do projeto sejam satisfeitas e a integridade dos elementos estruturais não seja afetada.

Para Nazar (2007), um sistema de fôrmas é o conjunto de materiais e equipamentos que são utilizados para concebê-las e executá-las.

Segundo a ABNT NBR 15696:2009, os sistemas de fôrmas são definidos como estruturas provisórias que servem para moldar o concreto fresco, resistindo a todas as ações provenientes das ações variáveis resultantes das pressões do lançamento do concreto fresco, até que o concreto se torne autoportante. Em complemento a este conceito, esta mesma norma apresenta a definição de sistema de escoramento como sendo estruturas provisórias com capacidade de resistir e transmitir às bases de apoio da estrutura do escoramento todas as ações provenientes das solicitações permanentes e variáveis resultantes do lançamento do concreto fresco sobre as fôrmas horizontais e verticais, até que o concreto se torne autoportante.

Assim, os sistemas de fôrmas para construções de estruturas de concreto desempenham um papel extremamente importante. Os tipos de subsistemas e materiais utilizados na composição das fôrmas apresentam relação direta para o correto e eficaz desempenho do sistema como um todo. A seguir são destacados alguns dos aspectos mais importantes dos componentes dos sistemas de fôrmas de madeira. A Figura 1 apresenta um sistema de fôrmas de madeira em execução.

Figura 1 – Estrutura de sistema de fôrmas de madeira em execução



Fonte: Autor

2.1.1 Tipos de sistemas de fôrmas de madeira

De acordo com Fajersztajn (1992), pode-se analisar as fôrmas subdividindo-se o sistema de fôrmas em subsistemas, elementos e componentes.

O subsistema de fôrma é o conjunto das fôrmas utilizadas para moldar determinadas partes da estrutura de concreto armado da edificação. Então, tem-se um subsistema lajes, vigas, pilares e paredes, conforme a função que cada uma das partes desempenha na estrutura. (MARANHÃO, 2000).

Os elementos são conjuntos de peças que exercem função determinada dentro do subsistema de fôrmas. São classificados de acordo com a finalidade em molde, estrutura do molde, escoramento e acessórios. O molde é o elemento que entra em contato direto com o concreto, definindo sua geometria e textura. A estrutura do molde é o elemento destinado a enrijecer e suportar o molde, garantindo que não se deforme quando submetido aos esforços originados pelas operações de armação e concretagem. Já escoramento, para Pfeil (1987), são todos os elementos que servem para sustentar as fôrmas, equipamentos e funcionários, estruturas auxiliares e o concreto até que este seja autoportante.

Segundo Maranhão (2000), o subsistema de fôrma para laje é composto por painéis de laje que são constituídos de chapas de compensado, apoiados sobre longarinas, que são vigas compostas de madeira maciça ou sobre vigas treliçadas de madeira. As longarinas, por sua vez, se apoiam nas transversinas, que são compostas pelo mesmo material das longarinas e transferem os esforços para o escoramento.

Para Nemati (2007), a fôrma para lajes consiste em um revestimento, normalmente de madeira compensada, que se apoia sobre vigas, que por sua vez são apoiadas por longarinas que descarregam todas as solicitações do sistema sobre as escoras.

Na Figura 2 é apresentado um modelo de subsistema de lajes conforme descrito anteriormente.

O subsistema de pilar possui como principais componentes os painéis, as gravatas, galgalhos, os tensores ou tirantes e acessórios para nivelamento. Os galgalhos têm como principal função locar a fôrma, para o correto posicionamento do molde, e conter os

empuxos na base do pilar. O molde é composto pelos painéis laterais, confeccionados usualmente em madeira compensada. São utilizados sarrafos e pontaletes para estruturação do molde e o travamento é executado com a utilização das gravatas ou dos tirantes. Os tirantes normalmente são as barras de ancoragem apertadas com porcas.

Figura 2 – Subsistemas de fôrmas de lajes



Fonte: Autor

Na Figura 3 é apresentado um modelo de subsistema de pilares conforme descrito anteriormente.

O subsistema de viga é composto basicamente por painéis de face e fundo da viga, sarrafos, garfos e acessórios para nivelamento, (MARANHÃO, 2000). Os painéis, tanto os de face quanto os de fundo, 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. Os mesmos trabalham como escora para os painéis de fundo de viga e como travamento para os laterais, evitando deformações horizontais excessivas. Além disso, são eles que transmitem os esforços verticais do molde e da estrutura do molde para os pontos de apoio na superfície,

(MARANHÃO, 2000). O principal acessório para nivelamento dos painéis são as cunhas de madeiras, colocadas entre a travessa inferior do garfo de madeira e a estrutura, ou então a utilização de escoras metálicas com regulagem de altura.

Figura 3 – Subsistemas de fôrmas de pilares



Fonte: Autor

Na Figura 4 é apresentado um modelo de subsistema de vigas conforme descrito anteriormente.

Na Tabela 1 é mostrado um resumo dos subsistemas e seus elementos e componentes.

Figura 4 – Subsistemas de fôrmas de vigas



Fonte: Autor

Tabela 1 – Subsistemas de fôrmas e seus componentes

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

Fonte: Maranhão (2000)

2.1.2 Materiais e componentes de fôrmas para pilares

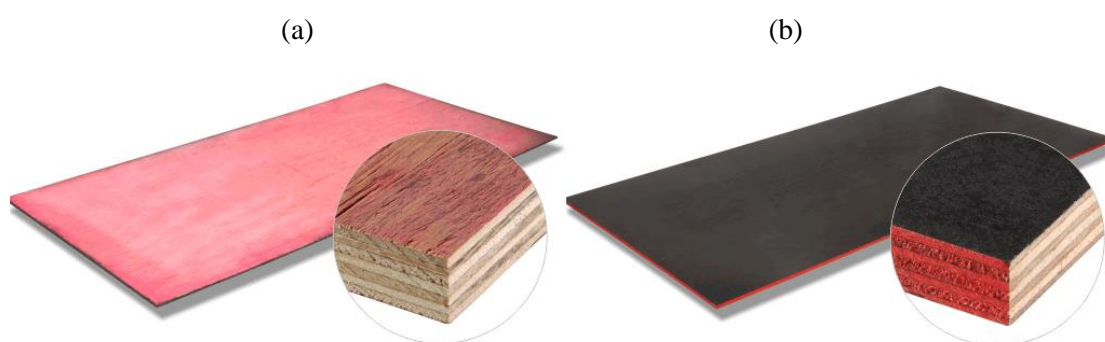
De maneira geral os sistemas de fôrmas feitos em madeira utilizam materiais e acessórios semelhantes entre si, sendo estes adaptados para cada peça, estrutural ou não, a ser

executada. Moliterno (1989) descreve que a madeira para fôrmas deve ter como qualidade, elevado módulo de elasticidade, razoável resistência, permitir vários reaproveitamentos e por consequência gerando baixos custos.

Para o caso dos pilares, são utilizadas chapas de madeira compensada como moldes para o pilar lhe conferindo uma geometria de acordo com as medidas de projeto. Estas chapas compensadas são fabricadas em várias lâminas prensadas e posicionadas em direções perpendiculares uma em relação à outra. Os compensados mais utilizados para execução de estruturas de concreto são o compensado resinado e o compensado plastificado. O resinado tem custo mais baixo que o plastificado, porém é de qualidade inferior, o que implica diretamente no reaproveitamento destas peças. Quando se tem uma obra em que a mesma fôrma será utilizada em múltiplos pavimentos é recomendada a utilização de chapas compensadas plastificadas por possuírem em sua superfície um filme fenólico que protege a peça de madeira. As chapas compensadas são fabricadas em diversas espessuras (de 6 mm a 20 mm) e medindo 110 cm de largura por 220 cm de altura, como medida padrão. Podem também ser encontradas chapas com 122 cm \times 244 cm.

A Figura 5 apresenta modelos de chapas compensadas de madeira usuais na execução de estruturas de concreto armado em geral.

Figura 5 – Chapas compensadas resinada (a) e plastificada (b)



Fonte: GlobalWood (2017)

Para proporcionar maior rigidez ao sistema de fôrmas dos pilares são utilizadas peças de madeiras serradas, tais como, sarrafos, tábuas, pontaletes e caibros em diferentes medidas. Estas peças são posicionadas e fixadas junto às chapas compensadas enrijecendo e travando os painéis a fim de que o sistema suporte as solicitações do concreto durante e após a concretagem da estrutura. Madeiras serradas também são utilizadas na execução de

gastalhos e aprumadores do sistema. Em todas as montagens das fôrmas são utilizados pregos de diversos tamanhos e modelos buscando a melhor fixação possível para as peças de madeira visando também facilitar o processo de desmoldagem das fôrmas após a concretagem.

O travamento final do sistema de fôrma de pilares é feito por meio de tensores ou barras de ancoragem como mostrado na Figura 6.

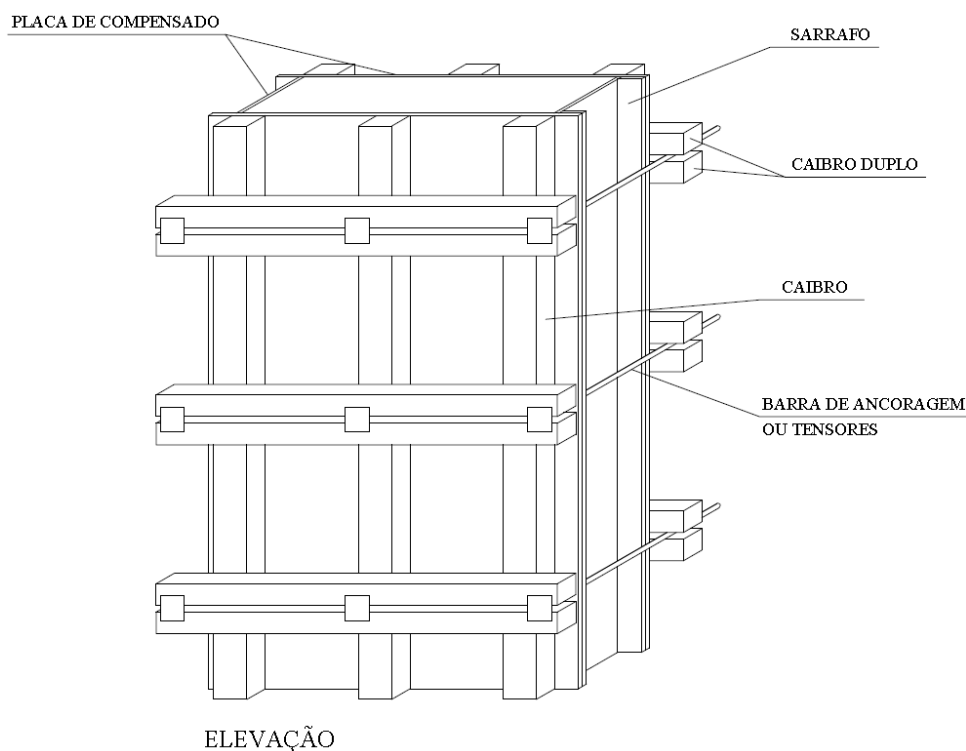
Figura 6 – Barras de ancoragem para fôrmas de pilares



Fonte: Amcore (2017)

Um esquema geral da composição de sistemas de fôrmas para pilares pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Esquema geral sistema de fôrma para pilar



Fonte: adaptado de Calil (2005) apud Júnior (2008)

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

A ABNT NBR 7190:1997 trata das condições gerais a serem seguidas na elaboração de projetos e na execução de estruturas de madeira em geral, sejam elas definitivas como pontes, coberturas e pisos, ou provisórias como sistemas de fôrmas e escoramentos. Nela são abordados itens essenciais que devem compor o projeto de uma estrutura de madeira, bem como tópicos fundamentais para o correto dimensionamento das mais diversas estruturas. Dentre estes tópicos está a avaliação dos estados limites (último e de utilização) da estrutura, combinações de ações e carregamentos atuantes, análise das situações de projeto a serem consideradas (duradouras, transitórias e excepcionais), de acordo com cada tipo de estrutura.

Outro tema apresentado nesta norma, que tem influência direta no dimensionamento e comportamento das estruturas, é com relação às propriedades das madeiras a serem utilizadas na composição da estrutura e sob quais condições esta ficará exposta. Nesta parte da norma são descritas as principais propriedades da madeira, tais como, densidade, resistência, rigidez e umidade. Na Tabela 2 são apresentadas as classes de umidade em que são divididas as madeiras, para efeito de dimensionamento.

Tabela 2 – Classes de umidade

| 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 | $\geq 25\%$ |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

É feita também uma caracterização das propriedades da madeira de acordo com a classe a que estas pertencem (Coníferas ou Dicotiledôneas) e o tipo de madeira utilizada (serrada, laminada, compensada ou recompostas). Todos estes parâmetros influenciam diretamente nos valores de cálculo de algumas propriedades do material como a resistência e o módulo de elasticidade. Assim a ABNT NBR 7190:1997 estabelece a utilização de um coeficiente de modificação (k_{mod}), representado pela Equação 1, para determinação dos valores de

cálculo (resistência, módulo de elasticidade, entre outros) a serem utilizados no dimensionamento das estruturas de madeira.

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

A Equação 1 leva em consideração a classe de carregamento e o tipo de material empregado na estrutura, representado pelo coeficiente parcial de modificação $k_{mod,1}$, conforme apresentado na Tabela 3. Leva em conta a classe de umidade da madeira de acordo com o tipo de material por meio do coeficiente parcial de modificação $k_{mod,2}$, apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Valores de $k_{mod,1}$

| Classes de carregamento | Tipos de madeira | |
|-------------------------|--|--------------------|
| | Madeira serrada Madeira laminada colada 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 de $k_{mod,2}$

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

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Já o coeficiente parcial de modificação $k_{mod,3}$ leva em conta se a madeira é de primeira ou segunda categoria. Para uma madeira ser considerada de primeira categoria esta deve estar isenta de defeitos e apresentar rigidez homogênea em todo lote da madeira a ser empregado na mesma estrutura. Para madeiras de primeira categoria adota-se $k_{mod,3} = 1,0$ e para madeiras de segunda categoria $k_{mod,3} = 0,8$. A norma ainda ressalta que, para as coníferas em madeira serrada para peças estruturais, o $k_{mod,3}$ a ser adotado sempre deve ser igual a 0,8, levando-se em conta o risco de haver nós de madeira nas partes não visíveis das peças estruturais.

Além disso, a ABNT NBR 7190:1997 expõe uma série de critérios para dimensionamento de peças de madeira para diversas condições estruturais bem como detalhamento de tipos de ligações para peças de madeira quando estas são necessárias em uma estrutura.

Como anexo da norma, são apresentadas regras para desenho de projetos de estruturas de madeira em geral, roteiro para realização de ensaios para determinação de propriedades físicas e mecânicas das madeiras, roteiro para ensaios de resistência de ligações de peças de madeira e recomendações sobre a durabilidade das madeiras. São mostradas também tabelas com valores de referência para densidade, resistências e rigidez para diversas espécies de madeiras comumente utilizadas na execução de estruturas de madeira.

Vários dos critérios e parâmetros apresentados na ABNT NBR 7190:1997 são parcial ou totalmente aplicáveis às estruturas de sistemas de fôrmas de madeira, porém alguns aspectos específicos destes sistemas, que são estruturas de madeira provisórias, são abordados superficialmente ou até mesmo não são abordados. Assim, em 2009 foi editada a ABNT NBR 15696:2009 que trata especificamente de estruturas provisórias como sistemas de fôrmas de madeira. Esta norma e seus critérios serão abordados na Seção seguinte.

2.3 CRITÉRIOS DA ABNT NBR 15696:2009

A ABNT NBR 15696:2009 fixa os procedimentos e condições a serem obedecidos na execução de estruturas provisórias que servem de fôrmas e escoramentos, para a execução de estruturas de concreto, incluindo materiais e equipamentos utilizados, e critérios para dimensionamento de projetos deste tipo de estrutura.

2.3.1 Projeto de fôrmas e escoramentos

Com relação aos projetos de fôrmas a norma estabelece que estes devem:

- Especificar os materiais utilizados;
- Definir o posicionamento de todos os elementos utilizados;
- Apresentar os critérios adotados para o dimensionamento da fôrma, tais como a pressão do concreto, a velocidade de lançamento, altura de concretagem, etc.;

- Ter detalhamento completo do sistema, para facilitar a correta execução da montagem.

2.3.2 Ações atuantes

Dentre as solicitações existentes ou atuantes sobre o sistema estão:

- Peso próprio dos componentes do sistema de fôrmas;
- Peso do concreto, armadura e demais componentes da estrutura a ser suportados pelo sistema de fôrmas;
- Solicitações geradas no momento do lançamento do concreto;
- Sobrecarga de trabalho oriundas dos serviços de concretagem;
- Impacto e movimentação de máquinas e equipamentos utilizados na concretagem;
- Pressões de vento, não inferiores a 0,6 kN/m²;
- Forças provenientes da pressão horizontal do concreto (fundamental no caso de fôrmas para vigas e pilares).

2.3.3 Métodos de cálculo

Em uma abordagem mais específica de dimensionamento para sistema de fôrmas a ABNT NBR 15696:2009 apresenta alguns métodos e critérios de cálculo.

2.3.3.1 Estados limites últimos

Considerando a estrutura em seu estado limite último, deve sempre ser verificado que as ações atuantes (F_d) gerem solicitações de cálculo que sejam menores ou iguais à resistência de cálculo (R_d) desta estrutura. A determinação destas ações atuantes é feita a partir da combinação de ações provenientes de estruturas convencionais mesmo que o sistema de fôrmas e escoramentos seja de caráter provisório. A Equação 2 representa a combinação de ações para dimensionamento do sistema:

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

Onde, $F_{Ql,k}$ representa o valor característico da ação variável considerada como principal para a situação transitória; $\Psi_{0j,ef}$ é igual ao fator Ψ_{0j} adotado em combinações normais e tomado como 1,0 e $\gamma_Q = 1,4$. Fazendo as devidas substituições de valores na Equação 2, tem-se a Equação 3.

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

Como os sistemas de fôrmas e escoramentos são de natureza transitória, não são consideradas parcelas de ações permanentes na combinação para o dimensionamento, observando que o peso próprio é considerado como ação variável.

O valor de cálculo X_d de qualquer propriedade da madeira é obtido de um valor característico X_k , através da Equação 4:

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

onde, X_{ik} é o valor característico para os diversos esforços; 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 , conforme especificado na Seção anterior a respeito da ABNT NBR 7190:1997 e da Equação 1 (pág. 28).

Para o caso de fôrmas, o coeficiente $k_{mod,1}$ pode ser adotado igual a 0,9, considerando que a ação variável é de curta duração. O coeficiente $k_{mod,2}$ pode ser adotado igual a 0,8 para madeira maciça e 1,0 para madeira industrializada. O coeficiente $k_{mod,3}$ pode ser adotado 0,8.

O coeficiente γ_w pode ser adotado igual a 1,4 para determinação de tensões de compressão paralelas às fibras da madeira, e igual a 1,8 para tensões de cisalhamento. A norma também apresenta equações simplificadas para cálculo de tensões de acordo com cada situação de solicitação, posicionamento e tipo de material utilizado no sistema de fôrmas de madeira.

2.3.3.2 Estados limites de utilização (ou serviço)

Segundo a ABNT NBR 15696:2009 é o estado que, pela sua ocorrência, repetição ou duração, provoque efeitos incompatíveis com as condições de uso da estrutura, tais como: deslocamentos excessivos, vibrações e deformações permanentes.

A condição principal a ser considerada para este caso dada pela Equação 5 é:

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

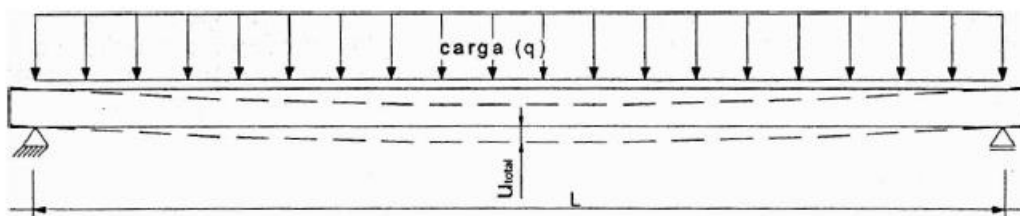
em que, u_{total} é a máxima flecha que ocorre no elemento, calculada com a “carga de peso próprio do concreto e sobrecarga de 1,0 kN/m²”; e u_{lim} é a deformação limite e é dada pela Equação 6. Quando ocorre pressão lateral devida ao empuxo do concreto – caso de vigas e pilares –, o termo “peso próprio do concreto” acredita-se corresponder à ação devida ao empuxo, pois, caso contrário, não haveria solicitação a considerar – interpretação do autor.

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

onde, L é a distância, em milímetros, entre os apoios de cada elemento estrutural da fôrma estudada.

A Figura 8 representa o esquema de deslocamento que ocorre nos elementos do sistema de fôrmas.

Figura 8 – Esquema de deslocamento aplicada em função da distância entre apoios



Fonte: ABNT NBR 15696:2009

2.3.4 Execução de estrutura de fôrmas e escoramentos

Inicialmente a ABNT NBR 15696:2009 ressalta que todos os procedimentos de montagem, lançamento do concreto, desmontagem, armazenamento e transporte de materiais e

equipamentos devem ser realizados dentro das instruções a respeito de técnicas de segurança constantes na norma regulamentadora ABNT NR 18 e ABNT NBR 7678.

Algumas condições importantes que as fôrmas devem apresentar são:

- Rigidez para assegurar a geometria e dimensões das peças estruturais de concreto, conforme estabelecido em projeto, dentro de tolerâncias admissíveis;
- Estanqueidade, de modo a impedir a perda de pasta de cimento, o que pode comprometer as propriedades do concreto aplicado.

Certos cuidados devem ser tomados na montagem dos sistemas de fôrmas e escoramentos tais como:

- Utilização de projeto específico de fôrmas e escoramentos para cada elemento;
- Seguir métodos e procedimentos adequados de montagem e desmontagem dos sistemas de fôrmas seguindo orientações de projeto a respeito da sequência e prazos corretos de execução de cada etapa;
- Quando peças e equipamentos utilizados no sistema forem industrializados, devem ser seguidas as instruções dos fornecedores;
- Elementos estruturais das fôrmas, como por exemplo, barras de ancoragem, tirantes, tubulações entre outros, podem ser colodados dentro da seção da estrutura de concreto, desde que tenha passado por verificação do projetista estrutural, e que siga as seguintes condições:
 - Os elementos devem ser fixados corretamente assegurando o seu posicionamento durante a concretagem;
 - Não podem alterar as características estruturais da peça;
 - Não devem reagir de maneira nociva com os componentes do concreto e armaduras;
 - Não provocar manchas em concretos aparentes;
 - Não prejudicar o instante da aplicação do concreto;
 - Não interferir na função e durabilidade do elemento estrutural.
- Evitar casos em que partes da fôrma ficam perdidas, ou seja, após a concretagem não seja possível a sua retirada completa, em função da geometria dos elementos da estrutura de concreto;

- Podem ser utilizados agentes desmoldantes de maneira adequada (sem falta ou excesso) sobre as fôrmas de madeira a fim de facilitar o processo de retirada das fôrmas após a concretagem, preservando a integridade dos painéis, aumentando o número de reaproveitamento.

Para a etapa de concretagem também são necessários alguns cuidados:

- Deve ser feita toda a conferência de dimensões, nivelamento e prumo das fôrmas, visando assegurar as dimensões das peças estruturais definidas pelo projeto;
- Realização de conferência das posições e condições estruturais dos escoramentos garantindo as dimensões e posicionamento correto das fôrmas conforme estipulado em projeto;
- As superfícies internas das fôrmas devem estar limpas e apresentar condição de estanqueidade das juntas, para evitar a perda de pasta de cimento do concreto;
- As fôrmas devem ser molhadas para minimizar a perda de água do concreto para os painéis de madeira;
- Tubulações para bombeamento e condução do concreto não devem ser fixados aos escoramentos e fôrmas ou qualquer outra parte do sistema de fôrma a ser concretado, pois devido ao impacto gerado no momento do bombeamento pode retirar elementos do sistema de sua posição original;
- Evitar acúmulo de concreto em pequenas áreas do sistema de fôrmas para que não sejam geradas sobrecargas excessivas.

Juntamente com todas estas orientações e cuidados, deve sempre ser feito o acompanhamento passo a passo da execução de cada etapa, desde a montagem dos painéis, posicionamento e montagem de todo sistema de fôrmas, passando pela fase da concretagem até a completa retirada de fôrmas e escoramentos, devendo ser observado o comportamento de todo sistema a fim de garantir a correta execução da estrutura de concreto conforme definido pelo projeto.

2.3.5 Critérios de cálculo da pressão do concreto para fôrmas verticais

Uma situação bastante importante existente nos sistemas de fôrmas é com relação às fôrmas verticais, que são utilizadas nas laterais de vigas, pilares, paredes de concreto,

reservatórios, muros de arrimos, e outras aplicações, que sofrem a pressão do concreto fluido como ação variável.

2.3.5.1 Definições

Algumas definições importantes são apresentadas pela ABNT NBR 15696:2009, para o estudo de fôrmas verticais, tais como:

- Pressão do concreto fluido: pressão horizontal que o concreto exerce sobre a face da fôrma em contato com o concreto. O símbolo para esta pressão é P_b e a unidade de medida é kN/m^2 ;
- Velocidade de concretagem: incremento vertical do nível superior do concreto fluido medido linearmente em relação ao tempo decorrido de concretagem. O símbolo é v_b e a unidade de medida é m/h ;
- Altura hidrostática: diferença entre a superfície superior do concreto fluido e a altura, onde a pressão do concreto fluido atinge o valor máximo de P_b . O símbolo é h_s e a unidade de medida é em metro (m);
- Consistência: atributo que caracteriza a moldabilidade e a fluidez do concreto. A Tabela 5 apresenta as classes de consistência que o concreto pode ser classificado segundo a ABNT NBR 15696:2009 e a ABNT NBR 8953:2015. A Tabela 6 mostra classificação do concreto quanto à consistência da ABNT NBR 8953:2015.
- Tempo de endurecimento: tempo entre o momento da mistura do concreto e o momento quando o concreto atingiu a dureza suficiente que a pressão horizontal contra a fôrma com carga vertical adicional não mais aumenta. O símbolo é t e a unidade de medida é em hora.

Tabela 5 – Classificação do concreto quanto à consistência: ABNT NBR 15696:2009

| 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

Tabela 6 – Classificação do concreto quanto à consistência: ABNT NBR 8953:2015

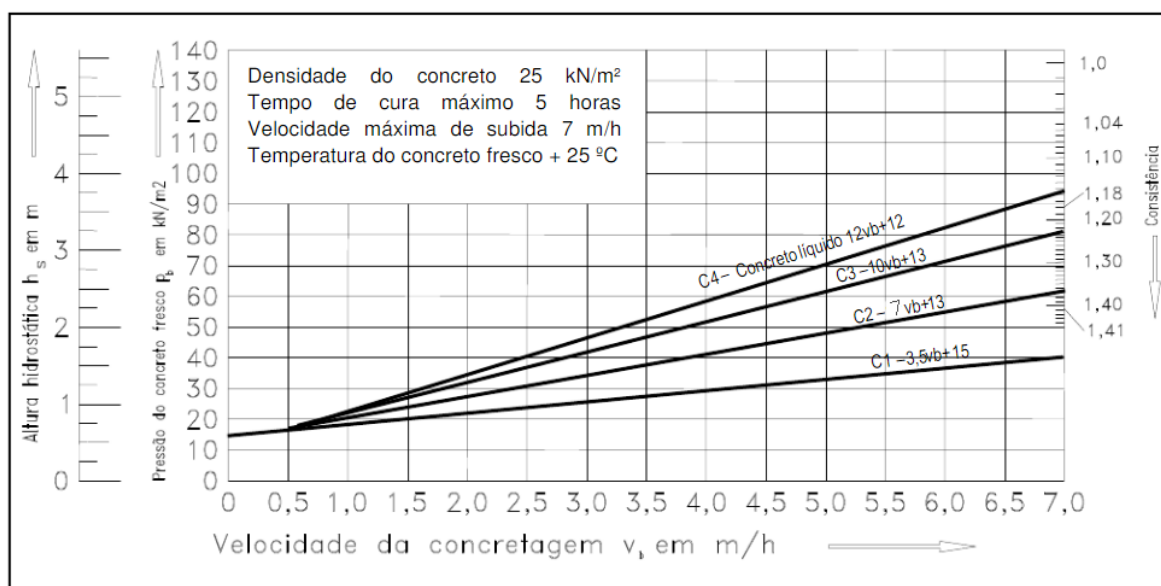
| Classe | Abatimento (mm) | Aplicações típicas |
|--------|--------------------|---|
| S10 | $10 \leq A < 50$ | Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado |
| S50 | $50 \leq A < 100$ | Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações |
| S100 | $100 \leq A < 160$ | Elementos estruturais com lançamento convencional do concreto |
| S160 | $160 \leq A < 220$ | Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto |
| S220 | ≥ 220 | Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras |

Fonte: ABNT NBR 8953:2015

2.3.5.2 Determinação do valor da pressão do concreto fluido

Para determinação do valor da pressão do concreto fluido (P_b) em um painel vertical de um sistema de fôrmas, a ABNT NBR 15696:2009 apresenta um gráfico onde também pode-se extrair o valor para altura hidrostática (h_s) em função da velocidade de concretagem (v_b) e classes de consistência do concreto. A Figura 9 apresenta este diagrama com uma adaptação do valor da equação representativa para a curva da classe de consistência C2 que estava representado pelo mesma equação da curva C3 ($10 v_b + 13$), enquanto que a equação adequada para a curva C2 é igual a ($7 v_b + 13$).

Figura 9 – Diagrama para determinação da pressão do concreto e a altura hidrostática



Fonte: ABNT NBR 15696:2009 (curva C2 adaptada)

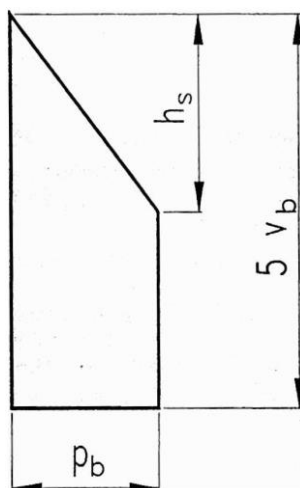
O diagrama da Figura 9 foi elaborado com base em algumas considerações e condições a serem respeitadas no momento da concretagem:

- Peso específico do concreto fluido é $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$;
- Concreto fluido lançado com temperatura própria de 25°C ;
- Concreto fluido endurece em no máximo 5 horas;
- Compactação/ adensamento do concreto fluido feita com vibração interna;
- Fôrma estanque;
- Velocidade de concretagem não passa de $7,0 \text{ m/h}$.

2.3.5.3 Distribuição da pressão do concreto fluido ao longo da altura

A pressão atuante sobre os painéis verticais de sistemas de fôrmas tem distribuição triangular ao longo do comprimento do painel, atingindo seu valor máximo na parte inferior da fôrma, e corresponde ao resultado da multiplicação do peso específico do concreto (P_b) pela altura do painel vertical. Porém este valor máximo de carregamento fica limitado ao valor originado da multiplicação de P_b pela altura hidrostática (h_s) gerando a distribuição de carregamento apresentado na Figura 10, utilizada para painéis verticais com altura não superior a $h = 5 v_b$ (tempo de endurecimento \times velocidade de concretagem).

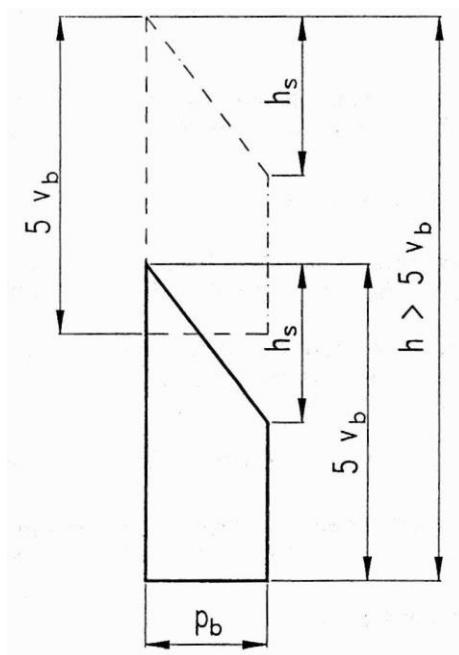
Figura 10 – Distribuição da pressão do concreto fluido sobre painel vertical



Fonte: ABNT NBR 15696:2009

Para o caso de alturas superiores à $5 v_b$, deve-se adotar a distribuição com a configuração apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição da pressão do concreto fluido para alturas especiais



Fonte: ABNT NBR 15696:2009

Para todos os casos a norma especifica a utilização da situação mais desfavorável do carregamento para o dimensionamento da fôrma.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA DE PESQUISA

3.1 METODOLOGIA

A seguir é apresentada uma abordagem geral dos métodos de pesquisa utilizados para realização dos estudos propostos com relação ao dimensionamento e ao comportamento de sistemas de fôrmas para pilares de concreto armado.

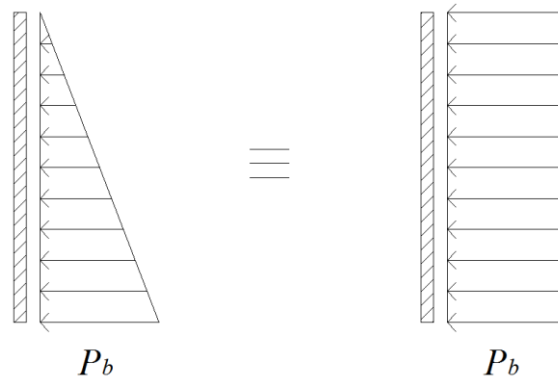
3.1.1 Métodos simplificados de cálculo

De maneira geral, para o dimensionamento e verificações dos sistemas de fôrmas de vigas, pilares entre outros, buscam-se métodos de cálculo simplificados visando maior praticidade na elaboração de projetos e na execução propriamente dita dos sistemas de fôrma. Como apresentado no Capítulo anterior, os carregamentos atuantes sobre painéis verticais de fôrmas de vigas, pilares, paredes de concreto, possuem distribuição triangular até certo ponto, a depender da altura total do elemento. Assim, uma maneira de simplificação bastante utilizada é a substituição destes carregamentos triangulares por carregamentos retangulares correspondentes ao máximo valor encontrado anteriormente, ou um carregamento retangular com valor médio aproximado, de acordo com cada caso a ser analisado.

Para os casos estudados nesta pesquisa será utilizada a simplificação do carregamento triangular para o carregamento retangular correspondendo ao maior valor encontrado no carregamento triangular, valor este que ocorre na parte inferior do painel vertical do sistema de fôrmas. A Figura 12 representa como seria esta simplificação.

Ao fazer estas simplificações, passa-se a considerar que a chapa compensada do painel trabalha como uma viga biapoiada em que a espessura da chapa (e_{chapa}) representa a altura desta viga, enquanto que sua base é correspondente à largura da chapa utilizada, de acordo com as dimensões do elemento estrutural. O vão para esta viga biapoiada é determinado por cada distância entre caibros ou sarrafos que compõem o sistema de enrijecimento dos painéis da fôrma, desconsiderando assim a continuidade das placas compensadas, continuidade esta existente na situação real.

Figura 12 – Simplificação do carregamento atuante sobre fôrma vertical



Fonte: Autor

Consequentemente para o dimensionamento do sistema de enrijecimento (caibros ou sarrafos) pelo modelo simplificado, além destes caibros/sarrafos receberem as reações de apoio da chapa compensada que são oriundas de um carregamento aproximado, estes elementos também são dimensionados como vigas biapoiadas, onde os apoios são as barras de ancoragem que atravessam de um lado para o outro a seção do pilar a ser executado.

De maneira clássica e bastante aproximada, é comum definir um carregamento retangular com valor obtido por meio da Equação 7.

$$P_{b,retangular} = \gamma \times h \times b, \text{ para } h < h_s \quad (7)$$

Onde b corresponde à largura da seção da viga biapoiada citada anteriormente.

O deslocamento máximo dessa viga biapoiada, pode ser calculado pela Equação 8.

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{5}{384} \times \frac{P_{b,retangular} \times L^4}{E \times I} \quad (8)$$

Já a tensão máxima atuante sobre a chapa compensada ou sobre os elementos de travamento é dado pela Equação 9.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{I} \times y, \text{ sendo } y = \frac{h}{2} \quad (9)$$

Onde y representa a distância entre o CG e a superfície da peça em que a carga atua e h corresponde a e_{chapa} para o caso de fôrmas de madeira.

Todos os casos estudados serão verificados pelo método simplificado de cálculo dos elementos do sistema de fôrmas.

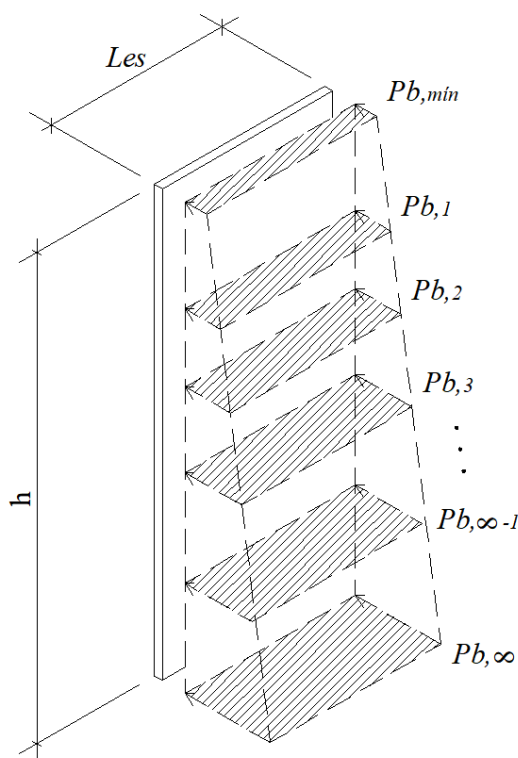
A simplificação que é feita não corresponde simplesmente em transformar um carregamento triangular distribuído em um carregamento uniformemente distribuído em um plano 2D. Na realidade, ao se considerar o plano 3D para o sistema de fôrmas, o carregamento real atuante possui distribuição prismática triangular, ou mesmo distribuição prismática trapezoidal.

Deste modo é possível perceber a complexidade de análise e dimensionamento do sistema, pois existe, ao longo da altura do painel, infinitos planos de carregamentos, cada um com valor diferente, o que torna impossível que o cálculo exato seja feito manualmente. A Figura 13 possibilita uma melhor visualização da dificuldade descrita.

Para auxiliar na resolução destes cálculos complexos, existe o método dos elementos finitos que pode ser usado para correlacionar respostas com o método simplificado a fim de tornar menos complexo o processo de dimensionamento de um sistema de fôrmas, sem deixar de considerar características reais importantes existentes em todo o sistema.

Este método será melhor descrito na próxima Subseção deste Capítulo.

Figura 13 – Visão geral do carregamento atuante sobre sistema de fôrma vertical



Fonte: Autor

3.1.2 Modelagem pelo método dos elementos finitos

Diferentemente dos métodos simplificados de cálculo, a utilização do método dos elementos finitos para análises e dimensionamentos de estruturas gera maior precisão de comportamentos e resultados obtidos. Tais resultados se aproximam bastante ou até mesmo representam as situações reais a que certas estruturas estarão submetidas, como por exemplo, o carregamento triangular do concreto sobre o painel de fôrma, sem que sejam feitas aproximações ou simplificações.

Segundo Azevedo (2003), no âmbito da engenharia de estruturas, o método dos elementos finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas.

De maneira geral, o método dos elementos finitos consiste em uma técnica para resolver diversos problemas de engenharia, onde a estrutura analisada é subdividida em tantas partes quanto forem necessárias para obtenção de resultados com a maior precisão possível. O número e as dimensões destas subdivisões variam de acordo com a

complexidade da geometria da estrutura e com a necessidade de obtenção de resultados do comportamento desta estrutura quando está submetida às ações existentes.

Atualmente as soluções por meio do método dos elementos finitos são obtidas através de simulações numéricas das estruturas utilizando programas computacionais apropriados, o que traz maior agilidade a todo processo. Assim, é possível a coleta de maior número de resultados em um espaço de tempo muito menor em relação à utilização do MEF em cálculos manuais, o que tornaria a utilização do MEF praticamente inviável.

Para determinação de deslocamentos e tensões atuantes sobre painéis de fôrmas de pilares, será utilizado o método dos elementos finitos através do programa computacional ANSYS® na plataforma Workbench, realizando análises tridimensionais dos casos estudados. A maneira de análise por MEF será semelhante às análises realizadas por Valente e Gesualdo (2014) que estudaram painéis de fôrmas para vigas.

Assim como para os cálculos simplificados, todos os casos estudados serão verificados pelo método dos elementos finitos para o dimensionamento dos elementos do sistema de fôrmas para pilares.

3.1.3 Comparação entre os métodos e definição de parâmetros

Após a realização dos cálculos pelo método simplificado e simulação pelo método dos elementos finitos dos diversos casos propostos, será feita a análise dos resultados obtidos para valores de tensões e deslocamentos nos dois casos, avaliando a coerência destes valores para verificação da validade ou não do caso estudado, podendo este ser descartado em casos extremos.

Com resultados verificados em mãos, será proposto, assim como no estudo realizado por Valente e Gesualdo (2014), a criação de fatores de correção entre o método simplificado e o método dos elementos finitos. Deste modo, independentemente das dimensões das peças estruturais (pilares), será possível definir uma configuração simplificada de carregamento do sistema de fôrma do pilar que permita obter respostas bem próximas das reais, através de uma equação que leva em conta este fator de correção em função da altura ou largura do painel e do espaçamento entre sarrafos de enrijecimento do painel.

O fator de correção entre os métodos utilizados neste estudo é definido pela Equação 10.

$$FC_x = \frac{X_{MEF}}{X_{MS}} \quad (10)$$

Em que, FC_x é o fator de correção para a variável em análise (tensão e deslocamento), X_{MEF} é o valor da variável calculada pelo método dos elementos finitos e X_{MS} é o valor da variável calculada pelo método simplificado.

3.2 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS

Para a realização do dimensionamento do sistema de fôrmas para pilares, alguns parâmetros, referentes aos materiais utilizados na confecção das fôrmas e ao concreto utilizado, devem ser definidos.

Nos estudos realizados serão adotados os seguintes critérios com relação ao concreto:

- Consistência do concreto: Classe C3 – Abatimento de 80 mm a 140 mm (Concreto mais usual).
 - Obs.: Apesar de existir a atualização da classificação do concreto quanto à sua consistência (ABNT NBR 8953:2015), será utilizada a classificação apresentada pela ABNT NBR 15696:2009, para que possam ser seguidos os demais critérios, ábacos e fórmulas apresentadas nesta mesma norma;
- Velocidade de concretagem (v_b): dada pela Equação 11 a seguir.

$$v_b = \frac{\text{Altura pilar}}{\text{Volume concreto}} \times \text{Vazão bomba} \quad (11)$$

Sendo a altura do pilar dada em metros, o volume de concreto em metros cúbicos e a vazão da bomba em metros cúbicos por hora (Equação 12).

$$\text{Vazão bomba} = \frac{\text{Volume concreto}}{\text{Tempo lançamento}} \quad (12)$$

Tomando-se por base que um volume de 6 m³ necessita em média de 20 minutos para ser aplicado, tem-se que a vazão média para bomba é equivalente à 18 m³/h.

- Peso específico do concreto fluido igual a 25 kN/m³;
- Temperatura do concreto no momento da sua aplicação de 25°C;
- Concreto endurece em no máximo 5 horas;
- Adensamento do concreto realizado com vibração interna;
- Pressão máxima do concreto fluido (P_b): calculada através da Equação 13 obtida da curva representativa dos concreto classe C3 conforme apresentado em diagrama da ABNT NBR 15696:2009 mostrado anteriormente aqui neste trabalho na Figura 9 (pág. 36):

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

Quando a altura hidrostática - h_s (Equação 14) for menor que a altura do pilar.

Para situações em que o pilar possui altura menor que h_s , a pressão máxima que ocorre sobre a fôrma do pilar pode ser obtida pela Equação 15:

$$h_s = \frac{P_b}{\gamma} \quad (14)$$

$$P_b = \gamma \times h \quad (15)$$

Onde h representa a altura do pilar.

Com relação às peças de madeira a serem utilizadas na composição do sistema de fôrmas serão adotados os seguintes parâmetros:

- Chapa de madeira compensada de Pinus Brasileiro para uso externo, não lixado e com qualidade C+/C (Classificação comercial). Alguns dados importantes a respeito do material são apresentados na Tabela 7. As propriedades apresentadas nesta tabela são resultados de testes realizados pela ABIMCI em mais de 20000 corpos de prova obtidos através de material coletado em 18 empresas.
- O valor médio para densidade do compensado de Pinus com 18 mm de espessura e 7 lâminas é igual a 528 kg/m³ de acordo com o catálogo técnico da ABIMCI (2002);
- Peças de madeira serrada tipo conífera para elementos de travamento dos painéis: uma peça com seção transversal 25 mm × 50 mm para enrijecimento da chapa de

madeira compensada e duas peças com seção transversal 25 mm × 50 mm conforme mostrado na Figura 14 para compor as gravatas do travamento final do sistema de fôrma. Tais peças de madeira são denominadas sarrafos de acordo com a ABNT NBR 14807:2002 que classifica as peças de madeira de acordo com as suas dimensões.

Tabela 7 – Dados gerais do compensado de Pinus Brasileiro

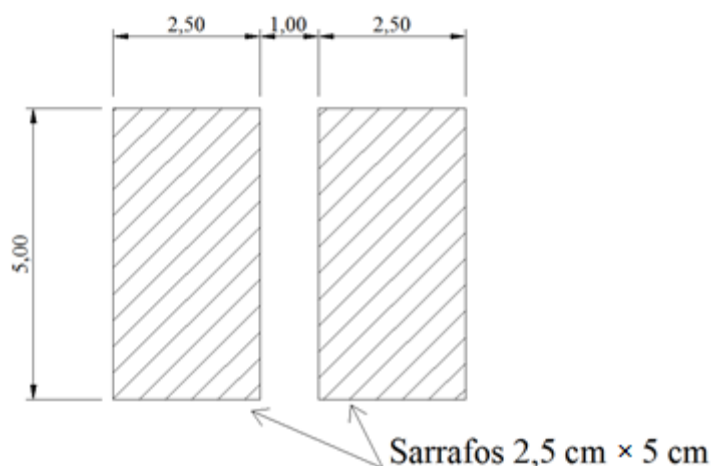
| Espessura chapa (mm) | Quantidade lâminas | Valores para resistência à flexão da chapa (MPa) | | | | |
|----------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | | Paralela | | Perpendicular | |
| | | | MOE ⁽¹⁾ | MOR ⁽²⁾ | MOE ⁽¹⁾ | MOR ⁽²⁾ |
| 18 | 7 | Máximo | 7980,0 | 45,01 | 4758,8 | 40,21 |
| | | Médio | 6215,8 | 34,03 | 3552,8 | 29,42 |
| | | Mínimo | 4451,4 | 22,95 | 2346,8 | 18,53 |

⁽¹⁾ MOE – Módulo de elasticidade à flexão

⁽²⁾ MOR – Tensão resistente à flexão

Fonte: Adaptado do catálogo técnico ABIMCI (2002)

Figura 14 – Seção transversal dos sarrafos de travamento do sistema de fôrma



Fonte: Autor

- A Tabela 8 apresenta dados importantes para madeiras serradas do tipo coníferas com umidade da ordem de 12%. Nos casos estudados será utilizada a classe C25.

Tabela 8 – Classes de resistência das coníferas

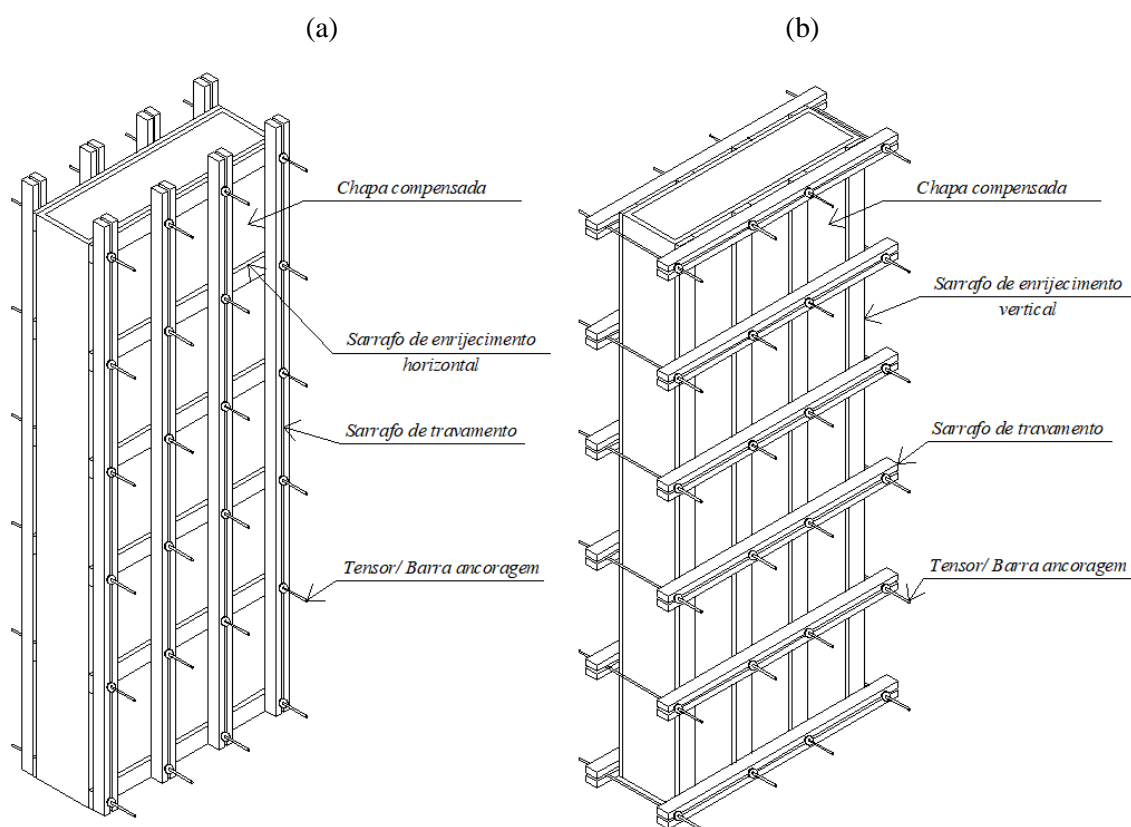
| Classes | f_{c0k} MPa | f_{vk} MPa | $E_{c0,m}$ MPa | $\rho_{bas,m}$ kg/m ³ | $\rho_{aparente}$ kg/m ³ |
|-------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|--|
| C 20 | 20 | 4 | 350 | 400 | 500 |
| C 25 | 25 | 5 | 8500 | 450 | 550 |
| C 30 | 30 | 6 | 14500 | 500 | 600 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

3.3 CASOS ESTUDADOS

Para a realização das análises descritas anteriormente, serão utilizados pilares com dimensões, para seção e altura, mais comuns de execução em edifícios de estruturas de concreto armado. Serão estudados casos com duas formatações diferentes para o sistema de fôrma. Em uma destas formatações, os sarrafos de enrijecimento do painel estarão dispostos na posição horizontal como indicado na Figura 15 (a), variando-se o espaçamento entre estes sarrafos e incrementando-se a dimensão da seção do pilar de um caso para outro. Já na outra formatação os sarrafos de enrijecimento estarão dispostos na posição vertical como mostrado na Figura 15 (b), para efeito de comparação entre uma formatação e outra, definindo qual delas seria mais viável do ponto de vista da resistência e do ponto de vista econômico.

Figura 15 – Fôrma com elementos de enrijecimento horizontal (a) e vertical (b)

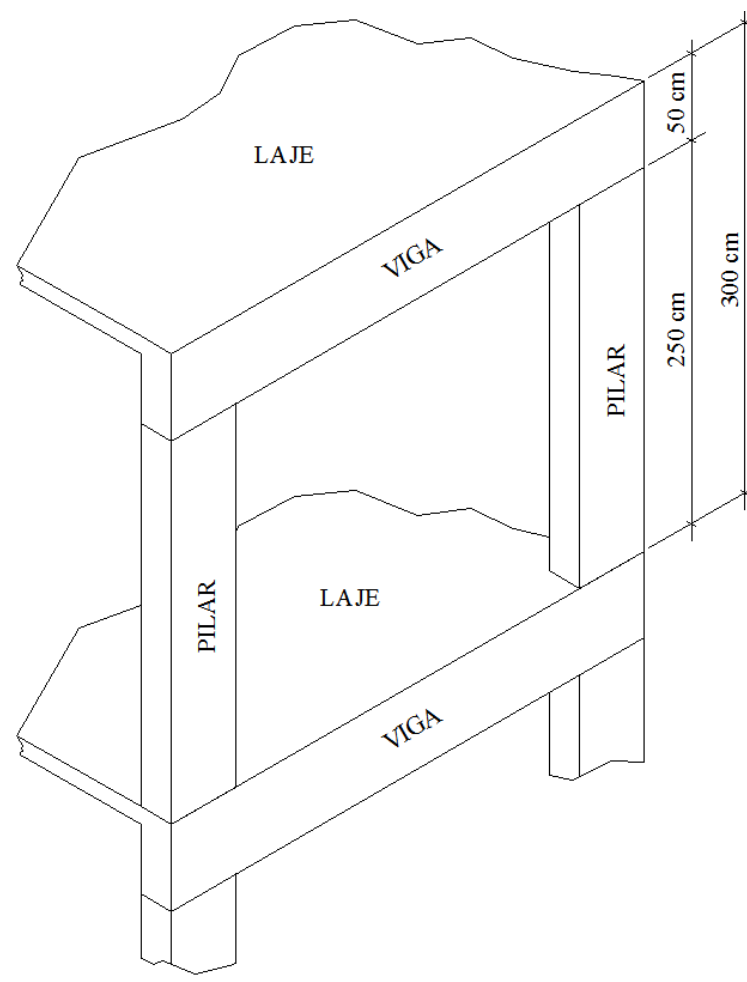


Fonte: Autor

Serão analisados casos de fôrmas para pilares que possuem altura livre de 250 cm, uma altura típica para pilares de edificações com 300 cm de distância de laje para laje, e considerando vigas com altura de 50 cm. A Figura 16 apresenta o esquema geral para os

modelos estudados. Para fôrmas de pilares com esta altura, na construção dos modelos pelo método dos elementos finitos, é necessária a consideração de emendas entre chapas compensadas que compõem painel do sistema de fôrmas, visto que a altura da chapa compensada corresponde a 220 cm. As medidas das seções dos pilares, para altura de 250 cm, variam de 20 cm × 40 cm até 20 cm × 110 cm, mantendo-se a medida de uma das faces e incrementando-se a medida da outra face em 10 cm de uma situação para outra.

Figura 16 – Esquema estrutural geral para os modelos estudados



Fonte: Autor

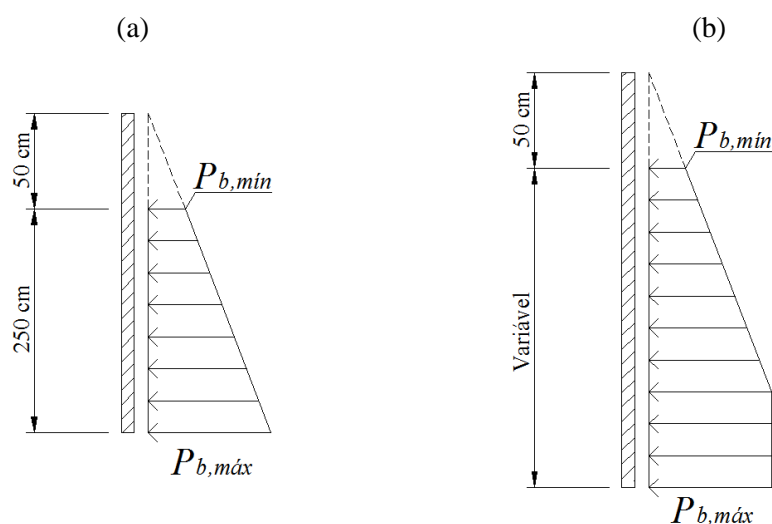
O espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento na horizontal, que funcionarão como apoios para o painel de chapa compensada da fôrma, será variado dividindo-se a altura do pilar de 2 a 10 vãos de medidas iguais em cada uma das situações. Desta maneira, será possível, para o caso dos sarrafos de enrijecimento na posição horizontal, a determinação de um fator de correção entre o modelo simplificado e o de elementos finitos, sendo

possível a verificação da influência de se considerar ou não a continuidade do painel de chapa compensada.

Assim como na situação anterior, no caso dos sarrafos de enrijecimento na posição vertical também serão determinados fatores de correção e equações que correlaciona tais fatores a outras variáveis no sistema. Nestes casos, será adotada uma medida única de seção para o pilar, variando-se a altura do pilar. Para que seja possível uma maior variação do espaçamento entre os sarrafos de enrijecimento vertical, será escolhido um pilar de seção transversal com medidas de 25 cm \times 200 cm, dividindo-se a face maior do pilar de 2 a 10 vãos de medidas iguais em cada uma das situações. As alturas livres estudadas irão variar de 250 cm a 350 cm com incrementos de 10 cm de um caso para outro.

Para todos os casos, seja com sarrafos de enrijecimento na posição horizontal ou na vertical, o carregamento triangular atuante sobre o sistema de fôrmas dos pilares seguirá a distribuição apresentado na Figura 17, em que o carregamento triangular é iniciado na parte superior da viga/ laje e tem o maior valor de carregamento na parte inferior do pilar.

Figura 17 – Carregamento para MEF para sarrafos na horizontal (a) e na vertical (b)



Fonte: Autor

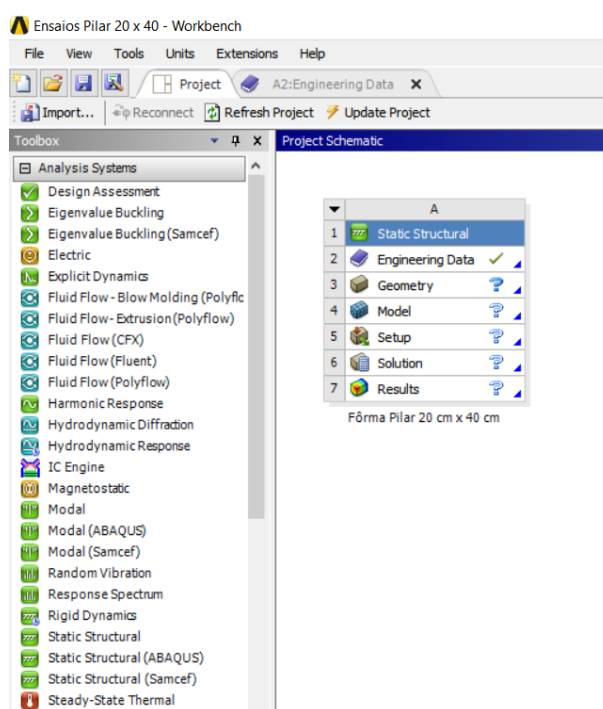
3.4 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

Para construção dos modelos de todos os casos relacionados na Seção anterior, foi utilizado o sistema computacional ANSYS® Workbench em sua versão 16.0, que realizará

a simulação numérica dos modelos apresentando resultados para tensões atuantes e deslocamentos ocorridos.

Primeiramente após abrir o programa, para iniciar a construção do modelo deve ser criado um novo projeto escolhendo umas das opções de linha de pesquisa apresentadas pelo sistema. No caso dos estudos aqui propostos a opção a ser escolhida é denominada de *Static Structural*, por se tratar de uma análise de sistemas de fôrmas que são estruturas estáticas no momento de sua utilização, mesmo que sejam de caráter provisório no contexto geral. A Figura 18 apresenta uma visão geral da parte inicial da criação do projeto dentro do programa.

Figura 18 – Tela de início de um projeto no sistema computacional ANSYS®



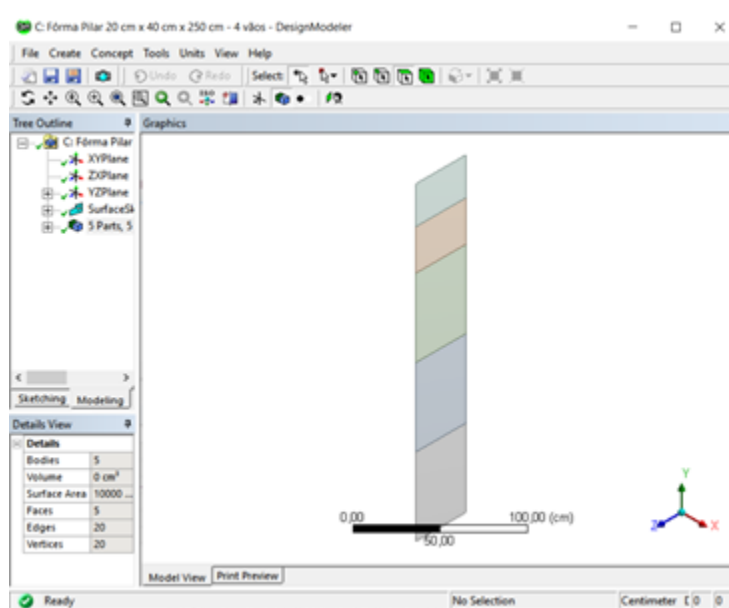
Fonte: Autor

Após a criação do projeto é necessário selecionar ou oferecer informações para o programa para que este possa trabalhar de acordo com as necessidades do estudo. No item *Engineering Data* são inseridas as propriedades referentes ao material a ser utilizado ao longo das simulações. Para o caso da chapa de madeira compensada dos painéis de fôrmas dos pilares, foram adicionadas propriedades para material ortotrópico, tais como os valores para a densidade (528 kg/m^3), o módulo de elasticidade paralelo às fibras ($6215,8 \text{ MPa}$), o módulo de elasticidade perpendicular às fibras ($3552,8 \text{ MPa}$), os módulos de elasticidade

transversais ($G_0 = E_{c0}/20 = 310,79$ MPa e $G_{90} = E_{C90}/20 = 177,64$ MPa), o módulo de ruptura (Valor médio = 34,03 MPa, Valor característico = $0,7 \times 34,03 = 23,82$ MPa) e para o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,30$).

O próximo passo após a caracterização dos materiais é a execução do desenho da estrutura a ser simulada, entrando no item *Geometry* dentro do projeto criado. Ao clicar neste item o programa irá abrir uma nova janela de operações chamada *Design Modeler*. No *Design Modeler* deve ser escolhido um plano espacial para realizar o desenho, devendo atentar para os planos que foram inseridas propriedades como módulo de elasticidade que variam de acordo com o posicionamento da estrutura estudada. Como exemplo, para desenhar o painel de um pilar $20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 250 \text{ cm}$ de altura com 4 vãos entre sarrafos horizontais, é necessário que sejam desenhados retângulos, um sobre o outro como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Modelo em construção no sistema computacional ANSYS®



Fonte: Autor

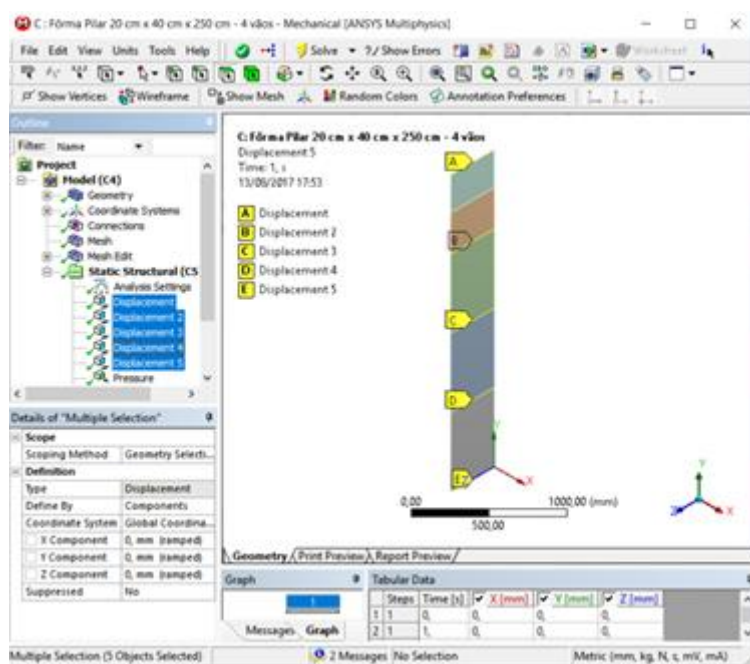
Esta é uma maneira de simular a existência dos sarrafos de enrijecimento centrais que funcionarão como apoios intermediários para o painel de chapa compensada. Aos desenhos dos retângulos, são adicionadas superfícies com a espessura da chapa, sendo esta no caso igual a 18 mm.

A etapa seguinte da construção do modelo é retornar à janela inicial do projeto para acessar o *Model*. Na interface *Mechanical* é possível caracterizar melhor a estrutura como um todo. É nesta etapa que se informa o tipo de material das superfícies desenhadas.

Uma tarefa muito importante a ser executada nessa fase de montagem do projeto é a realização da interligação entre as partes dos desenhos (retângulos), para que seja oferecida a idéia de continuidade do painel ao modelo construído. O recurso do programa a ser utilizado para realizar esta operação é denominado *Node Merge*, que faz a união entre os nós da malha de discretização que é gerada para cada retângulo, transformando-a em uma malha integral para todo o modelo desenhado. Caso não seja feita a união destes pontos de interligação, cada retângulo do modelo irá trabalhar de maneira isolada sem que haja a transferência de esforços entre eles, o que não representaria uma situação próxima da realidade.

O desenho dos retângulos separadamente tem o objetivo de criar uma linha no ponto em que se precisa inserir um sarrafo de enrijecimento para o painel da fôrma. Esta inserção de apoios é feita nesta etapa também, sendo criados apoios lineares para o painel em todos os pontos estipulados para existir o sarrafo (Apoio). A Figura 20 mostra como são representados estes apoios (*Displacement*) no programa.

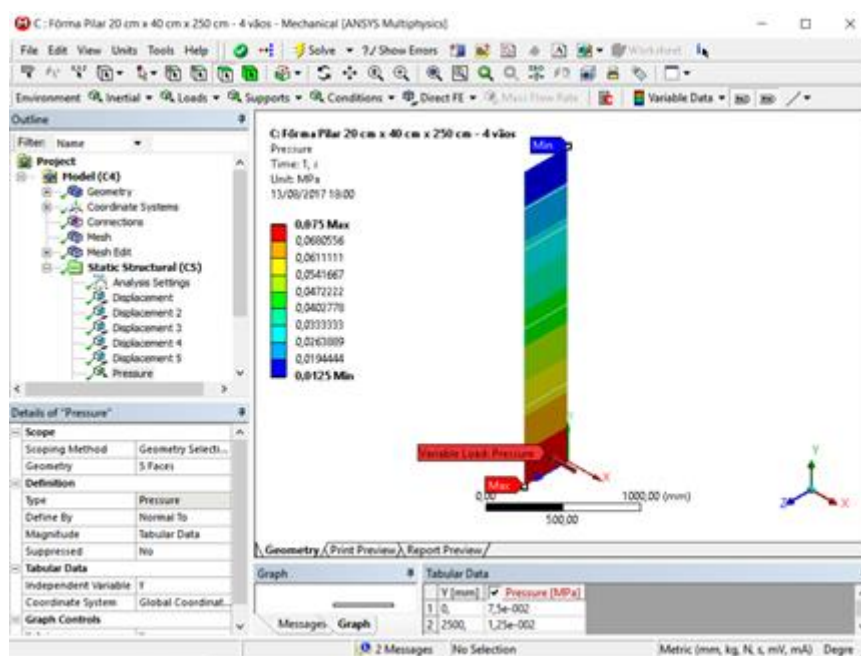
Figura 20 – Modelo com apoios inseridos



Fonte: Autor

Após a inserção dos apoios, devem ser introduzidas as forças que irão atuar sobre a estrutura construída. Nos casos estudados o carregamento sobre o painel do sistema de fôrma de pilar é distribuído sobre a superfície e de maneira triangular, com valor mínimo na parte superior do painel e valor máximo na parte inferior da superfície. No programa ANSYS®, a aplicação desse tipo de carregamento é feita através da ferramenta denominada *Pressure*, e deve ser inserido de maneira tabular, variando o valor do carregamento ao longo da altura do painel. A Figura 21 apresenta um modelo de painel submetido ao carregamento descrito anteriormente.

Figura 21 – Carregamento aplicado sobre o modelo



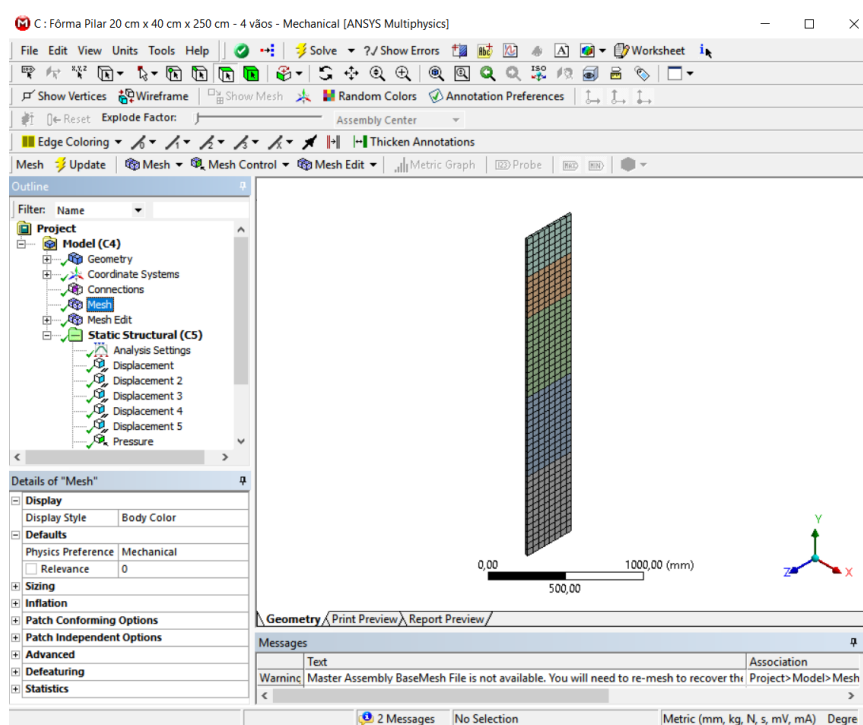
Fonte: Autor

Para obtenção de resultados mais precisos para a simulação é necessário que seja definida uma malha de discretização com dimensões adequadas. Nos casos estudados, o tipo de malha será sempre formada por quadriláteros (quadrados ou retângulos), haja vista que em nenhum dos modelos terá quinas, recortes ou elementos curvos. Quanto menor a dimensão dos lados dos quadriláteros que formam a malha, maior a quantidade de resultados obtidos na simulação, pois haverá maior quantidade de nós ao longo da estrutura, e cada um dos nós retorna valores referentes às deformações, tensões, entre outros, que está ocorrendo exatamente naquele ponto quando a estrutura montada fica submetida aos carregamentos estipulados. O aumento na quantidade de nós gera por consequência um aumento da necessidade de processamento dos dados por parte do programa, sendo que em excesso

pode ocasionar uma sobrecarga no computador. Assim, é importante encontrar um equilíbrio nas dimensões das malhas, para que se obtenha resultados precisos, em um tempo não muito longo.

Nos casos estudados, como mostrado na Figura 22, foram utilizadas inicialmente malhas com medidas máximas de 50 mm, pois para medidas maiores começa a ocorrer variações consideráveis nos resultados gerados pelo programa, o que não é viável para a correta simulação dos sistemas de fôrmas propostos. Entretanto, ao se fazer um refinamento maior da malha foi observado uma melhora considerável dos resultados, no sentido de maior regularidade entre os modelos simulados. Assim foram feitas simulações com malhas com 18 mm (espessura da placa) como medida máxima.

Figura 22 – Definição da malha para simulação do modelo



Fonte: Autor

Para a discretização dos resultados de simulação dos modelos no ANSYS®, em uma análise elástica linear do sistema de fôrmas, foi utilizado o elemento finito SHELL 181. Este elemento finito é adequado para análise de estruturas com pequena espessura como é o caso dos modelos estudados. O SHELL 181 é um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó.

Após todas as definições realizadas conforme descrito anteriormente, para que o modelo possa ser simulado, é necessária a escolha de quais resultados o programa deverá apresentar no final do processamento. Em geral os resultados mais importantes para os casos aqui estudados, serão os deslocamentos na direção perpendicular ao painel e as tensões atuantes sobre a estrutura.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 ORGANIZAÇÃO DOS MODELOS

Para uma melhor organização dos modelos estudados, são apresentados na Tabela 9 os Modelos Horizontais, que contemplam as variações de todos os casos analisados contendo sarrafos de enrijecimento na posição horizontal, que servirão de base para comparação de resultados entre os métodos de cálculo simplificado e o MEF.

Tabela 9 – Variações de modelos para pilares com sarrafos de enrijecimento horizontais

| Modelos Horizontais | Seção do Pilar (cm) | Altura livre do Pilar (cm) |
|---------------------|---------------------|----------------------------|
| PILAR 1 | 20 × 40 | 250 |
| PILAR 2 | 20 × 50 | 250 |
| PILAR 3 | 20 × 60 | 250 |
| PILAR 4 | 20 × 70 | 250 |
| PILAR 5 | 20 × 80 | 250 |
| PILAR 6 | 20 × 90 | 250 |
| PILAR 7 | 20 × 100 | 250 |
| PILAR 8 | 20 × 110 | 250 |

Fonte: Autor

Além disso, para configurações de fôrmas com sarrafos horizontais, será feito o dimensionamento de um sistema em que estes sarrafos terão espaçamentos variados entre eles, de acordo com a variação do carregamento linear distribuído que o sistema estiver submetido.

Já na Tabela 10 são apresentados os Modelos Verticais, que contemplam os casos estudados que possuem os sarrafos de enrijecimento na posição vertical, que servirão de base para determinação de fatores e equações de correção das condições de carregamento dos sistemas de fôrmas de pilares com esta configuração.

Tabela 10 – Variações de modelos para pilares com sarrafos de enrijecimento verticais

| Modelos Verticais | Seção do Pilar (cm) | Altura livre do Pilar (cm) |
|-------------------|---------------------|----------------------------|
| PILAR A | 25 × 200 | 250 |
| PILAR B | 25 × 200 | 260 |
| PILAR C | 25 × 200 | 270 |
| PILAR D | 25 × 200 | 280 |
| PILAR E | 25 × 200 | 290 |
| PILAR F | 25 × 200 | 300 |
| PILAR G | 25 × 200 | 310 |
| PILAR H | 25 × 200 | 320 |
| PILAR I | 25 × 200 | 330 |
| PILAR J | 25 × 200 | 340 |
| PILAR K | 25 × 200 | 350 |

Fonte: Autor

Após o desenvolvimento das equações de correção, serão feitos dimensionamentos de sistemas de fôrma pelo método simplificado utilizando as correções, a fim de verificar a validade das equações para dimensionamentos, comparando os deslocamentos e tensões máximas obtidos nos cálculos simplificados aos gerados pelo método dos elementos finitos, para o sistema dimensionado.

Por fim, será feito a comparação de um mesmo modelo de pilar, com diferentes configurações para o sistema de fôrma (sarrafos horizontais × sarrafos verticais), sendo observado, dentre as configurações, qual apresenta os melhores resultados, no aspecto estrutural (deslocamentos e tensões) e no aspecto econômico (consumo de material e mão de obra). Para isto serão considerados sistemas de fôrmas completos, ou seja, contemplando a chapa compensada, os sarrafos de enrijecimento e os sarrafos de travamento final do sistema, como apresentado na Figura 15 (pág. 47).

4.2 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DOS MODELOS COM ENRIJECIMENTOS HORIZONTAIS

Nesta Seção são apresentados os procedimentos realizados para os cálculos simplificados e para as simulações numéricas de todos os modelos propostos na Tabela 9 (pág. 56), bem como análises e comparações entre métodos.

Para este tipo de configuração, não existe grande dificuldade no dimensionamento da chapa de madeira compensada, visto que o carregamento trapezoidal atuante é o mesmo ao

longo de toda faixa de chapa entre dois sarrafos de enrijecimento. Porém ao se realizar o dimensionamento simplificado, não há a consideração da continuidade da chapa compensada, pois é analisado apenas o vão entre sarrafos de carregamento mais crítico, desprezando-se os demais vãos.

Para os modelos horizontais de sistema de fôrmas para pilares, não serão desenvolvidas equações de correção entre os métodos de cálculo, uma vez que, na análise deste tipo de configuração de fôrma, o esquema estático do sistema funciona como uma viga contínua com uma série de apoios, e um carregamento trapezoidal simples ao longo de toda fôrma. Desta maneira, ao se adotar o método simplificado de cálculo, o dimensionamento é feito considerando-se vários trechos de vigas bi-apoiadas como representação do esquema estático de cálculo. Para o caso de pilares, a região mais solicitada do sistema ocorre no tramo inferior do painel, sendo este, o tramo adotado para o dimensionamento de todo o sistema.

Deste modo, esta Seção propõe, a título de comparação, o desenvolvimento de coeficientes de comparação entre os métodos de cálculo simplificado (não leva em conta a continuidade do painel) e MEF (Considera a continuidade do painel). Em geral, ao se considerar a continuidade da chapa, ocorre um alívio de tensões e diminuição de deslocamentos máximos sobre o sistema, pois neste caso, existe a diferença do esquema estático, ao se considerar um trecho bi-apoiado apenas e quando é adotada uma viga contínua.

Para realização dos cálculos simplificados e simulações numéricas no sistema computacional ANSYS®, é preciso primeiramente calcular as forças atuantes sobre o sistema de fôrmas em cada caso.

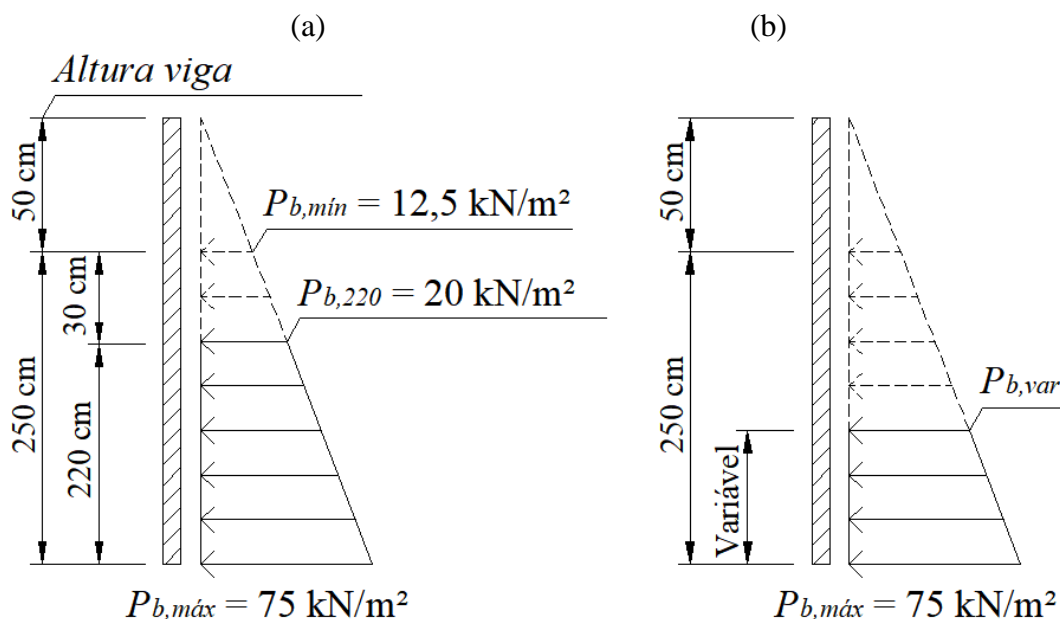
A partir dos critérios apresentados na Seção 3.2 deste trabalho, é possível determinar a velocidade de concretagem (Equação 11 – pág. 44). Para o caso deste pilar $20\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 300\text{ cm}$ (250 cm de altura livre), tem-se que a velocidade de concretagem é igual a 225 m/h, sendo para estes casos adotado velocidade de concretagem equivalente à 7 m/h para utilização do diagrama da ABNT 15696:2009 apresentado na Figura 9 (pág. 36), na determinação das forças atuantes. Da Equação 13 (pág. 45) calcula-se que a pressão máxima atuante sobre a fôrma é igual a 83 kN/m². Porém da Equação 14 (pág. 45) é

verificado que a altura hidrostática (h_s) é igual a 3,32 m, valor maior que 3,00 m, medida correspondente à altura total do pilar.

Assim é definido que para pilares com altura de 3,00 m e velocidade de concretagem igual ou superior a 7 m/h, a pressão máxima ($P_{b,máx}$) que o painel da fôrma do pilar fica exposto é da ordem de 75 kN/m², sendo o carregamento distribuído de maneira triangular. Como os 50 cm da parte superior do pilar são parte integrante da viga da estrutura, a pressão mínima ($P_{b,mín}$) que a parte livre da fôrma do pilar fica exposto é da ordem de 12,5 kN/m².

O carregamento triangular com estes valores será utilizado para o método dos elementos finitos, enquanto que os cálculos realizados pelo método simplificado utilizarão como base um carregamento distribuído trapezoidal do tramo inferior do painel com valor maior igual à $P_{b,máx}$ e valor menor variável, de acordo com a dimensão do vão do último tramo, como é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Carregamento para MEF (a) e método simplificado (b)



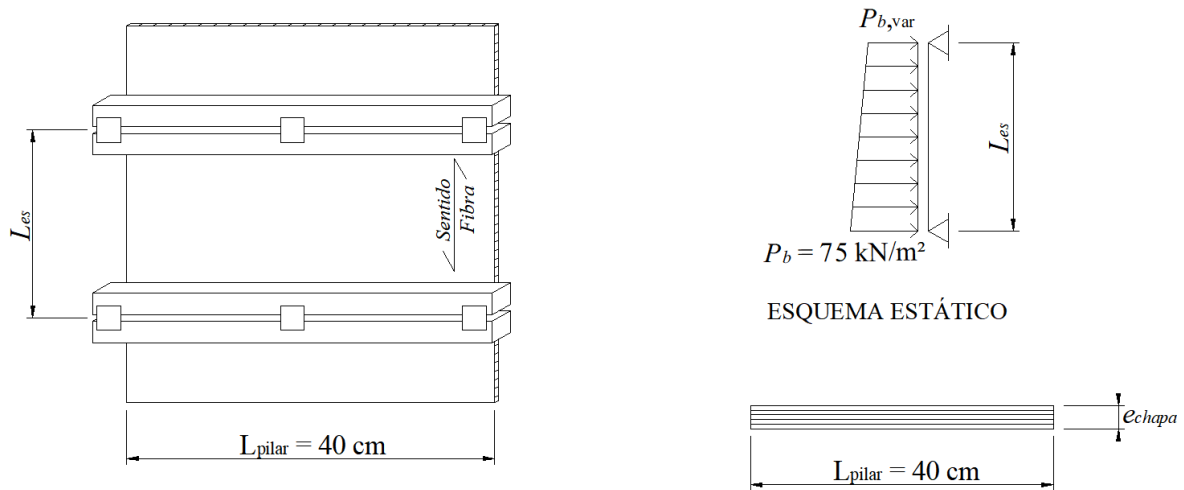
Fonte: Autor

Como os critérios para determinação dos carregamentos atuantes sobre as fôrmas verticais são em função da altura dos painéis, todos os casos listados na Tabela 9 (pág. 56) seguirão os carregamentos apresentados na Figura 23.

4.2.1 Fôrma com elementos de enrijecimento na horizontal

Neste tipo de composição de fôrma para pilar, para realização dos cálculos de deslocamentos e tensões atuantes pelo método simplificado, o painel de chapa compensada de madeira funciona como uma viga biapoada com base medindo a largura do pilar (40 cm para o Pilar 1, por exemplo) e a altura medindo a espessura da chapa (1,8 cm), como pode ser observado no esquema apresentado pela Figura 24, esquema este semelhante para todos os modelos listados na Tabela 9 (pág. 56), sendo variada apenas a largura da seção transversal que é correspondente à largura da seção do pilar de cada modelo.

Figura 24 – Esquema geral do sistema de fôrma para cálculos simplificados



Fonte: Autor

Seguindo então o esquema apresentado, e por meio das Equações 16 e 9 (pág. 41) descritas na Subseção 3.1.1, é possível a realização dos cálculos dos deslocamentos e das tensões pelo método simplificado.

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{5}{768} \times \frac{P_{b,m\acute{a}x} \times L_{pilar} \times L_{es}^4}{E \times I} + \frac{5}{768} \times \frac{P_{b,var} \times L_{pilar} \times L_{es}^4}{E \times I} \quad (16)$$

Para isso é importante definir o valor do momento de inércia (I) da seção transversal que é dado pela Equação 17.

$$I = \frac{L_{pilar} \times e_{chapa}^3}{12} \quad (17)$$

Para o caso analisado nesta Subseção, o valor do momento de inércia é 19,44 cm⁴.

O momento máximo gerado pelo carregamento atuante sobre o sistema, necessário para o cálculo das tensões, é dado pela Equação 18, sendo seu valor variável em função do vão equivalente ao espaçamento entre elementos de enrijecimento.

$$M_{\max} = -\frac{P_{b,\max} \times L_{\text{pilar}} \times L_{es}^2}{8} + \frac{3 \times P_{b,\max} \times L_{\text{pilar}} \times L_{es}^2}{16} + \frac{P_{b,\text{var}} \times L_{\text{pilar}} \times L_{es}^2}{16} \quad (18)$$

Tanto para a determinação dos deslocamentos máximos, quanto para o cálculo dos momentos, foi considerado como ponto de referência o meio do vão entre sarrafos, ou seja, $L_{es}/2$. Tal consideração representa uma pequena aproximação, já que pelo fato do carregamento ser trapezoidal, o máximo momento e o maior deslocamento ocorrem em um ponto ligeiramente deslocado do centro do vão.

Os resultados encontrados para os cálculos simplificados de deslocamentos e tensões, para pilar com as medidas 20 cm × 40 cm × 250 cm com elementos de enrijecimento espaçados por 2 até 10 vãos, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos cálculos simplificados (Pilar 1)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (cm) | Momento máximo (kN·cm) | Tensão atuante (kN/cm²) |
|------------|---------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 17,485 | 0,809 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 21,496 | 0,995 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 27,060 | 1,253 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 35,102 | 1,625 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 47,333 | 2,191 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 67,276 | 3,115 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 103,039 | 4,770 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 177,030 | 8,196 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 370,563 | 17,156 |

Fonte: Autor

Na realização das simulações pelo método dos elementos finitos, pelo fato da altura total do painel de fôrma ser de 250 cm, seria necessária a inclusão da emenda de painéis de chapa compensada, já que a altura dos compensados é de 220 cm. Para uma melhor simulação do modelo no sistema computacional ANSYS®, foi feita a simulação do modelo com a chapa até 220 cm de altura, porém considerando-se o carregamento correspondente a um pilar de 300 cm de altura conforme apresentado na Figura 23 (pág. 59).

Esta simplificação do modelo simulado computacionalmente é possível, pois a maior força sobre o sistema ocorre em sua parte inferior, enquanto que a emenda está posicionada na parte superior do painel da fôrma. Logo, os pontos de maiores tensões e maiores deslocamentos não sofreram significativa interferência da região de emenda, para os modelos analisados nesta Seção.

Assim, como descrito anteriormente, os modelos simulados contarão com 2 até 10 vãos de espaçamentos iguais entre sarrafos de enrijecimento horizontal, ao longo da altura da chapa, equivalente à 220 cm e não mais ao longo da altura livre do pilar que é de 250 cm.

Os resultados obtidos para simulação MEF do sistema de fôrmas do Pilar 1 estão mostrados na Tabela 12.

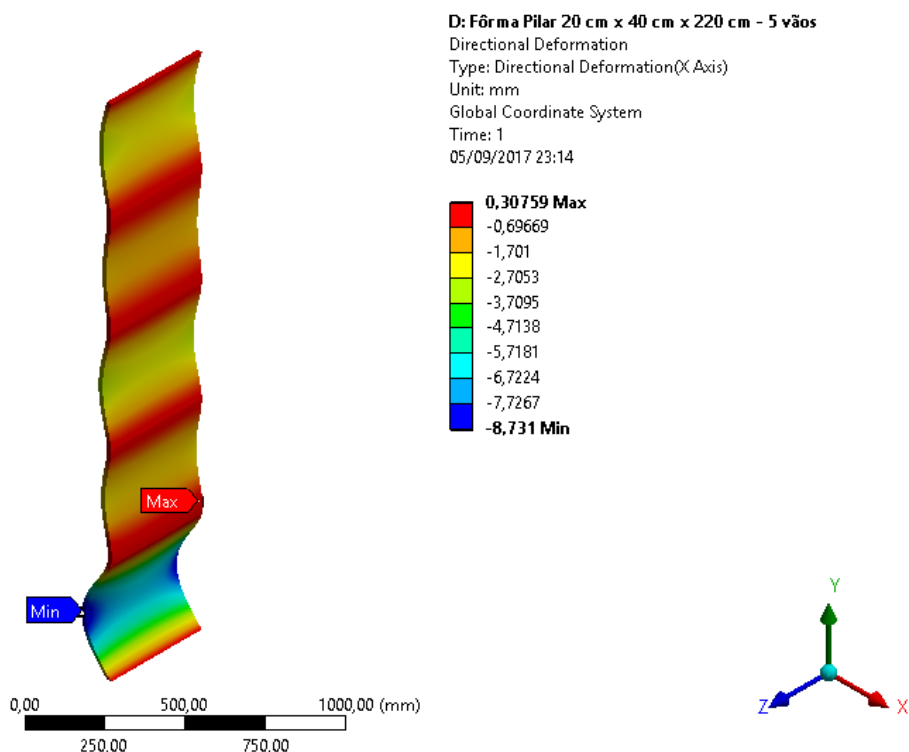
Tabela 12 – Resultados por MEF (Pilar 1)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (cm) | Tensão atuante (kN/cm ²) |
|------------|------------------------------|----------------------|---|
| 10 | 22,0 | 0,071 | 0,736 |
| 9 | 24,4 | 0,103 | 0,888 |
| 8 | 27,5 | 0,155 | 1,125 |
| 7 | 31,4 | 0,259 | 1,469 |
| 6 | 36,7 | 0,449 | 2,092 |
| 5 | 44,0 | 0,873 | 2,772 |
| 4 | 55,0 | 1,942 | 4,041 |
| 3 | 73,3 | 5,681 | 6,845 |
| 2 | 110,0 | 24,431 | 13,464 |

Fonte: Autor

Como amostra de apresentação dos resultados fornecidos pelo sistema computacional ANSYS®, a Figura 25 indica os resultados de deslocamentos para o modelo com 5 vãos entre sarrafos de enrijecimento.

Figura 25 – Resultado de deslocamento do painel para 5 vãos (pilar 20 cm × 40 cm)



Fonte: Autor

Com os resultados dos dois métodos em mãos, é possível a realização dos cálculos dos coeficientes de comparação através da Equação 10 (pág. 44 – Equação para cálculo de Fatores de Correção, porém com a mesma analogia neste caso) apresentada na Subseção 3.1.3. Na Tabela 13 estão os detalhes dos resultados com relação aos deslocamentos ocorridos e fatores de correção entre os métodos.

Tabela 13 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 1)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,071 | 0,968 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,103 | 0,926 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,155 | 0,881 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,259 | 0,867 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,449 | 0,819 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,873 | 0,778 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 1,942 | 0,723 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 5,681 | 0,692 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 24,431 | 0,632 |

Fonte: Autor

Na Tabela 14 estão descritos os resultados para tensões atuantes e os respectivos fatores de correção entre os métodos de cálculo.

Tabela 14 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 1)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,736 | 0,909 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,888 | 0,892 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,125 | 0,898 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,469 | 0,904 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,092 | 0,955 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,772 | 0,890 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,041 | 0,847 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 6,845 | 0,835 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 13,464 | 0,785 |

Fonte: Autor

Como explicado anteriormente, todos os modelos da Tabela 9 (pág. 56) seguem os mesmos procedimentos e métodos descritos para o modelo Pilar 1.

Desta maneira, os resultados obtidos, para os demais modelos de fôrmas com elementos de enrijecimento na posição horizontal, são apresentados no Apêndice A ao final da pesquisa.

4.2.2 Análise dos resultados dos modelos com enrijecimento horizontal

Nesta Subseção são apresentadas análises gerais dos resultados apresentados na Subseção 4.2.1 referente aos diversos modelos simulados.

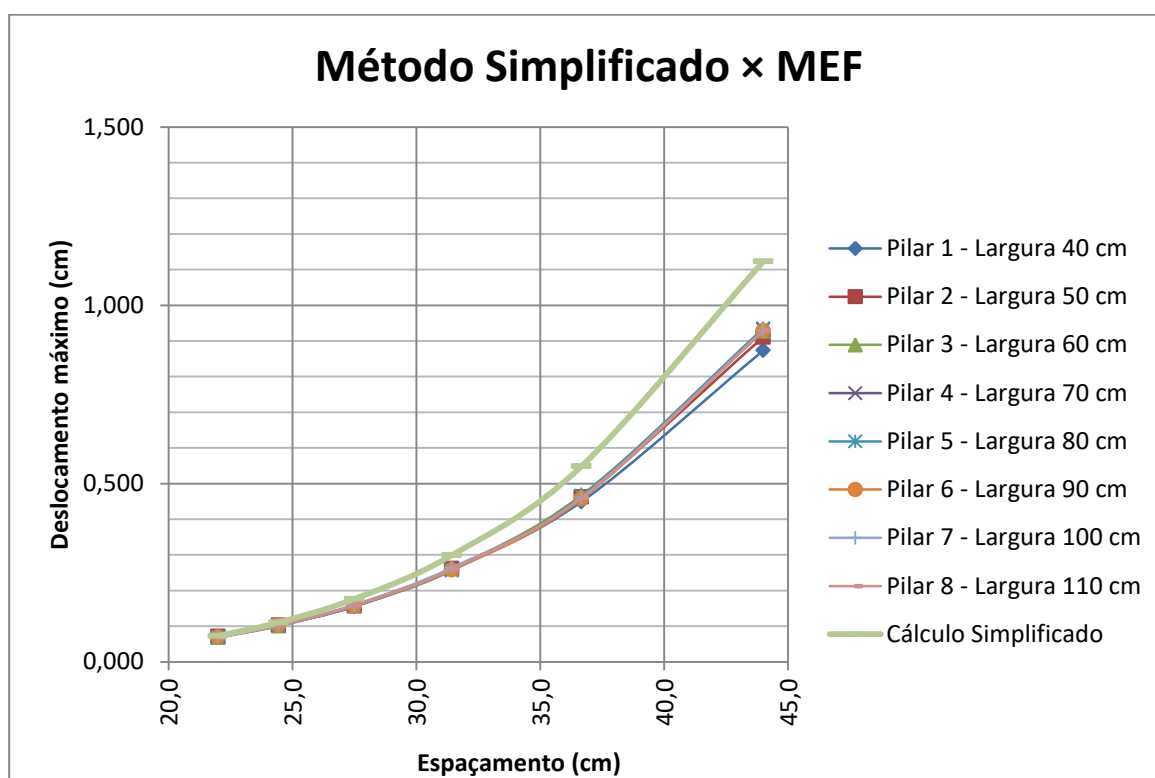
No que diz respeito ao método simplificado de cálculo, os valores de deslocamentos e tensões obtidos foram os mesmos, para todos os modelos da Tabela 9 (pág. 56) (do Pilar 1 ao Pilar 8). Isso se justifica, pois não há variações na altura do painel do sistema de fôrmas dos modelos analisados o que por consequência não gera valores diferentes de carregamentos atuantes sobre o sistema.

Com relação aos resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, tanto para deslocamentos como para tensões atuantes, ocorreu acréscimos dos valores à medida que era aumentada a largura da seção do pilar, principalmente para os casos com espaçamentos

maiores que 50 cm entre sarrafos de enrijecimento. Para espaçamentos menores não há uma tendência bem definida.

De maneira geral, existe semelhança no comportamento dos resultados de deslocamentos apresentados pelos dois métodos de cálculo e entre os diferentes modelos simulados. Este fato pode ser melhor observado na Figura 26.

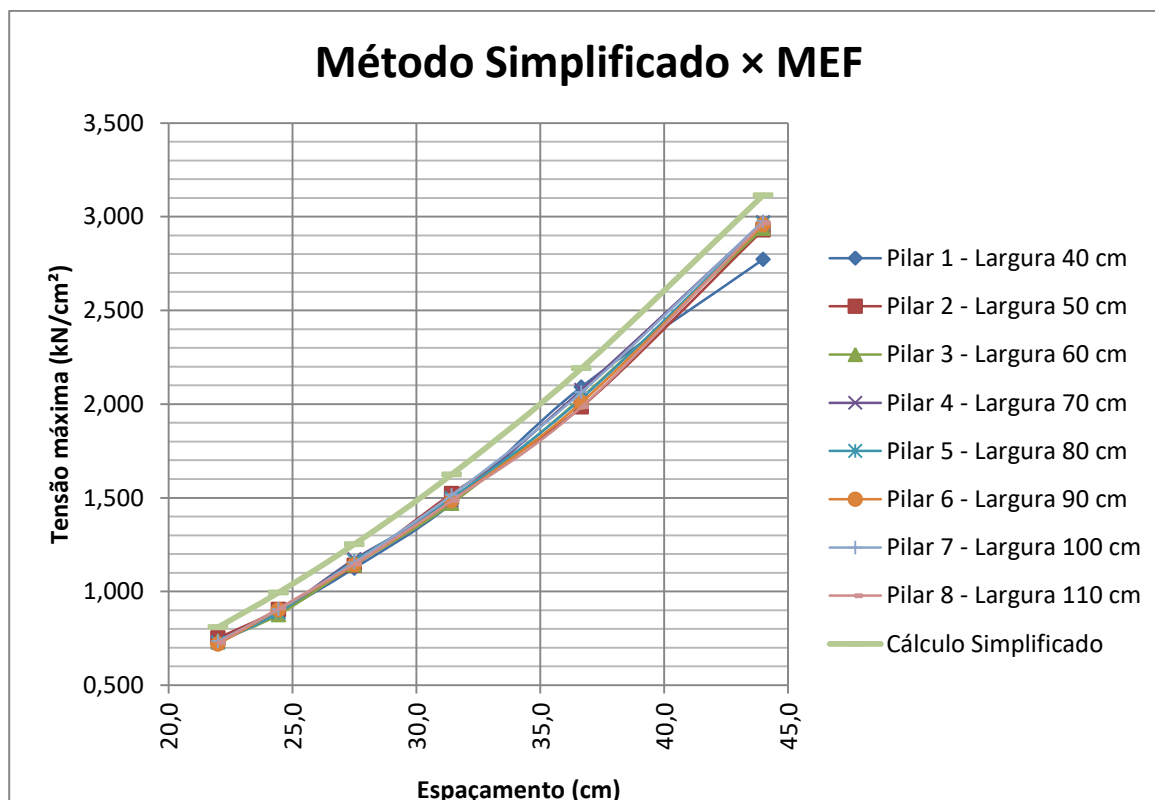
Figura 26 – Deslocamentos máximos – Enrijecimentos horizontais



Fonte: Autor

Do mesmo modo, existe semelhança no comportamento dos resultados de tensões apresentados pelos dois métodos de cálculo e pelos diferentes modelos simulados. Este fato pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Tensões máximas – Enrijecimentos horizontais



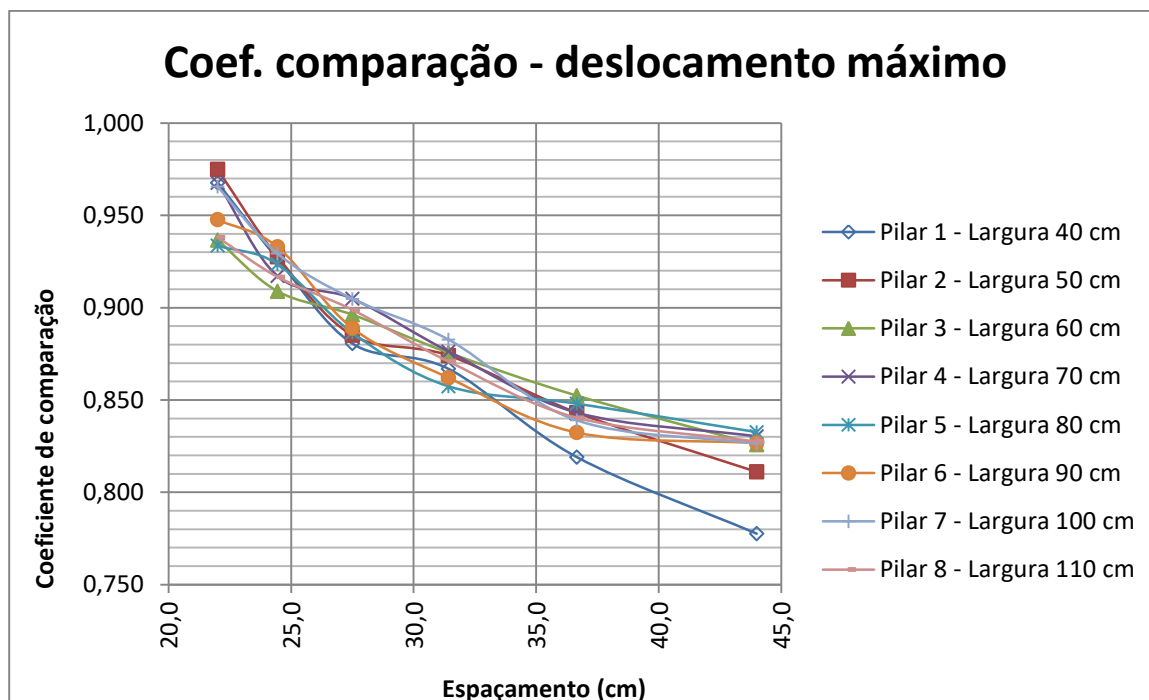
Fonte: Autor

Com relação aos coeficientes de comparação entre métodos de cálculo, a partir dos resultados apresentados, no que diz respeito aos deslocamentos é observada uma tendência de acréscimo do coeficiente à medida que é aumentado o número de vãos, ou seja, com espaçamentos menores entre os sarrafos de enrijecimento do painel.

A Figura 28 apresenta a tendência descrita para os valores de coeficientes de comparação para deslocamentos nos modelos simulados.

Já com relação às tensões, pode-se observar, de maneira geral, que à medida que se aumentou a quantidade de vãos, ocorreu o aumento do valor do coeficiente, porém até certo ponto, observando-se certa instabilidade dos valores, para espaçamentos menores que 44 cm, ou seja, 5 vãos entre sarrafos.

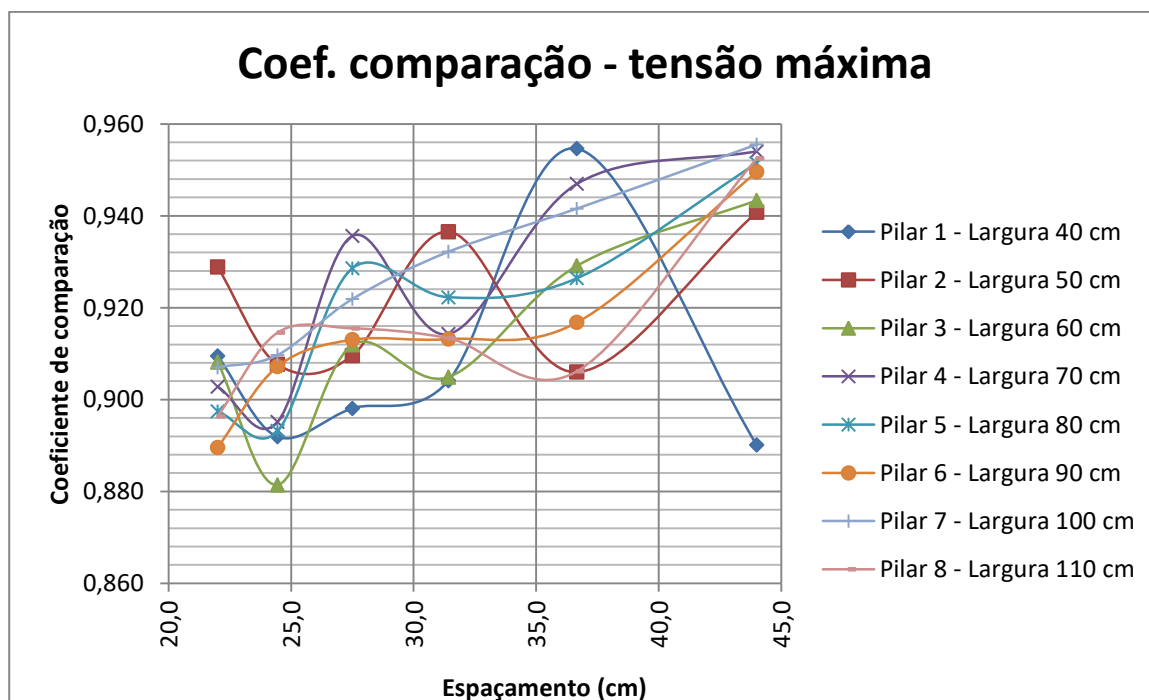
Figura 28 – Coeficiente de comparação para deslocamentos – Enrijecimentos horizontais



Fonte: Autor

A Figura 29 apresenta a tendência descrita para os valores de coeficiente de comparação para tensões atuantes nos modelos simulados com vãos de até 44 cm.

Figura 29 – Coeficiente de comparação para tensões – Enrijecimentos horizontais



Fonte: Autor

4.2.3 Modelo de fôrma com espaçamento variável entre sarrafos

Como descrito e exemplificado em Capítulos e Seções anteriores, a força aplicada sobre um sistema de fôrmas de pilares é caracterizada por um carregamento linear distribuído com maior valor na parte inferior da fôrma e com decréscimo deste valor ao longo da altura do pilar.

Desta maneira é possível que, para fôrmas com sarrafos de enrijecimento na horizontal, o espaçamento entre estes sarrafos seja variável, com espaçamentos menores na parte inferior da fôrma e espaçamentos maiores na parte superior da fôrma.

Assim, esta Subseção desenvolve um modelo de fôrma de pilar com sarrafos horizontais de espaçamentos variáveis. Como referência será utilizado o modelo Pilar 1, da Tabela 9 (pág. 56), de seção medindo 20 cm × 40 cm, altura total de 300 cm e altura livre do painel de fôrma do pilar correspondente à 250 cm.

No dimensionamento da chapa do painel da fôrma devem ser respeitadas duas condições, a máxima tensão atuante (σ_d) deve ser igual ou inferior à resistência de cálculo à compressão (f_{cd}) da chapa, bem como o máximo deslocamento deve ser inferior ao deslocamento limite dado pela Equação 6 (pág. 32).

A definição da resistência de cálculo à compressão da chapa na direção paralela às fibras é feita pela Equação 19.

$$f_{cd_chapa} = \frac{k_{mod_chapa} \times f_{ck_chapa}}{\gamma_{wc}} \quad (19)$$

Onde k_{mod_chapa} equivale a 0,72 e é dado pela Equação 1, e f_{ck_chapa} é a resistência característica da chapa dada pela Equação 20.

$$f_{ck_chapa} = 0,7 \times f_{cm_chapa} \quad (20)$$

Onde f_{cm_chapa} equivale a 3,403 kN/cm², obtido na Tabela 7 (pág. 46).

Já a resistência de cálculo à compressão da chapa na direção perpendicular às fibras é determinada pela Equação 21.

$$f_{c90d_chapa} = \frac{f_{c90m_chapa}}{f_{c0m_chapa}} \times f_{c0d_chapa} \quad (21)$$

Onde f_{c90m_chapa} equivale a 2,942 kN/cm², obtido na Tabela 7 (pág. 46).

Dessa maneira tem-se que o f_{c0d_chapa} é igual a 1,225 kN/cm² e o f_{c90d_chapa} corresponde a 1,059 kN/cm². Considerando-se a direção vertical para as fibras, tem-se que a máxima tensão atuante (σ_d) não poderá ser maior que 1,225 kN/cm².

Com relação ao módulo de elasticidade, considerando-se o vão entre sarrafos paralelo às fibras da chapa, este pode ser obtido pela multiplicação do módulo de elasticidade médio (621,58 kN/cm²) pelo k_{mod_chapa} (0,72), resultando em um módulo de elasticidade de cálculo equivalente à 447,54 kN/cm².

A partir disso é possível o dimensionamento do primeiro espaçamento entre sarrafos, na parte inferior do painel, tomando-se como base a tensão limite calculada e a força máxima característica sobre o painel equivalente a 75 kN/m² (Força máxima de cálculo corresponde à 105 kN/m²). Por meio da Equação 9 (pág. 41), obteve-se um vão limite de 22,4 cm. Na sequência com a Equação 8 (pág. 40) faz-se a verificação deste vão para o parâmetro deslocamento da chapa, obtendo-se um deslocamento de 1,58 mm, enquanto que o limite de deslocamento para o vão em questão é equivalente a 1,450 mm. Assim este vão atende aos limites do parâmetro tensão, mas não o deslocamento máximo, sendo necessário o dimensionamento do vão a partir do deslocamento limite para o caso. Com isso obteve-se para este caso um vão de 21,9 cm entre sarrafos.

Para o dimensionamento do segundo vão entre sarrafos foi estabelecida força máxima de cálculo equivalente a 97,335 kN/m², menor que a anterior justamente por estar 21,9 cm acima do trecho já dimensionado. Os demais procedimentos de cálculo se repetem ao longo de toda altura do painel.

A Tabela 15 apresenta os valores obtidos no dimensionamento total do painel, enquanto que a Figura 30 mostra o esquema geral do carregamento utilizado nos cálculos.

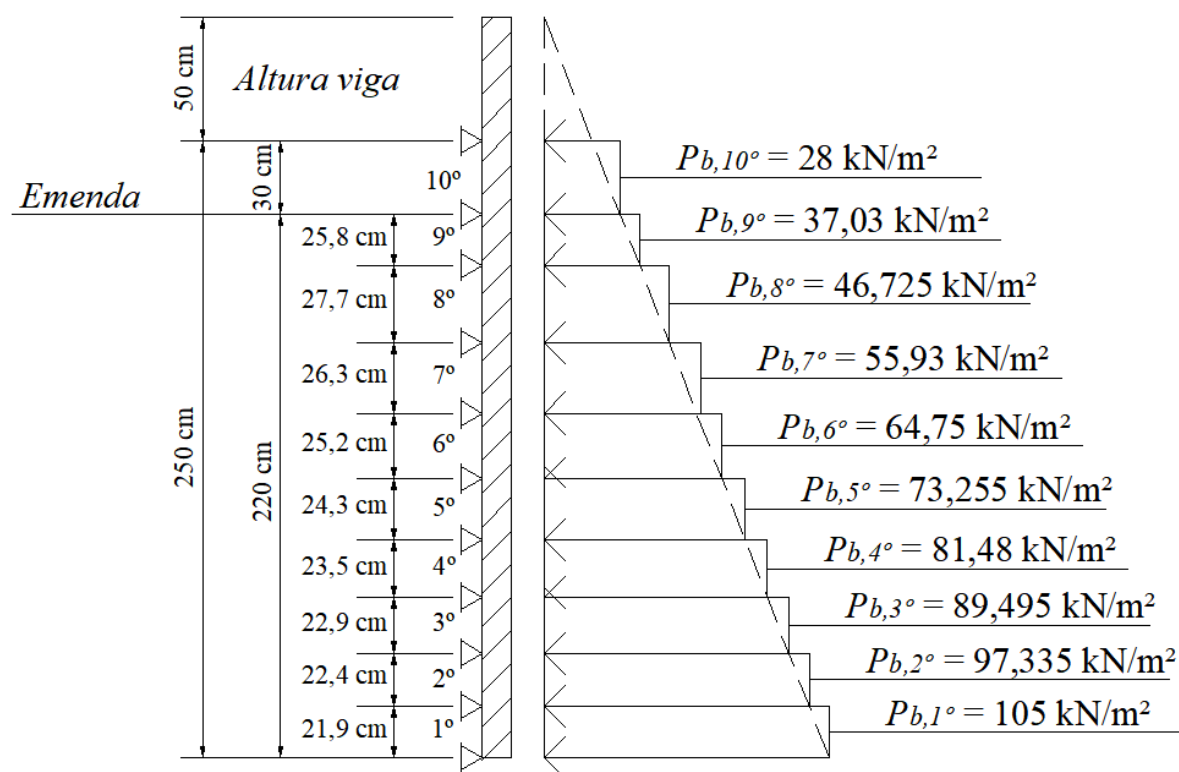
Tabela 15 – Dados do dimensionamento do modelo

| Nº vão | $P_{b,d}$ (kN/m ²) | f_{c0d} (kN/cm ²) | L_{es} <i>Adotado</i> (cm) | σ_d (kN/cm ²) | u_{lim} (cm) | u_{total} (cm) | L_{es} <i>Final</i> (cm) | Parâmetro principal |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1º | 105,000 | 1,225 | 22,4 | 1,166 | 0,145 | 0,158 | 21,9 | Desloc. |
| 2º | 97,335 | 1,225 | 23,3 | 1,131 | 0,147 | 0,172 | 22,4 | Desloc. |
| 3º | 89,495 | 1,225 | 24,3 | 1,086 | 0,149 | 0,187 | 22,9 | Desloc. |
| 4º | 81,480 | 1,225 | 25,4 | 1,041 | 0,151 | 0,203 | 23,5 | Desloc. |
| 5º | 73,255 | 1,225 | 26,8 | 1,001 | 0,154 | 0,226 | 24,3 | Desloc. |
| 6º | 64,750 | 1,225 | 28,5 | 0,952 | 0,157 | 0,256 | 25,2 | Desloc. |
| 7º | 55,930 | 1,225 | 30,7 | 0,896 | 0,161 | 0,297 | 26,3 | Desloc. |
| 8º | 46,725 | 1,225 | 33,6 | 0,830 | 0,167 | 0,357 | 27,7 | Desloc. |
| *9º | 37,030 | 1,225 | 25,8 | 0,571 | 0,152 | 0,098 | 25,8 | - |
| *10º | 28,000 | 1,225 | 30,0 | 0,583 | 0,160 | 0,135 | 30,0 | |

* vãos adjacentes à emenda entre chapas

Fonte: Autor

Figura 30 – Esquema geral fôrma com espaçamento variável entre sarrafos



Fonte: Autor

Dos resultados apresentados, destaca-se o aumento do espaçamento entre sarrafos de enrijecimento horizontais ao longo da altura da fôrma, em função da diminuição da força atuante a cada trecho. Tal fato somente não ocorreu nas proximidades da emenda entre

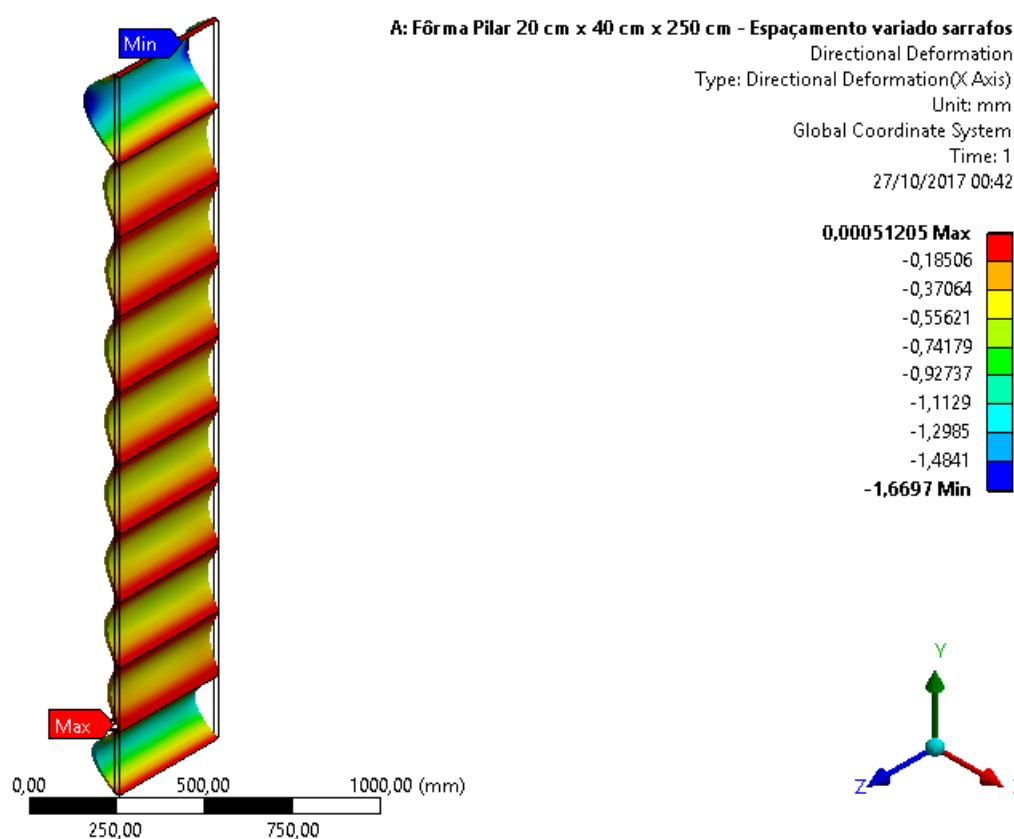
chapas, ponto em que é necessária a inclusão de um sarrafo para fazer a interligação entre as partes.

Outro ponto importante a ser destacado é que, para todos os vãos, o parâmetro que determinou a dimensão do vão foi o deslocamento limite, exceto para o 9º e 10º vãos, em que os dois parâmetros não atingiram os limites máximos.

Para comparação entre métodos de cálculo, foi feita a simulação por MEF do modelo dimensionado pelo método simplificado de cálculo, com os espaçamentos variados assim como apresentado na Figura 30.

A Figura 31 apresenta o resultado pelo MEF do comportamento do sistema de fôrma dimensionado.

Figura 31 – Deslocamentos – modelo com espaçamento variável entre sarrafos (20 cm x 40 cm)



Fonte: Autor

Os resultados comparativos entre os métodos de cálculo para deslocamentos e para tensões são apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17, respectivamente.

Tabela 16 – Comparativo entre métodos de cálculo – Deslocamentos

| Nº vão | L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) |
|--------|---------------|--|-------------------------------|
| 1º | 21,9 | 0,144 | 0,122 |
| 2º | 22,4 | 0,145 | 0,048 |
| 3º | 22,9 | 0,146 | 0,059 |
| 4º | 23,5 | 0,147 | 0,055 |
| 5º | 24,3 | 0,149 | 0,056 |
| 6º | 25,2 | 0,150 | 0,055 |
| 7º | 26,3 | 0,153 | 0,055 |
| 8º | 27,7 | 0,155 | 0,051 |
| 9º | 25,8 | 0,098 | 0,060 |
| 10º | 30,0 | 0,135 | 0,167 |

Fonte: Autor

Tabela 17 - Comparativo entre métodos de cálculo – Tensões

| Nº vão | L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) |
|--------|---------------|---|--|
| 1º | 21,9 | 1,166 | 1,001 |
| 2º | 22,4 | 1,131 | 0,828 |
| 3º | 22,9 | 1,086 | 0,583 |
| 4º | 23,5 | 1,041 | 0,640 |
| 5º | 24,3 | 1,001 | 0,602 |
| 6º | 25,2 | 0,952 | 0,572 |
| 7º | 26,3 | 0,896 | 0,552 |
| 8º | 27,7 | 0,830 | 0,504 |
| 9º | 25,8 | 0,571 | 0,522 |
| 10º | 30,0 | 0,583 | 0,669 |

Fonte: Autor

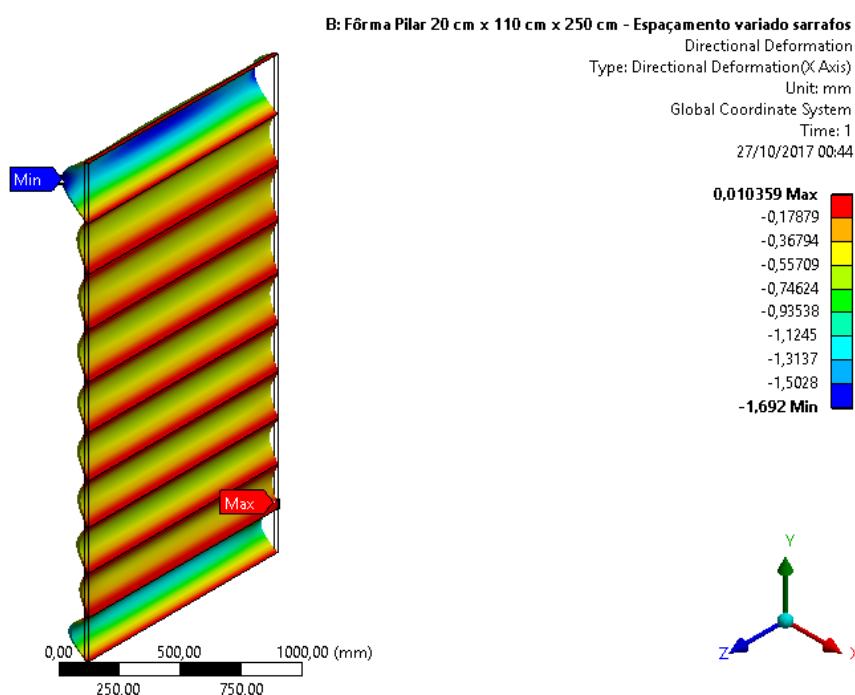
A partir dos resultados obtidos é verificado que para deslocamentos da chapa, a tendência de resultados similares entre praticamente todos os vãos para os cálculos simplificados, foi mantida também na simulação numérica realizada pelo MEF. Com relação às tensões, o comportamento dos resultados obtidos para os dois métodos de cálculo foram semelhantes, apresentando certa diminuição das tensões à medida que era considerando um ponto da chapa mais próximo a parte superior do sistema de fôrma.

Na comparação dos resultados, os valores obtidos pelo MEF foram menores que os valores do cálculo simplificado, pelo fato de que na simulação do modelo pelo método dos elementos finitos a continuidade da chapa, de um vão para outro, é considerada. A única

excessão ocorreu no vão entre sarrafos na parte superior da fôrma. Este último vão é justamente a parte da fôrma que está além do ponto de emenda entre chapas, ou seja, acima dos 220 cm de altura, não existindo de fato a continuidade entre as chapas.

Contudo, a configuração de espaçamentos entre sarrafos horizontais proposta, para pilares com altura livre de 250 cm, é adequada, atendendo aos estados limites, tanto de utilização quanto o estado limite último. Assim esta configuração pode ser utilizada para fôrmas com 250 cm de altura, para diversas seções de pilares, uma vez que o fator que influencia diretamente nas forças atuantes sobre o sistema é a altura do pilar. Tal fato pode ser comprovado na Figura 32, onde é apresentado o comportamento do sistema de fôrmas com 250 cm de altura para um pilar com seção equivalente a 20 cm \times 110 cm. Os resultados obtidos para deslocamentos e tensões são basicamente os mesmos dos obtidos para o pilar com seção de 20 cm \times 40 cm.

Figura 32 – Deslocamentos – modelo com espaçamento variável entre sarrafos (20 cm \times 110 cm)



Fonte: Autor

Com o modelo proposto, de espaçamento variável entre sarrafos horizontais, é possível a redução de pelo menos dois vãos entre sarrafos, quando se comparado ao dimensionamento simplificado feito considerando apenas a força máxima sobre o sistema e definindo-se espaçamentos iguais ao longo de toda a fôrma. No caso seriam vãos de medidas iguais e equivalentes a 21,9 cm. Dessa maneira é possível a redução dos custos no

que diz respeito ao material utilizado, sobretudo em se tratando de uma produção em maior escala.

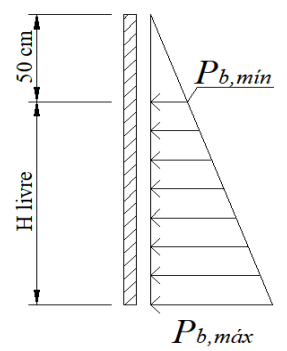
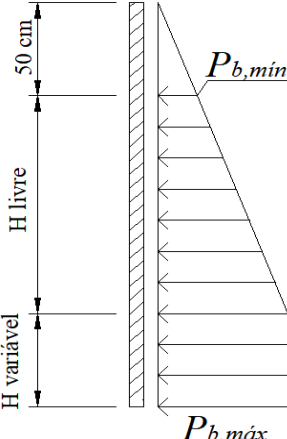
4.3 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DOS MODELOS COM ENRIJECIMENTOS VERTICAIS

Nesta Seção são apresentados os procedimentos realizados para os cálculos simplificados e para as simulações numéricas de todos os modelos propostos na Tabela 10 (pág. 57).

Assim como para os modelos da Seção 4.2, para realização dos cálculos simplificados e simulações numéricas no sistema computacional ANSYS®, é preciso primeiramente determinar as forças atuantes sobre o sistema de fôrmas em cada caso.

A partir dos critérios apresentados na Seção 3.2 deste trabalho, é possível definir as características do carregamento atuante sobre cada um dos modelos. Tais características são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Detalhamento do carregamento atuante em cada modelo

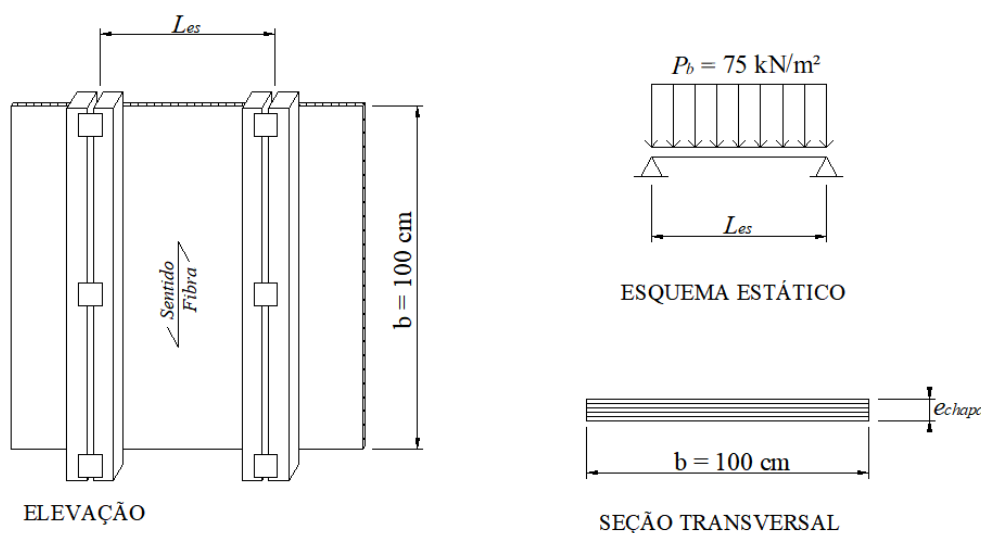
| Modelo | Forma carregamento MEF | $P_{b,min}$ kN/m ² | $P_{b,máx}$ kN/m ² | H livre (cm) | H variável (cm) |
|---------|---|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------|
| PILAR A |  | 12,5 | 75,0 | 250 | - |
| PILAR B | | | 77,5 | 260 | - |
| PILAR C | | | 80,0 | 270 | - |
| PILAR D | | | 82,5 | 280 | - |
| PILAR E |  | 12,5 | 83,0 | 282 | 8 |
| PILAR F | | | | | 18 |
| PILAR G | | | | | 28 |
| PILAR H | | | | | 38 |
| PILAR I | | | | | 48 |
| PILAR J | | | | | 58 |
| PILAR K | | | | | 68 |

Fonte: Autor

4.3.1 Fôrma com elementos de enrijecimento na vertical

Neste tipo de composição de fôrma para pilar, para realização dos cálculos de deslocamentos e tensões atuantes pelo método simplificado, o painel de chapa compensada de madeira funciona como uma viga biapoiada com base medindo 100 cm (pelo fato do carregamento ser uniformemente distribuído ao longo de todo o painel) e a altura medindo a espessura da chapa (1,8 cm), como pode ser observado no esquema apresentado pela Figura 33, esquema este semelhante para todos os modelos listados na Tabela 10 (pág. 57), sendo variado apenas o valor do carregamento uniformemente distribuído.

Figura 33 – Esquema geral do sistema de fôrma para cálculos simplificados



Fonte: Autor

Seguindo então o esquema apresentado, e por meio das Equações 8 e 9 descritas na Subseção 3.1.1, é possível a realização dos cálculos dos deslocamentos e das tensões pelo método simplificado. Para isso é importante definir o valor do momento de inércia (I) da seção transversal que é dado pela Equação 22.

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

Para todos os casos analisados nesta Seção, para fôrmas com elementos de enrijecimento na posição vertical, o valor do momento de inércia é $48,6 \text{ cm}^4$, visto que a seção transversal da viga biapoiada formada pela chapa compensada será a mesma para os demais casos.

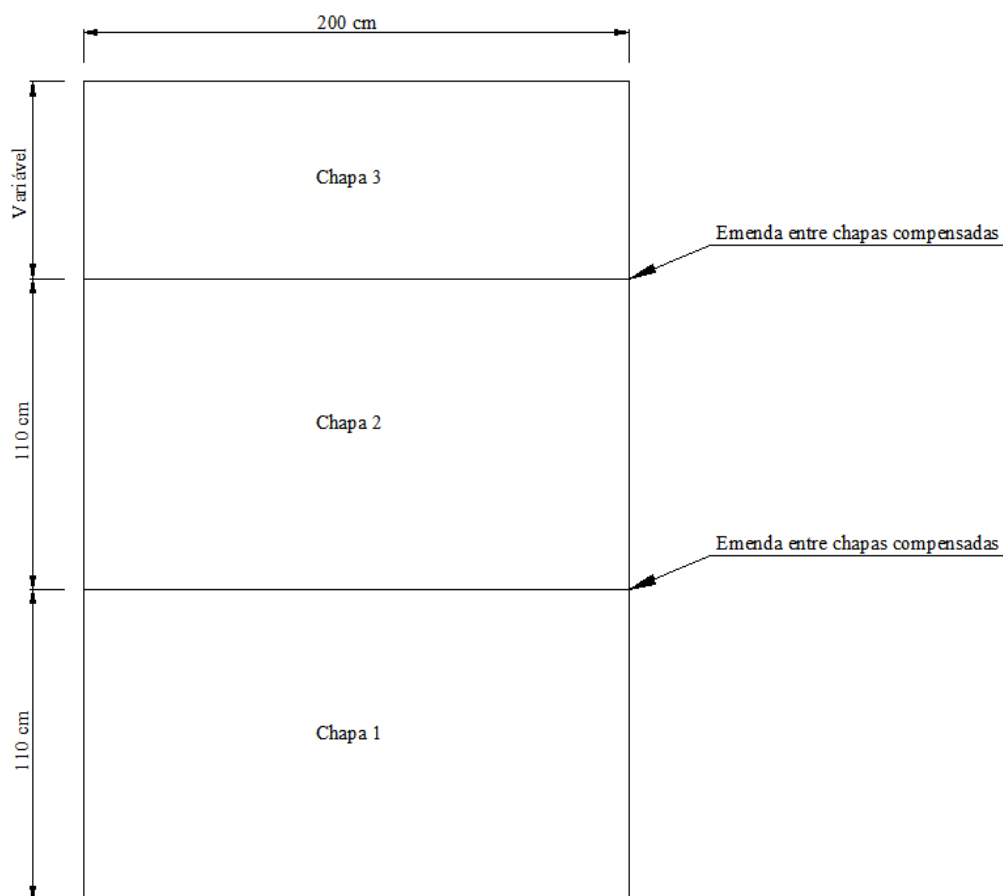
O momento máximo gerado pelo carregamento atuante sobre o sistema, necessário para o cálculo das tensões, é dado pela Equação 23, sendo seu valor variável em função do vão equivalente ao espaçamento entre elementos de enrijecimento.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P_b \times b \times L_{es}^2}{8} \quad (23)$$

Na realização das simulações pelo método dos elementos finitos, pelo fato da altura total do painel de fôrma variar de 250 cm a 350 cm, e a maior dimensão da seção do pilar ser igual a 200 cm, foi necessária a inclusão de emendas de painéis de chapa compensada, já que as dimensões dos compensados são 110 cm × 220 cm.

A Figura 34 apresenta o esquema geral de distribuição das chapas compensadas que compõem o painel de fôrmas simulados nesta Subseção e nas seguintes, detalhando os pontos de emenda entre chapas.

Figura 34 – Detalhe da distribuição das chapas de madeira compensada



Fonte: Autor

Os resultados encontrados para os cálculos simplificados de deslocamentos e tensões, para o Pilar A com as medidas 25 cm × 200 cm × 250 cm com elementos de enrijecimento espaçados por 2 até 10 vãos, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados dos cálculos simplificados (Pilar A)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (cm) | Momento máximo (kN·cm) | Tensão atuante (kN/cm²) |
|------------|---------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,090 | 37,500 | 0,694 |
| 9 | 22,2 | 0,138 | 46,296 | 0,857 |
| 8 | 25,0 | 0,221 | 58,594 | 1,085 |
| 7 | 28,6 | 0,377 | 76,531 | 1,417 |
| 6 | 33,3 | 0,698 | 104,167 | 1,929 |
| 5 | 40,0 | 1,448 | 150,000 | 2,778 |
| 4 | 50,0 | 3,535 | 234,375 | 4,340 |
| 3 | 66,7 | 11,172 | 416,667 | 7,716 |
| 2 | 100,0 | 56,559 | 937,500 | 17,361 |

Fonte: Autor

Já os resultados obtidos para simulação MEF do mesmo modelo estão descritos na Tabela 20.

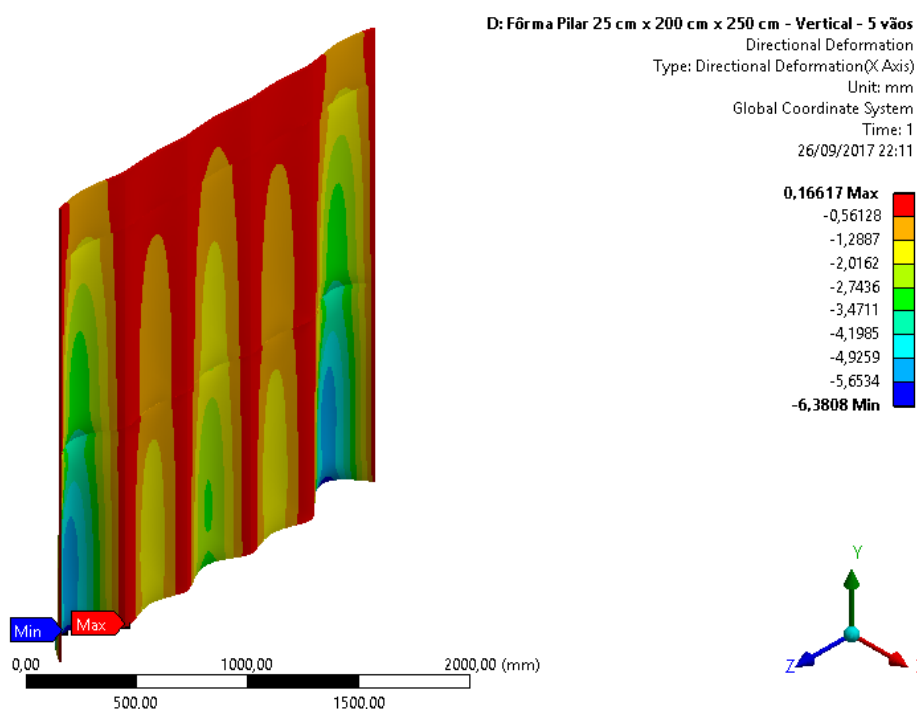
Tabela 20 – Resultados por MEF (Pilar A)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (cm) | Tensão atuante (kN/cm²) |
|------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,049 | 0,597 |
| 9 | 22,2 | 0,072 | 0,723 |
| 8 | 25,0 | 0,111 | 0,925 |
| 7 | 28,6 | 0,180 | 1,233 |
| 6 | 33,3 | 0,320 | 1,628 |
| 5 | 40,0 | 0,638 | 2,617 |
| 4 | 50,0 | 1,503 | 4,063 |
| 3 | 66,7 | 4,844 | 7,152 |
| 2 | 100,0 | 18,701 | 20,316 |

Fonte: Autor

Como amostra de apresentação dos resultados fornecidos pelo sistema computacional ANSYS®, a Figura 35 indica os resultados de deslocamentos para o modelo com 5 vãos entre sarrafos de enrijecimento verticais.

Figura 35 – Resultado de deslocamento do painel para 5 vãos verticais (Pilar A)



Fonte: Autor

Na Tabela 21 são apresentados os resultados com relação aos deslocamentos ocorridos e fatores de correção entre os métodos.

Tabela 21 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar A)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,090 | 0,049 | 0,542 |
| 9 | 22,2 | 0,138 | 0,072 | 0,519 |
| 8 | 25,0 | 0,221 | 0,111 | 0,504 |
| 7 | 28,6 | 0,377 | 0,180 | 0,477 |
| 6 | 33,3 | 0,698 | 0,320 | 0,459 |
| 5 | 40,0 | 1,448 | 0,638 | 0,441 |
| 4 | 50,0 | 3,535 | 1,503 | 0,425 |
| 3 | 66,7 | 11,172 | 4,844 | 0,434 |
| 2 | 100,0 | 56,559 | 18,701 | 0,331 |

Fonte: Autor

Na Tabela 22 estão descritos os resultados para tensões atuantes e os respectivos fatores de correção entre os métodos de cálculo.

Tabela 22 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar A)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,694 | 0,597 | 0,859 |
| 9 | 22,2 | 0,857 | 0,723 | 0,844 |
| 8 | 25,0 | 1,085 | 0,925 | 0,852 |
| 7 | 28,6 | 1,417 | 1,233 | 0,870 |
| 6 | 33,3 | 1,929 | 1,628 | 0,844 |
| 5 | 40,0 | 2,778 | 2,617 | 0,942 |
| 4 | 50,0 | 4,340 | 4,063 | 0,936 |
| 3 | 66,7 | 7,716 | 7,152 | 0,927 |
| 2 | 100,0 | 17,361 | 20,316 | 1,170 |

Fonte: Autor

Seguindo os mesmos critérios descritos para o Pilar A, os resultados obtidos, para os demais modelos de fôrmas com elementos de enrijecimento na posição vertical, são apresentados no Apêndice B ao final da pesquisa.

4.3.2 Análise dos resultados dos modelos com enrijecimento vertical

Nesta Subseção são apresentadas análises gerais dos resultados apresentados na Seção 4.3, referente aos diversos modelos simulados.

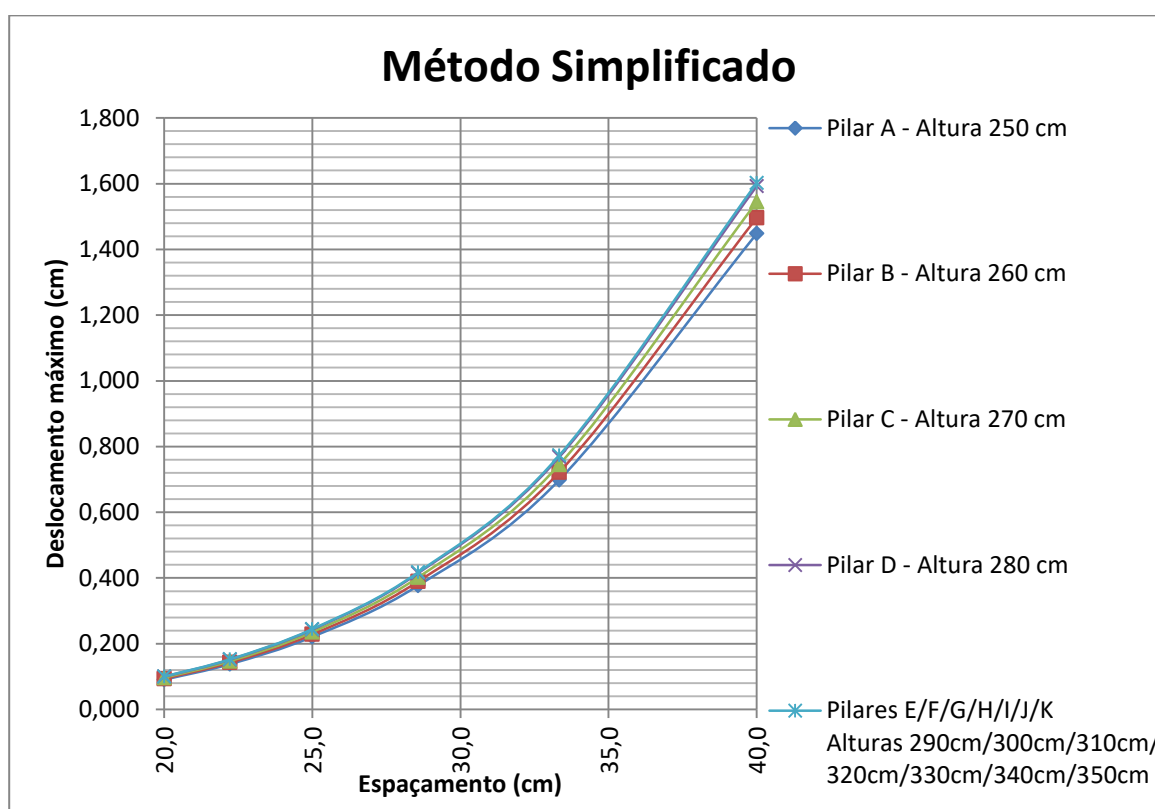
No que diz respeito ao método simplificado de cálculo, foi observado que os valores de deslocamentos e tensões máximas atuantes sobre o sistema aumentavam à medida que era aumentada a altura do painel de fôrma dos pilares, porém até certo limite. Este limite é a altura hidrostática (h_s), equivalente à 3,32 m, ou seja, até o modelo Pilar E ocorreu aumento no valor máximo do carregamento distribuído sobre o sistema. A partir deste modelo, apesar do aumento da altura do pilar, não ocorreu o aumento deste valor máximo de carregamento, gerando assim valores de deslocamentos e tensões máximas iguais desde o modelo Pilar E até o modelo Pilar K.

Com relação aos resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, tanto para deslocamentos como para tensões atuantes, ocorreram acréscimos dos valores à medida que era aumentada a altura do pilar, para todos os espaçamentos simulados, até o modelo Pilar E. Para espaçamentos menores que 40 cm entre os elementos de enrijecimento, os valores de deslocamentos e tensões se mantiveram praticamente constantes do modelo

Pilar E até o modelo Pilar K. Já para espaçamentos maiores que 40 cm, estes valores continuaram crescendo à medida que era aumentada a dimensão do Pilar até uma altura de 320 cm. Acima disto iniciou-se uma tendência de queda dos valores de deslocamento e tensão máximos.

De maneira geral, existe semelhança no comportamento dos resultados de deslocamentos apresentados pelos dois métodos de cálculo e pelos diferentes modelos simulados. Este fato pode ser melhor observado na comparação entre a Figura 36 e a Figura 37.

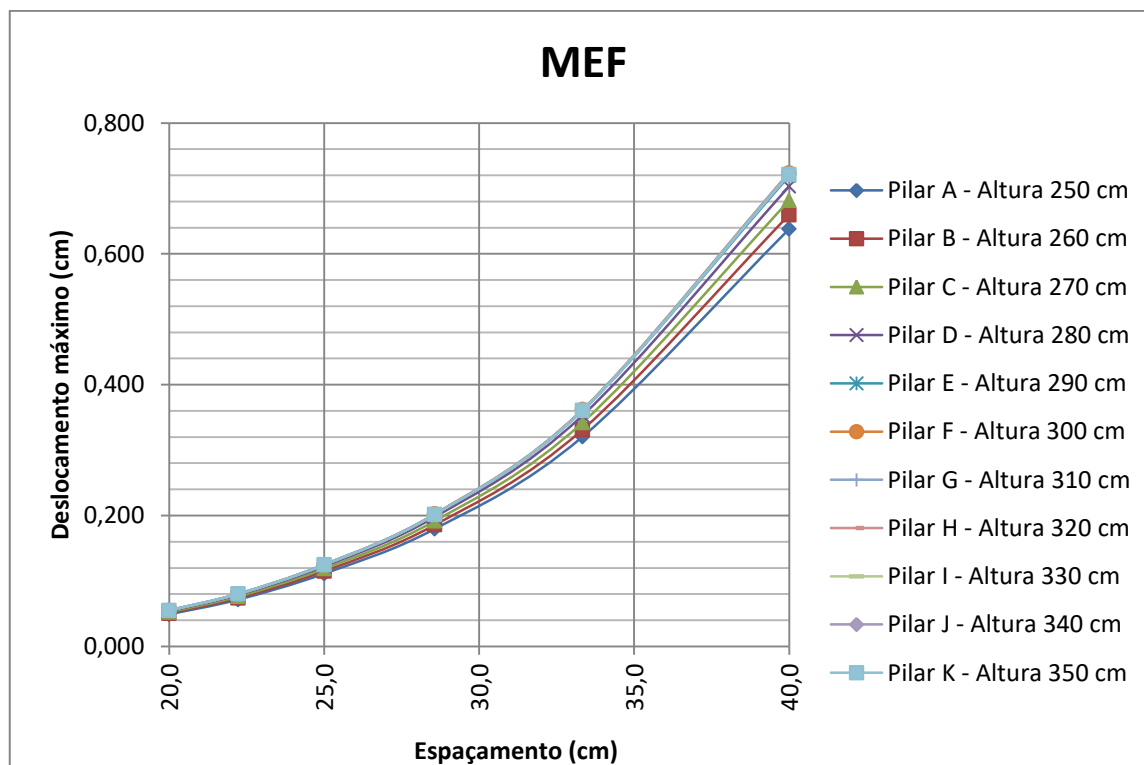
Figura 36 – Deslocamentos máximos método simplificado – Enrijecimentos verticais



Fonte: Autor

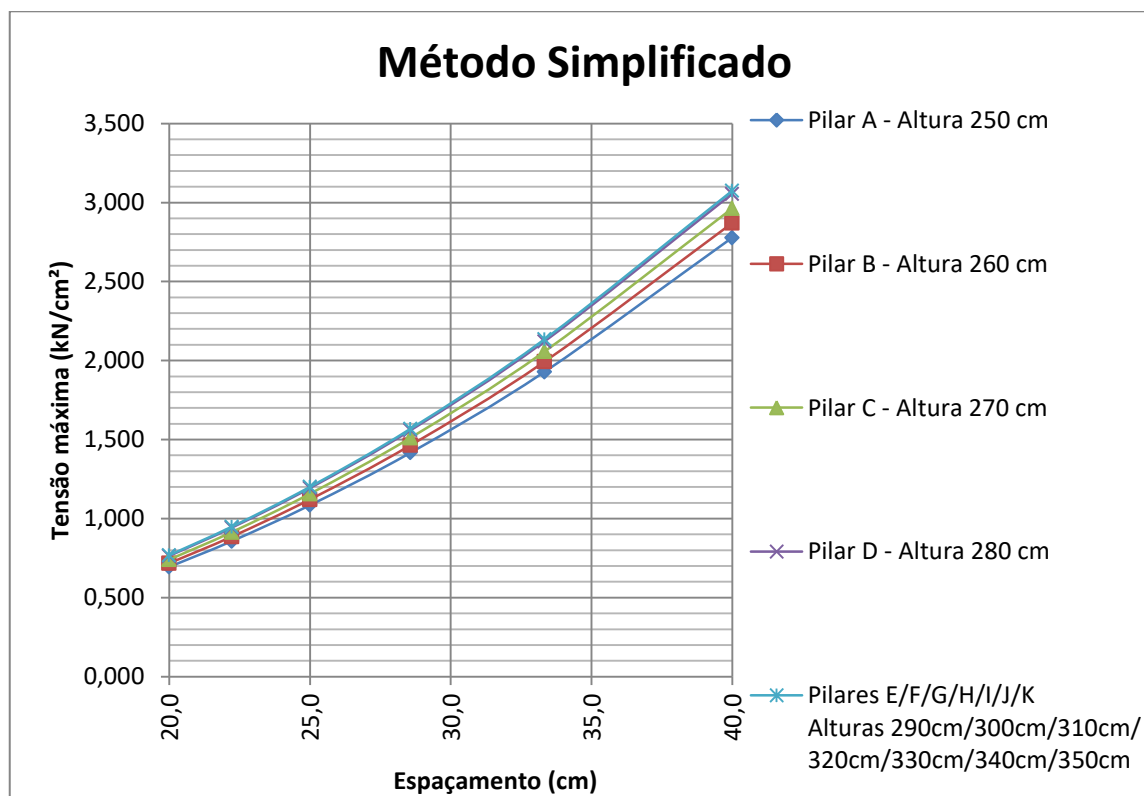
Da mesma maneira, existe semelhança no comportamento dos resultados de tensões apresentados pelos dois métodos de cálculo e pelos diferentes modelos simulados. Este fato pode ser observado na comparação entre a Figura 38 e a Figura 39.

Figura 37 – Deslocamentos máximos por MEF – Enrijecimentos verticais



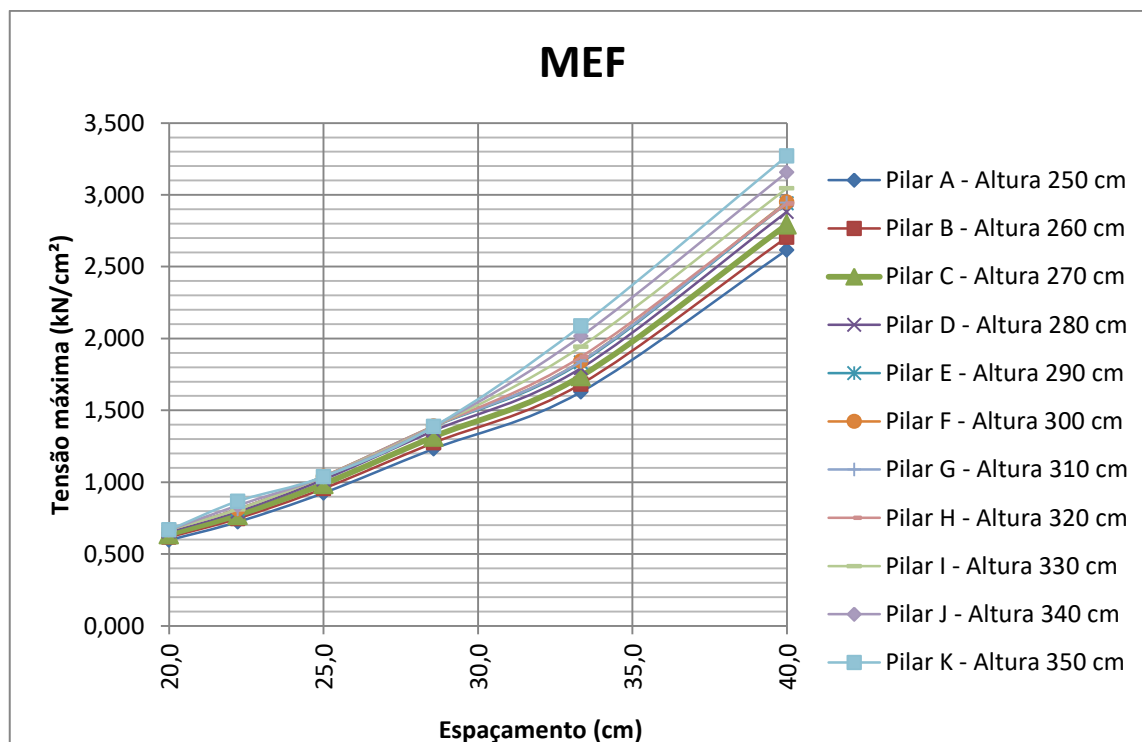
Fonte: Autor

Figura 38 – Tensões máximas pelo método simplificado – Enrijecimentos verticais



Fonte: Autor

Figura 39 – Tensões máximas por MEF – Enrijecimentos verticais



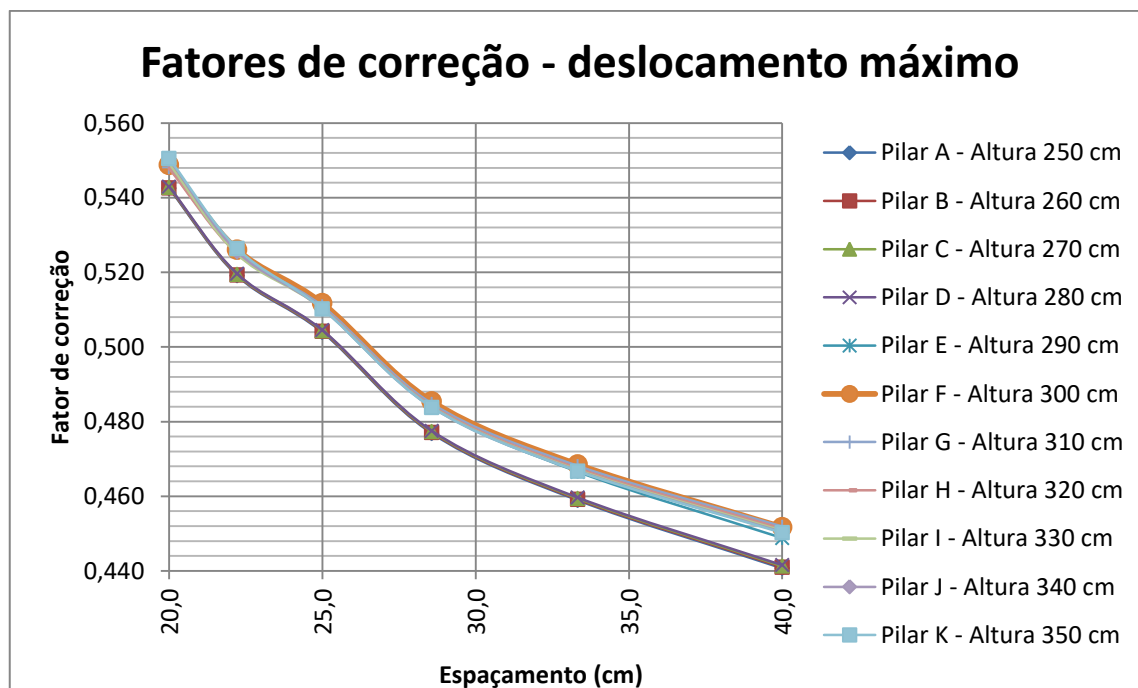
Fonte: Autor

A partir dos resultados apresentados para os valores dos fatores de correção, no que diz respeito aos deslocamentos, considerando valores admissíveis, pode-se observar uma variação de valores na faixa de 0,40 a 0,60 para todas as configurações.

Este comportamento ocorreu de maneira semelhante para todos os modelos estudados como pode ser observado na Figura 40.

Já com relação às tensões, pode-se observar que à medida que se aumentou a quantidade de vãos, ocorreu a diminuição do valor do fator de correção, destacando-se certa oscilação neste comportamento do modelo com espaçamentos entre sarrafos menores que 40 cm (Intervalo com valores admissíveis).

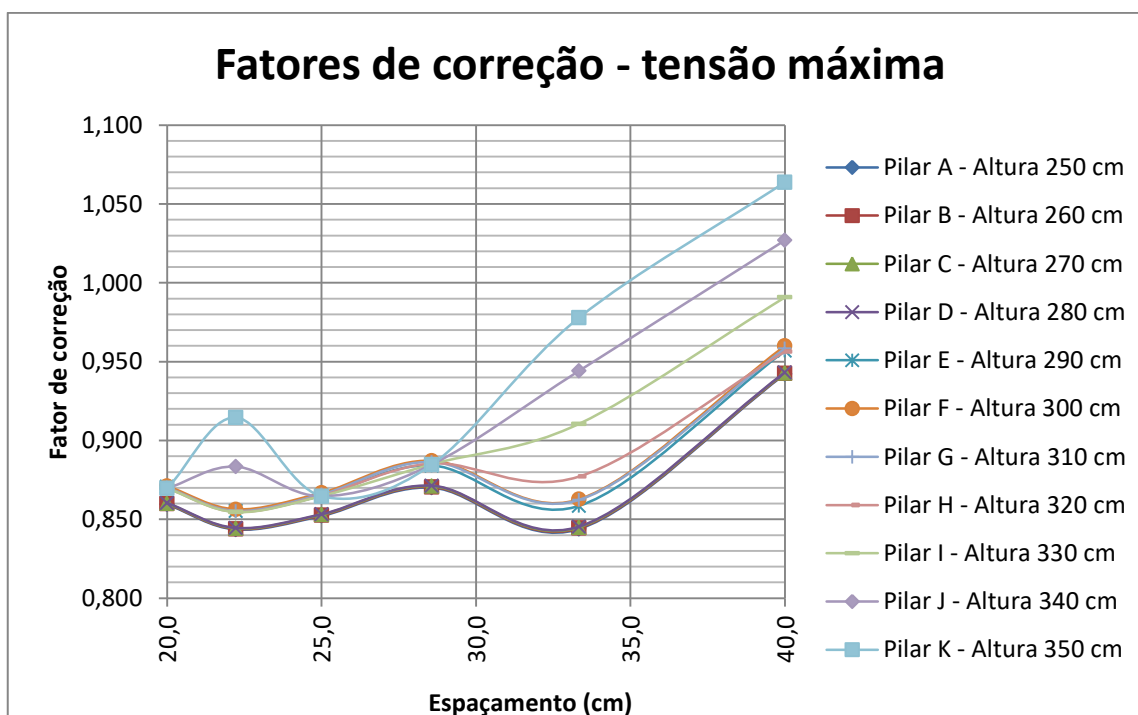
Figura 40 – Fatores de correção para deslocamentos – Enrijecimentos verticais



Fonte: Autor

A Figura 41 apresenta a tendência descrita para os valores de fatores de correção para tensões atuantes.

Figura 41 – Fatores de correção para tensões – Enrijecimentos verticais



Fonte: Autor

4.3.3 Equações de fatores de correção para fôrmas de pilares com enrijecimentos verticais

Com a conclusão de todos os cálculos simplificados e simulações numéricas dos diversos modelos de sistemas de fôrmas com elementos de enrijecimento na posição vertical, foi possível realizar a comparação dos resultados gerados pelos dois métodos de cálculo, sendo gerados a partir daí, fatores de correção que fazem uma correlação entre estes métodos.

Dessa maneira, nesta Seção são desenvolvidas e propostas equações de fatores de correção, uma para os deslocamentos e outra para as tensões, que irão auxiliar no dimensionamento simplificado de painéis de sistemas de fôrmas para execução de pilares de concreto armado, que utilizem elementos de enrijecimento na posição vertical.

Destaca-se que foram utilizados, no desenvolvimento das equações, tanto para deslocamentos quanto para tensões, os resultados obtidos para espaçamentos entre sarrafos até 40,0 cm, já que os espaçamentos maiores apresentaram valores de deslocamentos muito acima dos limites máximos permitidos.

4.3.3.1 Fator de correção para deslocamentos

Utilizando os dados e resultados gerados para fatores de correção entre o método simplificado de cálculo e o MEF, em relação aos deslocamentos que ocorrem em um sistema de fôrmas de pilar com elementos de enrijecimento na posição vertical, é proposta a Equação 24 obtida a partir de regressão linear de duas variáveis.

$$FC_{u,m\acute{a}x} = 0,605030894 - (0,004882284 \times \text{Espa\c{c}amento}) + (0,0000929649 \times \text{Altura}) \quad (24)$$

Onde, $FC_{u,m\acute{a}x}$ é o fator de correção para deslocamento máximo; *Espaçamento* corresponde ao espaçamento entre sarrafos de enrijecimento, no intervalo $20 \text{ cm} \leq \text{Espa\c{c}amento} \leq 40 \text{ cm}$; e *Altura* é a altura livre do painel da fôrma, definida no intervalo $250 \text{ cm} \leq \text{Altura} \leq 350 \text{ cm}$.

A regressão realizada para obtenção da Equação 24 gerou os parâmetros de ajuste de curva apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Parâmetros de ajuste de curva

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|-------------|
| R múltiplo | 0,96947938 |
| R-Quadrado | 0,939890267 |
| R-Quadrado ajustado | 0,937982022 |
| Erro padrão | 0,008650213 |
| Observações | 66 |

Fonte: Autor

4.3.3.2 Fator de correção para tensões atuantes

Utilizando os dados e resultados gerados para fatores de correção entre o método simplificado de cálculo e o MEF, em relação às tensões atuantes sobre um sistema de fôrmas de pilar com elementos de enrijecimento na posição vertical, é proposta a Equação 25 obtida a partir de regressão linear de duas variáveis.

$$FC_{\sigma,m\acute{a}x} = 0,5873448 + (0,004915505 \times \text{Espa\c{c}amento}) + (0,000534056 \times \text{Altura}) \quad (25)$$

Onde, $FC_{\sigma,m\acute{a}x}$ é o fator de correção para tensão máxima; *Espaçamento* corresponde ao espaçamento entre sarrafos de enrijecimento, definido no intervalo $20 \text{ cm} \leq \text{Espa\c{c}amento} \leq 40,0 \text{ cm}$; e *Altura* é a altura livre do painel da fôrma, definida no intervalo $250 \text{ cm} \leq \text{Altura} \leq 350 \text{ cm}$.

A regressão realizada para obtenção da Equação 25 gerou os parâmetros de ajuste de curva apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros de ajuste de curva

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|-------------|
| R múltiplo | 0,807460377 |
| R-Quadrado | 0,65199226 |
| R-Quadrado ajustado | 0,640944395 |
| Erro padrão | 0,028064482 |
| Observações | 66 |

Fonte: Autor

4.3.4 Verificação das equações desenvolvidas

Nesta Subseção é feita, através de cálculos simplificados, a verificação da validade das equações desenvolvidas para fatores de correção, para o dimensionamento de painéis de

fôrmas de pilares. Como referência, em seguida é feita a simulação do modelo dimensionado para comparação de resultados de deslocamentos e tensões.

4.3.4.1 Dimensionamento de painel de fôrma para pilar

Para a verificação das equações desenvolvidas será feito o dimensionamento de fôrma para pilar com as seguintes características:

- Altura do Pilar: 300 cm;
- Altura livre da fôrma: 250 cm;
- Espessura da chapa: 18 mm;
- Momento de Inércia: $48,6 \text{ cm}^4$;
- Módulo de elasticidade: $E_{c90_chapa} = 355,28 \times 0,72 = 255,80 \text{ kN/cm}^2$ (fibras na vertical);
- Resistência de cálculo: $f_{c90d_chapa} = 1,059 \text{ kN/cm}^2$;
- $P_b = 75 \text{ kN/m}^2$

Primeiramente são calculados os fatores de correção para deslocamento e para tensão por meio das Equações 24 e 25, respectivamente. Para isso são adotados inicialmente, espaçamentos entre sarrafos que produzam os maiores fatores de correção em cada caso, ou seja, as situações mais críticas para o sistema de fôrma. Assim para o cálculo do fator de correção dos deslocamentos é adotado um espaçamento entre sarrafos equivalente a 20 cm, e para tensões um espaçamento igual a 66,7 cm.

Desta maneira o fator de correção para deslocamentos (FC_u) corresponde a 0,5306 e o fator de correção para tensões (FC_σ) é equivalente a 1,049. A partir disso, com as Equações 26 e 27, é possível a determinação das forças atuantes sobre a fôrma.

$$q_{d_s} = P_b \times b \times FC_u \times \gamma_Q \quad (\text{Estado limite de serviço}) \quad (26)$$

$$q_{d_u} = P_b \times b \times FC_\sigma \times \gamma_Q \quad (\text{Estado limite último}) \quad (27)$$

Onde b é a “largura” da seção transversal da chapa correspondente a 1,0 m e γ_Q é o coeficiente de majoração igual a 1,4. A força atuante encontrada para o ELS (q_{d_s}) equivale a 55,71 kN/m enquanto que a força atuante para o ELU (q_{d_u}) corresponde à 110,12 kN/m.

Na sequência do dimensionamento é feita a verificação do ELS, devendo ser respeitada a condição estabelecida pela Equação 5 (pág. 32), em que o deslocamento total que ocorrer na fôrma (Equação 7 – pág. 40), deve ser menor ou igual à flecha limite permitida (Equação 6 – pág. 32). Fazendo-se a igualdade das duas equações tem-se que o espaçamento entre sarrafos para o estado limite de serviços deve ser menor ou igual a 22,31 cm.

Já para a verificação do ELU, a condição a ser respeitada é que a máxima tensão de cálculo atuante (σ_d) seja menor ou igual à resistência de cálculo da chapa (f_{cd}). Neste caso, com a adoção das fibras da madeira na direção vertical, tem-se que f_{cd} é equivalente a f_{c90d_chapa} . Assim, sendo respeitada tal condição, obtém-se que, para o estado limite último, o máximo vão entre sarrafos seja equivalente a 20,3 cm.

Dentre os valores de espaçamentos máximos obtidos, é adotado o menor valor, 20,3 cm. Então são feitos novamente todos os cálculos, desde a determinação dos fatores de correção com base neste espaçamento. Com as novas forças atuantes ($q_{d_s} = 55,56 \text{ kN/m}^2$ e $q_{d_u} = 86,16 \text{ kN/m}^2$) após nova verificação dos estados limites, de serviço e último, são obtidos novos valores para espaçamentos máximos entre sarrafos. Para o ELS este valor é 22,33 cm e para o ELU corresponde a 23,04 cm.

Desta maneira, como a variação destes últimos resultados foi pequena em relação aos primeiros, adota-se que o espaçamento máximo entre os sarrafos de enrijecimento do painel é equivalente a 20,3 cm.

Para este espaçamento, ocorre um deslocamento total de 0,988 mm, e a máxima tensão atuante é equivalente a 0,8219 kN/cm², valores estes obtidos através dos cálculos simplificados ajustados pelo fator de correção.

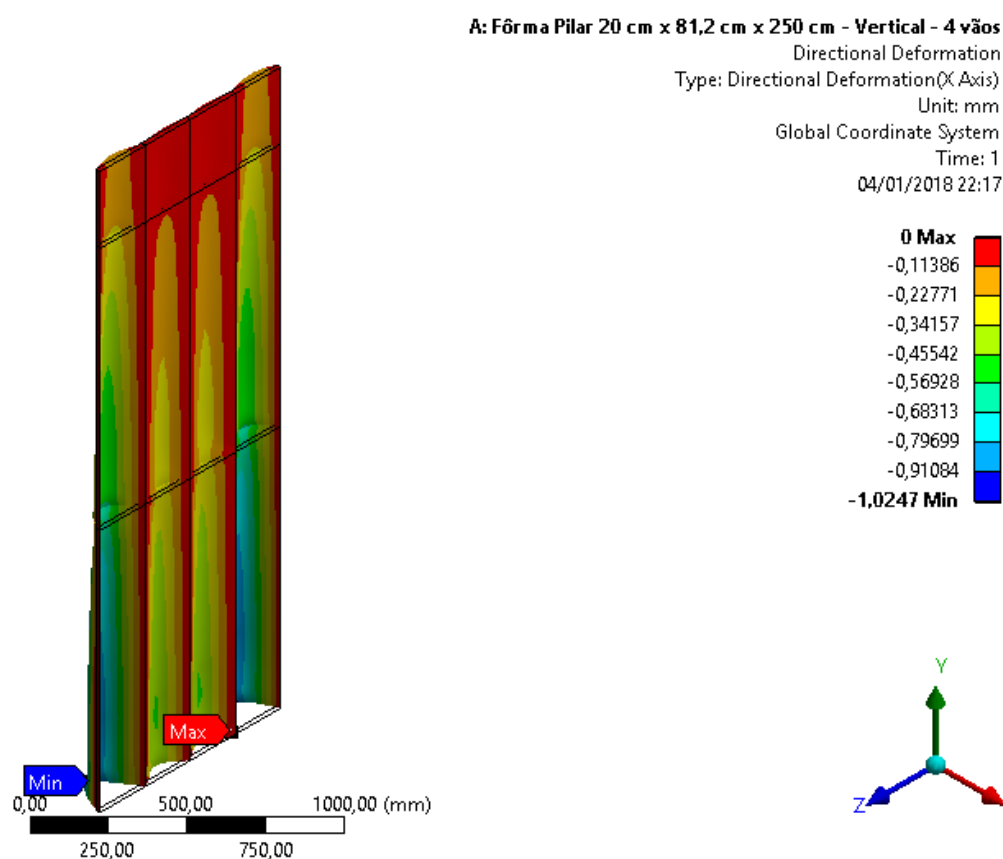
4.3.4.2 Simulação do modelo dimensionado

Para complementar a verificação das Equações 24 e 25 desenvolvidas neste trabalho, é feita a simulação do modelo dimensionado na Subseção 4.3.4.1, em que o espaçamento entre sarrafos não pode ser maior que 20,3 cm. Para manter este espaçamento entre sarrafos, foi adotado um pilar com seção transversal de 20 cm × 81,2 cm (4 vãos entre sarrafos), e com as mesmas características de material, carregamento e demais condições

utilizadas no dimensionamento desenvolvido pelo método simplificado de cálculo. Os resultados obtidos pela simulação MEF, tanto para deslocamentos quanto para tensões, foram bastante satisfatórios. O máximo deslocamento da placa foi equivalente a 1,0247 mm, como pode ser observado na Figura 42. Já a máxima tensão atuante sobre o sistema corresponde a 0,8434 kN/cm².

A diferença entre os resultados gerados pela simulação MEF e os valores obtidos pelo método simplificado ajustado foi da ordem de 3 %, tanto para os deslocamentos como para as tensões, de onde se pode concluir que as equações de fatores de correção desenvolvidas, proporcionam grande aproximação do comportamento real de um sistema de fôrmas de pilares com sarrafos de enrijecimento verticais.

Figura 42 – Comportamento de deslocamento do modelo vertical dimensionado



Fonte: Autor

4.4 DIMENSIONAMENTO COMPLETO DE SISTEMA DE FÔRMAS DE PILARES

Nesta Seção é realizado o dimensionamento completo, a partir das equações desenvolvidas, de sistema de fôrmas com dois tipos de configurações diferentes, para pilares com as mesmas características. Dessa maneira é possível a comparação entre sistemas de fôrmas, dos pontos de vista estrutural e econômico, ou seja, maior ou menor consumo de material. Também é realizado o dimensionamento completo dos sistemas de fôrmas, utilizando apenas os cálculos simplificados, ou seja, sem a incidência de fatores de correção.

Para os dimensionamentos, o pilar adotado é o mesmo que foi utilizado no dimensionamento desenvolvido na Subseção 4.3.4.1, com seção medindo 20 cm \times 81,2 cm e com altura total de 300 cm, 250 cm de altura livre da fôrma.

4.4.1 Dimensionamentos a partir das equações desenvolvidas

4.4.1.1 Dimensionamento de fôrma com enrijecimento vertical

Como o pilar utilizado para o dimensionamento do sistema de fôrmas é o mesmo da Seção anterior, a chapa compensada já está dimensionada, tendo o espaçamento entre sarrafos de enrijecimento (L_{es}) equivalente a 20,3 cm. Portanto, é necessário o dimensionamento dos sarrafos de enrijecimento e dos sarrafos de travamento final do sistema.

Inicialmente, para o dimensionamento dos elementos de enrijecimento do painel, seriam adotados sarrafos de seção 5 cm \times 2,5 cm, porém em função da baixa inércia, são adotados sarrafos/ caibros de seção 5 cm \times 5 cm, com momento de inércia equivalente a 52,08 cm⁴. Os demais dados para dimensionamento são os seguintes:

- Madeira: conífera classe C25;
- $k_{mod_mad} = 0,9 \times 0,8 \times 0,8 = 0,576$;
- $E_{c0,m} = 850 \text{ kN/cm}^2$;
- $E_{c0ef} = 850 \times 0,576 = 489,6 \text{ kN/cm}^2$;
- $y = 2,5 \text{ cm}$;
- $\gamma_{wc} = 1,4$;

- $f_{c0k} = 2,5 \text{ kN/cm}^2$;
- $f_{c0d} = f_{c0d_mad} = 1,03 \text{ kN/cm}^2$.

Para a verificação do estado limite de serviço, a força atuante (11,28 kN/m) é resultado da multiplicação da força q_{d_s} (55,56 kN/m²), calculado na Seção anterior, pela faixa correspondente ao espaçamento entre sarrafos (20,3 cm). Para o ELS, o máximo vão entre apoios que os sarrafos de enrijecimento podem ter é 42,31 cm.

Já para a verificação do estado limite último, a força atuante (17,49 kN/m) é obtida através da multiplicação da força q_{d_u} (86,16 kN/m²), também calculado na Seção anterior, pela faixa correspondente ao espaçamento entre sarrafos (20,3 cm). Para o ELU, o máximo vão entre apoios que os sarrafos de enrijecimento podem ter é 31,32 cm.

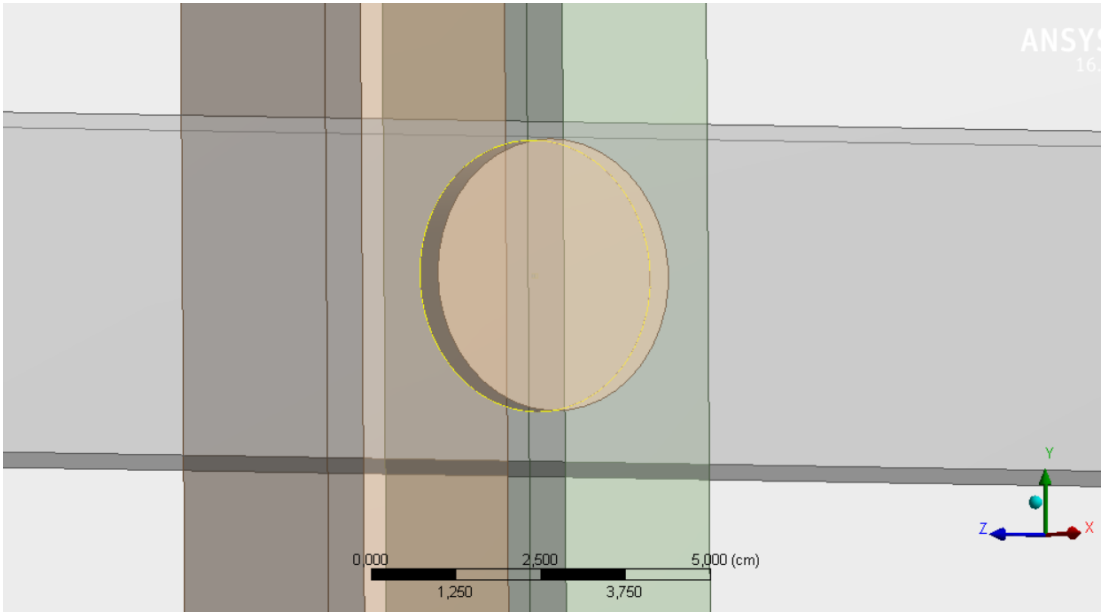
Desse modo, é adotado um espaçamento de 30 cm entre apoios dos sarrafos de enrijecimento. Estes apoios são representados pelos sarrafos de travamento final do sistema de fôrmas. Estes sarrafos de travamento do sistema são compostos por duas peças de madeira de seção 2,5 cm × 5 cm conforme mostrado na Figura 14 (pág. 46).

Para o dimensionamento dos elementos de travamento, os dados utilizados são basicamente os mesmos. Difere-se apenas na força atuante sobre o sistema (31,5 kN/m), resultado da multiplicação da força P_b (75 kN/m²) pelo coeficiente de majoração γ_Q (1,4) e pelo espaçamento entre sarrafos de enrijecimento (30 cm).

Na verificação do ELS, o máximo vão entre apoios que os sarrafos de travamento podem ter é 31,75 cm, enquanto que pelo ELU, este vão não pode ser maior que 23,3 cm, logo os apoios devem respeitar este último espaçamento. Os elementos que representam estes apoios são os tensores metálicos, ou barras de ancoragem, como às apresentadas na Figura 6 (pág. 26) e modelados no programa ANSYS® como apresentado na Figura 43. O esquema final do modelo de fôrma dimensionado é apresentado na Figura 44 (a).

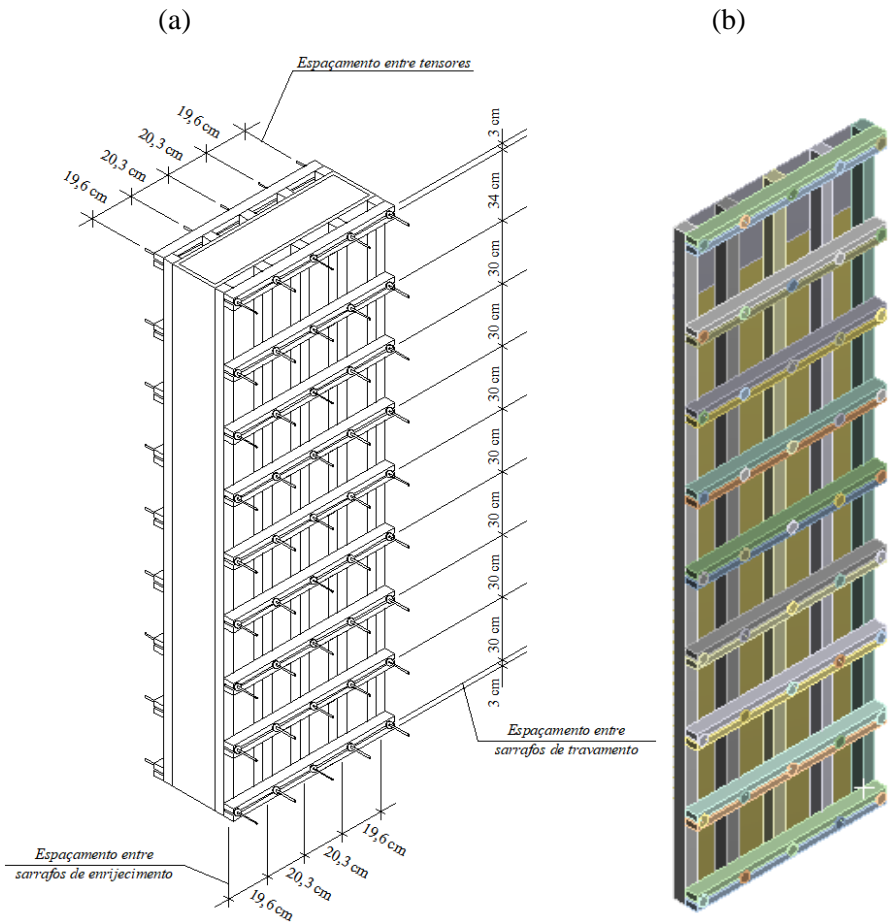
Como maneira de comparação e verificação do comportamento do sistema de fôrma dimensionado, foi feita a simulação deste no sistema computacional ANSYS®. O modelo simulado é apresentado na Figura 44 (b).

Figura 43 – Detalhe da modelagem dos tensores no programa ANSYS®



Fonte: Autor

Figura 44 – Montagem final – Sistema de fôrma dimensionado

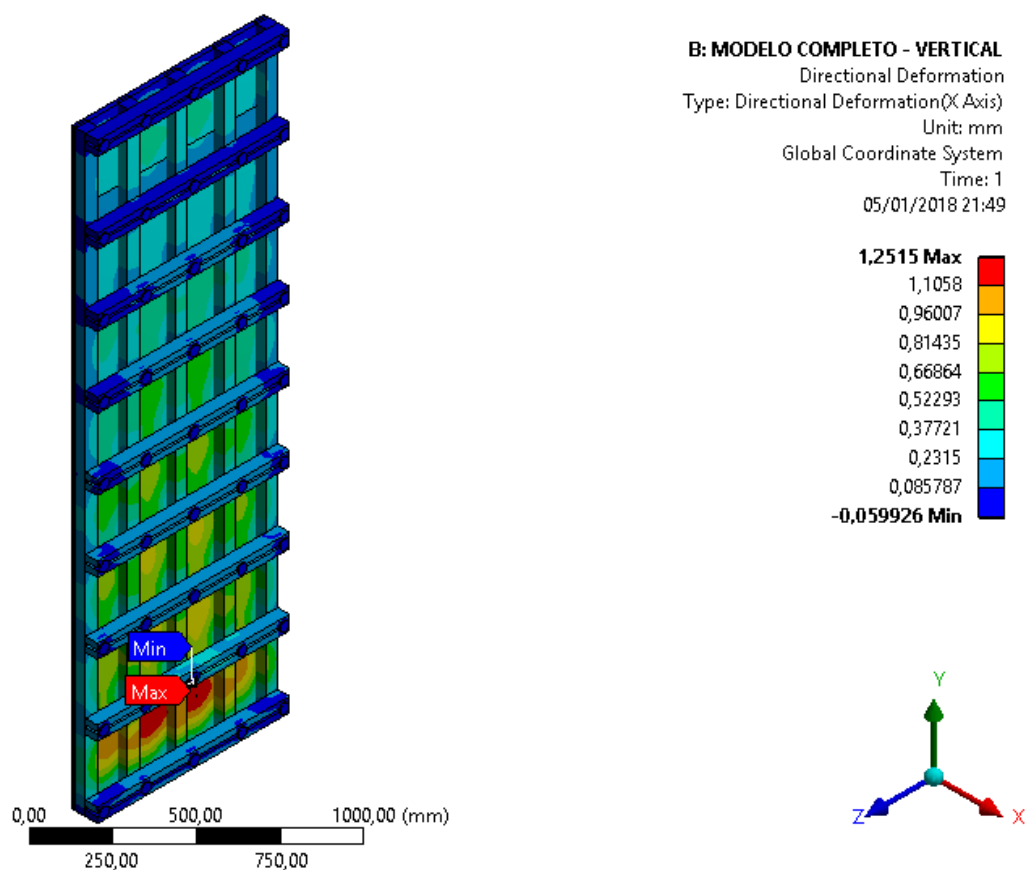


Fonte: Autor

Destaca-se que em função da largura do painel ser de 81,2 cm, os espaçamentos entre tensores são iguais e da ordem de 20,3 cm, dimensão menor que o vão máximo dimensionado. Outro ponto a se destacar é com relação ao espaçamento entre sarrafo de travamento. Pelo fato da altura total livre do painel ser de 250 cm e o espaçamento dimensionado ser de 30 cm, na parte superior da fôrma foi considerado um vão ligeiramente maior. Tal fato é possível, pois na parte superior do painel, a força atuante é muito menor que a força utilizada no dimensionamento. Isto foi feito para que se evitasse a colocação de dois elementos de travamento extremamente próximos, o que não se justificaria.

O comportamento de deslocamento do sistema pode ser observado na Figura 45.

Figura 45 – Deslocamento fôrma vertical – Simulação MEF



Fonte: Autor

A Tabela 25 apresenta a relação geral de materiais necessários para a confecção de todo o sistema de fôrma dimensionado nesta Subseção para o pilar de 20 cm × 81,2 cm × 250 cm, além da composição de custos de material para confecção desta fôrma.

Tabela 25 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma vertical

| Item | Descrição | Unid. | Qtde | V. Unit.* | Valor Total |
|---|--|----------------|---------|--------------|-------------|
| 1 | Chapa compensada plastificada 1,10 m × 2,20 m × 18 mm | m ² | 5,06 | R\$ 26,28 | R\$ 132,98 |
| 2 | Sarrafo/ caibro 5 cm × 5 cm × 2,5 m | m ³ | 0,0625 | R\$ 1.170,00 | R\$ 73,13 |
| 3 | Sarrafo 2,5 cm × 5 cm × 81,2 cm | m ³ | 0,03654 | R\$ 1.170,00 | R\$ 42,75 |
| 4 | Tensor/ barra de ancoragem | Aluguel/ pç | 45 | R\$ 1,50** | R\$ 67,50 |
| Valor total por fôrma de pilar | | | | | R\$ 316,36 |
| Valor total por m ² de fôrma | | | | | R\$ 62,52 |

*Valores unitários extraídos do catálogo de preços de insumos SINAPI/Caixa Econômica Federal.

** Valor considerando duas utilizações por mês de cada peça.

Fonte: Autor

4.4.2 Dimensionamentos a partir de métodos simplificados básicos

Em mais uma maneira de comparação, para verificação das equações desenvolvidas na pesquisa, nesta Subseção é realizado o dimensionamento do sistema de fôrma com as mesmas características dos modelos dimensionados até aqui, porém, utilizando para isto, cálculos simplificados básicos, sem a influência de fatores de correção.

4.4.2.1 Dimensionamento de fôrma com enrijecimento vertical

Para este tipo de configuração de fôrmas, a força a ser considerada para o dimensionamento da placa compensada do sistema é equivalente a 105 kN/m, resultado da multiplicação entre a força máxima P_b (75 kN/m²), uma faixa do painel b (100 cm) e o coeficiente de majoração γ_Q (1,4). Os demais dados utilizados para o dimensionamento da placa são os seguintes:

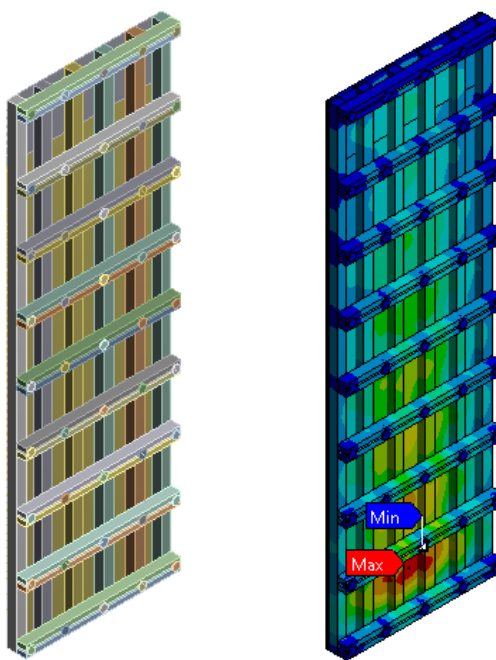
- Momento de inércia = 48,6 cm⁴;
- $k_{\text{mod_chapa}} = 0,9 \times 1,0 \times 0,8 = 0,72$;
- $E_{c90,m} = 355,28 \text{ kN/cm}^2$;
- $E_{c90_chapa} = 355,28 \times 0,72 = 255,8 \text{ kN/cm}^2$;
- $y = 0,9 \text{ cm}$;
- $f_{c0k} = 3,403 \text{ kN/cm}^2$;
- $f_{c0d} = f_{c90d_chapa} = 1,059 \text{ kN/cm}^2$.

Após as verificações dos estados limites, de serviço e último, o vão máximo para a chapa deve ser 18,80 cm. Porém, como a dimensão da chapa é 81,2 cm, para que se tenha vãos iguais entre apoios, o vão final adotado corresponde à 16,24 cm.

Para o dimensionamento dos sarrafos de enrijecimento e dos sarrafos de travamento final os dados utilizados são idênticos aos adotados nos dimensionamentos anteriores. Desta maneira, no dimensionamento dos elementos de enrijecimento a força considerada é 17,05 kN/m, que considera a força máxima P_b , o coeficiente de majoração γ_Q e o espaçamento de 16,24 cm entre os sarrafos. Fazendo-se a verificação do ELS e do ELU, chega-se a um vão máximo de 31,72 cm entre apoios, sendo adotado um espaçamento final de 30 cm.

Já para o dimensionamento dos elementos de travamento, a força utilizada é equivalente a 31,5 kN/m, considerando-se o espaçamento de 30 cm entre os sarrafos de enrijecimento. Com as verificações dos estados limites, define-se que o máximo vão entre apoios para os sarrafos de travamento equivale a 23,3 cm. O vão final adotado para este elemento é igual a 20,3 cm, uma vez que a dimensão total do sarrafo de travamento é 81,2 cm. O esquema final do modelo de fôrma dimensionado bem como o seu comportamento para deslocamentos são apresentados na Figura 46 (a) e na Figura 46 (b), respectivamente.

Figura 46 – Modelo dimensionado e deslocamento ocorrido
(a) (b)



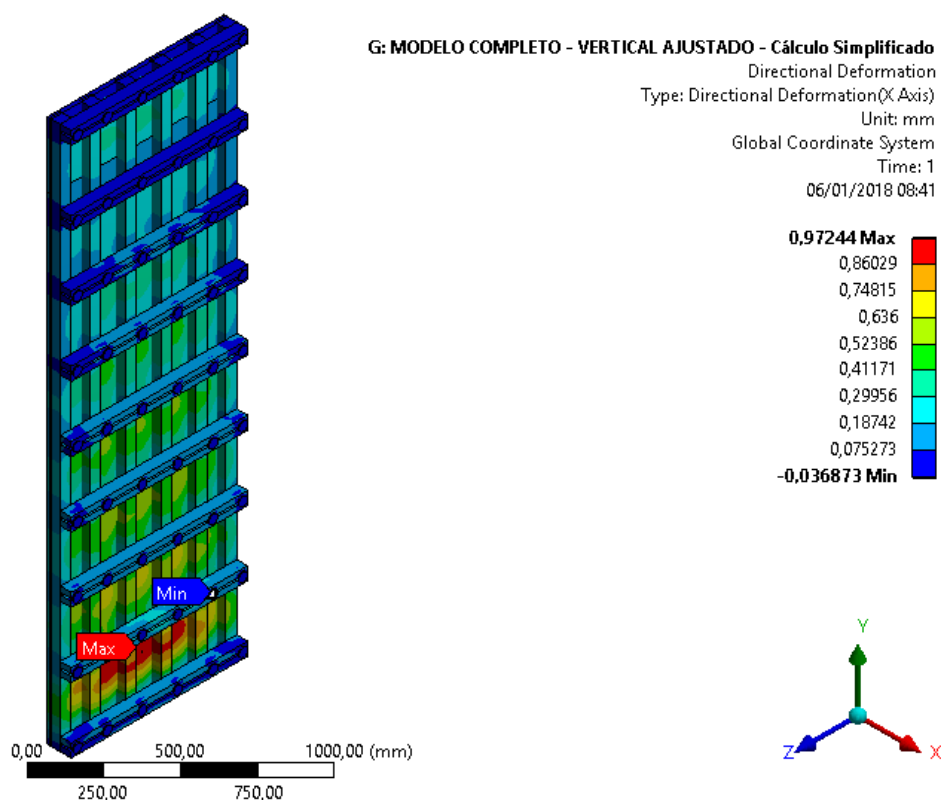
Fonte: Autor

Neste caso, o máximo deslocamento (1,62 mm) excedeu os valores limites para os vãos existentes no modelo dimensionado. Esta situação pode ser explicada pelo seguinte fato, ao ser realizado o dimensionamento de cada elemento do sistema de fôrma, os valores limites foram as referências utilizadas. Um fator que pode explicar a diferença de resultados, é que o dimensionamento de cada parte do sistema é feito separadamente, considerando que os apoios dos elementos são indeslocáveis em cada um dos casos. Já na simulação do sistema no ANSYS®, os únicos elementos considerados indeslocáveis são os tensores, ou seja, ao se verificar o deslocamento da chapa compensada, esta pode sofrer influência do deslocamento que ocorre nos sarrafos de enrijecimento, que por sua vez sofre influência do deslocamento dos sarrafos de travamento.

A ocorrência da situação relatada pode ser minimizada, colocando-se um maior número de tensores para travamento do sistema, ou seja, com menor vão entre eles do que foi dimensionado. A colocação dos tensores em cada interseção dos sarrados de enrijecimento com os sarrafos de travamento seria a situação que mais se aproxima do procedimento realizado para o dimensionamento do sistema.

A Figura 47 demonstra bem o comportamento da fôrma com os ajustes, onde o máximo deslocamento é equivalente a 0,97 mm, valor inferior aos deslocamentos limites para qualquer um dos componentes do sistema dimensionado.

Figura 47 – Deslocamento fôrma vertical ajustada



Fonte: Autor

A Tabela 26 apresenta a relação geral de materiais necessários para a confecção de todo o sistema de fôrma dimensionado e ajustado nesta Subseção utilizando métodos simplificados de cálculo.

Tabela 26 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma vertical simplificada

| Item | Descrição | Unid. | Qtde | V. Unit.* | Valor Total |
|---|--|----------------|---------|--------------|-------------|
| 1 | Chapa compensada plastificada 1,10 m × 2,20 m × 18 mm | m ² | 5,06 | R\$ 26,28 | R\$ 132,98 |
| 2 | Sarrafo/ caibro 5 cm × 5 cm × 2,5 m | m ³ | 0,075 | R\$ 1.170,00 | R\$ 87,75 |
| 3 | Sarrafo 2,5 cm × 5 cm × 81,2 cm | m ³ | 0,03654 | R\$ 1.170,00 | R\$ 42,75 |
| 4 | Tensor/ barra de ancoragem | Aluguel/ pç | 54 | R\$ 1,50** | R\$ 81,00 |
| Valor total por fôrma de pilar | | | | | R\$ 344,48 |
| Valor total por m ² de fôrma | | | | | R\$ 68,08 |

*Valores unitários extraídos do catálogo de preços de insumos SINAPI/Caixa Econômica Federal.

** Valor considerando duas utilizações por mês de cada peça

Fonte: Autor

4.4.2.2 Dimensionamento de fôrma com enrijecimento horizontal

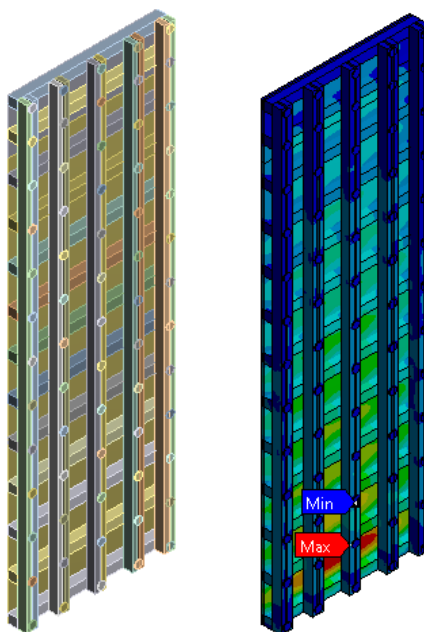
No dimensionamento do modelo com sarrafos de enrijecimento horizontais utilizando os cálculos simplificados, a força a ser considerada é equivalente a 85,26 kN/m, resultado da multiplicação entre a força máxima P_b (75 kN/m²), a largura do pilar (81,2 cm) e o coeficiente de majoração γ_Q (1,4). Outros dados utilizados para os dimensionamentos são os mesmos que foram apresentados na Subseção **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Após as verificações dos estados limites, o vão para a chapa não deve ser maior que 21,80 cm. Porém, para que se tenha vãos iguais entre apoios, o vão final adotado corresponde à 20,8 cm.

Para o dimensionamento dos elementos de enrijecimento, a força considerada é 21,84 kN/m e fazendo-se a verificação do ELS e do ELU, chega-se a um vão máximo de 27 cm entre apoios. No entanto, como o comprimento total do sarrafo de enrijecimento é igual a 81,2 cm, são adotados 4 vãos entre apoios equivalentes à 20,3 cm.

Já para o dimensionamento dos elementos de travamento, a força utilizada é equivalente a 21,32 kN/m. Com as verificações dos estados limites, define-se que o vão entre apoios para os sarrafos de travamento não pode ser maior que 27,7 cm. Com este vão, as barras de ancoragem não ficariam posicionadas nos pontos de encontro entre sarrafos. Como esta situação não foi considerada ideal para modelos anteriormente dimensionados, então, é adotado vão entre barras de ancoragem equivalentes à 20,8 cm. O esquema final do modelo de fôrma dimensionado e o seu comportamento de deslocamento são apresentados na Figura 48 (a) e na Figura 48 (b), respectivamente.

Figura 48 – Modelo dimensionado e deslocamento ocorrido
(a) (b)



Fonte: Autor

A Tabela 27 apresenta a relação geral de materiais necessários para a confecção de todo o sistema de fôrma dimensionado utilizando métodos simplificados de cálculo.

Tabela 27 – Relação de materiais e composição de custos em outubro de 2017 – Fôrma horizontal simplificada

| Item | Descrição | Unid. | Qtde | V. Unit.* | Valor Total |
|---|--|----------------|---------|--------------|-------------|
| 1 | Chapa compensada plastificada 1,10 m × 2,20 m × 18 mm | m ² | 5,06 | R\$ 26,28 | R\$ 132,98 |
| 2 | Sarrafo/ caibro 5 cm × 5 cm × 81,2 cm | m ³ | 0,05278 | R\$ 1.170,00 | R\$ 61,75 |
| 3 | Sarrafo 2,5 cm × 5 cm × 2,5 m | m ³ | 0,0625 | R\$ 1.170,00 | R\$ 73,13 |
| 4 | Tensor/ barra de ancoragem | Aluguel /pç | 65 | R\$ 1,50** | R\$ 97,50 |
| Valor total por fôrma de pilar | | | | | R\$ 365,36 |
| Valor total por m ² de fôrma | | | | | R\$ 72,21 |

*Valores unitários extraídos do catálogo de preços de insumos SINAPI/Caixa Econômica Federal.

** Valor considerando duas utilizações por mês de cada peça

Fonte: Autor

4.4.3 Comparação entre modelos dimensionados

De maneira geral, do ponto de vista estrutural, os modelos dimensionados apresentaram um comportamento esperado nas simulações numéricas realizadas no sistema ANSYS®.

Para o sistema de fôrmas que foi dimensionado utilizando as equações de fatores de correção desenvolvidas para o modelo com sarrafos de enrijecimento vertical, a máxima tensão atuante sobre o sistema foi inferior a $0,7 \text{ kN/cm}^2$, valor abaixo das resistências de cálculo paralela e perpendicular às fibras, seja da chapa compensada, ou das peças de madeira serrada. No que diz respeito aos deslocamentos ocorridos no sistema, o valor máximo foi equivalente a $1,34 \text{ mm}$, deslocamento este inferior aos limites de deslocamentos para todos os vãos existentes no modelo dimensionado.

Os sistemas de fôrmas dimensionados a partir de métodos simplificados básicos, sem utilização de fatores de correção, de maneira geral apresentaram menores vãos entre apoios para os elementos, sobretudo no que diz respeito ao dimensionamento da chapa compensada de madeira, sendo necessário maior número de sarrafos de enrijecimento (apoios), tanto para o modelo vertical quanto para o modelo horizontal. Foram necessários ajustes de posicionamento e quantidade de tensores (barras de ancoragem) após o primeiro dimensionamento de cada modelo, pois apresentaram resultados inesperados quando foram simulados no sistema computacional ANSYS[®]. Dessa maneira, os modelos finais dimensionados, também apresentaram resultados, de tensões e deslocamentos, dentro dos limites de cálculo.

Do ponto de vista do material utilizado para a confecção dos sistemas de fôrmas dimensionados, os modelos de fôrmas verticais, ou seja, com sarrafos de enrijecimento na posição vertical, apresentaram menor consumo de material para os itens madeiras serradas (sarrafos e caibros) e tensores, gerando um custo na faixa de 6 % a 13 % menor que o modelo de fôrmas horizontais, para os modelos dimensionados com e sem as equações de fatores de correção. Portanto, ao se realizar uma avaliação geral dos modelos de fôrmas dimensionados, o modelo de fôrma vertical, aquele que possui sarrafos de enrijecimento vertical e sarrafos de travamento horizontal, mostrou-se mais viável tanto no que diz respeito à parte estrutural, quanto em relação ao quesito financeiro, o que pode ser melhor observado, ao se considerar a execução de uma estrutura convencional de concreto armado de edifícios, onde quase todos os pilares possuem dimensões e demais características semelhantes entre si.

Comparando-se os métodos de cálculo, a utilização das equações de fatores de correção que foram desenvolvidas, gerou melhores resultados que o dimensionamento simplificado

básico, uma vez que, o primeiro consegue fazer com que os cálculos simplificados se aproximem mais de uma situação real, enquanto que o segundo considera basicamente a situação mais crítica que ocorre sobre parte do sistema de fôrma, expandindo tal situação para todo o sistema.

Desta maneira, a melhor condição dentre os modelos completos dimensionados é o sistema de fôrmas com elementos de enrijecimento vertical dimensionado a partir da utilização de fatores de correção determinados a partir das equações desenvolvidas nesta pesquisa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os sistemas de fôrmas, utilizados principalmente para execução de estruturas de concreto armado, são considerados estruturas provisórias que devem suportar as solicitações a que estiver exposta e proporcionar as características e dimensões estipuladas por projetos. Como qualquer tipo de sistemas com função estrutural, os sistemas de fôrmas devem seguir determinações e instruções para o correto dimensionamento e consequentemente uma correta execução.

Para o caso de fôrmas verticais, como laterais de vigas e pilares, o dimensionamento apresenta algumas particularidades, dentre elas o tipo de carregamento, que tornam os procedimentos de cálculo mais complexos. Desta maneira, esta pesquisa apresentou duas alternativas para auxiliar no dimensionamento de sistemas de fôrmas para pilares de concreto armado em diferentes tipos de configuração. Basicamente, as duas configurações de fôrmas para pilares utilizadas na prática se diferem pelo posicionamento dos sarrafos de enrijecimento do painel e os sarrafos de travamento do sistema.

No que diz respeito aos sistemas de fôrmas com os sarrafos de enrijecimento horizontais foram feitas as seguintes proposições e tiradas as seguintes conclusões:

- Comparação entre métodos de cálculo para dimensionamento de sistemas de fôrmas, sendo estipulados coeficientes de comparação entre o método dos elementos finitos, que leva em consideração a continuidade de todo o painel da fôrma, e o método simplificado de cálculo que utiliza-se apenas do tramo de

maiores forças aplicadas sobre o sistema (tramo inferior no caso de fôrmas para pilares);

- Dimensionamento de modelo de fôrma com enrijecimento horizontal em que o espaçamento entre os sarrafos seja variável ao longo da altura, ou seja, de maneira direta, quanto mais alta a posição na fôrma, menor a força atuante e, consequentemente maior pode ser o vão entre sarrafos;
- Apesar de não muito usual, esta configuração com espaçamentos variáveis entre sarrafos, permite a diminuição de elementos de enrijecimento, sendo respeitados os valores limites para deslocamentos e tensões, gerando certa diminuição de custo com relação a materiais.

Quanto aos sistemas de fôrmas com os sarrafos de enrijecimento verticais foram feitas as seguintes proposições e tiradas as seguintes conclusões:

- Desenvolvimento de duas equações de fatores de correção dos métodos de cálculo simplificado, assim como as equações desenvolvidas para a configuração de fôrma anteriormente relatada;
- As equações corrigem, em função do espaçamento entre sarrafos verticais e a altura do pilar, os valores das forças atuantes sobre o sistema de fôrmas, na verificação dos estados limites, de serviço e último, para a realização do dimensionamento;
- Estas equações também apresentaram uma boa resposta para realização de dimensionamento através de cálculos simplificados, já que, ao ser realizada a simulação numérica pelo MEF do modelo dimensionado, os resultados obtidos para deslocamentos e tensões atuantes, variaram em torno de 2 % dos resultados obtidos utilizando as equações.

Por fim, foram dimensionados modelos dos dois tipos de configuração (vertical e horizontal) por dois diferentes métodos de cálculo, o método simplificado básico e o método simplificado com utilização de fatores de correção. Todos os modelos completos dimensionados foram simulados computacionalmente. A partir disto, foram feitas as seguintes conclusões:

- Todos os modelos dimensionados, por seguirem os valores limites de deslocamentos e tensões (ELS e ELU, respectivamente), apresentaram respostas coerentes na simulação numérica realizada;
- Alguns ajustes de espaçamentos e quantidade de apoios foram feitos, principalmente com relação aos tensores (barras de ancoragem), que realizam o travamento geral do sistema de fôrmas. Tais ajustes foram necessários, após a realização de uma primeira simulação numérica de alguns modelos dimensionados;
- Pequenas variações, entre os resultados do dimensionamento e da simulação numérica, ocorrem pelo fato de que os cálculos simplificados dimensionam separadamente, elemento por elemento do sistema de fôrmas, ou seja, certo deslocamento que ocorra na chapa compensada, não é considerado no dimensionamento do elemento de enrijecimento e por consequência não é transferido para o dimensionamento dos elementos de travamento;
- Por tudo isso, e após novas simulações dos modelos com ajustes, observou-se que o posicionamento ideal para os tensores ou barras de ancoragem, é no ponto de encontro, ou cruzamento, entre os sarrafos de enrijecimento e os sarrafos de travamento;
- Do ponto de vista de custo de material para execução dos modelos completos dimensionados, independentemente do método de cálculo utilizado, os modelos com sarrafos de enrijecimento verticais se apresentaram mais econômicos que os modelos com sarrafos de enrijecimento horizontais;
- Ainda com relação ao custo, comparando-se os métodos de cálculo utilizados, os modelos dimensionados com a utilização das equações de fatores de correção, apresentaram menor consumo de material quando comparados às mesmas configurações dos modelos dimensionados através de cálculos simplificados básicos.

Portanto, após a realização de diversos dimensionamentos e várias simulações numéricas das mais variadas configurações para sistemas de fôrmas de pilares de concreto armado, tanto a configuração de fôrma com sarrafos de enrijecimento horizontais como com sarrafos de enrijecimento verticais, ambas são completamente viáveis e exequíveis, do ponto de vista estrutural, sendo que, do ponto de vista de custos, os modelos com sarrafos de enrijecimento na posição vertical é a escolha mais viável.

Por fim, as equações propostas nesta pesquisa, que visam corrigir métodos de cálculo simplificados de dimensionamento de fôrmas de pilares, mostraram-se bastante úteis para o dimensionamento de modelos verticais, visto que os resultados obtidos em dimensionamentos utilizando tais equações foram muito semelhantes aos resultados obtidos por simulações numéricas dos modelos dimensionados.

As equações poderão auxiliar na realização mais prática e precisa de dimensionamentos de sistemas de fôrmas para pilares de concreto armado, gerando estruturas suficientemente resistentes e com menores custos em relação à outros métodos de dimensionamento.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Desenvolvimento de equações de fatores de correção para dimensionamento dos demais componentes do sistema de fôrmas para pilar, como por exemplo, os sarrafos de enrijecimento e de travamento;
- Simulação experimental de sistemas de fôrmas para pilares comparados à simulação numérica dos mesmos sistemas de fôrmas;
- Avaliação e desenvolvimento de outras possíveis configurações de fôrmas para pilares, com relação aos elementos que compõem o sistema, bem como as características e dimensões destes elementos;
- Levantamento de campo da execução de sistemas de fôrmas, verificando-se a existência de projetos específicos para fôrmas, bem como a maneira como são executados os sistemas de fôrma em geral;
- Desenvolvimento de programa computacional para automatização do cálculo do sistema de fôrmas e escoramentos.

REFERÊNCIAS

AMCORE. Disponível em: <http://www.amcore.com.br/produtos_ver.php?id=6>. Acesso em: 05 jan. 2017.

ANSYS Workbench 16.0. Ansys, Inc. Products Release, 2014.

ASSAHI, P. N. Sistema de fôrma para estrutura de concreto. Boletim Técnico, São Paulo, 2004.

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. **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 8953**: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14807**: peças de madeira serrada – dimensões. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15696**: fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. Disponível em: <<http://www.fe.up.pt/~alvaro>>. Acesso em 20 JAN. 2017.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Preços de insumos**. Belo Horizonte, agosto 2017. Planilha de composição de preços de insumos sem desoneração, SINAPI.

FAJERSZTAJN, H. **Fôrmas para concreto armado**: aplicação para o caso do edifício. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

GLOBALWOOD. Disponível em: <<http://globalwood.com.br/forma-de-madeira/>>. Acesso em: 05 JAN. 2017.

JHA, K. N. **Formwork for Concrete Structures**. New Delhi: Tata McGraw Hill Education, 2012.

JUNIOR, T. F. C., FILHO, A. F. da S. **Emprego de fôrmas de madeira em estrutura de concreto**. Artigo (Graduação) – Escola de Engenharia, Universidade Católica de Salvador, Salvador, 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.

MOLITERNO, A. Escoramento, cimbramentos, fôrmas para concreto e travessias em estruturas de madeira. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 379p.

MORIKAWA, M. S. **Materiais alternativos utilizados em fôrmas para concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NAZAR, N. **Fôrmas e escoramentos para edifícios**: critérios para dimensionamento e escolha do sistema. São Paulo: PINI, 2007.

NEMATI, K. M. **Formwork for Concrete**: Horizontal Formwork Design and Formwork Design Tables. Department of Construction Management, University of Washington, Washington, USA, 2007.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 18**: condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção. 2009.

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.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6.ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 2003.

VALENTE, R.B.; GESUALDO, F.A.R. Efeitos específicos no projeto de sistemas de fôrmas e escoramentos à luz da ABNT NBR 15696:2009. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, EBRAMEM**, 14, 2014, Natal, RN, Brasil.

APÊNDICE A

São apresentados aqui os resultados de deslocamentos e tensões atuantes para todos os modelos horizontais listados na Tabela 9 (pág. 56), bem como os valores de fatores de correção entre o método simplificado de cálculo e o método dos elementos finitos para os dois parâmetros.

Tabela 28 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 2)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,071 | 0,975 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,103 | 0,928 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,156 | 0,885 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,261 | 0,874 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,463 | 0,843 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,911 | 0,811 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,076 | 0,772 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 5,970 | 0,727 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 25,122 | 0,650 |

Fonte: Autor

Tabela 29 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 2)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,752 | 0,929 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,903 | 0,908 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,140 | 0,910 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,522 | 0,937 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 1,985 | 0,906 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,930 | 0,941 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,317 | 0,905 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,350 | 0,897 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 14,160 | 0,825 |

Fonte: Autor

Tabela 30 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 3)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,068 | 0,937 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,101 | 0,909 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,158 | 0,896 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,262 | 0,876 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,468 | 0,852 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,927 | 0,826 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,119 | 0,789 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,193 | 0,755 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 25,865 | 0,669 |

Fonte: Autor

Tabela 31 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 3)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,735 | 0,908 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,877 | 0,881 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,142 | 0,912 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,471 | 0,905 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,036 | 0,929 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,938 | 0,943 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,394 | 0,921 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,312 | 0,892 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 14,311 | 0,834 |

Fonte: Autor

Tabela 32 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 4)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,071 | 0,968 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,102 | 0,917 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,160 | 0,905 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,262 | 0,876 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,463 | 0,843 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,932 | 0,830 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,193 | 0,816 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,469 | 0,788 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 26,834 | 0,694 |

Fonte: Autor

Tabela 33 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 4)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,731 | 0,903 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,891 | 0,895 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,172 | 0,936 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,486 | 0,914 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,075 | 0,947 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,972 | 0,954 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,494 | 0,942 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,532 | 0,919 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 14,687 | 0,856 |

Fonte: Autor

Tabela 34 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 5)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,068 | 0,934 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,102 | 0,924 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,156 | 0,886 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,256 | 0,857 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,465 | 0,848 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,935 | 0,833 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,200 | 0,819 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,631 | 0,808 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 27,801 | 0,719 |

Fonte: Autor

Tabela 35 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 5)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,726 | 0,897 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,889 | 0,893 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,163 | 0,929 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,499 | 0,922 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,030 | 0,926 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,963 | 0,951 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,511 | 0,946 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,979 | 0,974 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 15,998 | 0,933 |

Fonte: Autor

Tabela 36 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 6)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,069 | 0,948 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,103 | 0,933 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,157 | 0,889 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,258 | 0,862 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,457 | 0,832 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,928 | 0,827 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,207 | 0,822 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,756 | 0,823 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 28,635 | 0,741 |

Fonte: Autor

Tabela 37 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 6)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,720 | 0,890 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,903 | 0,907 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,144 | 0,913 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,484 | 0,913 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,009 | 0,917 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,958 | 0,950 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,528 | 0,949 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,936 | 0,968 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 15,713 | 0,916 |

Fonte: Autor

Tabela 38 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 7)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,070 | 0,966 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,103 | 0,929 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,160 | 0,905 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,264 | 0,883 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,460 | 0,839 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,928 | 0,826 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,195 | 0,817 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,857 | 0,836 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 29,597 | 0,766 |

Fonte: Autor

Tabela 39 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 7)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,734 | 0,907 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,905 | 0,910 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,155 | 0,922 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,515 | 0,932 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 2,063 | 0,942 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,976 | 0,956 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,524 | 0,948 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 7,959 | 0,971 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 16,330 | 0,952 |

Fonte: Autor

Tabela 40 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar 8)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,073 | 0,068 | 0,938 |
| 9 | 24,4 | 0,111 | 0,102 | 0,917 |
| 8 | 27,5 | 0,176 | 0,159 | 0,899 |
| 7 | 31,4 | 0,299 | 0,260 | 0,871 |
| 6 | 36,7 | 0,549 | 0,461 | 0,840 |
| 5 | 44,0 | 1,123 | 0,929 | 0,827 |
| 4 | 55,0 | 2,687 | 2,195 | 0,817 |
| 3 | 73,3 | 8,207 | 6,840 | 0,833 |
| 2 | 110,0 | 38,653 | 30,145 | 0,780 |

Fonte: Autor

Tabela 41 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar 8)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Coefficiente comparação |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------|
| 10 | 22,0 | 0,809 | 0,726 | 0,896 |
| 9 | 24,4 | 0,995 | 0,910 | 0,915 |
| 8 | 27,5 | 1,253 | 1,147 | 0,916 |
| 7 | 31,4 | 1,625 | 1,484 | 0,913 |
| 6 | 36,7 | 2,191 | 1,986 | 0,906 |
| 5 | 44,0 | 3,115 | 2,967 | 0,952 |
| 4 | 55,0 | 4,770 | 4,484 | 0,940 |
| 3 | 73,3 | 8,196 | 8,149 | 0,994 |
| 2 | 110,0 | 17,156 | 16,352 | 0,953 |

Fonte: Autor

APÊNDICE B

São apresentados aqui os resultados de deslocamentos e tensões atuantes para todos os modelos horizontais listados na Tabela 10 (pág. 57), bem como os valores de fatores de correção entre o método simplificado de cálculo e o método dos elementos finitos para os dois parâmetros.

Tabela 42 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar B)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,094 | 0,051 | 0,543 |
| 9 | 22,2 | 0,143 | 0,074 | 0,519 |
| 8 | 25,0 | 0,228 | 0,115 | 0,504 |
| 7 | 28,6 | 0,389 | 0,186 | 0,477 |
| 6 | 33,3 | 0,722 | 0,331 | 0,459 |
| 5 | 40,0 | 1,496 | 0,660 | 0,441 |
| 4 | 50,0 | 3,653 | 1,555 | 0,426 |
| 3 | 66,7 | 11,544 | 5,012 | 0,434 |
| 2 | 100,0 | 58,444 | 19,355 | 0,331 |

Fonte: Autor

Tabela 43 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar B)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm²) | Fator de correção FC_σ |
|------------|---------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,718 | 0,617 | 0,860 |
| 9 | 22,2 | 0,886 | 0,748 | 0,844 |
| 8 | 25,0 | 1,121 | 0,956 | 0,853 |
| 7 | 28,6 | 1,464 | 1,275 | 0,871 |
| 6 | 33,3 | 1,993 | 1,683 | 0,844 |
| 5 | 40,0 | 2,870 | 2,705 | 0,942 |
| 4 | 50,0 | 4,485 | 4,201 | 0,937 |
| 3 | 66,7 | 7,973 | 7,395 | 0,927 |
| 2 | 100,0 | 17,940 | 21,020 | 1,172 |

Fonte: Autor

Tabela 44 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar C)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,097 | 0,052 | 0,543 |
| 9 | 22,2 | 0,147 | 0,076 | 0,519 |
| 8 | 25,0 | 0,236 | 0,119 | 0,504 |
| 7 | 28,6 | 0,402 | 0,192 | 0,477 |
| 6 | 33,3 | 0,745 | 0,342 | 0,459 |
| 5 | 40,0 | 1,544 | 0,682 | 0,441 |
| 4 | 50,0 | 3,771 | 1,606 | 0,426 |
| 3 | 66,7 | 11,917 | 5,180 | 0,435 |
| 2 | 100,0 | 60,329 | 20,009 | 0,332 |

Fonte: Autor

Tabela 45 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar C)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,741 | 0,637 | 0,860 |
| 9 | 22,2 | 0,914 | 0,772 | 0,844 |
| 8 | 25,0 | 1,157 | 0,987 | 0,853 |
| 7 | 28,6 | 1,512 | 1,317 | 0,871 |
| 6 | 33,3 | 2,058 | 1,739 | 0,845 |
| 5 | 40,0 | 2,963 | 2,794 | 0,943 |
| 4 | 50,0 | 4,630 | 4,339 | 0,937 |
| 3 | 66,7 | 8,230 | 7,638 | 0,928 |
| 2 | 100,0 | 18,519 | 21,724 | 1,173 |

Fonte: Autor

Tabela 46 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar D)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_{μ} |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,054 | 0,543 |
| 9 | 22,2 | 0,152 | 0,079 | 0,520 |
| 8 | 25,0 | 0,243 | 0,123 | 0,505 |
| 7 | 28,6 | 0,415 | 0,198 | 0,478 |
| 6 | 33,3 | 0,768 | 0,353 | 0,460 |
| 5 | 40,0 | 1,593 | 0,703 | 0,442 |
| 4 | 50,0 | 3,888 | 1,658 | 0,426 |
| 3 | 66,7 | 12,289 | 5,348 | 0,435 |
| 2 | 100,0 | 62,215 | 20,663 | 0,332 |

Fonte: Autor

Tabela 47 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar D)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,764 | 0,657 | 0,860 |
| 9 | 22,2 | 0,943 | 0,796 | 0,845 |
| 8 | 25,0 | 1,194 | 1,018 | 0,853 |
| 7 | 28,6 | 1,559 | 1,358 | 0,871 |
| 6 | 33,3 | 2,122 | 1,794 | 0,845 |
| 5 | 40,0 | 3,056 | 2,882 | 0,943 |
| 4 | 50,0 | 4,774 | 4,477 | 0,938 |
| 3 | 66,7 | 8,488 | 7,881 | 0,928 |
| 2 | 100,0 | 19,097 | 22,427 | 1,174 |

Fonte: Autor

Tabela 48 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar E)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,549 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,526 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,511 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,484 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,361 | 0,467 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,719 | 0,449 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,698 | 0,434 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,488 | 0,444 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,230 | 0,339 |

Fonte: Autor

Tabela 49 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar E)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm²) | Fator de correção FC_σ |
|------------|---------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,669 | 0,871 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,812 | 0,855 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,039 | 0,865 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,387 | 0,884 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 1,833 | 0,859 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 2,941 | 0,957 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,579 | 0,953 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,065 | 0,944 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,025 | 1,198 |

Fonte: Autor

Tabela 50 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar F)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,549 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,526 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,512 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,485 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,362 | 0,468 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,724 | 0,452 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,713 | 0,438 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,562 | 0,450 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,579 | 0,345 |

Fonte: Autor

Tabela 51 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar F)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 1 | 20,0 | 0,769 | 0,669 | 0,871 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,812 | 0,856 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,041 | 0,867 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,392 | 0,887 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 1,842 | 0,863 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 2,951 | 0,960 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,608 | 0,959 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,129 | 0,952 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,365 | 1,216 |

Fonte: Autor

Tabela 52 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar G)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_{μ} |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,548 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,525 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,511 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,485 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,362 | 0,468 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,724 | 0,452 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,717 | 0,439 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,595 | 0,453 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,771 | 0,348 |

Fonte: Autor

Tabela 53 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar G)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,669 | 0,870 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,812 | 0,855 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,040 | 0,866 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,390 | 0,886 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 1,841 | 0,862 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 2,946 | 0,958 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,609 | 0,960 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,135 | 0,953 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,532 | 1,225 |

Fonte: Autor

Tabela 54 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar H)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,548 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,525 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,510 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,484 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,361 | 0,467 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,723 | 0,451 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,716 | 0,439 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,607 | 0,453 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,862 | 0,349 |

Fonte: Autor

Tabela 55 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar H)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_σ |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,668 | 0,870 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,811 | 0,855 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,039 | 0,865 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,389 | 0,885 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 1,872 | 0,877 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 2,940 | 0,956 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,602 | 0,958 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,287 | 0,970 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,595 | 1,228 |

Fonte: Autor

Tabela 56 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar I)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,549 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,525 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,510 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,484 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,361 | 0,467 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,722 | 0,451 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,714 | 0,438 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,607 | 0,454 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,886 | 0,350 |

Fonte: Autor

Tabela 57 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar I)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,668 | 0,870 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,811 | 0,855 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,038 | 0,865 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,388 | 0,885 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 1,944 | 0,911 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 3,046 | 0,991 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,594 | 0,956 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,587 | 1,006 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,595 | 1,228 |

Fonte: Autor

Tabela 58 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar J)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,550 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,526 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,510 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,484 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,361 | 0,467 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,722 | 0,450 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,712 | 0,438 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,603 | 0,453 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,872 | 0,349 |

Fonte: Autor

Tabela 59 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar J)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_{σ} |
|------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,668 | 0,870 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,838 | 0,883 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,038 | 0,865 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,388 | 0,885 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 2,016 | 0,944 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 3,157 | 1,027 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,589 | 0,955 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 8,887 | 1,041 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,561 | 1,226 |

Fonte: Autor

Tabela 60 – Comparação de valores de deslocamentos máximos (Pilar K)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Deslocamento (Cálculo simplificado) (cm) | Deslocamento (MEF) (cm) | Fator de correção FC_u |
|------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,100 | 0,055 | 0,550 |
| 9 | 22,2 | 0,153 | 0,080 | 0,526 |
| 8 | 25,0 | 0,244 | 0,125 | 0,510 |
| 7 | 28,6 | 0,417 | 0,202 | 0,484 |
| 6 | 33,3 | 0,773 | 0,361 | 0,467 |
| 5 | 40,0 | 1,602 | 0,721 | 0,450 |
| 4 | 50,0 | 3,912 | 1,711 | 0,437 |
| 3 | 66,7 | 12,364 | 5,597 | 0,453 |
| 2 | 100,0 | 62,592 | 21,838 | 0,349 |

Fonte: Autor

Tabela 61 – Comparação de valores de tensões máximas (Pilar K)

| Nº de vãos | Espaçamento L_{es} (cm) | Tensão atuante (Cálculo simplificado) (kN/cm ²) | Tensão atuante (MEF) (kN/cm ²) | Fator de correção FC_σ |
|------------|---------------------------|---|--|-------------------------------|
| 10 | 20,0 | 0,769 | 0,668 | 0,870 |
| 9 | 22,2 | 0,949 | 0,868 | 0,915 |
| 8 | 25,0 | 1,201 | 1,038 | 0,865 |
| 7 | 28,6 | 1,568 | 1,388 | 0,885 |
| 6 | 33,3 | 2,135 | 2,088 | 0,978 |
| 5 | 40,0 | 3,074 | 3,270 | 1,064 |
| 4 | 50,0 | 4,803 | 4,585 | 0,955 |
| 3 | 66,7 | 8,539 | 9,181 | 1,075 |
| 2 | 100,0 | 19,213 | 23,511 | 1,224 |

Fonte: Autor