

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO
COMPORTAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS**

Victor Eduardo Kraeski

Porto Alegre
2023

VICTOR EDUARDO KRAESKI

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO
COMPORTAMENTO DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

Kraeski, Victor Eduardo
Análise por elementos finitos do comportamento de
lajes alveolares protendidas / Victor Eduardo Kraeski.
-- 2023.
168 f.
Orientadores: Américo Campos Filho, Paula Manica
Lazzari.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Laje alveolar protendida. 2. Modelagem numérica.
3. Método dos elementos finitos. 4. ANSYS. I. Campos
Filho, Américo, orient. II. Manica Lazzari, Paula,
orient. III. Título.

VICTOR EDUARDO KRAESKI

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO
COMPORTAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de novembro de 2023

Prof. Américo Campos Filho
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo
Orientador

Profa. Paula Manica Lazzari
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. pela Concordia University, Canadá
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Bruna Manica Lazzari (PUCRS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do
Sul

Prof. Daniel de Lima Araújo (UFG)
Dr. pela Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo

Prof. Jorge Luis Palomino Tamayo (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do
Sul

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, Vilma Aparecida Kraeski e Elcio Benedito Kraeski, por todo o apoio, incentivo, conselhos e exemplo ao longo da minha jornada. Sou eternamente grato por todo o esforço dedicado à minha formação.

À minha irmã Ana Flávia Kraeski, presente em todas as fases do meu mestrado e ao longo de toda a minha vida, gostaria de expressar minha gratidão pelo constante incentivo e apoio ao longo da minha formação. Não consigo expressar em palavras o quanto sou grato a você, minha irmã. Ao meu querido primo Willian Pawlak, que considero como um irmão, agradeço por todo o apoio e presença constante ao longo da minha jornada.

Agradeço ao professor Américo Campos Filho pela orientação deste trabalho, pela amizade, apoio e por sua vasta experiência e contribuição ao trabalho.

À Paula e à Bruna, expesso minha gratidão pela amizade e companhia ao longo de todo o mestrado, pela disposição em ajudar e pelo suporte prestado na pesquisa, compartilhando seus conhecimentos e incentivando-me constantemente.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu querido amigo Henrique pela sua amizade e por todas as horas de áudios e conversas aleatórias sobre a vida, as quais, com certeza, foram de suma importância para a realização do mestrado.

Aos queridos amigos Paulo, Carol e Iraci, agradeço por sempre me tratarem como família e por me incentivarem em todas as minhas atividades.

À querida Tifhany, expesso minha gratidão por toda a atenção e carinho durante a fase final do meu mestrado, demonstrando sempre interesse em ouvir sobre o meu trabalho.

Ao Giancarlo e Claudinei, agradeço por toda a companhia e amizade. Ao Matheus, expesso minha gratidão por sua amizade.

Ao Andrei, agradeço pela amizade e por compartilhar seu conhecimento e acervo fotográfico sobre estruturas pré-moldadas.

Agradeço aos colegas de mestrado, Arthur, Patrick, Isabel, Daniele, Marcos, Lucas e Joici.

Agradeço a todos os demais professores e professoras que, ao longo da minha jornada, me incentivaram a persistir nos estudos e a buscar meus objetivos. Este trabalho reflete um pouco de cada um de vocês. Em particular, expesso minha gratidão ao professor Cassiano Ianke, do

ensino médio, e à Andrea Tedesco, da graduação.

Agradeço aos demais docentes do PPGEC e do Centro de Mecânica Aplicada Computacional (CEMACOM).

Agradeço a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Por fim, expresso minha gratidão à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para esta pesquisa, assim como à UFRGS e ao CEMACOM pela infraestrutura fornecida para a realização deste trabalho.

Nós vamos vencer.
Porque não existe outra opção.
Luide Matos

RESUMO

KRAESKI, V. E. **Análise por elementos finitos do comportamento de lajes alveolares protendidas**. 2023. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O uso cada vez mais frequente de lajes alveolares protendidas é notado principalmente em construções comerciais e industriais como elemento de piso. Isso é devido à sua rápida execução e à sua capacidade de se adaptar a grandes vãos, graças ao seu peso relativamente baixo e ao consumo reduzido de materiais. No entanto, devido à configuração com vazios longitudinais em sua seção transversal, bem como ao efeito da protensão e à ausência de armadura para combater o cisalhamento, compreender seu comportamento é relativamente complexo. Isso tem impulsionado a necessidade de estudos numéricos e experimentais no meio acadêmico. Neste trabalho, o foco foi contribuir para a pesquisa sobre análises numéricas de lajes alveolares protendidas, por meio do desenvolvimento de dois modelos numéricos tridimensionais em elementos finitos no software ANSYS, versão 2021 R2. Esses modelos foram validados comparando os resultados numéricos com valores experimentais disponíveis na literatura técnica. A composição dos modelos consistiu em uma malha de elementos sólidos hexaédricos para o concreto, com as cordoalhas de aço representadas por armadura incorporada para os testes de flexão, e por armadura discreta combinada a um elemento de combinação para os testes de cisalhamento. Para simular o comportamento do concreto, foram usados dois modelos: o DP-*Concrete* e um modelo personalizado na interface USERMAT. Além disso, foram empregados dois modelos distintos para o aço: um modelo viscoelástico e um modelo elastoplástico. Os resultados obtidos para as lajes analisadas mostraram uma boa correlação com os resultados experimentais. Os modelos numéricos desenvolvidos foram capazes de captar vários modos de colapso das lajes alveolares, tanto nos testes de flexão quanto nos de cisalhamento.

Palavras-chave: *Laje alveolar protendida, Modelagem numérica, Método dos elementos finitos, ANSYS.*

ABSTRACT

KRAESKI, V. E. **Análise por elementos finitos do comportamento de lajes alveolares protendidas**. 2023. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

As a floor element, the increasingly frequent use of prestressed hollow core slabs is notably observed in commercial and industrial constructions. This is due to their swift implementation and ability to adapt to large spans, owing to their relatively low weight and reduced material consumption. However, understanding their behavior is rather complex due to the configuration with longitudinal voids in their cross-section, as well as the effect of prestressing and the absence of reinforcement to combat shear. This has propelled the necessity for numerical and experimental studies within the academic sphere. In this study, the focus was to contribute to research on numerical analyses of prestressed hollow core slabs by developing two three-dimensional numerical models in finite elements within the ANSYS software, version 2021 R2. The comparison of the numerical results with experimental values available in the technical literature validated these models. The composition of the models consisted of a mesh of hexahedral solid elements for concrete, with the steel tendons represented by embedded reinforcement for bending tests and by discrete reinforcement combined with a shear connector for shear tests. Two models, the DP-Concrete and a custom model in the USERMAT interface, were used to simulate the behavior of the concrete. Also, two different models were employed for the steel: a viscoelastic model and an elastoplastic model. The values obtained for the analyzed slabs strongly correlated with the experimental results. The developed numerical models could capture various failure modes of the prestressed hollow core slabs in bending and shear tests.

Keywords: *hollow core slabs, numerical modeling, the finite element method, ANSYS.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Organograma das etapas do trabalho	27
Figura 2.1 – Fábrica da SPANCRETE	29
Figura 2.2 – Unidades alveolares e suas partes	30
Figura 2.3 – Seções transversais tipos de lajes alveolares	32
Figura 2.4 – Máquina de moldagem por deslizamento	33
Figura 2.5 – Processo de fabricação por extrusão	33
Figura 2.6 – Máquina extrusora	34
Figura 2.7 – Cabos de protensão	35
Figura 2.8 – Pista de protensão	35
Figura 2.9 – Concretagem de lajes alveolares	35
Figura 2.10 – Estoque de lajes alveolares	36
Figura 2.11 – Içamento e posicionamento das lajes	37
Figura 2.12 – Nivelção dos painéis	38
Figura 2.13 – Capeamento laje alveolares	38
Figura 2.14 – Junta longitudinal	39
Figura 2.15 – Preenchimento dos alvéolos	39
Figura 2.16 – Abertura em lajes alveolares	40
Figura 2.17 – Lajes alveolares: (a) isostáticas; (b) contínuas	40
Figura 2.18 – Modelo de funcionamento de transmissão de esforços cortante	42
Figura 2.19 – Tensão de flexão e cisalhamento: a) Sem fissuração; b) Com fissuração	44
Figura 2.20 – Fissuração em elementos protendidos	45
Figura 2.21 – Comportamento da fissuração de lajes alveolares	46

Figura 2.22 – Situação em que $1 < a_v/d < 2,5$	46
Figura 2.23 – Situação em que $a_v/d < 1$	47
Figura 2.24 – Ruptura da nervura por compressão devida ao cisalhamento	47
Figura 2.25 – Fenômenos de aderência: a) Adesão; b) Atrito; c) Mecânica	48
Figura 2.26 – Efeito Hoyer	49
Figura 2.27 – Desenvolvimento das tensões na protensão	49
Figura 2.28 – Bursting	50
Figura 2.29 – Splitting	50
Figura 2.30 – Spalling	51
Figura 2.31 – Interação entre as cordoalhas e o concreto	51
Figura 2.32 – Curva tensão-deslizamento: a) barras nervuradas a) cordoalhas de 7 fios	53
Figura 2.33 – Esquema dos ensaios analisados por Yang (1994)	55
Figura 2.34 – Esquema estático de Yang (1994)	56
Figura 2.35 – Ensaio realizado por Pajari (2004)	56
Figura 2.36 – Modelo numérico de Broo e Lundgren (2002)	57
Figura 2.37 – Resultados do modelo numérico inicial	57
Figura 2.38 – Exemplo de um ensaio realizado por Pachalla e Prakash (2017)	58
Figura 2.39 – Comparação modelo numérico com ensaio experimental de Pachalla (2017)	58
Figura 2.40 – Ensaio realizado por Michelini et al. (2020)	59
Figura 2.41 – Modelo numérico Michelini et al. (2020)	59
Figura 2.42 – Modelo numérico Brunesi, Bolognini e Nascimbene (2015)	60
Figura 2.43 – Modelo numérico Adawi, Youssef e Meshaly (2016)	60
Figura 3.1 – Elemento SOLID186	64
Figura 3.2 – Elemento REINF264	65

Figura 3.3 – Elemento LINK180	65
Figura 3.4 – Elemento COMBIN39	66
Figura 3.5 – Opções do elemento COMBIN39	66
Figura 3.6 – Inserção da curva Força-Deslizamento	67
Figura 3.7 – Fluxograma modelos constitutivos do modelo numérico	67
Figura 3.8 – Relações típicas da tensão de compressão com as deformações axial, lateral e volumétrica	68
Figura 3.9 – Curvas tensão-deformação para o concreto sob tração	69
Figura 3.10 – Superfície de Drucker-Prager. (a) Plano meridiano; (b) Plano desviador ; (c) Espaço tridimensional de tensões principais	70
Figura 3.11 – Comparação das superfícies DP- <i>Rankine</i> e DP-DP	71
Figura 3.12 – Leis de endurecimento do concreto comprimido no modelos HSD	71
Figura 3.13 – Leis de endurecimento do concreto tracionado no modelos HSD	72
Figura 3.14 – Intersecção da superfície de Ottosen. (a) Com planos meridianos; (b) Com planos desviadores	74
Figura 3.15 – Superfícies de carregamento e de ruptura no plano	75
Figura 3.16 – Diagrama tensão-deformação do concreto tracionado	76
Figura 3.17 – Modelo elastoplástico com endurecimento linear das armaduras ativas	78
Figura 3.18 – Modelo viscoelástico para armaduras ativas	79
Figura 3.19 – Interação entre as cordoalhas e o concreto	80
Figura 3.20 – Geração dos volumes	81
Figura 3.21 – Geração dos volumes dos apoios	82
Figura 3.22 – Refinamento da malha	82
Figura 3.23 – Criação dos nós e do elemento COMBIN39 no modelo de armadura discreta	83

Figura 3.24 – Modelagem comando CP e elemento COMBIN39 no modelo de armadura discreta	84
Figura 3.25 – Modelo simétrico: a) Vista Frontal; b) Vista Lateral	85
Figura 3.26 – Método de Newton-Raphson	86
Figura 3.27 – Representação da desativação de elementos	87
Figura 3.28 – Modelo de laje alveolar	89
Figura 3.29 – Gráfico de forças x deslocamento	90
Figura 3.30 – Retirada de dados do ANSYS	90
Figura 4.1 – Modelo dos Ensaio de Flexão	91
Figura 4.2 – Tipologia das lajes sem capa estrutural	92
Figura 4.3 – Tipologia das lajes com capa estrutural	92
Figura 4.4 – Detalhe do apoio	94
Figura 4.5 – Detalhe do atuador	95
Figura 4.6 – Modelo numérico da laje L3_S_20-8D12.7-X_F	98
Figura 4.7 – Etapas de carregamento da laje L3_S_20-8D12.7-X_F	98
Figura 4.8 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3_S_20-8D12.7-X_F	99
Figura 4.9 – Avaliação da variação na umidade no modelo de armadura incorporada - Usermat	99
Figura 4.10 – Avaliação da variação da temperatura no modelo de armadura incorporada - Usermat	99
Figura 4.11 – Evolução da componente de tensão σ_x dos elementos de concreto DP-DP (kN/cm ²)	101
Figura 4.12 – Evolução da componente de tensão σ_x dos elementos de concreto USER-MAT (kN/cm ²)	102

Figura 4.13 – Comparação da fissuração na laje: a) Ensaio; b) Modelo de armadura incorporada USERMAT - tensão σ_x dos elementos de concreto (kN/cm ²); c) Elementos fissurados na USERMAT apresentados apenas na simetria da laje	103
Figura 4.14 – Evolução da componente de tensão axial dos elementos da armadura DP-DP (kN/cm ²)	104
Figura 4.15 – Evolução da componente de tensão axial dos elementos da armadura USERMAT (kN/cm ²)	105
Figura 4.16 – Avaliação detalhada da tensão na armadura pelo modelo da USERMAT no centro do vão(kN/cm ²)	106
Figura 4.17 – Comparação momento x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural	107
Figura 4.18 – Modelo numérico da laje L3-C-25-8D12,7-X_F	108
Figura 4.19 – Etapas de carregamento da laje L3-C-25-8D12,7-X_F	109
Figura 4.20 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3-C-25-8D12,7-X_F	109
Figura 4.21 – σ_x dos elementos de concreto na proximidade ruptura da laje com capa . .	110
Figura 4.22 – σ_x dos elementos de aço na ruptura da laje	110
Figura 4.23 – Comparação momento x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural	111
Figura 4.24 – Modelo numérico da laje L9-C-25-5D12,7-Z_F	112
Figura 4.25 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L9-C-25-5D12,7-Z_F	112
Figura 5.1 – Modelo dos Ensaios de Cisalhamento	113
Figura 5.2 – Tipologia das lajes sem capa estrutural	114
Figura 5.3 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3_S_20-8D12,7-X_F para os modelos de armadura incorporada e discreta, ambos com a USERMAT	116
Figura 5.4 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de concreto no ato da protensão	117
Figura 5.5 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de concreto na proximidade da ruptura	118

Figura 5.6 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de aço no ato da protensão	119
Figura 5.7 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de aço na proximidade da ruptura	120
Figura 5.8 – Modelo numérico da laje L2_S_20-8D12.7-X_C	121
Figura 5.9 – Comparação cortante x deslocamento vertical da laje Laje L2_S_20-8D12.7-X_C	122
Figura 5.10 – Tensão σ_x dos elementos da concreto na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm ²)	123
Figura 5.11 – Tensão σ_x dos elementos da armadura na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm ²)	124
Figura 5.12 – Tensão σ_x dos elementos da armadura na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm ²)	125
Figura 5.13 – Comparação ruptura da laje no: a) Ensaio, b) Modelo de armadura incorporada USERMAT - tensão σ_x nos elementos de concreto (kN/cm ²); c) Elementos fissurados na USERMAT	126
Figura 5.14 – Comparação cortante x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural	127
Figura 5.15 – Esquema da análise paramétrica	128
Figura 5.16 – Comparação cortante x deslocamento vertical da laje Laje L2_S_20-8D12.7-X_C na análise paramétrica	129
Figura 5.17 – Avaliação na tensão axial (kN/cm ²) nas armaduras na análise paramétrica - Ato da Protensão	130
Figura 5.18 – Avaliação na tensão axial (kN/cm ²) nas armaduras na análise paramétrica - Proximidade da Ruptura	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Dados do modelo de Khalaf e Huang para cordoalhas com superfície lisa (2016)	51
Quadro 2.2 – Parâmetros das cordoalhas lisas de sete fios	54
Quadro 3.1 – Parâmetros do modelo de DP- <i>Concrete</i>	73
Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo da USERMAT	77
Quadro 4.1 – Características das seções das lajes	93
Quadro 4.2 – Características do concreto das lajes sem capa estrutural	93
Quadro 4.3 – Características do concreto das lajes com capa estrutural	93
Quadro 4.4 – Características das armaduras das lajes	94
Quadro 4.5 – Dados da armadura	94
Quadro 4.6 – Dados dos apoios	95
Quadro 4.7 – Dados do atuador	95
Quadro 4.8 – Dados do modelo DP-DP	96
Quadro 4.9 – Dados do modelo USERMAT	97
Quadro 4.10 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes sem capa submetidas à flexão	107
Quadro 4.11 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes com capa submetidas à flexão	111
Quadro 5.1 – Características das seções das lajes	115
Quadro 5.2 – Características do concreto das lajes sem capa estrutural	115
Quadro 5.3 – Características das armaduras das lajes	115
Quadro 5.4 – Dados do modelo com a armadura discreta	121
Quadro 5.5 – Comparação resultados experimentais versus modelo da laje sem capa submetida a ruptura ao cortante	122

Quadro 5.6 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes sem capa submetidas a ruptura ao cortante	127
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAQUS	<i>ABAQUS</i>
ANSYS	<i>Analysis Systems Incorporated</i>
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ARI	Alta resistência inicial
ASSAP	<i>Association of Manufacturers of Prestressed Hollow Core Floors</i>
BISO	<i>Bilinear Isotropic Hardening</i>
CEMACON	<i>Centro de mecânica aplicada e computacional</i>
DLL	<i>Dynamic-link library</i>
<i>fib</i>	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
HOLCOTORS	<i>holcotors</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NETPRE	Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UPF	<i>User Programmable Features</i>
VTT	<i>Valtion teknillinen tutkimuskeskus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

T_b	Força máxima de aderência na direção da cordoalha
A_b	Área nominal da cordoalha
d_b	Diâmetro nominal da cordoalha
L_b	Comprimento embutido da cordoalha no concreto
ϑ_c	Resistência ao esforço cortante na massa de concreto
d_w	Diâmetro do fio externo da cordoalha
l_w	Comprimento das cordoalhas
n	Número de fios da cordoalha
μ	Coefficiente de atrito
C	Coesão entre o concreto e o aço
σ_n	Tensão normal perpendicular aos eixos das cordoalhas
σ_t	Resistência a tração do concreto
θ	Ângulo de inclinação dos fios externos da cordoalha
f_{cm}	Resistência média á compressão do concreto
f_t	Resistência a tração do concreto
f'_c	Resistência a compressão do concreto
f_{ctm}	Resistência media uniaxial á tração do concreto
f_{2ccm}	Resistência biaxial do concreto
f_{ptk}	Tensão de ruptura do aço
ε_c	Deformação específica do concreto
ε_{c1}	Deformação na tensão máxima
P_1	Força inicial na cordoalha
P_2	Força após a liberação da tensão na cordoalha
A_S	Área nominal do aço

E_S	Módulo de elasticidade do aço
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do concreto
ε_1	Deformação da cordoalha em P1
ε_2	Deformação da cordoalha em P2
ν	Coefficiente de Poisson
I_1	Primeiro invariante de tensões
J_2	Segundo invariante de tensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
1.3	OBJETIVO	25
1.4	DELINEAMENTO	26
2	SISTEMA DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	28
2.1	HISTÓRICO SOBRE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	28
2.2	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ALVEOLARES	30
2.3	MÉTODOS DE PRODUÇÃO	32
2.4	MÉTODOS EXECUTIVOS	36
2.5	COMPORTAMENTO DAS LAJES ALVEOLARES	41
2.5.1	Mecanismo de ruptura flexo-cortante	43
2.5.2	Mecanismo de ruptura devido à força cortante	43
2.5.3	Ancoragem	47
2.6	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	54
3	ANÁLISE NUMÉRICA UTILIZANDO O ANSYS	62
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	62
3.2	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS	63
3.2.1	SOLID186	63
3.2.2	REINF264	64
3.2.3	LINK180	65

3.2.4	COMBIN39	66
3.3	MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS	67
3.3.1	Concreto	68
3.3.1.1	Drucker-Prager	70
3.3.1.2	USERMAT	73
3.3.2	Aço	77
3.3.3	Modelo de aderência	79
3.4	LANÇAMENTO DA ESTRUTURA	80
3.4.1	Geometria e Malha	81
3.4.2	Condições de Contorno	84
3.4.3	Solução	85
3.5	ORGANIZAÇÃO DO <i>SCRIPT</i>	87
3.5.1	Inicialização	88
3.5.2	Dados de entrada	88
3.5.3	Pré-processamento	88
3.5.4	Solução	89
3.5.5	Pós-processamento	89
4	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE RUPTURA À FLEXÃO	91
4.1	UNIDADES ALVEOLARES SEM CAPA	96
4.2	UNIDADES ALVEOLARES COM CAPA	108
5	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE RUPTURA AO ESFORÇO CORTANTE	113
5.1	VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O ENSAIO DE RUPTURA À FLEXÃO	115
5.2	UNIDADES ALVEOLARES SEM CAPA	121
5.3	ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ANCORAGEM	128

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
	REFERÊNCIAS	134
	APÊNDICES	139

1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo, são consolidadas as informações relacionadas à pesquisa, abordando as considerações iniciais sobre o tema, expondo os objetivos e sua justificativa. Posteriormente, é delineado o plano da pesquisa, apresentando a estrutura dos capítulos do trabalho e o organograma das etapas.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No âmbito da modernização dos processos, otimização e racionalização de recursos, a humanidade busca desde os tempos primórdios melhorias em suas tarefas desde a agricultura, moradia e alimentação. A indústria da construção civil busca, de forma ininterrupta, melhorias em processos construtivos, desde o processo de produção, transporte e criação de novas tecnologias. Com esse enfoque, surge a utilização de estruturas pré-moldadas, mais especificamente elementos pré-moldados de concreto, que buscam atender a demanda da economia de tempo, racionalização de recursos com um maior controle de qualidade (EL DEBS, 2017).

Do ponto de vista histórico, o primeiro grande desenvolvimento da pré-fabricação, na indústria da construção civil, está intimamente ligado ao período pós segunda guerra mundial, com propósito de suprir a demanda, tanto habitacional, quanto de hospitais, escolas, indústrias que surgiram devido à destruição das edificações durante a guerra. A pré-fabricação consiste em um sistema industrializado de produção, na qual, os elementos são fabricados em grande séries numa produção em massa, sendo transportados e montados na obra, geralmente, com auxílio de dispositivos de elevação (ORDONEZ, 1974). O sistema é concebido e otimizado para a produção de edificações com alta repetitividade, sendo largamente aplicados em edificações industriais, grandes centros comerciais, obras portuárias e pontes.

Acompanhando o aumento do uso da pré-fabricação, um dos sistemas estruturais mais utilizados seriam os sistemas de pisos, que apresentam uma vasta gama de aplicações e combinações com outros materiais. Citam-se alguns elementos de piso que se destacam, lajes protendidas, lajes alveolares, lajes tipo pi, *steel deck*, entre outros.

As lajes alveolares são constituídas por painéis de concreto protendido, que possuem seção transversal com altura constante e vazios (alvéolos) distribuídos longitudinalmente. A presença dos vazios proporciona um alívio no peso da estrutura em conjunto com uma redução do consumo

de materiais. O sistema é caracterizado pela sua facilidade e rapidez na execução, podendo alcançar grandes vãos devido ao efeito da protensão e concreto com elevadas resistências. De maneira geral, as lajes são aplicadas principalmente em componentes de pavimentos (pisos ou coberturas) e vedação lateral em edificações comerciais e industriais.

No que diz respeito ao seu comportamento estrutural, as lajes alveolares geralmente atuam como elementos apoiados, dimensionadas de acordo com as diretrizes gerais para um elemento de concreto protendido, verificando as tensões no momento da transferência de protensão, durante seu transporte e manuseio, finalizando com as verificações em seu uso. Por se tratar de um elemento pré-fabricado, ocorre um enfoque nas ligações entre os elementos e os efeitos dinâmicos que a peça sofre durante seu manuseio até sua destinação final.

Contudo, a presença dos alvéolos na seção transversal, ausência da armadura para combater os esforços cortantes, a disseminação das forças de protensão e os comprimentos de apoios com pequena dimensão, propiciam um comportamento complexo nas lajes alveolares, principalmente nas regiões do apoio, acarretando diferentes mecanismos de ruptura, sendo alguns deles como ruptura abrupta, que pode acarretar acidentes graves. Somado a isso, algumas técnicas executivas promovem alterações no sistema, alterações essas que proporcionam uma complexidade ainda maior da análise e dimensionamento da estrutura, citando como exemplo, recortes nas peças, execução de capa estrutural e preenchimento dos alvéolos.

Nesse contexto, diversas pesquisas acadêmicas buscam contribuir para um melhor entendimento do comportamento estrutural das lajes alveolares, tirando proveito de simulações numéricas ou experimentais. O presente trabalho busca contribuir através da análise numérica do comportamento das lajes alveolares, dando seguimento aos estudos realizados e promovendo a divulgação do conhecimento sobre o tema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a ampliação da utilização de elementos pré-fabricados no Brasil, as lajes alveolares destacam-se como um elemento de alta praticidade, englobando uma racionalização de recursos aliada a uma versatilidade de aplicação no canteiro de obras. Entretanto, para um correto uso de lajes alveolares protendidas, tirando proveito de todas as suas vantagens e com uma racionalização de recursos, se faz necessária uma continuidade nas pesquisas sobre o tema, tanto por meio de modelagens numéricas, quanto experimentais, com o propósito de aprimorar o entendimento do comportamento estrutural, principalmente, levando em conta que uma das possíveis formas de colapso do elemento pode ser frágil e abrupta. Além disso, a sequência da linha de pesquisa poderá contribuir para aprimoramento de futuras normas brasileiras e

internacionais.

Tendo em vista os pontos destacados, o presente trabalho integra a linha de pesquisa de simulação numérica de estruturas do PPGEC (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) por meio da aplicação dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*). Citam-se como alguns exemplos: Lazzari (2015), Lazzari (2016), Quevedo (2017), Alarcon (2017), Barbosa (2017), Jensen (2019), Medeiros (2019), Araujo (2019), Honscha (2019), Benincá (2020), Hoffman (2020), Rachinhas (2020), Matos (2021), Lazzari (2020), Machado (2022), Soares (2022) e Spessatto (2022).

Em relação às pesquisas anteriores, o presente trabalho buscou avançar no desenvolvimento de técnicas de modelagem para modelos numéricos de elementos estruturais vazados no programa ANSYS. Além disso, procurou-se aprimorar as técnicas previamente apresentadas em estudos anteriores e dar continuidade à investigação da evolução temporal em elementos pré-moldados. Por fim, objetivou-se elaborar um modelo de aderência capaz de representar de forma eficaz a interação entre o concreto e o aço.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar numericamente o comportamento deformacional das lajes alveolares protendidas em situações de flexão e corte, visando esclarecer seu comportamento mecânico. Entre os objetivos específicos do estudo, pode-se listar os seguintes itens:

- a) avaliar o comportamento mecânico das lajes frente à ruptura por flexão ou esforço cortante;
- b) avaliar a influência dos efeitos diferidos no tempo dos materiais na ruptura das lajes alveolares;
- c) avaliar a influência do escorregamento da cordoalha na resistência à força cortante;
- d) avaliar a influência da zona de transferência da protensão na resistência à força cortante;

1.4 DELINEAMENTO

Visando atingir os objetivos apresentados, inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre lajes alveolares protendidas, com a finalidade de formular uma base sobre a temática, tanto para o entendimento do comportamento quanto para o estabelecimento do estado da arte sobre tema.

Após a compreensão inicial do tema, foi realizado um estudo sobre as ferramentas para a simulação numérica do comportamento das lajes alveolares protendidas utilizando o programa ANSYS. A princípio, buscando à compreensão do uso do MEF e do comportamento constitutivo dos materiais, e de qual forma esses conceitos são apresentados no ANSYS, possibilitando assim, o desenvolvimento de simulações numéricas empregando o programa.

Por fim, desenvolveu-se um modelo numérico para representar o comportamento de lajes alveolares presentes em ensaios experimentais na literatura. As escolhas dos experimentos levaram em conta as variações nas seções transversais e suas disposições construtivas das lajes, buscando representar possíveis formas de ruptura das lajes alveolares protendidas.

O trabalho é composto por cinco capítulos. No presente capítulo é apresentada uma introdução que descreve as considerações iniciais sobre o tema, expondo os objetivos e justificativa da pesquisa.

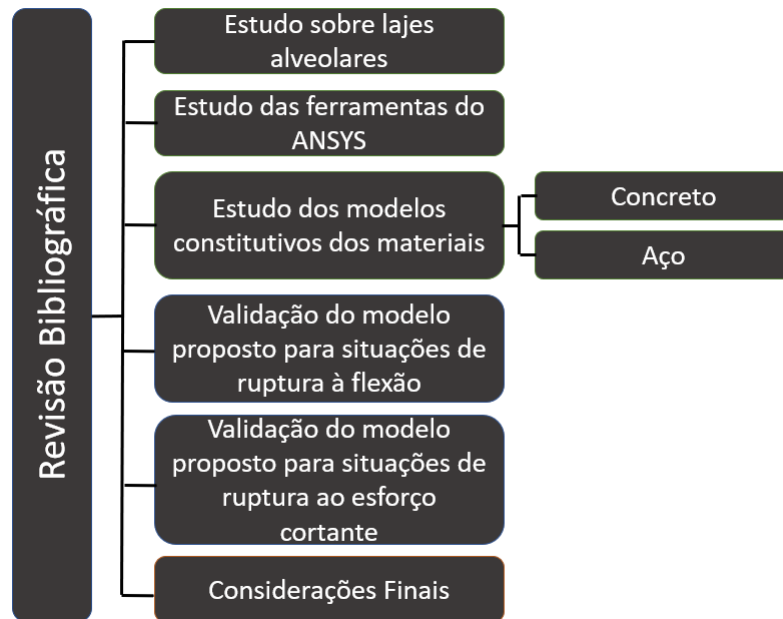
No segundo capítulo é realizada uma breve revisão bibliográfica a respeito de lajes alveolares protendidas, na qual discutem-se os aspectos históricos e estruturais da mesma. São abordados itens como aplicações das lajes alveolares, disposições construtivas, métodos produtivos e seus modelos de ruptura.

No terceiro capítulo estão descritas de forma detalhada as características dos elementos finitos e os procedimentos para geração do modelo numérico aplicando o programa ANSYS.

No quarto capítulo é apresentada a validação do modelo de armadura incorporada perante a ensaios de ruptura à flexão, comparando a performance do modelo numérico proposto com resultados experimentais da bibliografia. No quinto capítulo ocorre a validação do modelo numérico de armadura discreta para ensaios de lajes sujeitas a ruptura devido ao esforço cortante.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões. Em seguida são indicadas, em ordem alfabética, a relação de referências bibliográficas consultadas durante o trabalho. A Figura 1.1 apresenta o organograma que resume as etapas do trabalho.

Figura 1.1 – Organograma das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

No final, encontram-se os apêndices com exemplos de scripts APDL para algumas lajes modeladas.

2 SISTEMA DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

No presente capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre lajes alveolares protendidas. São abordados itens como aplicações das lajes, disposições construtivas, métodos produtivos e seus modos de ruptura.

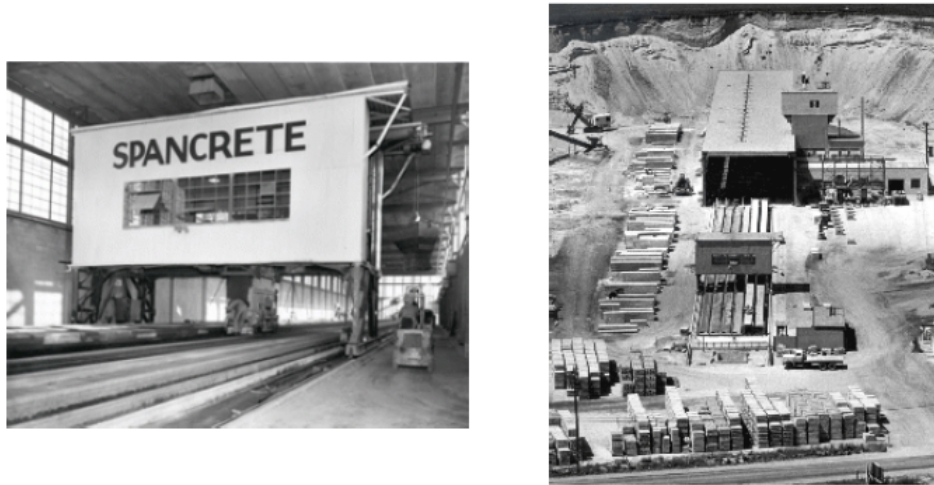
2.1 HISTÓRICO SOBRE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Na década de 1930, os inventores alemães Wilhelm Schaefer e Otto Kuen desenvolveram os princípios para o que é conhecido hoje como laje alveolar, elaborando lajes isoladas, com núcleos alveolares compostas por concreto pozolânico embutido entre duas camadas de concreto armado. Contudo, somente no final da década de 1940 e início da década 1950, após inúmeras tentativas e adaptações em sua linha produtiva, os inventores obtiveram algum sucesso, gerando a venda de licenças produtivas para algumas companhias na Alemanha, tanto Ocidental quanto Oriental, e uma nos Estados Unidos (ASSAP, 2002).

Na década de 1950, a companhia Buderus'sche Eisenwerke, principal produtora das lajes na Alemanha ocidental, promoveu uma grande alteração no sistema produtivo, introduzindo o efeito de protensão nas lajes alveolares. Logo em sequência, o concreto pozolânico deixa de ser empregado devido a sua baixa resistência ao cisalhamento, que limitava a aplicabilidade em vãos maiores, surgindo, então, as lajes alveolares em concreto monolítico, que reduziam tais limitações (ASSAP, 2002).

No mesmo período da década de 1950, a empresa americana detentora da licença de produção das lajes, também começou a induzir protensão em lajes alveolares, desenvolvendo a tal ponto, que começou a vender patentes de fabricação sob o nome de SPANCRETE. O método de produção consistia na aplicação de concreto em várias camadas separadas por uma simples folha plástica, que após o endurecimento, eram serradas por uma máquina com disco adiamantado (PCI, 2005). As lajes alveolares foram empregadas em vários silos e estacionamentos, apesar de apresentar um acabamento imperfeito em sua superfície, mas compatível ao seu uso. A Figura 2.1 mostra a primeira fábrica da empresa SPANCRETE.

Figura 2.1 – Fábrica da SPANCRETE



(fonte: PCI, 2005)

Em 1955, o inventor Max Gessner de Lochham, da cidade de Munique, desenvolveu o método de produção por formas deslizantes com vibração, do inglês *slipform*, muito semelhante as configurações de produção aplicadas atualmente. Devido ao sucesso do método, no ano de 1957 as companhias Max Roth Kg e Weiler Kg, indústrias da Alemanha Ocidental, compraram as patentes de produção do inventor e gradualmente promoveram sua expansão pela Europa e mundo. Paralelamente às inovações na Europa, na década de 1960, a companhia SPIROLL, uma empresa canadense, desenvolveu uma nova técnica de produção das lajes por meio de extrusão do concreto, onde, aplicava-se concreto de baixa relação água/cimento que era compactado e vibrado durante o procedimento. Além disso, o formato do alvéolo, anteriormente alongando, se tornava circular. O novo método de extrusão foi amplamente aceito na Europa, principalmente no norte da Europa e no Bloco Soviético, promovendo uma competição a nível global entre o sistemas de formas deslizantes e extrusão (ASSAP, 2002).

A concorrência entre os sistemas foi benéfica para disseminação e desenvolvimento da tecnologia das lajes alveolares pelo mundo, sendo que, ambos os sistemas servem como a base para o funcionamento das linhas de produção das lajes até os dias atuais. No que tange a evolução dos métodos produtivos, uma menção a empresa italiana *Nordimpianti System*, especialista na produção de lajes alveolares adotando formas deslizantes, que desenvolveu uma metodologia e maquinário para produção de lajes com grandes espessuras. Em 1987, a empresa realizou o feito de produzir lajes de até 80 cm de espessura, marcas impressionantes até para os dias atuais (CATOIA, 2011).

Atualmente, a produção de lajes alveolares emprega equipamentos com alta tecnologia, apresentando um controle de qualidade padrão industrial em todos os processos, desde a composição do

concreto até a verificação do acabamento final das peças. A produção automatizada promove uma racionalização de recursos aliada a uma grande produtividade, tornando o sistema competitivo se comparado a de estruturas moldadas *in loco* ou até mesmo a outras peças pré-fabricadas, mesmo que demande um alto custo inicial para implementação da linha produtiva.

No Brasil, a tecnologia de fabricação de lajes alveolares chegou na década de 1980, contudo, só foi consolidada no início dos anos 2000, devido ao grande incremento e popularização da utilização de estruturas pré-fabricadas que ocorreu no período. A maioria das lajes alveolares produzidas nacionalmente seguem processos de fabricação internacionais, empregando equipamentos importados, em sua maioria, da Europa e Estados Unidos, produzindo lajes com baixa espessura, em torno de 10 a 30 cm, diferentemente de outros países europeus que frequentemente aplicam lajes com grandes espessuras chegando até 70 cm (PETRUCCELLI, 2009).

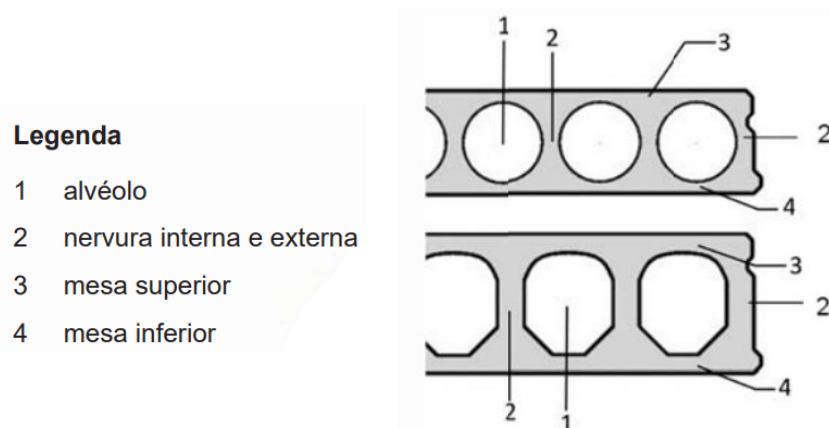
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ALVEOLARES

A NBR 14861 (ABNT, 2022) tem como definição para laje alveolar:

Elemento com seção transversal vazada, com a presença de nervuras de concreto e alvéolos, de geometria variada, conforme representada na Figura 2.2, caracterizada por conter armaduras principais longitudinais ativas por pré-tensionamento e pela não obrigatoriedade de armadura transversal de cisalhamento.

As lajes geralmente são aplicadas como elementos de pisos, unidades de coberturas ou até mesmo como painéis de vedação. A NBR 14861 (ABNT, 2022) apresenta na Figura 2.2 um exemplo de laje alveolar, juntamente com a nomenclatura para cada região da peça estrutural.

Figura 2.2 – Unidades alveolares e suas partes



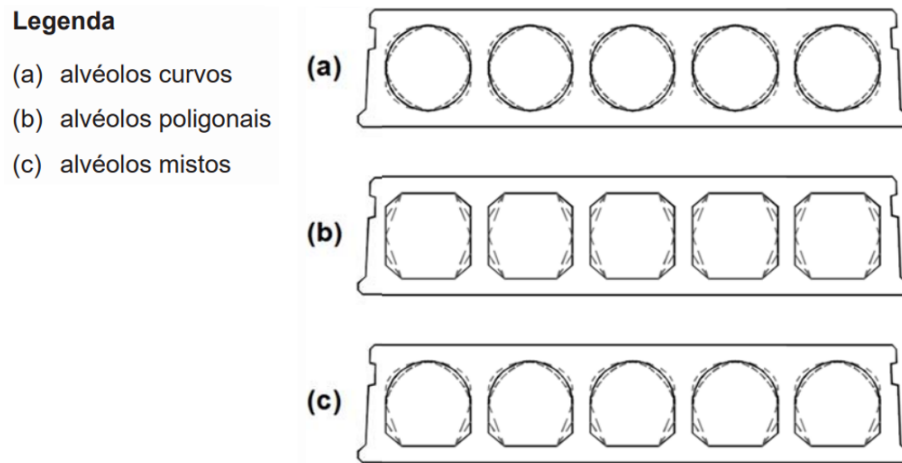
(fonte: adaptado de ABNT NBR 14861:2022)

As lajes alveolares protendidas são capazes de suportar cargas de utilização superiores a 30 kN/m², usualmente aplicadas para superar vãos entre 4 a 20 m, com espessuras que variam de 100 mm a mais de 400 mm, apresentando largura padronizada de 1,2 m. Por se tratar de um elemento pré-fabricado, a peça estrutural é produzida com grande controle de qualidade e geralmente distante de seu uso final. Sendo assim, muitas vezes a peça será armazenada e no decorrer do tempo, transportada e manuseada até sua disposição final. O sistema de execução é simples, geralmente apenas apoiando as lajes sobre vigas, possibilitando uma redução no tempo de construção, viabilizando uma melhor organização do canteiro de obras e uma economia no sistema de cimbramento das estruturas. Este modelo de laje é ideal para obras com prazo de entrega reduzido e com alto grau de repetitividade (FIP, 1992).

As lajes são constituídas por concreto de elevada resistência, com valores superiores a 45 MPa, atingindo até 60 MPa, devido principalmente ao controle de qualidade padrão industrial do método produtivo, aplicando concreto com baixa relação água-cimento, acompanhado de uma composição granulométrica adequada e controlada. No que diz respeito às armaduras utilizadas nas lajes no Brasil, geralmente são empregadas cordoalhas de CP-190RB, com diâmetros variando de 9,5 a 12,7 mm. As cordoalhas geralmente são empregadas na porção inferior da laje, sendo utilizadas na região superior quando a resistência do concreto não é suficiente para resistir aos esforços de tração proveniente do ato da protensão, quando somente o peso próprio está atuando. Além disso, as lajes alveolares não apresentam armadura transversal de cisalhamento (ARAÚJO, 2011).

No que se refere a sua seção transversal, os orifícios das lajes podem apresentar formato circular, oval, "pseudo"elíptico ou até mesmo retangular. O formato da seção transversal está intimamente interligado ao método de produção das lajes. Basicamente, as lajes alveolares são produzidas por dois métodos, extrusão ou formas deslizantes, sendo que, a produção por extrusão promove alvéolos circulares, enquanto a fabricação por formas deslizantes produz orifícios alongados caracterizando uma seção irregular (ASSAP, 2002). A Figura 2.3 apresenta seções típicas de lajes alveolares.

Figura 2.3 – Seções transversais tipos de lajes alveolares



(fonte: adaptado de ABNT NBR 14861:2022)

2.3 MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Apesar da possibilidade de fabricação das lajes alveolares em formas fixas, normalmente as lajes são produzidas por processos industriais contínuos, empregando maquinário desenvolvido especificamente para esse propósito, sendo produzidas em longas pistas de protensão (120 a 150 metros). De forma geral, são empregados basicamente dois métodos produtivos, extrusão (mais utilizado) ou formas deslizantes. No processo por formas deslizantes, aplica-se um concreto com maior *slump*. As lajes são produzidas pelo deslizamento das máquinas, sendo o concreto guiado por setores móveis e vibrado por baterias de diferentes frequências, que formarão as seções transversais. As peças produzidas apresentam alvéolos alongado com maior área de concreto. Uma forma alternativa do método, ao invés de máquinas, empregam-se tubos vibratórios que são retirados após a concretagem (CATOIA, 2011; PCI, 2005). A Figura 2.4 mostra o processo de fabricação das lajes alveolares por formas deslizantes.

Figura 2.4 – Máquina de moldagem por deslizamento

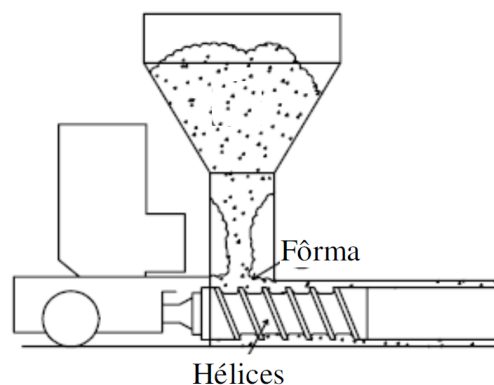


(fonte: ASSAP, 2002)

No processo por extrusão, o concreto com baixo fator água-cimento é forçado por máquinas, que possuem tubos em formato helicoidal, que o lança e compacta simultaneamente, produzindo peças únicas e contínuas, com elevada resistência à compressão. O processo promove uma peça com ótimo acabamento, apresentando alvéolos circulares. O processo é representado na Figura 2.5 e a máquina extrusora apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.5 – Processo de fabricação por extrusão

Lançamento
do concreto



(fonte: CATOIA, 2011)

Figura 2.6 – Máquina extrusora



(fonte: ASSAP, 2002)

Ambos os métodos necessitam de um concreto com alta qualidade e homogeneidade tanto na composição granulometria, quanto no teor de água-cimento. O concreto deve promover a estabilidade estrutural no momento da formação dos alvéolos e resistir ao efeito da protensão na peça. Para acelerar o processo de fabricação, é empregado Cimento ARI (Alta resistência inicial) e cura térmica ou úmida (ASSAP, 2002). Atendida a resistência adequada, as peças são cortadas e retiradas das pistas para o armazenamento. A seguir são descritas as principais etapas para a produção de lajes alveolares:

- a) preparação da pista de protensão, limpeza e aplicação de desmoldante;
- b) distribuição dos cabos de protensão (Figura 2.7);
- c) imposição da protensão nos cabos, adotando as tensões e deformações estipuladas em projeto. A ancoragem das cordoalhas é realizada em cabeceiras específicas para essa finalidade (Figura 2.8);
- d) o concreto é depositado continuamente nas máquinas e lançado na pista (Figura 2.9);
- e) após a concretagem, a *cura* do concreto é realizada, usualmente, com vapor de água com temperatura controlada para acelerar o ganho de resistência do concreto. No momento que o concreto atinge a resistência mínima de 21 MPa, são realizados os cortes transversais das lajes com uma serra de disco diamantado, a protensão começa agir nas lajes nesse momento.

Figura 2.7 – Cabos de protensão



(fonte: CATOIA, 2011)

Figura 2.8 – Pista de protensão



(fonte: ASSAP, 2002)

Figura 2.9 – Concretagem de lajes alveolares



(fonte: CATOIA, 2011)

Por fim, as lajes são retiradas da pista e inspecionadas minuciosamente, para, após sua aprovação, serem encaminhadas para estocagem ou direcionadas para a obra. Os estoques devem atender padrões de qualidade e recomendações normativas, as peças não devem ser posicionadas diretamente no solo e respeitar a relação de empilhamento máximo das peças. A Figura 2.10 mostra a maneira de armazenamento das lajes alveolares. Posteriormente, as lajes são transportadas por veículos específicos até seu posicionamento final, empregando equipamentos para içamento da peça, com cautela para não danificá-la, principalmente na região de apoio das lajes (ARAUJO, 2011).

Figura 2.10 – Estoque de lajes alveolares



(fonte: ARAUJO, 2011)

2.4 MÉTODOS EXECUTIVOS

As lajes alveolares geralmente são simplesmente apoiadas em vigas pré-moldadas, mas devido a sua versatilidade, ainda possibilitam diversas combinações com outros sistemas estruturais, como vigas metálicas, madeira ou até mesmo elementos em concreto moldado *in loco*. O processo de montagem pode ser organizado, de forma simplificada, iniciando pelo içamento das peças, organização dos painéis em planta (paginação), nivelamento das lajes, preenchimento das juntas e posteriormente, quando necessário, concretagem da capa estrutural moldada *in loco* e preenchimento dos alvéolos. Vale ressaltar que o processo de paginação dos painéis apresenta extrema importância para a viabilidade econômica da utilização das lajes, para promover um processo com alto rendimento pela alta repetitividade e distribuição planejada das lajes (ARAUJO, 2011). A Figura 2.11 apresenta o içamento de uma laje alveolar até a sua disposição final.

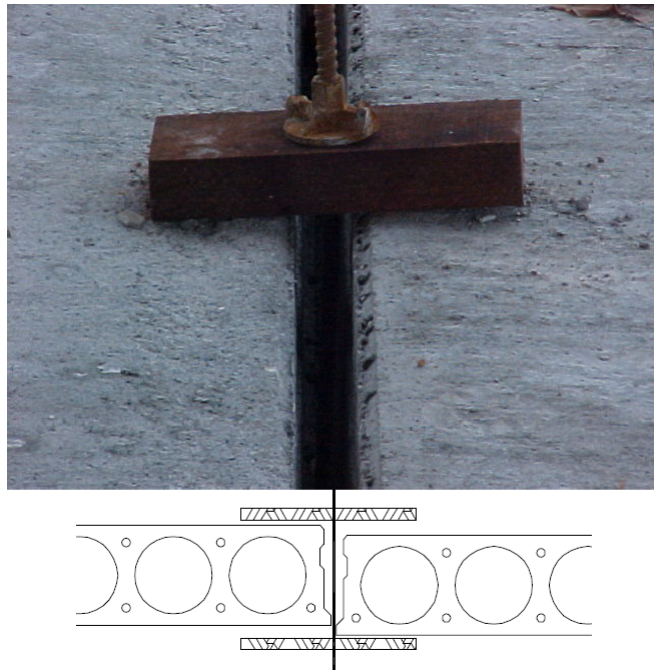
Figura 2.11 – Içamento e posicionamento das lajes



(fonte: AUTOR, 2022)

Durante a execução, é comum ocorrer diferenças nos valores obtidos das contra-flechas nos painéis, toleráveis na normativa, sendo acarretados por diversas razões, dentre elas, alterações na temperatura, umidade e cura. Os desnivelamentos são corrigidos através de torniquetes, tirantes de aço ancorados na face superior e inferior travados por cunhas de madeira, como é apresentado na Figura 2.12, que tem a finalidade de nivelar os painéis vizinhos e servir de ponto de referência caso for executada a capa estrutural de concreto.

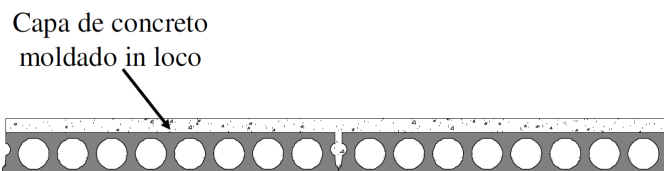
Figura 2.12 – Nivelção dos painéis



(fonte: ARAUJO, 2011)

Durante a execução destas lajes, podem ser empregadas capas estruturais de concreto com objetivo de formar uma seção composta de maior altura útil, que aumenta a resistência à flexão e aprimora a performance do elemento em relação ao efeito diafragma de estruturas pré-moldadas, principalmente em edificações de múltiplos pavimentos com alturas elevadas. Geralmente, o capeamento (Figura 2.13) não irá ser superior a 5 cm, adotado como ferramenta de nivelamento da superfície, principalmente devido às contra-flechas das lajes que surgem durante seu processo produtivo.

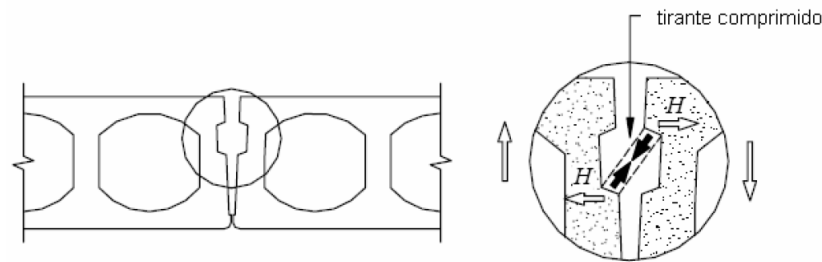
Figura 2.13 – Capeamento laje alveolares



(fonte: CATOIA, 2011)

A execução da capa estrutural colabora para o aumento da resistência estrutural das lajes. Uma das formas mais usuais de promover a redistribuição de forças concentradas entre as lajes é por meio da chave de cisalhamento, comumente chamada de chaveta, que consiste na aplicação de graute, argamassa ou concreto nas ligações entre as lajes como demonstrado na Figura 2.14 .

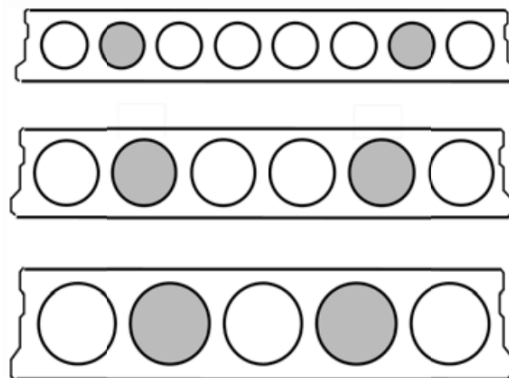
Figura 2.14 – Junta longitudinal



(fonte: CEB-FIP, 2012)

Devido à ausência da armadura transversal, para resistir a força cortante, uma das soluções aplicadas é pelo preenchimento dos alvéolos com concreto durante a execução das lajes, mostrada na Figura 2.15. Entretanto, não é uma adaptação executiva convencional se for executada no canteiro de obras, pois, age em contrapartida à facilidade de execução de soluções pré-moldadas, que buscam maior facilidade e rapidez durante a execução.

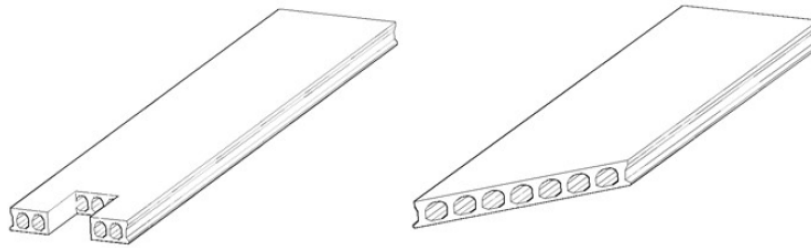
Figura 2.15 – Preenchimento dos alvéolos



(fonte: ABNT NBR 14861:2022)

Ainda em sua fase executiva, para promover a compatibilização entre a arquitetura e as diversas instalações das edificações, é necessária a execução de aberturas ou cortes como apresentados na Figura 2.16. Esses cortes possibilitam a passagem de tubulações e equipamentos ou apenas adequar o encaixe de algumas lajes com a estrutura de bordo. Os cortes e ajustes em lajes devem ser calculados e detalhados considerando as tensões que surgem nas proximidades da abertura, para garantir que a seção remanescente tenha capacidade de resistir aos esforços (PINHEIRO, 2017).

Figura 2.16 – Abertura em lajes alveolares

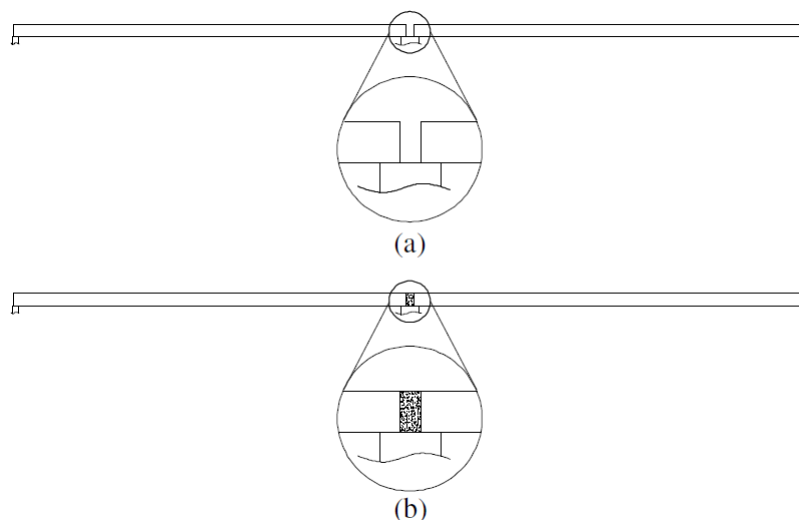


(fonte: PINHEIRO, 2017)

ASSAP (2002) indica que furos e aberturas preferencialmente devem ser realizados com o concreto em seu estado fresco, sendo que as dimensões máximas da abertura devem estar de acordo com a geometria da seção transversal da laje, a força de protensão, posicionamentos das cordoalhas e, principalmente, o posicionamento do furo. Deve-se tomar maior atenção nas regiões do apoio e de lajes de bordo, verificando a necessidade de reforço com armadura transversal em alguns casos.

Outra forma de melhorar o desempenho das lajes é o estabelecimento de continuidade posterior sobre os apoios intermediários das lajes. O método aumenta a rigidez e a capacidade portante do elemento através da confecção de elementos de conexão, que geram uma seção composta por elemento pré-moldado e moldando *in loco*. Do ponto de vista estrutural, apresenta uma solução com maior estabilidade global se comparada a metodologia de execução tradicional simplesmente apoiada (BARBIERI, 1999). A Figura 2.17 apresenta a alteração na concepção estrutural devido a continuidade.

Figura 2.17 – Lajes alveolares: (a) isostáticas; (b) contínuas



(fonte: ARAUJO, 2011)

2.5 COMPORTAMENTO DAS LAJES ALVEOLARES

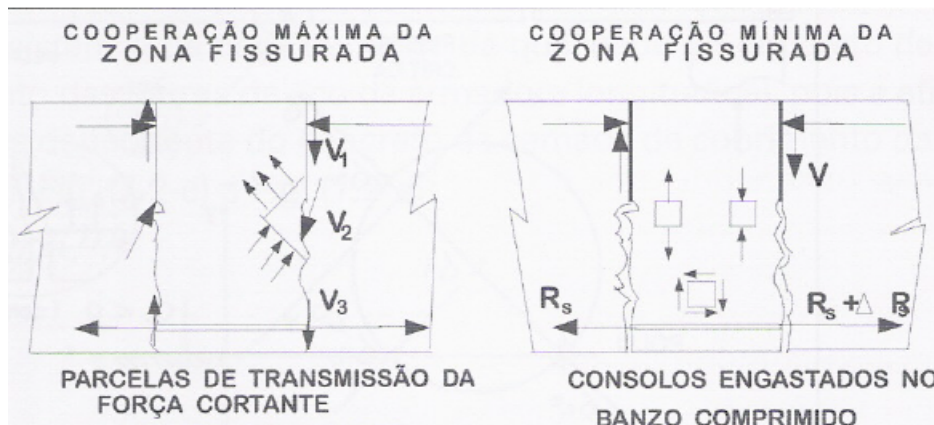
De forma geral, as lajes alveolares são concebidas para funcionar como elementos apoiados, com tendência à não transferir momentos fletores aos seus apoios (YANG, 1994). As lajes alveolares normalmente apresentam cordoalhas em sua região inferior, tendo uma protensão com pré-tração e a aderência pelo contato cordoalha e concreto.

A principal distinção para outros elementos de concreto protendido seria a ausência de armaduras para combater o cisalhamento, sendo o esforço cortante resistido pela armadura longitudinal e a resistência à tração do concreto. Além disso, o efeito de fissuração das lajes pode prejudicar a ancoragem das cordoalhas, diminuindo a força de protensão que está efetivamente aplicada na laje, que irá incidir diretamente no dimensionamento e colapso da peça.

De acordo com Fusco (2008), em relação à fissuração de lajes com ausência de armadura de cisalhamento, a ruptura da peça ocorre com o aparecimento da fissura crítica, fissura inclinada característica da ruptura por cisalhamento. Enquanto as fissuras por flexão, podem acontecer sem comprometer a integridade do elemento, por surgirem em menor quantidade quando comparada a fissuração de vigas. Em relação as lajes alveolares, o mecanismo dependerá da altura da laje podendo ocorrer a ruptura por cortante ou pela interação flexo-cortante.

Fusco (2008) ainda determina um modelo do comportamento do concreto pós-fissuração. Conforme este autor existem duas formas de propagação do esforço cortante em elementos estruturais com ausência de armadura de cisalhamento, o modelo de cooperação máxima e mínima, apresentado na Figura 2.18. O modelo de cooperação máxima define que apesar do surgimento da fissura, surgem três mecanismos para distribuição dos esforços cisalhantes, sendo eles, o efeito pino da armadura, engrenamento dos agregados e a transmissão pelo banzo superior comprimido. No modelo de cooperação mínima, os esforços cortantes são transmitidos apenas pelo banzo comprimido, alterando o funcionamento da estrutura.

Figura 2.18 – Modelo de funcionamento de transmissão de esforços cortante



(fonte: FUSCO, 2008)

Considerando a cooperação mínima das fissuras, todos os esforços serão transmitidos pelo banzo comprimido. Logo, a alma da peça funciona como um consolo. O modelo admite que o mecanismo de resistência da laje permaneça mesmo com o surgimento da fissura crítica, sendo a ruptura governada pelo equilíbrio das forças no banzo superior.

Analisando o modelo de cooperação máxima, o efeito pino surge devido a maior rigidez do aço em relação ao concreto, que proporciona uma região de transmissão dos esforços cortantes. O efeito de engrenamento dos agregados está relacionado as suas superfícies. Na cooperação máxima a estrutura tem um comportamento semelhante ao de uma treliça, o surgimento da fissura crítica leva a peça à ruptura (FUSCO, 2008).

Como forma de compreender a complexidade do comportamento das estruturas, a literatura apresenta diversos ensaios que buscam solicitá-las a tal ponto, que a aproximam da ruptura. O objetivo destes ensaios é descrever o comportamento e a interação dos materiais nessas situações, sendo, tais interações descritas como mecanismos de ruptura. O estudo dos mecanismos de ruptura possibilita um melhor entendimento do comportamento da estrutura, aprimorando as teorias e promovendo adequações normativas.

De acordo com Costa (2009), os mecanismos de ruptura das lajes alveolares são influenciados, entre outros fatores, pela geometria da seção (altura útil, formato dos alvéolos, posicionamento das armaduras) e pelo efeito da protensão (relacionados com a ancoragem e as perda de protensão). Aliado aos fatores citados anteriormente, a adição de capa estrutural e aberturas promovem uma complexidade ainda maior na determinação do comportamento da estrutura próxima ao colapso. De acordo com Mercx e Walraven (1983), Pajari (1989) e Girhammar (1992), as principais formas de ruptura das lajes alveolares podem ser categorizadas em mecanismo de ruptura por flexão ou de cisalhamento, em alguns casos ocorrendo sobreposição dos efeitos.

Os procedimentos para dimensionamento das lajes alveolares, em relação à flexão, são similares ao de peças de concreto armado protendidas com seção cheia, sendo os esforços de tração resistidos pela armadura. Contudo, em relação ao cisalhamento não existe uma formulação unânime entre os projetistas e normativas, ocorrendo divergências, principalmente em relação a lajes com altura elevada ou com presença de aberturas. Além disso, no dimensionamento de estruturas, geralmente é indicado o dimensionamento de peças que prevaleçam a ruptura por flexão em detrimento ao cisalhamento. De forma geral, enquanto a ruptura por flexão apresenta grandes deformações, a ruptura por cisalhamento apresenta poucas deformações caracterizando uma ruptura frágil, situação crítica para lajes alveolares, que são suscetíveis à ruptura por cisalhamento (CATOIA, 2011).

2.5.1 Mecanismo de ruptura flexo-cortante

De acordo com Pajari (1989) e Rettne e Edekling (2006), os mecanismos de ruptura na flexão das lajes alveolares podem estar vinculados individualmente ou em conjunto aos seguintes fatores:

- a) fissura do concreto devido à tração;
- b) deformação excessiva de laje;
- c) ruptura de cordoalhas por tração de flexão;
- d) ruptura do concreto por compressão devido à flexão;
- e) fissuração da fibra superior por flexão devido à retirada de ancoragem dos cabos protendidos.

De acordo com Catoia (2011), considerando os experimentos de flexão com a aplicação de uma carga concentrada, e levando em conta o comprimento da laje, é possível que fissuras de flexão se desenvolvam na forma de uma fissura diagonal, especialmente se houver um cisalhamento significativo na seção. Nesse contexto, ocorrerá uma interação entre os mecanismos de flexão e cisalhamento. Se essa região estiver distante do suporte, é importante garantir uma condição de ancoragem ainda adequada, e é mais provável que essa fissura diagonal progrida em direção à parte superior da laje, resultando em ruptura devido à compressão do concreto. Para lajes com pequeno vão de comprimento, é mais provável o desenvolvimento de uma fissura de fendilhamento, a partir da junção da fissura de flexão com a fissura diagonal.

2.5.2 Mecanismo de ruptura devido à força cortante

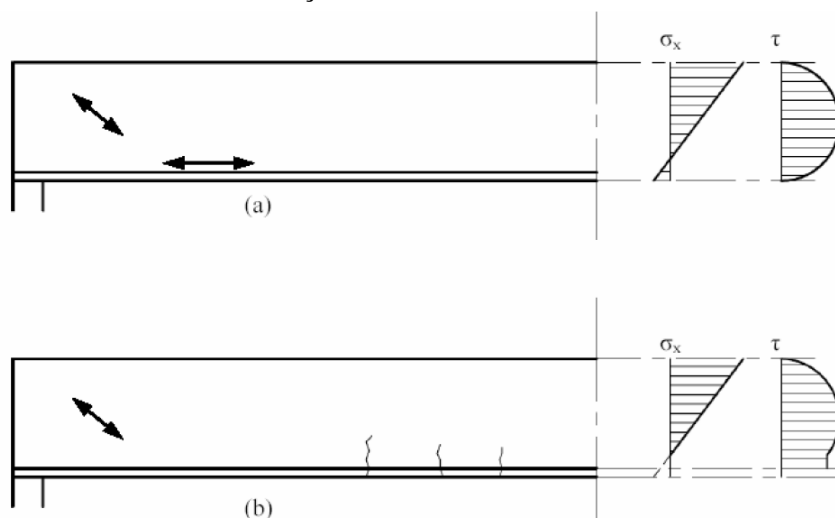
De acordo com Yang (1994), não existe uma teoria geral para verificação do cisalhamento das lajes alveolares, prejudicando a determinação com exatidão da sua resistência. Devido às

características das lajes, como a presença de aberturas ao longo da sua seção transversal e o comprimento dos apoios limitados, propicia uma situação de ruptura por cisalhamento. De acordo com Pajari (1989) e Rettne e Edekling (2006), os principais mecanismos de ruptura estão associados aos seguintes fatores:

- a) falha na ancoragem dos cabos;
- b) fissuração do concreto devido à interação flexão e cisalhamento;
- c) falha da nervura por tração devido ao cisalhamento;
- d) falha por escorregamento devido ao cisalhamento ao longo de uma fissura ;

De acordo com Broo, Lundgren e Engström (2005), a presença ou não de fissuras de flexão interfere diretamente nos mecanismos e na forma de ruptura das lajes ao cisalhamento, como demonstrado na Figura 2.19. Quando a resistência à tração do concreto é suficiente para não ocorrer a fissuração, a ruptura será proporcionada pelo surgimento da fissura inclinada típica do cisalhamento por força cortante. Yang (1994) determinou a região crítica para o surgimento da fissura, que é localizada próxima ao apoio no decorrer de uma linha inclinada com angulação de 35° em relação ao plano horizontal. A fissura irá ocorrer com o fim do alívio propiciado pelo efeito de compressão advindo das reações de apoio na região onde a protensão ainda está em desenvolvimento. A posição crítica exata irá variar de acordo com o carregamento e da seção transversal da laje.

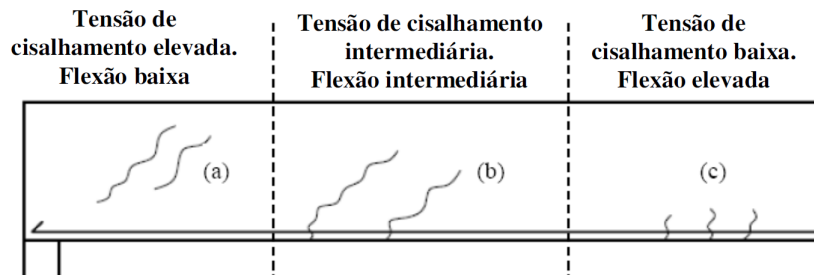
Figura 2.19 – Tensão de flexão e cisalhamento: a) Sem fissuração; b) Com fissuração



(fonte: BROO; LUNDGREN e ENGSTRON, 2005)

Com o aparecimento das fissuras de flexão, verifica-se uma combinação dos esforços de flexão e cisalhamento. De forma geral, o ponto crítico do cisalhamento seria a região onde a tensão de cisalhamento é máxima. Contudo, devido ao efeito da transmissão da protensão em elementos pré-tracionados, existe uma incerteza na determinação exata do posicionamento dessa seção. As fissuras de um elemento protendido submetido a esforços de cisalhamento e flexão podem ser representadas na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Fissuração em elementos protendidos

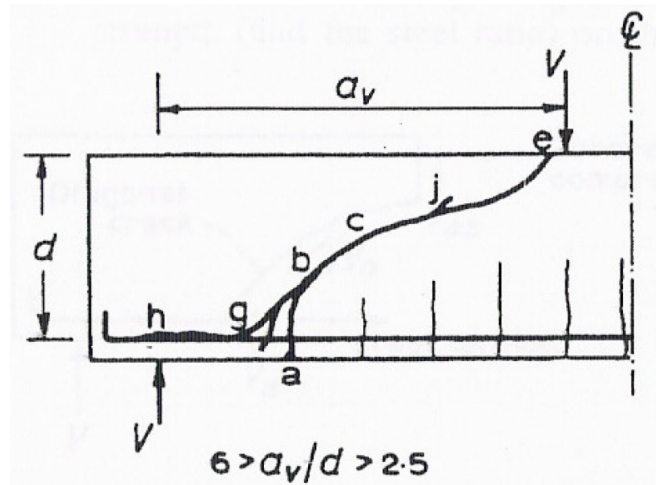


(fonte: RETTNE E EDEKLING, 2006)

A Figura 2.21 demonstra o comportamento da propagação das fissuras. Para uma relação relativamente elevada de av/d , a fissura parte do ponto "a-b", se estendendo até o ponto "e", sendo denominada falha por tração diagonal, seccionando a peça em dois pedaços. Uma relação av/d baixa não proporciona uma grande extensão da fissura, sendo parada até uma região próxima ao ponto j. Pode ocorrer o surgimento de inúmeras fissuras aleatórias no entorno da cordoalha, que com o aumento da força de cisalhamento poderá conduzir ao fendilhamento, ou seja, destruindo a aderência concreto e aço, sendo denominado como falha da ancoragem devido ao cisalhamento.

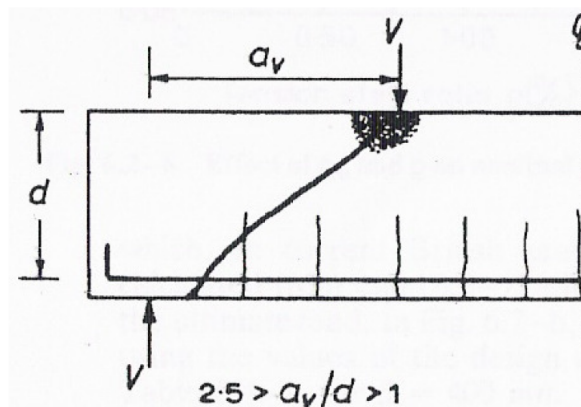
De acordo com Kong e Evans (2001), quando a carga concentrada é aplicada a uma distância do apoio numa proporção entre $2,5 < av/d < 6$, a ruptura tenderá à ocorrer devido aos efeitos de cisalhamento com a interação dos efeitos flexão. Esta situação é apresentada na Figura 2.21. Com o aumento da carga, a fissura inicialmente ocasionada pelo efeito da flexão, tem sua propagação alterada diagonalmente na direção da carga aplicada, sendo conhecida como fissura diagonal.

Figura 2.21 – Comportamento da fissuração de lajes alveolares



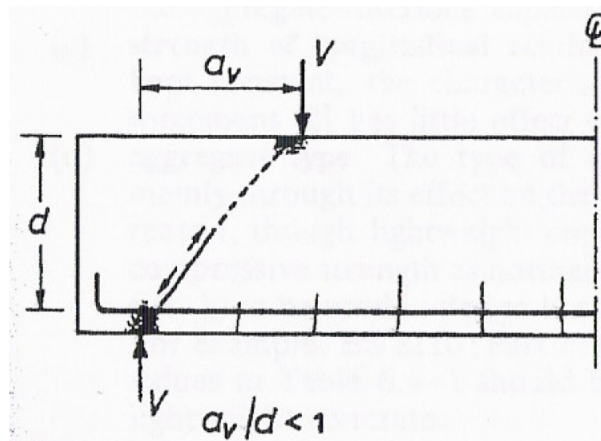
(fonte: KONG; EVANS, 2001)

Segundo Kong e Evans (2001), para uma carga concentrada aplicada a uma distância do apoio numa proporção entre $1 < a_v/d < 2,5$, a fissura diagonal irá ocorrer independente da fissura de flexão, caracterizando uma ruptura por cisalhamento, mostrada na Figura 2.22. O aumento da carga proporciona a propagação da fissura diagonal até o esmagamento do concreto, proporcionado em algumas situações uma ruptura abrupta.

Figura 2.22 – Situação em que $1 < a_v/d < 2,5$ 

(fonte: KONG; EVANS, 2001)

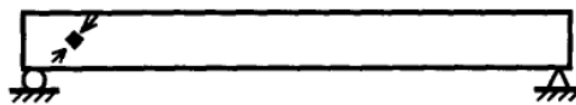
De acordo com Kong e Evans (2001), para uma carga concentrada aplicada a uma distância do apoio numa proporção entre $a_v/d < 1$, a fissura terá propagação realizando uma ligação entre o ponto de carregamento e o apoio. A ruptura ocorre com o esmagamento do concreto, como é apresentado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Situação em que $a_v/d < 1$ 

(fonte: KONG; EVANS, 2001)

A ruptura da nervura por compressão é ocasionada quando a tensão principal de compressão supera a resistência de compressão do concreto. Segundo Yang (1994), essa situação dificilmente ocorrerá, pois, provavelmente a ruptura da nervura por tração ocorrerá antes, levando em conta as resistências dos materiais que compõem as lajes. A ruptura por escorregamento devido ao cisalhamento ocorre na falha ou insuficiência de transmissão da força de tração ao apoio devido à ancoragem insuficiente da armadura longitudinal.

Figura 2.24 – Ruptura da nervura por compressão devida ao cisalhamento



(fonte: YANG, 1994)

Devido às diversas características que influenciam na resistência ao cisalhamento das lajes, foi desenvolvido, pela a FIP (1992) e indicado na norma Européia EN1168-2005, um ensaio padrão para determinação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares. A laje deve apresentar um arranjo isostático, com um apoio móvel e outro fixo, com a aplicação da carga a uma distância de 2,5 vezes a altura da laje. O carregamento deve ser realizado por um atuador e distribuído por uma viga metálica rígida sob a laje.

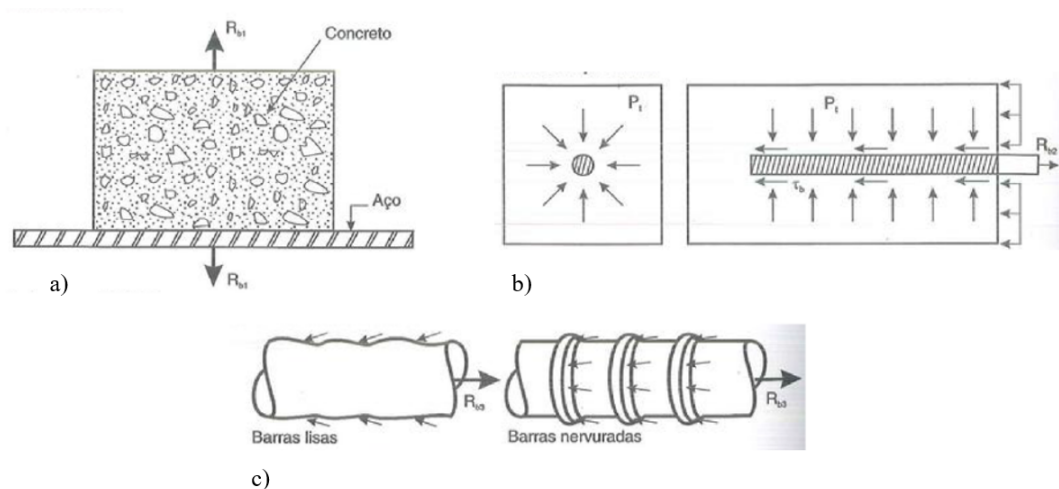
2.5.3 Ancoragem

Carvalho (2012) define que existem duas formas de promover a ancoragem da armadura: as que apresentam dispositivos mecânicos adicionais e a aderência pela interação concreto-armadura.

Em elementos protendidos com pré-tração, como as lajes alveolares, a solidarização ocorre exclusivamente pela aderência entre os materiais. Esses elementos apresentam uma maior tendência à falha da ancoragem se comparados aos elementos protendidos com pós-tração, que geralmente aplicam dispositivos mecânicos adicionais, como cunhas, blocos ou placas, para transmissão da protensão.

A aderência para elementos com pré-tração apresenta comportamento semelhante ao das armaduras passivas, ocorrendo através de fenômenos como adesão, atrito e engrenagem mecânica. Fusco (2013) afirma que a aderência por adesão está relacionada às ligações físico-químicas que ocorrem durante a tentativa de separar o aço do concreto, apresentando uma resistência à separação dos materiais. O atrito estaria vinculado à rugosidade e pressão que o concreto exerce na armadura devido a sua retração, dificultando o "arrancamento" da armadura inserida no concreto. A engrenagem mecânica, também denominada como aderência mecânica, é associada às saliências que mobilizam as tensões de compressão no concreto. A Figura 2.25 apresenta os fenômenos da aderência.

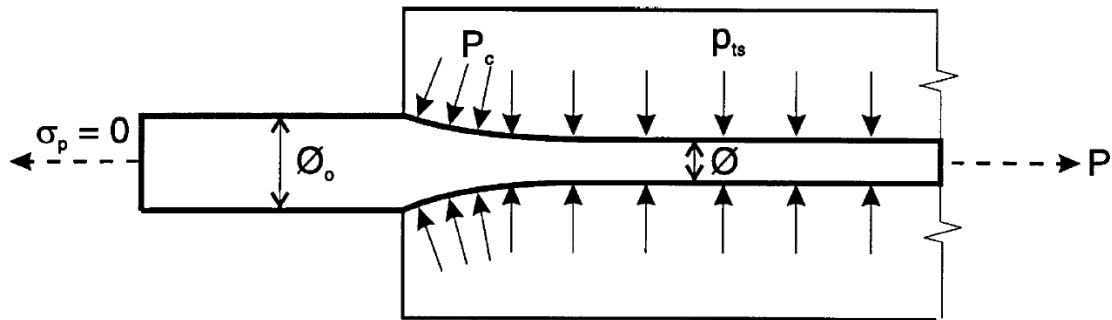
Figura 2.25 – Fenômenos de aderência: a) Adesão; b) Atrito; c) Mecânica



(fonte: FUSCO, 2013)

A aderência mecânica está intimamente relacionada à superfície da barra. Até mesmo barras lisas apresentam aderência mecânica por meio da rugosidade superficial advinda do processo de fabricação. O uso de cordoalhas ainda adiciona o efeito saca-rolha, que impede o deslizamento da armadura devido aos fios da cordoalha apresentarem um formato espiral que aumenta a superfície de contato e a engrenagem mecânica. Além disso, o efeito Hoyer promove um aumento do diâmetro dos fios próximos à região da protensão, quando não sujeita a nenhuma tensão, promovendo um efeito similar ao de uma cunha na extremidade onde foi realizada a liberação da tensão, demonstrado na Figura 2.26 (FUSCO, 2013).

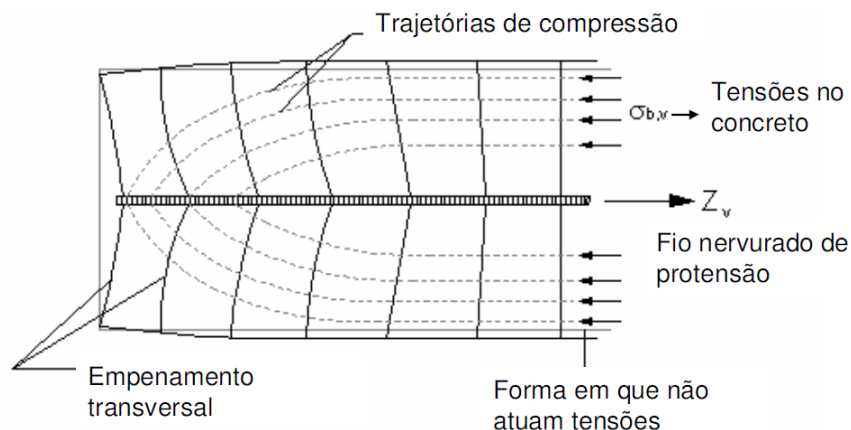
Figura 2.26 – Efeito Hoyer



(fonte: FUSCO, 2013)

De acordo com Leonhardt (1983), a tensão aplicada será parcialmente absorvida pela armadura e será transmitida gradativamente ao elemento estrutural pelas trajetórias de compressão, demonstradas na Figura 2.27, o que promove tensões de tração no sentido radial das armadura. A região de transmissão das tensões é denominada comprimento de ancoragem, conforme apresenta a Figura 2.27.

Figura 2.27 – Desenvolvimento das tensões na protensão



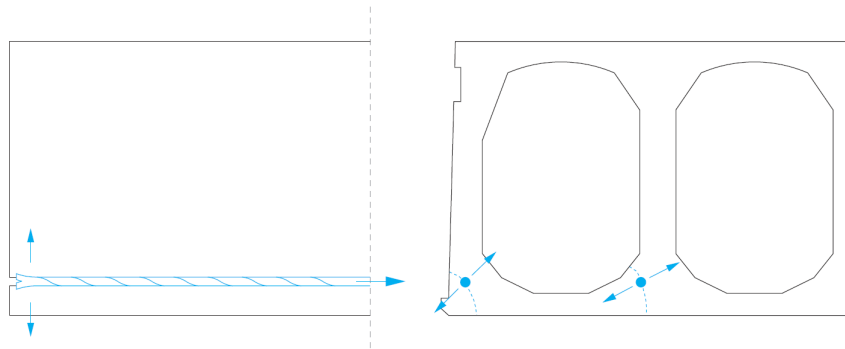
(fonte: LEONHARDT, 1983)

Para Mercx e Walraven (1983), a presença de fissuras no comprimento de ancoragem pode impossibilitar o aumento na tensão do aço. Em regiões distantes da zona do comprimento de ancoragem, o aumento da tensão do aço ocorre mesmo na presença de fissuras, sendo a tensão do aço transmitida pelos mecanismos de ancoragem em cada face da fissura. Entretanto, o aumento excessivo da tensão provoca desordem na região de ancoragem, podendo suceder o deslizamento da cordoalha.

O efeito da fissuração influencia diretamente o processo de ancoragem das armadura protendidas, tornando-se substancial a verificação das tensões de tração na área de transferência. As principais tensões de tração que emanam no comprimento de ancoragem são denominadas *Bursting*, *Splitting* e *Spalling*.

Bursting (Figura 2.28) são as tensões de tração que podem ocorrer no ato da protensão devido ao escorregamento da armadura na extremidade da laje. Como citado anteriormente por Fusco (2013), a seção da armadura na extremidade apresenta comportamento semelhante ao de uma cunha devido sua retração, produzindo tensões de tração radialmente. As tensões habitualmente ocorrem quando as armaduras são posicionadas incorretamente ou não respeitam as dimensões mínimas normativas de cobrimento, posto que, geralmente o próprio concreto irá absorver tais tensões.

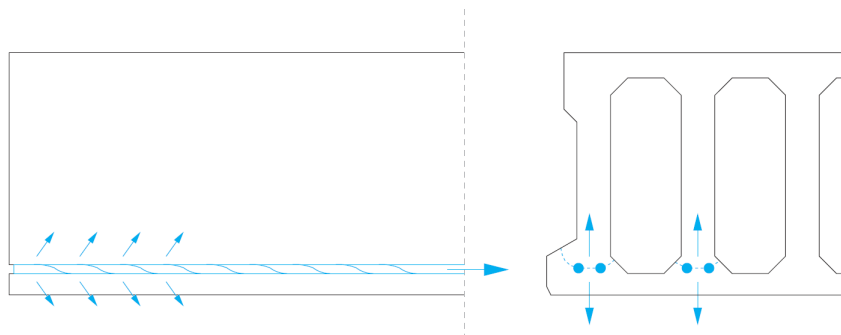
Figura 2.28 – Bursting



(fonte: CEB-FIP, 2012)

Splitting (Figura 2.29) são as tensões que surgem no desenvolvimento da transmissão de forças para o concreto. A aplicação da força de protensão estabelece tensões de tração radialmente em relação ao eixo da armadura. Caso forem superiores à resistência de tração do concreto, originam fissuras que podem seguir o traçado da cordoalha ou comportamento similar ao do efeito *bursting*, quando localizada próximas à região de ancoragem. A execução do cobrimento adequado minimiza a probabilidade do surgimento dessas tensões.

Figura 2.29 – Splitting

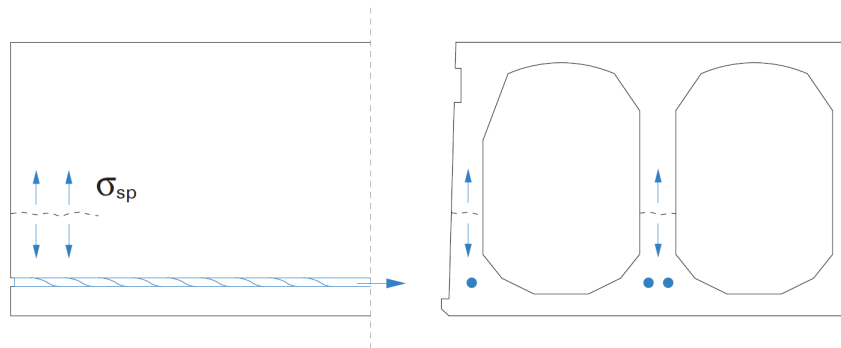


(fonte: CEB-FIP, 2012)

Spalling (Figura 2.30), diferentemente do *Splitting*, surgem acima das cordoalhas na largura mínima das nervuras das lajes. O efeito da protensão promove tensões de flexão e compressão, que tendem a separar a laje numa região superior e inferior. O excesso de fissuras horizontais pode

ser agravado durante o transporte e içamentos das lajes, podendo comprometer o funcionamento da estrutura.

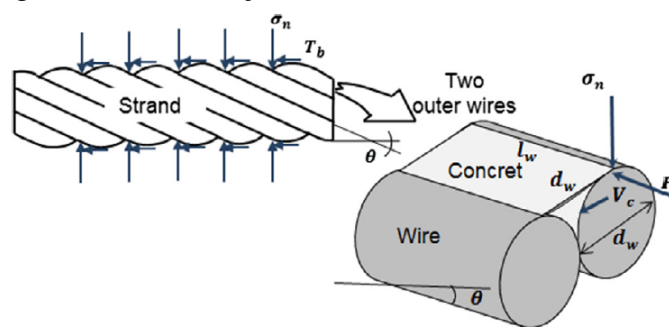
Figura 2.30 – Spalling



(fonte: CEB-FIP, 2012)

Khalaf e Huang (2016) apresenta um modelo para determinação da tensão máxima de aderência para cordoalhas de 3 e 7 fios. O modelo considera o estado da superfície da cordoalha, a geometria, número de fios, os parâmetros dos fios e do concreto. São apresentadas nas Equações 2.1 a 2.11 e no Quadro 2.1 as informações para o uso no modelo. A Figura 2.31 apresenta a interação entre a cordoalha e o concreto, demonstrando graficamente quais os parâmetros devem ser adotados para a determinação da tensão de aderência máxima.

Figura 2.31 – Interação entre as cordoalhas e o concreto



(fonte: KHALAF; HUANG, 2016)

Quadro 2.1 – Dados do modelo de Khalaf e Huang para cordoalhas com superfície lisa (2016)

VARIÁVEL	SÍMBOLO	VALOR
Coesão entre o concreto e o aço	C	1,3
Coefficiente de atrito	μ	0,4

(fonte: KHALAF; HUANG, 2016)

$$\tau_{max} = \frac{T_b}{A_b} \quad (2.1)$$

$$A_b = \pi d_b L_b \quad (2.2)$$

$$T_b = \frac{[\mu \vartheta_c d_w l_w n + 0.6 \pi d_w l_w n (C + \mu \sigma_n)]}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

$$\vartheta_c = \tau = \sqrt{[f_c' - 2f_t(-1 + \sqrt{1 + \frac{f_c'}{f_t}})] [\sigma_n + f_t]} \leq 0,2 f_{cm} \quad (2.4)$$

$$\sigma_n = \sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \quad (2.7)$$

$$k = 1,05 E_{cm} \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (2.8)$$

$$\frac{P_1}{A_S E_S} = \varepsilon_1 \quad (2.9)$$

$$\frac{P_2}{A_S E_S} = \varepsilon_2 \quad (2.10)$$

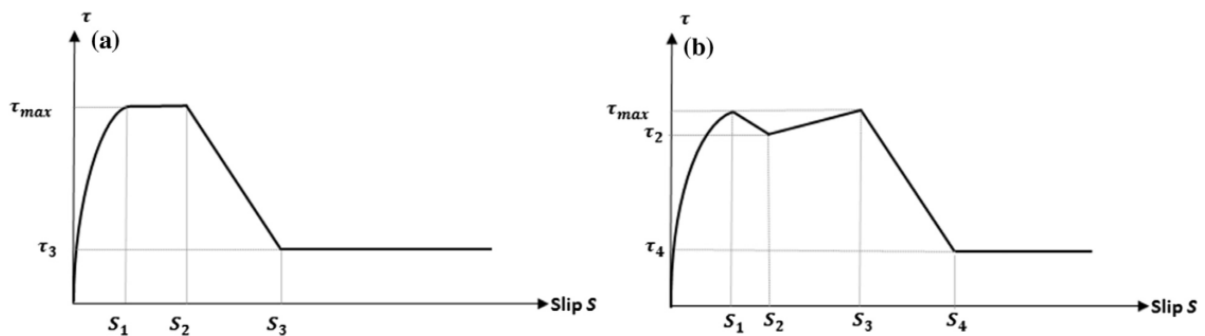
$$\varepsilon_c = \frac{P_1 - P_2}{A_S E_S} v = |\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{s2}| v \quad (2.11)$$

Onde: T_b é a força máxima de aderência na direção da cordoalha; A_b é a área nominal da cordoalha, d_b é o diâmetro nominal da cordoalha; L_b é o comprimento embutido da cordoalha no concreto; d_w é o diâmetro do fio externo da cordoalha; l_w é o passo da hélice dos fios que formam

a cordoalha; n é número de fios da cordoalha; μ é o coeficiente de atrito; C é a coesão entre o concreto e o aço; σ_n é a tensão normal perpendicular aos eixos das cordoalhas; θ é o ângulo de inclinação dos fios externos e foi adotado o valor de 9° ; τ é a resistência ao cisalhamento; f_{cm} é resistência média á compressão do concreto; f_t é a resistência a tração do concreto; ε_c é a deformação específica do concreto; ε_{c1} é a deformação na tensão máxima; P_1 é a força inicial na cordoalha; P_2 é a força após a liberação da cordoalha, tendo valor nulo quando a laje é cortada, pois reapresenta a força na entrada da cordoalha na laje; A_S é a área nominal do aço; E_S é o módulo de elasticidade do aço; E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto; ε_1 é a deformação da cordoalha em P1; ε_2 é a deformação da cordoalha em P2; ν é o coeficiente de Poisson.

Após o cálculo da força de aderência na cordoalha, a Figura 2.32 apresenta uma comparação do modelo analítico desenvolvido por Khalaf (2016) com o modelo de aderência de barras nervuradas apresentado no Código Modelo da *fib* (2013).

Figura 2.32 – Curva tensão-deslizamento: a) barras nervuradas a) cordoalhas de 7 fios



(fonte: KHALAF; HUANG, 2016)

De acordo com a Figura 2.32, constata-se visualmente a distinção entre os modelos para barras nervuradas do Código Modelo 2010 para o de cordoalhas de 7 fios demonstrada por Khalaf e Huang (2016). A seguir são apresentadas as equações que compõem a curva da tensão de aderência de Khalaf e Huang (2016) para cordoalhas lisas de 7 fios, apresentada na Figura 2.32, juntamente com o Quadro 2.2, que apresenta os parâmetros adotados de acordo com as pesquisas de Khalaf e Huang (2016) e Parkhats et al. (2021).

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq S \leq S_1 \quad (2.12)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_2) \left(\frac{S - S_1}{S_2 - S_1} \right) \quad \text{para } S_1 \leq S \leq S_2 \quad (2.13)$$

$$\tau = \tau_2 + (\tau_{max} - \tau_2) \left(\frac{S - S_2}{S_3 - S_2} \right) \quad \text{para } S_2 \leq S \leq S_3 \quad (2.14)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_4) \left(\frac{S - S_3}{S_4 - S_3} \right) \quad \text{para } S_3 \leq S \leq S_4 \quad (2.15)$$

$$\tau = \tau_f \quad \text{para } S \geq S_4 \quad (2.16)$$

Quadro 2.2 – Parâmetros das cordoalhas lisas de sete fios

VARIÁVEL	VALOR
S_1	0,25 mm
S_2	0,50 mm
S_3	3,50 mm
S_4	8,00 mm
τ_2	$0,75 \cdot \tau_{max}$
τ_4	$0,35 \cdot \tau_{max}$
α	0,50

(fonte: PARKHATS et al, 2021)

2.6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

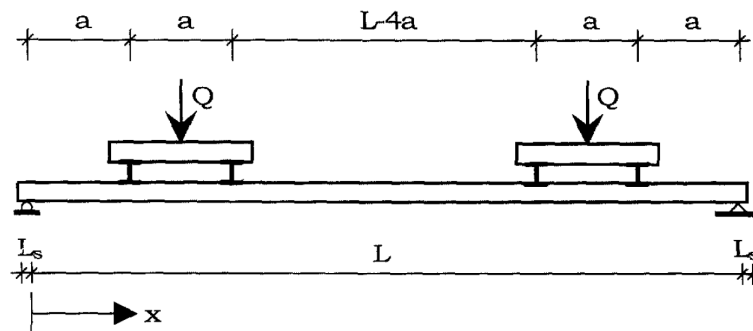
No momento do projeto de estruturas é comum que sejam realizadas diversas análises, com o propósito de se alcançar uma solução satisfatória, aliando tanto o fator econômico, quanto o fator segurança na confiabilidade da estrutura. Nessa perspectiva, Bathe (2014) declara que o Método dos Elementos Finitos é de suma importância, em alguns casos, indispensável para a análise de problemas na Engenharia. De acordo com Vellasco et al. (2014), os modelos numéricos possibilitam a redução de investigações experimentais juntamente com uma maior praticidade para o projetista. Contudo, ensaios experimentais possibilitam a calibração e formulações para as equações que regem os comportamentos da estrutura. Dessa forma, os modelos numéricos não pretendem substituir os ensaios experimentais, mas sim auxiliar os projetistas no âmbito da investigação do comportamento estrutural.

Nesse contexto, diversas pesquisas foram realizadas para investigar o comportamento das lajes alveolares. Na Europa, o projeto HOLCOTORS promoveu inúmeros ensaios experimentais com objetivo de desenvolver métodos numéricos para o projeto de lajes alveolares. Os ensaios foram documentados pelo Centro de Pesquisa técnica VTT (*Valtion teknillinen tutkimuskeskus*) na Finlândia e o desenvolvimento dos modelos numéricos pela Universidade de Chalmers, na Suécia.

No Brasil, foram realizados diversos ensaios no NETPRE (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), apresentando pesquisas, desde a padronização dos ensaios até as com caráter investigativo do comportamento das lajes alveolares.

Yang (1994) foi um dos pioneiros a realizar análises experimentais e numéricas de lajes alveolares, avaliando o comportamento das lajes quando submetidas aos esforços cisalhantes. O autor propôs uma formulação analítica para determinar a capacidade resistente à força cortante em lajes alveolares protendidas, realizando comparações com resultados experimentais obtidos em ensaios realizados no VTT, paralelamente a simulações numéricas. A Figura 2.33 apresenta o estudo realizado por Yang (1994) dos ensaios realizados pelo VTT.

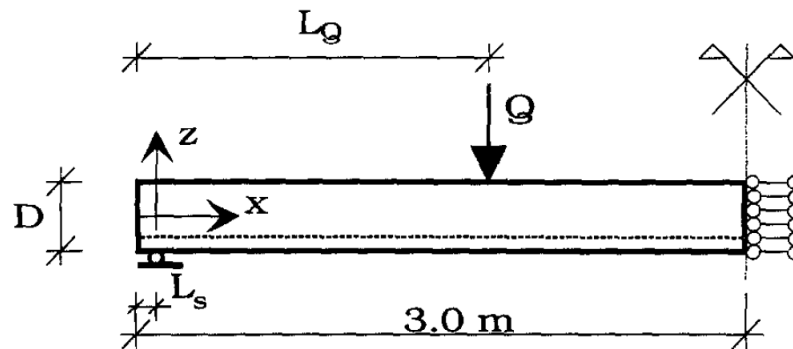
Figura 2.33 – Esquema dos ensaios analisados por Yang (1994)



(fonte: YANG, 1994)

Para as análises numéricas o autor utilizou o programa ABAQUS em sua versão do ano de 1989, modelando o concreto com elementos quadráticos com integração reduzida para análises tridimensionais e para análises bidimensionais aplicando o estado plano de tensões com elementos biquadráticos com integração reduzida. Para representação do aço, foi utilizada a função "Rebar" pressupondo uma aderência perfeita entre concreto e aço, desconsiderando o deslizamento da cordoalha, considerando a transferência de força gradual na extremidade da laje através de uma curva parabólica. Os resultados apresentados pela formulação analítica e a modelagem numérica demonstraram alta correlação com os resultados experimentais, sendo eficientes para determinar a capacidade resistente aos esforços cortantes das lajes com características semelhantes às lajes ensaiadas. O modelo numérico de Yang (1994) é mostrado na Figura 2.34.

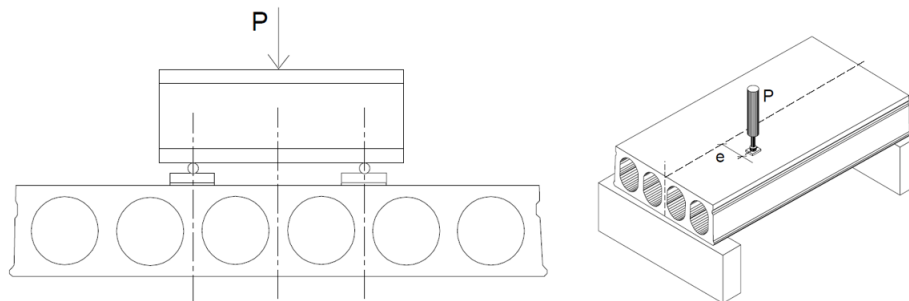
Figura 2.34 – Esquema estático de Yang (1994)



(fonte: YANG, 1994)

Broo e Lundgren (2002) estudaram o comportamento de lajes alveolares ao cisalhamento e à flexão através de simulações numéricas. Os autores realizaram a modelagem numérica de ensaios experimentais realizados por Pajari (2004) no instituto VTT, que apresentava lajes submetidas a esforços de cisalhamento e torção, com diferentes disposições de carregamento e seções transversais. A Figura 2.35 apresenta algumas informações de alguns ensaios realizados por Pajari (2004).

Figura 2.35 – Ensaio realizado por Pajari (2004)

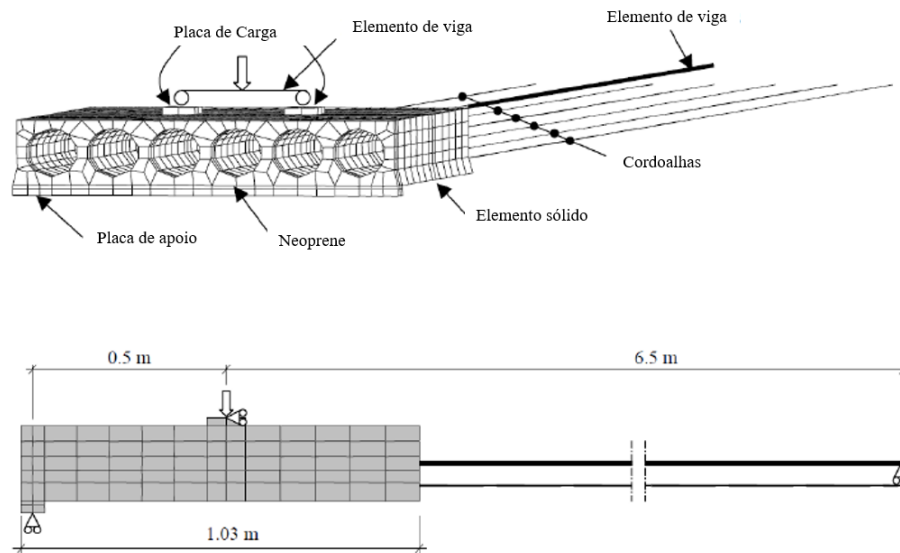


(fonte: PAJARI, 2004)

Para as análises numéricas, foi utilizado o programa DIANA 7.2, modelando a estrutura com elementos sólidos na região suscetível à falha por cisalhamento, enquanto no seu restante aplicando elementos de viga, conforme a Figura 2.36. A composição da malha com diferentes elementos visava a economia no processamento de dados, que seria elevada em uma malha composta apenas por elementos sólidos. Alguns resultados obtidos na avaliação do efeito de cisalhamento em peças com altura de até 200 mm foram discrepantes em relação aos ensaios (Figura 2.37). O autor atribuiu a divergência ao método de modelagem, ocorrendo a dificuldade de avaliar a resistência à torção do elemento de viga. Em continuidade aos estudos, Broo, Lundgren e Engström (2005) constataram que aplicação de elementos sólidos juntamente com

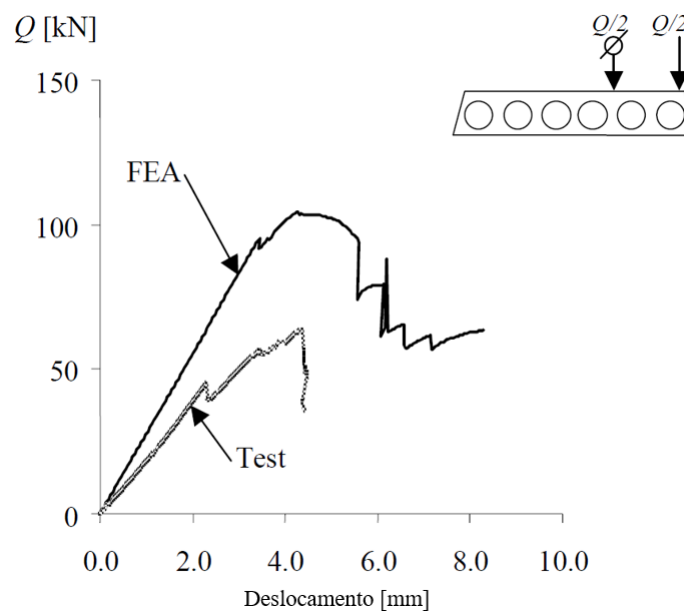
elementos de contato na região do apoio, promoviam um modelo numérico com comportamento próximo ao dos ensaios.

Figura 2.36 – Modelo numérico de Broo e Lundgren (2002)



(fonte: BROO E LUNDGREN, 2002)

Figura 2.37 – Resultados do modelo numérico inicial

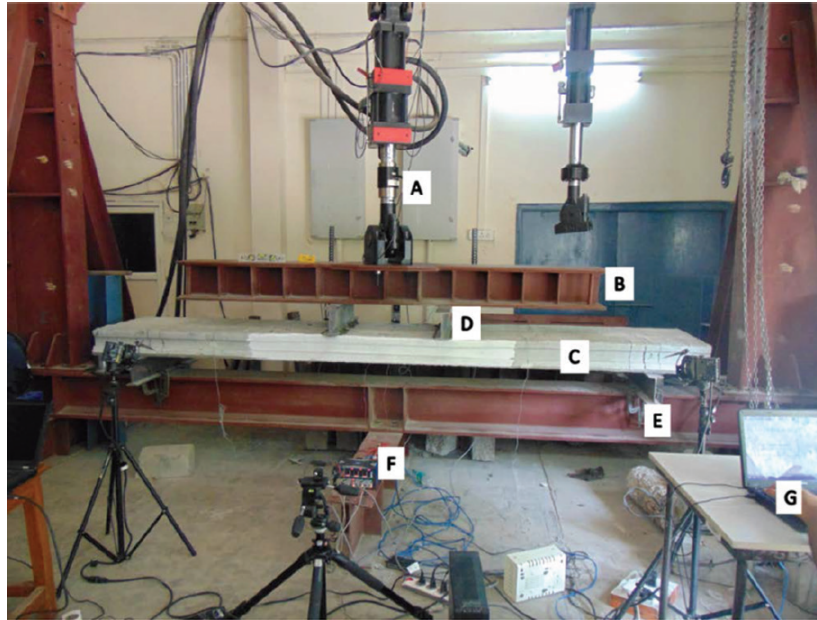


(fonte: BROO E LUNDGREN, 2002)

Pachalla e Prakash (2017) avaliaram a influência de aberturas em lajes alveolares. Os autores realizaram ensaios experimentais juntamente com a criação do modelo numérico no programa ANSYS. Os ensaios demonstraram que a presença de abertura tem influência direta na rigidez

das lajes promovendo a alteração do modo de ruptura, devido às concentrações de tensões nas proximidades das aberturas. A descrição do ensaio é mostrada na Figura 2.38.

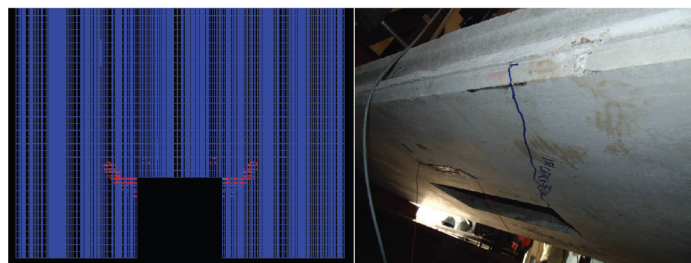
Figura 2.38 – Exemplo de um ensaio realizado por Pachalla e Prakash (2017)



(fonte: PACHALLA E PRAKASH, 2017)

No modelo numérico (Figura 2.39), os autores aplicaram o elemento tridimensional SOLID 65 para representar o concreto e o elemento de treliça LINK 180, considerando uma perfeita aderência entre o concreto e o aço. Foi adotada a superfície de ruptura multiaxial apresentada por Willam e Warnke (1975) para o concreto, enquanto para o aço foram aplicadas as relações propostas por Ramberg e Osgood (1943). O modelo numérico representou o comportamento das lajes, apresentando as fissuras e os deslocamentos similares aos ensaiados.

Figura 2.39 – Comparação modelo numérico com ensaio experimental de Pachalla (2017)

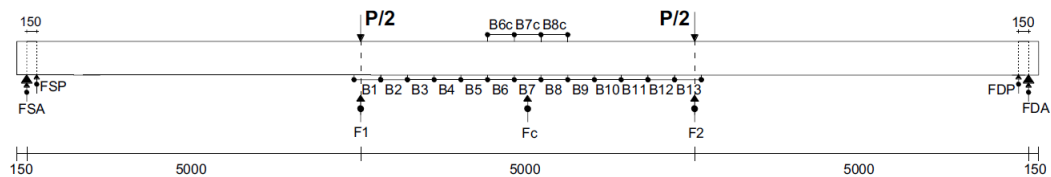


(fonte: PACHALLA E PRAKASH, 2017)

Michelini et al. (2020) , realizaram os ensaios e o modelo numérico da ruptura de lajes com grandes espessuras e longos vãos, no programa ABAQUS, realizando testes de flexão e cisa-

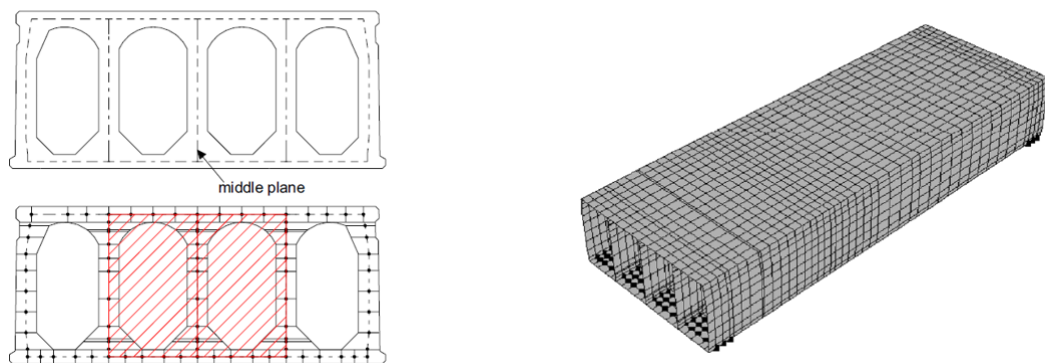
lhamento mostrados na Figura 2.40. Na modelagem (Figura 2.41), foi aplicada uma malha de elementos de casca com 4 nós com integração reduzida, aplicando a função "rebar layer" para representar as cordoalhas. O modelo constitutivo para representação do concreto foi o de Ottosen (1977) e para o aço um modelo com endurecimento. Os resultados demonstraram alto valor de correspondência com os valores experimentais, demonstrando que o MEF possibilita análises de lajes alveolares isoladas, além de possibilitar a verificação de conjuntos de lajes ou situações de contorno não triviais (presença de aberturas, cargas concentradas, diferentes situações de apoios).

Figura 2.40 – Ensaio realizado por Michelinei et al. (2020)



(fonte: MICHELINI et al. , 2020)

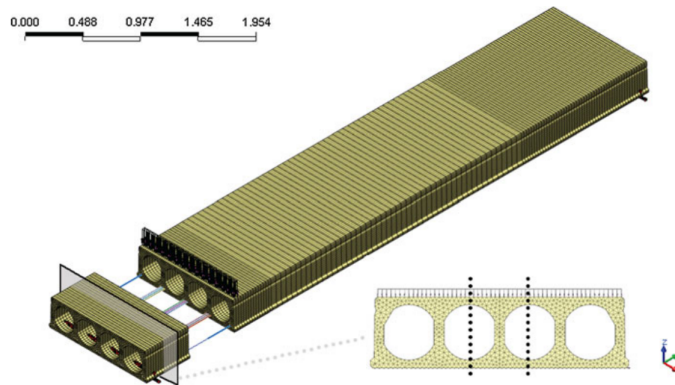
Figura 2.41 – Modelo numérico Michelinei et al. (2020)



(fonte: MICHELINI et al. , 2020)

A pesquisa conduzida por Brunesi, Bolognini e Nascimbene (2015) teve como objetivo analisar a resposta ao esforço cortante de lajes alveolares, variando a altura, de 20 a 50 cm, e o formato dos alvéolos. Na Figura 2.42, é apresentado o modelo numérico de uma das lajes utilizadas na pesquisa. Os modelos numéricos demonstraram uma boa correlação com os resultados experimentais, utilizando mecanismos de fratura não lineares para investigar o efeito da protensão no modelo.

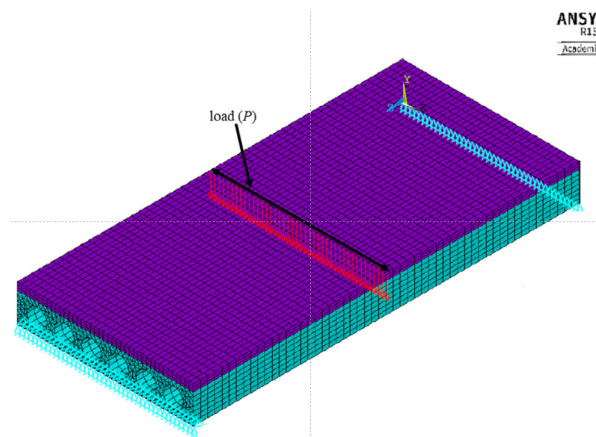
Figura 2.42 – Modelo numérico Brunesi, Bolognini e Nascimbene (2015)



(fonte: BRUNESI; BOLOGNINI E NASCIMBENE, 2015)

Adawi, Youssef e Meshaly (2016) realizaram um estudo para avaliar as propriedades não-lineares da interface entre uma laje alveolar e sua capa estrutural. Eles utilizaram o programa ANSYS versão 15.0 e representaram o concreto com o elemento SOLID 65, a armadura com o elemento LINK 180, e aplicaram o elemento COMBIN39 para modelar a região de interface de contato entre o concreto e a capa estrutural, bem como entre o concreto e a armadura. Os resultados apresentaram uma boa correlação experimental com o modelo numérico, sendo o modelo numérico exibido na Figura 2.43.

Figura 2.43 – Modelo numérico Adawi, Youssef e Meshaly (2016)



(fonte: ADAWI; YOUSSEF E MESHALY, 2016)

Em termos de estudos nacionais que conduziram modelagens numéricas de lajes alveolares, citam-se os trabalhos de Campos (2017), Silva (2020) e Sales (2020). A pesquisa de Campos (2017) envolveu modelagens numéricas de lajes com diferentes alturas no programa DIANA, avaliando o comportamento da laje na fase de ruptura, considerando a influência do preenchimento dos alvéolos e do uso de capa estrutural. Os resultados do modelo demonstraram uma correlação

significativa entre a curva de carga-deslocamento do ensaio experimental e a do modelo, mesmo não utilizando uma curva de tensão e deslizamento para representar a aderência entre o aço e o concreto.

A pesquisa conduzida por Silva (2020) teve como objetivo representar o comportamento de lajes com aberturas sujeitas a ensaios de cisalhamento. O programa ABAQUS foi empregado, utilizando um elemento sólido C3D8R e um elemento de barra 'truss' T3D2, juntamente com uma simulação de conexão rígida entre os elementos de concreto e aço. Os resultados destacaram o impacto significativo das aberturas na redistribuição das tensões nas nervuras. O modelo numérico foi capaz de prever com precisão o comportamento e as cargas últimas de modelos de lajes alveolares protendidas, tanto com quanto sem aberturas.

A pesquisa realizada por Sales (2020) teve como objetivo avaliar vários fatores, incluindo o comprimento de transferência, a perda de protensão, o comprimento de transferência da força, a altura da laje alveolar e a forma dos alvéolos, e sua influência na resistência ao esforço cortante das lajes alveolares. O modelo foi desenvolvido no programa DIANA, utilizando elementos isoparamétricos para o concreto e um elemento de treliça para a armadura. Um aspecto importante foi a inclusão de um elemento na interface para representar o deslizamento entre o aço e o concreto, capturando assim a aderência entre os materiais. De maneira abrangente, o modelo numérico conseguiu representar de forma precisa as deformações dos materiais.

De forma geral, as simulações numéricas dos ensaios de flexão conseguiram reproduzir o comportamento das lajes alveolares. Contudo, de acordo com Sales (2020), para ensaios de cisalhamento, ocorreram algumas divergências, principalmente com o surgimento de uma diferença na rigidez inicial de lajes alveolares, que estaria relacionada à dificuldade de obtenção das propriedades elásticas do concreto, em especial o módulo de elasticidade.

3 ANÁLISE NUMÉRICA UTILIZANDO O ANSYS

No presente capítulo é exposta uma breve revisão sobre elementos finitos. Além disso, há uma descrição detalhada dos procedimentos para geração dos modelos numéricos de lajes alveolares utilizando o programa ANSYS.

3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O conceito básico do MEF consiste na discretização de um meio contínuo em um número finito de elementos, sendo seu comportamento representado por um conjunto de relações entre as tensões e deslocamentos (MCGUIRE; GALLAGHER; ZIEMIAN, 2015). O método é amplamente utilizado na avaliação do comportamento não linear dos materiais, como aço e concreto, geralmente simplificado em práticas de projeto.

Visando a aplicação computacional do MEF, a companhia *ANSYS Inc.* desenvolveu na década de setenta do século XX as primeiras versões do programa ANSYS para a realização de simulações numéricas de problemas de engenharia. O programa ainda apresenta interface de auxílio ao usuário extremamente detalhada, disponibilizando suporte técnico à licença de uso fornecida pelo laboratório do CEMACOM-PPGEC-UFRGS, justificando a escolha do programa para o desenvolvimento da pesquisa.

A interface do ANSYS oferece uma vasta gama de ferramentas para a estruturação dos problemas, apresentando diversos elementos finitos e modelos constitutivos dos materiais para a construção de modelos numéricos. Além das ferramentas disponíveis na plataforma, apresenta a funcionalidade de customização ao usuário, através do uso da linguagem de programação *Fortran 77*, permitindo a inserção de novas funcionalidades, tais como, novos elementos finitos ou até mesmo outros modelos constitutivos com o uso da sub-rotina *USERMAT*.

Conforme detalhado por Lazzari (2020), o programa ANSYS ainda dispõe de uma linguagem denominada APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), a qual serve para desenvolver os modelos numéricos por intermédio de dados de texto (*script*), minimizando seleções na interface visual do programa. A linguagem possibilita ao usuário a criação de variáveis auxiliares e o uso de estruturas de controle (*IF, DO*), que auxiliam na execução do pré e pós processamento do modelo. Tal metodologia viabiliza ao usuário um ganho na velocidade do desenvolvimento do modelo, pois, minimiza, ou até mesmo dispensa, seleções na interface visual do programa,

possibilitando a automatização do modelo e de seus resultados.

A seguir são apresentadas as informações para a geração do modelo numérico das lajes alveolares, descrevendo os elementos finitos empregados, escolha dos modelos constitutivos dos materiais e a descrição da customização através do uso da USERMAT.

3.2 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

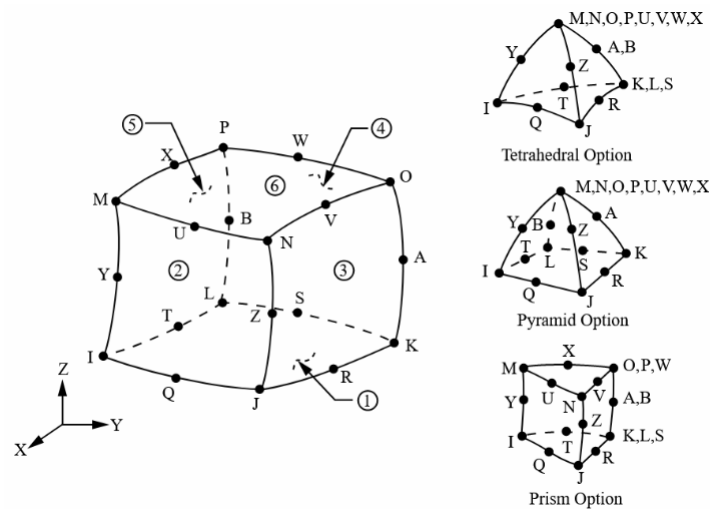
Para resolver os problemas relacionados com lajes alveolares protendidas, foram adotados dois modelos, um para a situação de falha por flexão e outro para a falha por cisalhamento. Ambos os modelos utilizam o elemento hexaédrico SOLID186 para as áreas de concreto, atuador e suportes. No que diz respeito à modelagem da armadura, o modelo utilizado para os testes de flexão se beneficia da metodologia de armadura incorporada, conforme descrita por Lazzari (2016), utilizando o elemento MESH 200 em conjunto com o REINF264.

Foi adotada a metodologia de armadura discreta para lidar com situações de ruptura devido ao esforço cortante, usando o elemento LINK180 para representar as armaduras em conjunto com o elemento de combinação COMBIN39, que tem a finalidade de representar o comportamento da aderência entre o aço e o concreto. Informações detalhadas sobre esses elementos finitos podem ser encontradas no '*Help*' do ANSYS.

3.2.1 SOLID186

Para modelagem das lajes de concreto foram aplicados elementos hexaédricos SOLID186, elemento composto por vinte nós com três graus de liberdade por nó (translações nos eixos X, Y e Z) com funções de interpolação quadráticas. Este elemento permite a escolha entre a integração completa ou reduzida, podendo ser utilizado em sua forma homogênea ou estruturado por camadas (ANSYS, 2022). Neste trabalho foi aplicada a integração completa e a forma homogênea do elemento. Sua formulação é baseada em Zienkiewicz (1977), suportando materiais com plasticidade, fluência e grandes deformações. Além de sua forma hexaédrica, é possível uma adaptação da geometria do elemento, podendo apresentar configuração piramidal, prismática ou tetraédrica, mostradas na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Elemento SOLID186



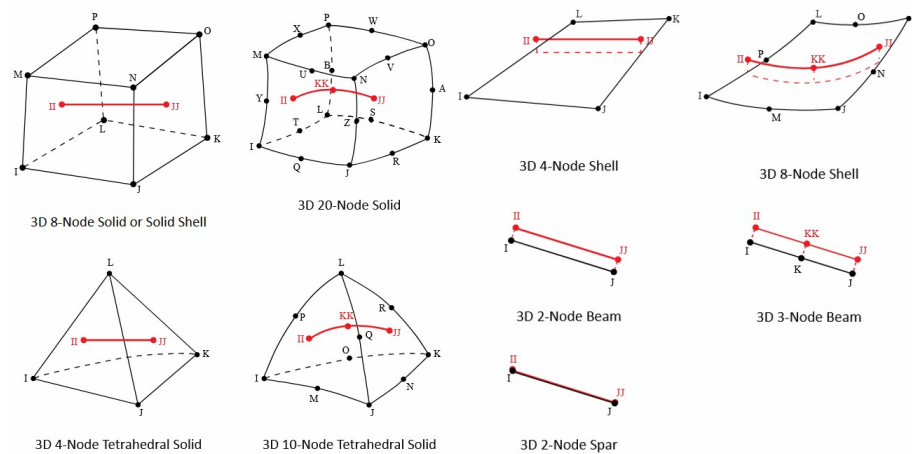
(fonte: ANSYS, 2022)

O elemento SOLID186 foi escolhido por apresentar bons resultados, sem a necessidade da discretização por malhas refinadas, as quais são necessárias em elementos com menor quantidade de nós e interpolação linear, como é o caso do SOLID185. Um dos pontos chave para o uso do elemento, foi a compatibilidade com o elemento REINF264 e LINK180, que possibilita a representação do concreto tanto pelo método de armadura incorporada quanto por armadura discreta. Além disso, por ser categorizado como elemento de tecnologia atual (*current-technology element*), é compatível com novas funcionalidades disponíveis no programa, tanto para materiais novos, como é o caso do modelo *DP-Concrete*, quanto para materiais customizáveis pelo usuário na interface USERMAT.

3.2.2 REINF264

O elemento de reforço REINF264 é compatível com elementos de barra, placa, casca ou elementos sólido (ANSYS, 2022). Este elemento foi aplicado para representar as armaduras ativas submetidas à pré-tração com aderência perfeita no modelo de armadura incorporada. A Figura 3.2 apresenta as possibilidades de uso do elemento.

Figura 3.2 – Elemento REINF264



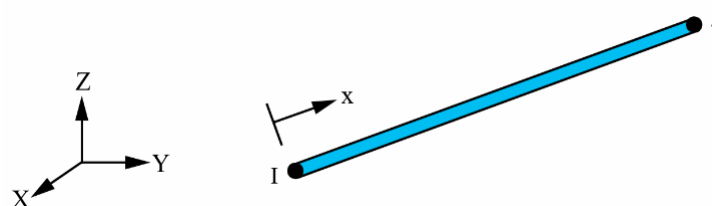
(fonte: ANSYS, 2022)

Neste trabalho o elemento REINF 264 foi aplicado pelo método de malha independente (*mesh-independent method*), descrito por Lazzari (2020) e Benincá (2020). Resumidamente, aplicam-se elementos guias (MESH 200), que tem por função apenas inserir a posição dos elementos de reforço dentro do elemento base, sem a necessidade que os elementos de reforço apresentem nós coincidentes com o elemento base, proporcionando maior facilidade na geração da malha de elementos finitos.

3.2.3 LINK180

O LINK180, apresentado na Figura 3.3, é um elemento unidimensional com diversas aplicações na engenharia. O elemento pode ser utilizado para modelar treliças, cabos, ligações, molas, etc. Apresenta um comportamento de tensão-compressão uniaxial com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais X, Y e Z, onde plasticidade, viscoelasticidade e grandes deformações podem ser consideradas. São suportadas as opções só de tração (cabo) ou só de compressão. O mesmo pode ser utilizado para representar, de forma discreta, armadura ativa com e sem aderência (ANSYS, 2022).

Figura 3.3 – Elemento LINK180



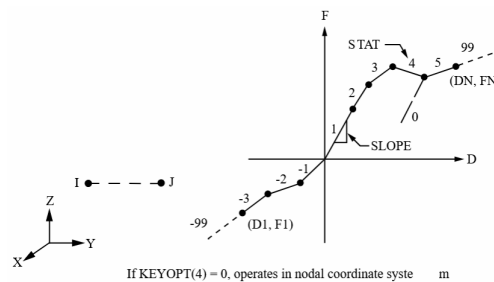
(fonte: ANSYS, 2022)

A escolha do LINK180 foi motivada pela necessidade de utilizar o elemento COMBIN39 no modelo numérico para lidar com situações de ruptura ao cisalhamento. Durante os ensaios de cisalhamento, foi fundamental representar a aderência não perfeita entre o concreto e o aço, o que foi realizado por meio do elemento de combinação COMBIN39, que é compatível com o LINK180, mas não com o REINF264. Além disso, a utilização do elemento COMBIN39 requer nós distintos entre o concreto e o aço, o que não é possível ao empregar a metodologia de armadura incorporada do REINF264.

3.2.4 COMBIN39

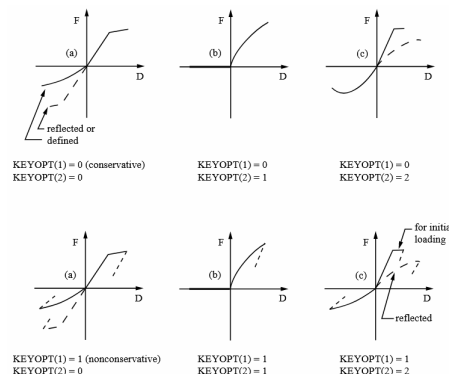
O elemento COMBIN39, demonstrado na Figura 3.4, é um elemento unidirecional de mola não linear com comportamento governado por uma curva de força-deslizamento, sendo útil para uma variedade de análises envolvendo arrancamento. Este elemento pode atuar no sentido longitudinal (translações nas direções nodais X, Y e Z) ou no sentido torsional (rotações nas direções nodais x, y e z) (ANSYS, 2022). Quando atua em um único grau de liberdade por nó, o elemento deve ser aplicado, preferencialmente, a nós coincidentes. Seu comportamento tração-compressão pode ser definido de acordo as opções do elemento de acordo com a Figura 3.5.

Figura 3.4 – Elemento COMBIN39



(fonte: ANSYS, 2022)

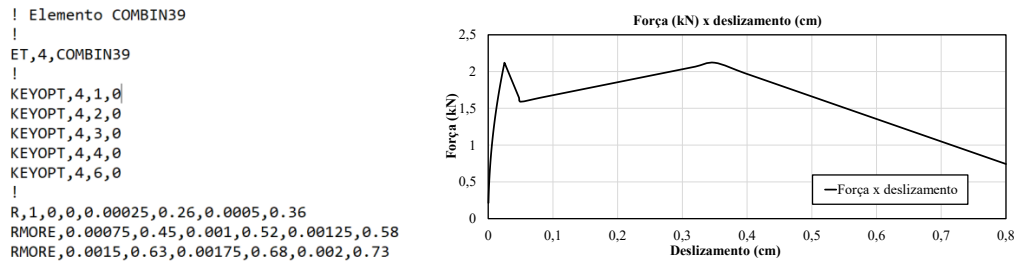
Figura 3.5 – Opções do elemento COMBIN39



(fonte: ANSYS, 2022)

Para os modelos numéricos de lajes alveolares foi adotado o modelo de tração-compressão padrão conservativo do ANSYS de acordo com a Figura 3.5. A curva força-deslizamento foi inserida através dos comandos R e RMORE, sendo demonstrando sua inserção na Figura 3.6. A curva inserida refere-se ao modelo de Khalaf e Huang (2016) para cordoalhas de 7 fios, o qual foi detalhado na seção 2.5.3.

Figura 3.6 – Inserção da curva Força-Deslizamento

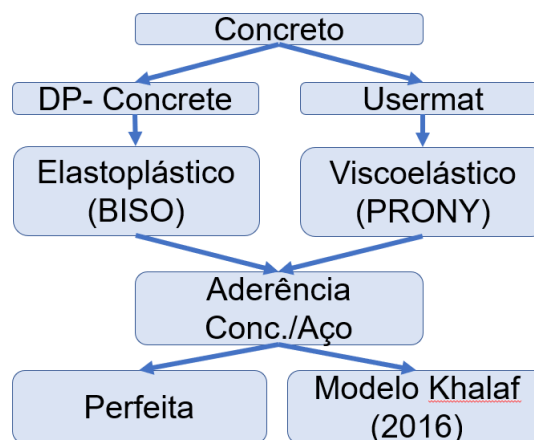


(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

No presente trabalho, os modelos constitutivos foram organizados entre os dois materiais que constituem as lajes alveolares, aço e concreto. Para o concreto, foram empregados o modelo de *DP-Concrete*, disponível no ANSYS, e um modelo customizado, incorporado ao ANSYS pela subrotina *USERMAT* (SPESSATTO, 2022), enquanto para a representação do aço foi empregado o modelo elastoplástico com endurecimento e um viscoelástico. A Figura 3.7 apresenta o fluxograma para a adoção do modelo constitutivo no análise numérica.

Figura 3.7 – Fluxograma modelos constitutivos do modelo numérico



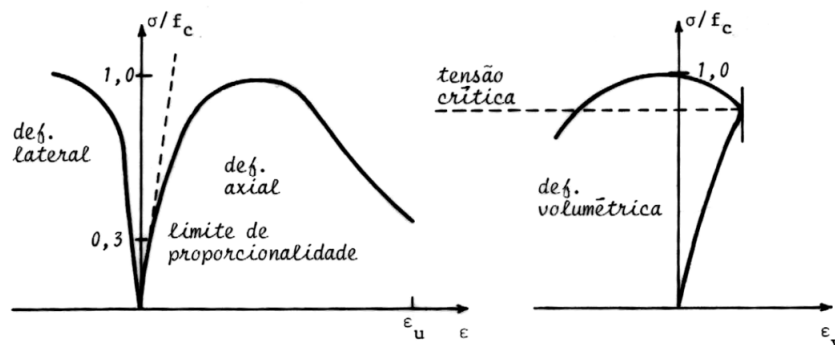
(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.1 Concreto

O concreto pode ser definido como um sistema que apresenta duas fases: uma matriz, constituída pela pasta de cimento em processo de endurecimento, envolvendo um aglomerado de partículas do agregado. A presença das microfissuras, principalmente na região entre agregado e pasta, interfere diretamente no comportamento mecânico do material. A resposta não-linear do material está diretamente relacionada à propagação dessas microfissuras durante a aplicação do carregamento (CHEN; HAN, 1988).

Uma forma de demonstrar a interação entre as microfissuras e o comportamento mecânico do concreto, ocorre através de ensaios de compressão axial com carregamentos de curta duração. Os ensaios conseguem delimitar três estágios na curva tensão-deformação, demonstrados na Figura 3.8 (CAMPOS FILHO, 2022). A primeira região é definida por tensões de compressão até 30% da resistência do concreto, apresentando um comportamento próximo ao linear elástico, sendo que as eventuais microfissuras existentes permanecem inalteradas.

Figura 3.8 – Relações típicas da tensão de compressão com as deformações axial, lateral e volumétrica



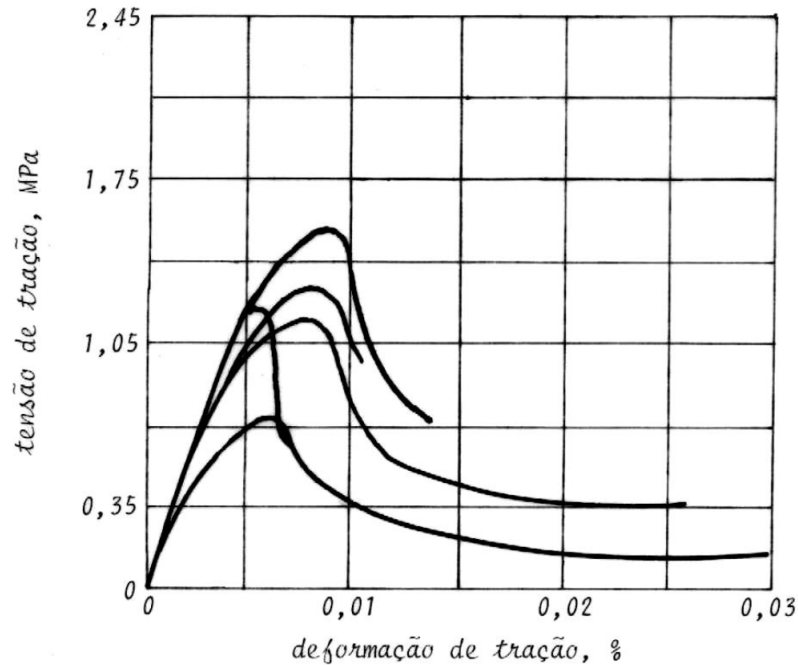
(fonte: CAMPOS FILHO, 2022)

Na região entre 0,3 a 0,75 do f_c (Resistência média do concreto), as microfissuras começam sua extensão até sua ligação com a matriz, promovendo o início da não linearidade no comportamento do concreto. Sob tensões acima de 0,75 f_c , tensão definida como crítica, a propagação das microfissuras torna o sistema instável, atingindo a tensão de ruptura, quando ocorre a falha no material que impossibilita o acréscimo de incrementos de tensão.

Para um ensaio típico de tração uniaxial, demonstrado na Figura 3.9, às curvas tensão-deformação são lineares até atingirem altos níveis de tensão, apresentando uma forma semelhante às curvas de compressão, devido à presença das microfissuras, porém com algumas diferenças. Para tensões inferiores a 60 % da resistência à tração do concreto (f_{ct}), a microfissuração pode ser descartada, ocorrendo o aumento da propagação das microfissuras junto ao agregado a partir dessa tensão.

Tensões acima de 75 % proporcionam uma propagação de fissuras instável até a ruptura do elemento.

Figura 3.9 – Curvas tensão-deformação para o concreto sob tração



(fonte: CAMPOS FILHO, 2022)

Para análises diferidas no tempo, constata-se que mesmo para tensões constantes, ocorre o aumento das deformações no concreto, demonstrando seu comportamento viscoso, sendo tal efeito denominado fluência. O concreto ainda tende a apresentar diminuição do seu volume (retração) e ganho da resistência ao longo do tempo. Lazzari (2020) constata que tais efeitos estão vinculados a heterogeneidade na composição do concreto, ocorrendo a coexistência entre uma fase sólida (cimento e agregado), líquida (água) e gasosa (ar aprisionado), sendo que a difusão de água no interior da peça e trocas de água com o ambiente ocorrem no decorrer do tempo.

Desta maneira, pode-se definir que o material concreto apresenta componentes dos três modelos reológicos básicos: elástico, plástico e viscoso. A definição de qual modelo será adotado para representação de seu comportamento estará ligada ao problema a ser analisado e a demanda computacional necessária. Para casos que envolvem altas cargas aplicadas em um curto período do tempo, como é o caso de ensaios experimentais, uma possível forma de representação seria pelo modelo elastoplástico. Desta forma, as deformações instantâneas têm origem no modelo elástico, enquanto as deformações inelásticas provem do modelo plástico.

Tendo em vista a alta complexidade na análise do comportamento do concreto, foram adotados dois modelos com superfícies distintas: *Drucker-Prager* que está presente na biblioteca

do ANSYS; Modelo customizado pelo usuário (USERMAT) detalhado por Soares (2022) e continuado na pesquisa de Spessatto (2022), ambos modelos detalhados a seguir.

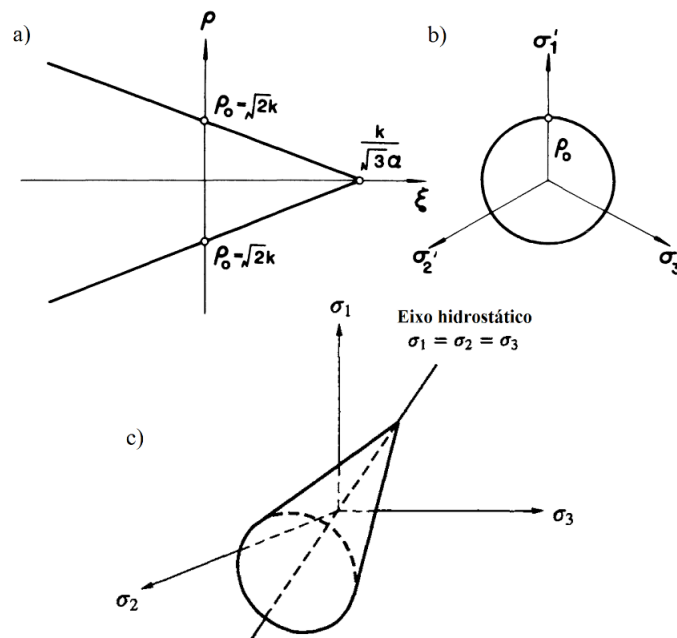
3.3.1.1 Drucker-Prager

O modelo de DP-*Concrete*, implementado nas versões recentes do ANSYS, apresenta duas superfícies: uma superfície representando o comportamento do material à tração e tração-compressão (podendo ser uma superfície de DP-*Concrete* ou de *Rankine*); e uma superfície de plastificação no comportamento de compressão ANSYS (2022). A superfície de plastificação original de DP é representada pela Equação 3.1 e ilustrada na Figura 3.10, compondo um cone circular no espaço tridimensional, formando círculos nas intersecções dos planos desviadores e retas nos planos meridianos.

$$f(I_1, J_2) = \alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (3.1)$$

Sendo que α e k são parâmetros dos materiais.

Figura 3.10 – Superfície de Drucker-Prager. (a) Plano meridiano; (b) Plano desviador ; (c) Espaço tridimensional de tensões principais



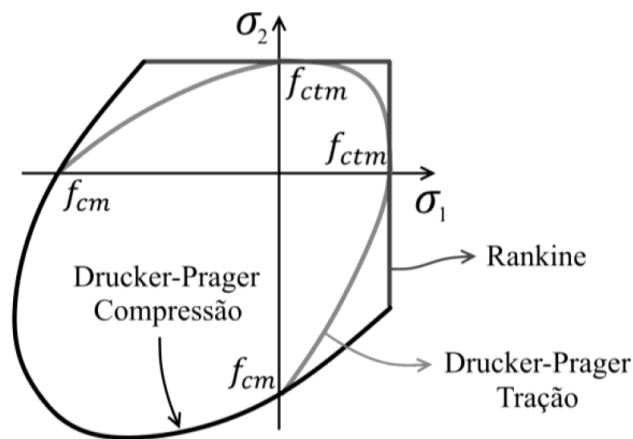
(fonte: BENINCÁ, 2020)

Benincá (2020) declara que para valores de compressão, a superfície se torna representativa do comportamento do concreto, mas falha na distinção do comportamento de tração para compressão, devido à formação de retas nos meridianos. Nesta situação, o modelo DP-*Concrete* indica o uso da superfície de DP para representar o comportamento à compressão do concreto e a utilização de

uma segunda superfície para o comportamento de tração e tração-compressão, disponibilizando a superfície de *Rankine* ou outra superfície de DP ajustada nos planos meridianos.

Do ponto de vista numérico, a composição do modelo com duas superfícies de DP (abreviada para DP-DP), proporciona uma maior estabilidade numérica. A composição de duas superfícies é ilustrada na Figura 3.11, apresentando numa simplificação apenas com as tensões σ_1 e σ_2 e realizando uma comparação com os outros modelos.

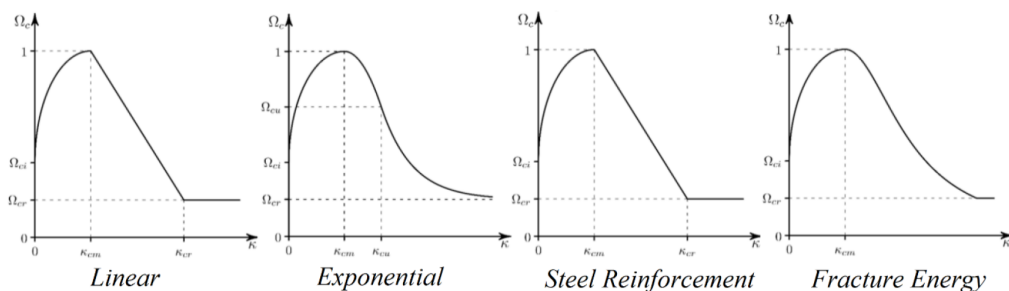
Figura 3.11 – Comparação das superfícies DP-*Rankine* e DP-DP



(fonte: LAZZARI, 2016)

O modelo DP-*Concrete* ainda define explicitamente o ponto onde ocorre a plastificação, adotando para valores negativos da função f um comportamento elástico e a partir do instante que a função f se torna nula, inicia-se o processo de movimentação da superfície de plastificação, promovendo o endurecimento (expansão) ou amolecimento (contração) do modelo. A superfície de endurecimento pode assumir alguns comportamentos, o ANSYS disponibiliza que o usuário defina no modelo HSD (*hardening, softening, dilatation*). O modelo HSD disponibiliza quatro opções: *linear, exponential, fracture energy e steel reinforcement*, mostrados na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Leis de endurecimento do concreto comprimido no modelos HSD



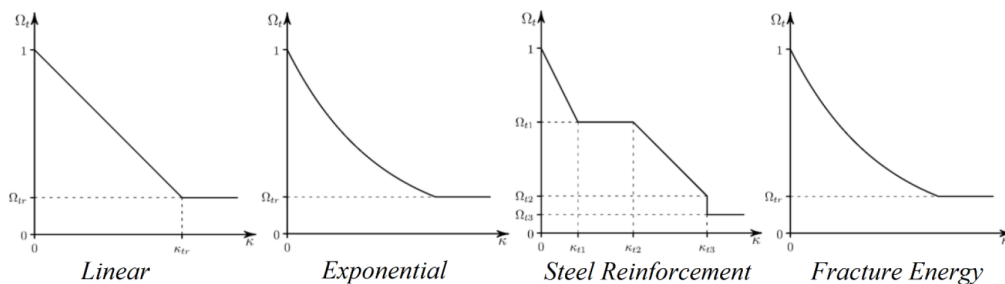
(fonte: ANSYS, 2022)

O ANSYS disponibiliza em seu manual explicações sobre cada modelo e Benincá (2020) apresenta nos apêndices de sua pesquisa algumas explicações e conclusões a respeito de cada modelo, detalhando cada superfície de plastificação e as informações adicionais necessárias para cada modelo, comparando os resultados para um exemplo base. Nesta pesquisa foi adotado o modelo HSD *Linear*, por se tratar do modelo que demanda uma menor quantidade de parâmetros, alguns de difícil obtenção ou determinação, apresentando boa correlação dos resultados.

No que diz respeito ao fenômeno de esmagamento do concreto, o modelo de *DP-Concrete* não apresenta uma determinação exata do fenômeno, sendo relacionada a não convergência da solução. O fenômeno pode ocorrer devido a inserção do amolecimento do concreto, que provoca um decréscimo da capacidade resistente do concreto, que poderá inviabilizar a convergência em relação aos esforços externos, cabendo ao usuário constatar tal fenômeno na verificação dos resultados das tensões.

Em relação aos esforços de tração, segue a mesma metodologia do comportamento a compressão, iniciando num regime elástico até a superfície de plastificação, demonstrado na Figura 3.13. A partir deste ponto, ocorrendo as leis de amolecimento e endurecimento que movimentam a superfície de plastificação. Nesta pesquisa foi adotado o modelo HSD *Linear*, por se tratar do modelo que demanda uma menor quantidade de parâmetros, alguns de difícil obtenção ou determinação, e que apresenta boa correlação de resultados.

Figura 3.13 – Leis de endurecimento do concreto tracionado no modelos HSD



(fonte: adaptado de ANSYS, 2022)

O modelo *DP-Concrete* apresenta dificuldades na representação da superfície ideal do concreto. De acordo com Chen e Han (1988), para que uma superfície de ruptura consiga performar o comportamento do concreto, deve ser composta por curvas suaves e convexas nas regiões de intersecção dos planos meridianos e desviadores, sendo que o modelo apresenta a formação do formato circular apenas nas regiões de alta compressão, sendo representativa nestas condições.

Entretanto, a adoção do modelo *DP-Concrete* proporciona ao usuário praticidade no desenvolvimento do seu problema. Por se tratar de um modelo presente no ANSYS, não demanda

um conhecimento prévio em programação e uso de compiladores. Além disso, possibilita a customização dos modelos de endurecimento dos materiais diretamente no *script*, enquanto que na USERMAT é necessário a alteração na programação interna do modelo. A aplicação de ambos modelos paralelamente, viabiliza uma comparação dos resultados, expondo possíveis erros de programação na USERMAT, processo de difícil verificação pela ausência da possibilidade de depuração no compilador. O ANSYS ainda possibilita a inserção de parâmetros de dilatância, que tem por função alterar a superfície de potencial plástico, introduzindo a plasticidade não associada. Entretanto, nesta pesquisa foi dispensado o uso da plasticidade associada, adotando valores de dilatância igual a 1.

Na utilização do *script*, são necessárias a introdução de alguns parâmetros no modelo DP-*Concrete*, sendo declaradas no Quadro 3.1. As informações são calculadas de acordo com as formulações do Código Modelo da *fib* (2013), sendo adotados alguns parâmetros obtidos através de calibração ou por comparação com os testes realizados por Benincá (2020), sendo apresentados os dados aplicados para uma laje no Quadro 4.8.

Quadro 3.1 – Parâmetros do modelo de DP-*Concrete*

PARÂMETRO	SÍMBOLO
Módulo de elasticidade	E_c
Coefficiente de Poisson	ν_c
Resistência média à compressão uniaxial	R_c
Resistência à compressão biaxial	R_b
Resistência média à tração uniaxial	R_t
Dilatância à tração	δ_t
Dilatância à compressão	δ_c
Tensão relativa no início da plastificação na compressão	Ω_{ci}
Tensão relativa para deformações plásticas superiores à K_{cr}	Ω_{cr}
Deformação plástica em R_c	K_{cm}
Deformação plástica última na compressão	K_{cr}
Deformação plástica última na tração	K_{tr}
Tensão relativa para deformações plásticas superiores à K_{tr}	Ω_{tr}

(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.1.2 USERMAT

O ANSYS disponibiliza ao usuário diversos recursos para customização de alguns aspectos do MEF, dentre eles a criação de novos elementos e alteração dos modelos constitutivos dos materiais. Quevedo (2017) descreve com detalhes todo o processo de customização dos modelos dos materiais e o tutorial para ativar o modelo de customização no ANSYS.

De forma sucinta, o usuário deve utilizar os recursos da interface UPF (*User Programmer Features*) para criar novos modelos constitutivos, sendo necessária a habilitação do recurso de customização do ANSYS (*ANSYS customization file*). Os recursos são desenvolvidos na linguagem *Fortran 77*, sendo necessário a compilação prévia dos recursos por um compilador Fortran compatível com o ANSYS, sendo aplicado nessa pesquisa o compilador *Intel Fortran Compiler*. As etapas necessárias para compilação são descritas por Quevedo (2017) e Lazzari (2016).

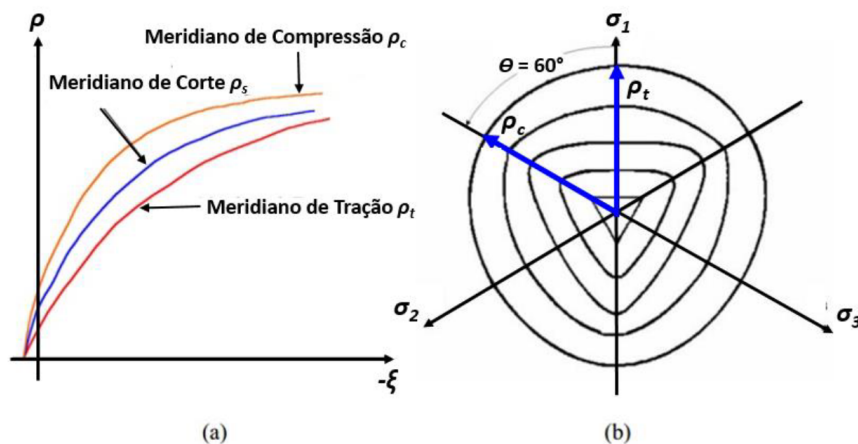
Neste trabalho, foi aplicada a USERMAT inicialmente desenvolvida por Lazzari (2016), adaptando a USERMAT3D para análise de elementos de concreto tridimensional, verificando o efeito da fissuração e retração. A descrição completa do modelo reológico e sua forma de funcionamento estão contidas em algumas pesquisas, dentre elas, o trabalho de Lazzari (2016), Lazzari (2020) e Spessatto (2022).

A superfície de ruptura adotada na USERMAT foi proposta por Ottosen (1977), também denominada superfície de quatro parâmetros, mostrada na Figura 3.14. Além da superfície de ruptura, foram desenvolvidas algumas sub rotinas internamente para o cálculos auxiliares de alguns parâmetros em relação à fluência e retração do concreto de acordo Código Modelo da *fib* (2013). O equacionamento da superfície é apresentado na Equação 3.2 e ilustrado na Figura 3.14.

$$f(I_1, J_2, \cos 3\theta) = \alpha \cdot \frac{J_2}{f_{cm}} + \lambda \cdot \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cm}} + \beta \cdot \frac{I_1}{f_{cm}} - 1 = 0 \quad (3.2)$$

Sendo que α e β são parâmetros dos materiais, θ o ângulo de similaridade e f_{cm} a resistência média à compressão do concreto.

Figura 3.14 – Intersecção da superfície de Ottosen. (a) Com planos meridianos; (b) Com planos desviadores

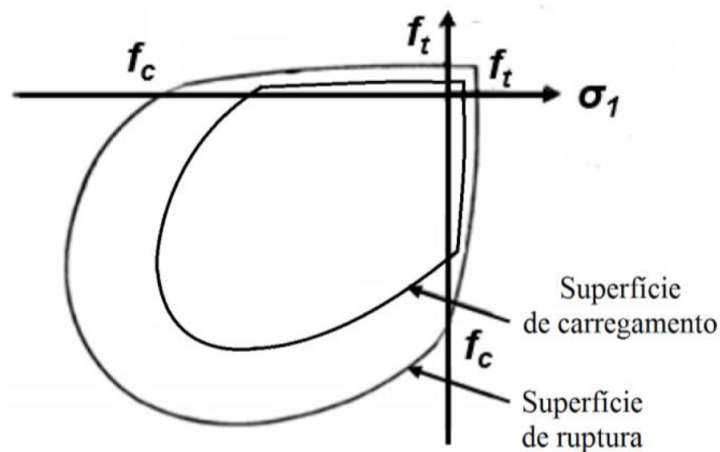


(fonte: LAZZARI, 2016)

Todos os parâmetros são definidos a partir da resistência média uniaxial da compressão do concreto (f_{cm}), resistência média uniaxial à tração do concreto (f_{ctm}) e da resistência biaxial do concreto (f_{2ccm}), além da determinação de um ponto contido no meridiano. Na ausência de dados experimentais, o Código Modelo da *fib* (2013) disponibiliza fórmulas para estimar tais valores experimentais.

Em relação à plastificação, Lazzari (2016), apresenta que o modelo da USERMAT adota um endurecimento isotrópico em que as superfícies de plastificação apresentam o mesmo formato que a de ruptura, mas delimitadas sobre um intervalo conforme apresentado na Figura 3.15. Foi adotado o diagrama tensão-deformação apresentado no Código Modelo da *fib* (2013). A plasticidade foi admitida associada, conforme exposto por Lazzari (2016). Em relação ao esmagamento do concreto está vinculado a não-convergência do problema, similar ao modelo DP-*Concrete*.

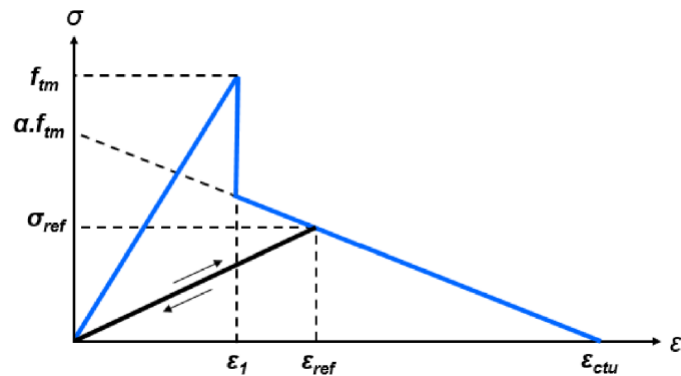
Figura 3.15 – Superfícies de carregamento e de ruptura no plano



(fonte: LAZZARI, 2016)

No concreto tracionado, considera-se na USERMAT um regime elástico até a superfície de ruptura, que inicia o processo de fissuração. O modelo de fissuras distribuídas dispensa a alteração na malha de elementos finitos, realizando apenas a alteração na relação tensão-deformação dos elementos. De acordo com Lazzari (2015), para a região fissurada, o material concreto deixa de ser isotrópico, tornando-se ortotrópico por meio da redução da rigidez do elemento na direção normal à fissura. O comportamento do concreto tracionado é apresentado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Diagrama tensão-deformação do concreto tracionado



(fonte: LAZZARI, 2016)

Em relação aos efeitos diferidos no tempo, Lazzari (2016) apresenta que o modelo da USERMAT emprega as diretrizes do Código Modelo da *fib* (2013) para representar os efeitos de fluência e retração. Para inserção no modelo numérico dos elementos finitos, foi empregada a metodologia do Modelo da Cadeia de Maxwell de Bazant e Wu (1974), que é computacionalmente viável, pois, se utiliza uma formulação baseada em elementos finitos, com integração com intervalos discretos de tempo.

A versão adotada da USERMAT foi inicialmente a de Soares (2022), que possibilita análises de elementos de concreto por um modelo elastoviscoplastico com fissuração. Contudo, devido às peculiaridades que envolvem a fabricação e utilização das lajes alveolares, foi adotada uma adaptação no arquivo da USERMAT, proposta por Spessatto (2022). A primeira alteração foi a inserção da variável *texist*, que possibilita inserir a idade desde a concretagem da peça pré-moldada até o momento do ensaio.

A variável *texist* proporciona ao usuário facilidade na criação dos casos de carga, que demandaria vários ajustes para representar as etapas construtivas dos elementos pré-moldados. Além da inserção da nova variável, foram adicionadas algumas verificações nas sub-rotinas da USERMAT, para compatibilizar o cálculo da idade do material, realizando a soma do tempo do carregamento ao da variável *texist*.

No *script*, quando utilizada a USERMAT para análises de elementos do concreto, versão adaptada de Soares (2022), devem ser informados, através do comando `TB,USER`, os valores descritos no Quadro 3.2 seguindo sua ordem de aparecimento. Para a inserção das variáveis, aplica-se o comando `TB,USER` para informar o número de dados que serão inseridos e o comando `TB,USER` para inserir cada parâmetro.

Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo da USERMAT

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
fck	Resistência característica do concreto em compressão [kN/cm ²]
nurev	Coefficiente de Poisson do concreto [adm]
s	Coefficiente que depende do tipo de concreto [adm]
betasc	Coefficiente que depende do tipo de cimento [adm]
alpha	Coefficiente que define o efeito do tipo de cimento durante a cura do concreto [adm]
rh	Umidade relativa do ambiente [%]
hf	Espessura fictícia [cm]
ti	Tempo considerado para o início do concreto na análise numérica [dias] A idade do material dada por $t_{mat} = t_{ime} - t_i$
ts	Idade do concreto no início da secagem [dias]
t0	Idade do concreto no início da aplicação do carregamento [dias]
textst	Idade do concreto no dia do ensaio [dias]
tinf	Tempo final considerado para o ajuste da cadeia de Kelvin [dias]
ndec	Número de décadas utilizadas para o ajuste da cadeia de Kelvin
ktime	Tempo para gerar o arquivo intermediário de saída de dados
kelemid	Identificação do elemento para a saída de dados
kkDomInPt	Identificação do ponto de integração para a saída de dados
ligafluencia	Define se a fluência vai ser considerada no modelo: 1: considera a fluência; 0: não considera a fluência
ligaretracao	Define se a retração vai ser considerada no modelo: 1: considera a retração; 0: não considera a retração
ligafissura	Define se a verificação da fissuração vai ser considerada no modelo: 1: considera a fissuração a partir da idade do material igual a 7 dias; 0: não considera a fissuração
desligatempo	Tempo máximo em dias para considerar o efeito de fluência no concreto
temperatura	Média de temperatura

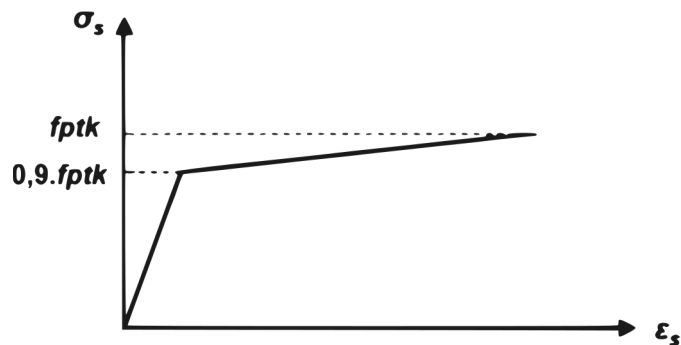
(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.2 Aço

No presente trabalho, foram utilizados dois modelos uniaxiais para representar o comportamento das armaduras ativas presentes nas lajes alveolares. No primeiro modelo, foi adotado um comportamento elastoplástico com endurecimento linear. O segundo modelo apresenta um comportamento viscoelástico que contempla o fator da relaxação no aço. Para ambos os modelos, foi considerado o mesmo comportamento na tração e compressão.

O primeiro modelo emprega um comportamento elastoplástico com endurecimento linear, representado por um comportamento elástico linear até atingir 90 % do seu valor de tensão de ruptura do aço (representando pelas siglas f_{ptk}). Após atingido este valor, apresenta um comportamento com endurecimento linear, sendo representado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Modelo elastoplástico com endurecimento linear das armaduras ativas



(fonte: elaborado pelo autor)

O modelo elastoplástico com endurecimento linear, apresentando na Figura 3.17, está disponível na biblioteca interna do ANSYS através do modelo BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*). O modelo adota que a inclinação inicial da curva tensão-deformação será referente ao módulo de elasticidade (E) do material indicado pelo usuário. A partir da tensão de escoamento, a inclinação da curva será definida pelo módulo de elasticidade tangente (E_T). O modelo BISO será aplicado em conjunto com o modelo DP-DP do concreto, ambos os modelos não consideram diretamente o fator da passagem do tempo em seus materiais, sendo tais fatores inseridos de forma aproximada através da perda de protensão, que foi ajustada manualmente nos modelos variando a tensão de protensão inicial do ensaio.

Conforme Lazzari (2016), quando uma deformação é mantida constante em uma armadura de protensão, a tensão aplicada diminui com o tempo. Esse comportamento é denominado relaxação. Este efeito é um fenômeno viscoelástico, assim como ocorre a fluência no concreto. A relaxação pode gerar uma perda de tensão significativa ao longo do tempo, quando os cabos são submetidos a elevadas tensões. No presente trabalho, as armaduras de protensão das lajes alveolares utilizam um pouco mais de 70 % da resistência característica do aço de protensão (f_{ptk}), deste modo, os cabos de protensão são considerados com o comportamento viscoelástico.

Para a introdução dos efeitos da relaxação, Lazzari (2016) apresenta que a intensidade da relaxação do aço de protensão segue o Código Modelo da *fib* (2013). A inserção no modelo numérico foi através da cadeia de Maxwell com cinco elementos de Bazant & Wu (1974). Para a inserção desse modelo viscoelástico foi utilizada uma série PRONY, disponível na biblioteca ANSYS para expressar o comportamento de relaxação do material. Ou seja, a partir do comando TB, PRONY pode-se incluir diretamente no ANSYS os parâmetros dos cinco módulos de elasticidade da mola da cadeia de Maxwell. Para isso, realizou-se o cálculo externamente das cinco constantes de Maxwell, que admite o fenômeno de relaxação com o passar do tempo e que varia de acordo a protensão aplicada nas cordoalhas, sendo calculado para cada laje. A Figura

3.18 apresenta como devem ser inseridas as informações na série de PRONY.

Figura 3.18 – Modelo viscoelástico para armaduras ativas

```

!
! Modelo linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,v3
!
! Modelo Viscoelastico
!
TB,PRONY,3,,5,BULK
TBDATA,1,234.013913398086/ES3,1
TBDATA,3,131.767789389654/ES3,10
TBDATA,5,247.956407937483/ES3,100
TBDATA,7,806.568639785371/ES3,1000
TBDATA,9,17516.0971276285/ES3,10E30
!

```

(fonte: elaborado pelo autor)

Seguindo a metodologia apresentada por Machado (2022), representada na Figura 3.18, para a definição do modelo viscoelástico, conforme descrito anteriormente, utilizou-se o comando TB, PRONY. O comando TB ativa as propriedades dos materiais. Ao utilizar a série PRONY, as propriedades ativadas levam em conta constantes viscoelásticas. A partir daí, se identifica o número dos materiais e o número de séries PRONY, neste caso as cinco constantes de Maxwell. Posteriormente, é necessário também, definir o comportamento da viscoelasticidade, neste caso, utilizou-se o comportamento BULK, que refere-se a série PRONY em massa. Com essas definições, a partir do comando TBDATA são inseridas as cinco constantes de Maxwell, calculadas externamente para cada ensaio.

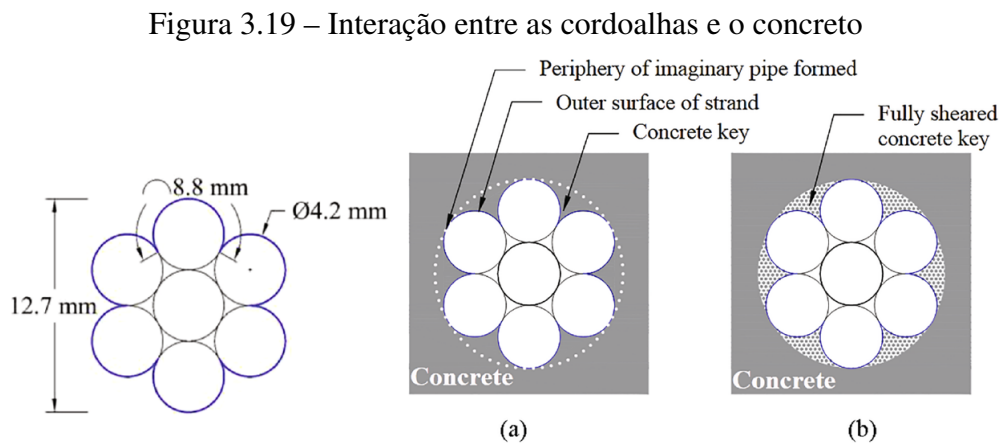
3.3.3 Modelo de aderência

Como mencionado anteriormente, compreender a aderência é crucial para entender a interação entre o aço e o concreto. Dois modelos são adotados para representá-la: um para a flexão e outro para os ensaios de cisalhamento.

Para o modelo de flexão, considerou-se aderência perfeita entre o aço e o concreto, alcançada por meio da compatibilização de deslocamentos entre a armadura e o concreto. Nesse modelo, não foi necessário usar elementos de combinação, apenas a metodologia descrita por Lazzari (2016), combinando os elementos SOLID186 com o MESH200+REINF264, conforme explicado na seção 3.2.1. No caso do modelo de armadura discreta, adotou-se o modelo analítico desenvolvido por Khalaf (2016), baseado no modelo de aderência de barras nervuradas apresentado no Código Modelo *fib* (2013), ilustrado anteriormente na Figura 2.32.

O valor da tensão τ_{max} é calculado de acordo com a metodologia apresentada na seção 2.5.3. Para o uso no programa ANSYS, deve ser inserido uma curva de Força-deslizamento no elemento COMBIN39 (como apresentando na Figura 3.5), sendo necessário multiplicar o valor da tensão τ_{max} pela superfície de contato de cada cordoalha com o concreto, por unidade de comprimento.

A pesquisa conduzida por Mohandoss, Pillai e Gettu (2021) apresentou um estudo detalhado sobre a área efetiva a ser considerada no cálculo da área de aderência, conforme mostrado na Figura 3.19. No entanto, considerando que o elemento COMBIN39 requer um gráfico de força-deslocamento, foi inserido apenas o valor da força " T_b " de acordo com a metodologia apresentada por Khalaf e Huang (2016) na seção 2.5.3. Foi adotado um comprimento l_w de 2,5 cm, correspondendo à área efetiva de cada elemento de combinação, de acordo com testes para a calibração numérica na falta de dados experimentais.



(fonte: MOHANDOSS; PILLAI; GETTU, 2021)

3.4 LANÇAMENTO DA ESTRUTURA

Como mencionado anteriormente, em relação à modelagem da malha de elementos finitos, foram adotados dois modelos, o de armadura incorporada e o discreta, cada um demandando particularidades em sua implementação. O modelo de armadura incorporada permite a inserção da barra de reforço em qualquer posição dentro dos elementos de concreto. Já para o modelo de armadura discreta, é necessário compatibilizar os nós entre os elementos de concreto e a armadura, juntamente com o elemento de combinação para representar a interação entre o concreto e o aço. Os *scripts* foram automatizados para facilitar o uso dos modelos, exigindo apenas algumas informações do usuário.

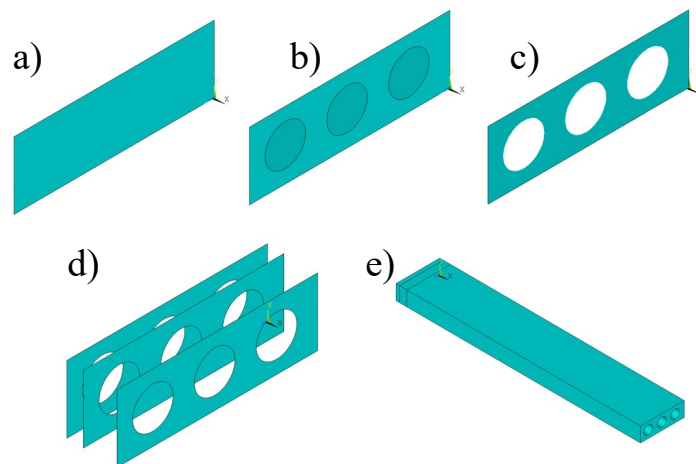
3.4.1 Geometria e Malha

A geração da malha e geometria foram automatizadas no *script*, sendo necessária apenas a inserção dos parâmetros de entrada, tais como, vão, altura, diâmetro do alvéolo e as informações referentes aos materiais empregados na confecção das lajes. A automatização viabiliza a modelagem de diversos exemplares de lajes alveolares, variando apenas os dados de entrada.

O processo de geração da geometria foi sintetizado na Figura 3.20, sendo descrito a seguir todas as etapas para geração dos volumes:

- a) a geração da geometria inicia-se pelo desenho da seção transversal maciça da laje, aplicando apenas sua altura e largura;
- b) em seguida, são inseridos os dados dos alvéolos, no caso de seções circulares, informando seu diâmetro, enquanto para seções irregulares, o usuário deverá realizar alterações no *script*, desenhando o alvéolo por intermédio de pontos auxiliares (*Keypoints*) ou pela união de figuras básicas disponíveis;
- c) através do comando ASBA, realiza-se a subtração dos alvéolos da seção maciça para formar a seção transversal da laje;
- d) posteriormente, o comando AGEN realiza múltiplas cópias da seção transversal para pontos específicos, visando a futura compatibilização entre os nós na geração da malha;
- e) gera-se os volumes a partir das seções transversais aplicando o comando VEXT, que irá extrudar o volume a partir da área selecionada;

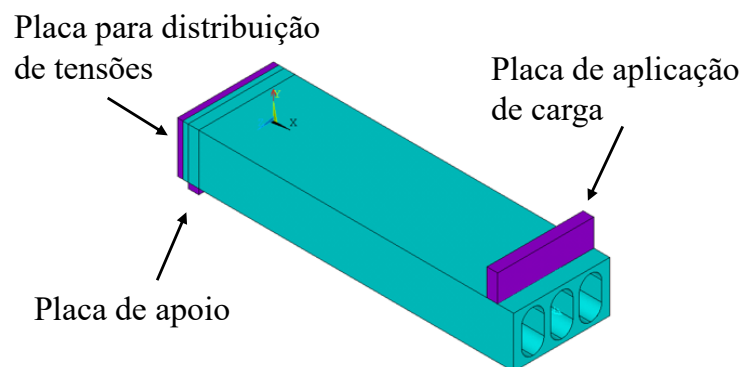
Figura 3.20 – Geração dos volumes



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a geração dos volumes, foi necessário aplicar o comando auxiliar VOV LAP que elimina volumes sobrepostos, gerados durante a produção da geometria. Estes volumes produziram erros durante a formação da malha, duplicando elementos na mesma localização, inviabilizando a visualização da malha da laje nestas regiões, sendo corrigidos pelo comando VOV LAP. Ainda para facilitar a seleção dos volumes, criam-se componentes auxiliares que delimitam cada região da laje, como exemplo, o componente "CONCRETO". Para modelagem dos apoios da laje, aplica-se o mesmo procedimento do desenho da seção transversal da laje, sendo simplificado pela ausência dos vazios. Além dos apoios, na extremidade da laje, são modeladas placas de apoios, que têm como função evitar o acúmulo de tensões que podem ocorrer durante a execução da protensão. Em relação às armaduras, devido a sua distribuição linear, são necessárias apenas a inserção de linhas na posição das cordoalhas. O método utilizado para geração dos volumes dos apoios é apresentado na Figura 3.21.

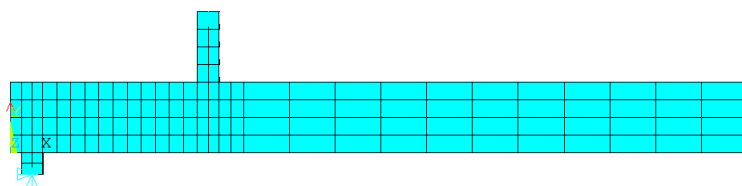
Figura 3.21 – Geração dos volumes dos apoios



(fonte: elaborado pelo autor)

Com o término da criação dos volumes, selecionam-se linhas específicas, aplicando o comando LSEL, para seu seccionamento pelo comando LESIZE, pois, essa segmentação nas linhas irão atuar como delimitadores dos tamanhos dos elementos na malha, sendo demonstrado na Figura 3.22. A densificação ou rarefação da malha possibilita ao usuário definir no modelo regiões densas para um resultado refinado, por outro lado viabiliza uma economia de gasto computacional para regiões que não demandam tal refinamento.

Figura 3.22 – Refinamento da malha



(fonte: elaborado pelo autor)

Para geração da malha dos apoios e das regiões em concreto, aplica-se o comando VSWEEP, que preenche volumes pré-existentes com elementos a partir de uma seção transversal. O comando se torna útil para a formação dos elementos de cunha (*Wedge*) que circundam os alvéolos, que não apresentam seção regular, impossibilitando o uso do comando VMESH, geralmente aplicado em seções transversais regulares.

No modelo de armadura incorporada, para compor a malha de aço, as linhas que representam a posição das cordoalhas são selecionadas para a geração dos elementos MESH200, juntamente com a definição da seção transversal e informações sobre os materiais do reforço. Após a criação do elemento base, o comando EREINF é utilizado para gerar os elementos REINF264 a partir dos elementos base, finalizando assim a modelagem do reforço. Por fim, os nós são renumerados por meio do comando NUMCMP.

No modelo de armadura discreta, é necessário realizar a compatibilização da modelagem entre a armadura e o concreto; os nós da armadura e do concreto devem estar na mesma posição, diferente da armadura incorporada, que necessita apenas que os nós da armadura estejam introduzidos dentro dos elementos de concreto. Para a compatibilização, a renumeração dos nós por meio do comando NUMCMP deve ser aplicada antes da inserção dos nós da armadura. Em seguida, são criados novos nós para a armadura na mesma posição dos nós da malha de concreto, conforme ilustrado na Figura 3.23. Posteriormente, os elementos de combinação são criados para conectar nós na direção x, e o comando CP é utilizado para compatibilizar os deslocamentos entre o concreto e o aço nas direções y e z.

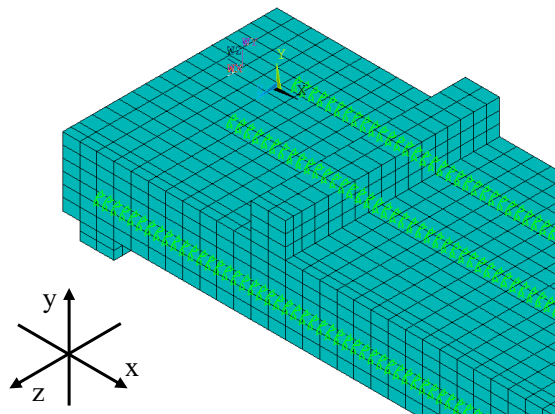
Figura 3.23 – Criação dos nós e do elemento COMBIN39 no modelo de armadura discreta

NÓS	COMBIM39
<pre> ! ----- ! 7.4 - ARMADURA DE PROTENSÃO ! ----- ! TYPE, 3 MAT, 3 SECNUM, 1 ! I=0 *DO,I,0,divcor N52=1100000+I N,N52,lp+mc*I,ac,dpc *ENDDO ! I=0 *DO,I,0,divcor-1 N52=1100000+I N53=N52+1 E,N52,N53 N52 = 0 N53 = 0 *ENDDO ! </pre>	<pre> ! ----- ! 7.5 - CONTATO ! ----- ! ALLSEL,ALL TYPE,4 ! I=0 J = 0 K = 0 L = 0 *DO,I,0,divcor N52=1100000+I NSEL,S,LOC,Y,ac NSEL,R,LOC,Z,dpc NSEL,R,LOC,X,4.999+mc*I,5.001+mc*I NSEL,U,,N52 *GET,NODECONC,NODE,0,NUM,MIN E,NODECONC,N52 ALLSEL,ALL L =J+1 K= L+1 CP,L,UY,NODECONC,N52 CP,K,UZ,NODECONC,N52 J = J+2 *ENDDO ! </pre>

(fonte: elaborado pelo autor)

No modelo de armadura discreta, a compatibilização precisa dos deslocamentos nas direções y e z é realizada por meio do comando CP, garantindo a concordância dos deslocamentos entre os nós do concreto e das cordoalhas, sendo necessário para funcionamento do modelo tal comando. No sentido longitudinal, os deslocamentos são determinados pelo elemento COMBIN39, o qual utiliza um gráfico força-deslocamento para representar o comportamento de aderência entre os elementos. A modelagem dos elementos de combinação e do comando CP no modelo é apresentada na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Modelagem comando CP e elemento COMBIN39 no modelo de armadura discreta



(fonte: elaborado pelo autor)

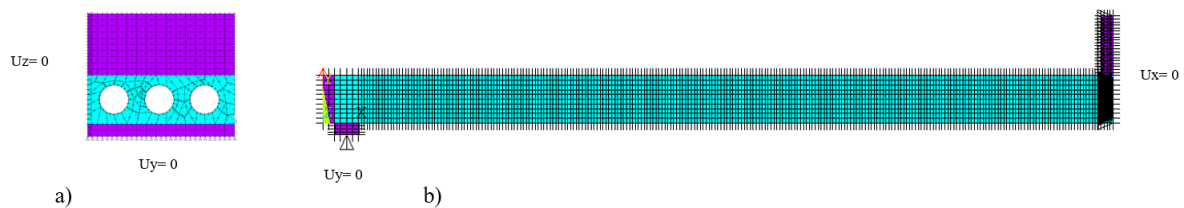
3.4.2 Condições de Contorno

O *script* foi automatizado para desenvolver lajes biapoizadas, modelando a laje completa para a validação dos modelos, considerando apenas a simetria das lajes no sentido longitudinal para os ensaios de ruptura ao cortante e quarto de simetria para o restante dos ensaios sujeitos a ruptura por flexão, buscando economia no processamento de dados. Neste item, são abordados os tópicos referentes às vinculações e carregamentos..

As cargas nas lajes alveolares são aplicadas na superfície superior do apoio, que representa o atuador, para evitar o acúmulo de tensões. No *script* padrão, é assumido que as cargas são aplicadas linearmente sob os apoios. Para os modelos DP-DP, adotam-se deslocamentos impostos, devido a uma melhor convergência nos resultados constatada durante os testes de malha. A seleção dos nós é realizada pelo comando NSEL, e a imposição dos deslocamentos é feita pelo comando D. Para o modelo da USERMAT, é aplicada uma pressão na superfície do atuador por meio do comando SFA. A alteração foi necessária devido à melhor convergência do modelo com a USERMAT em relação à pressão. Enquanto para o modelo DP-DP, a alteração é irrelevante, porém o gasto computacional é menor com o uso dos deslocamentos.

Na linha central do apoio inferior da laje, são restringidos os deslocamentos em x e em y para a representação de uma estrutura bi-apoiada, sendo necessária a restrição do deslocamento em z sob um nó auxiliar para evitar os movimentos de corpo rígido. Para modelagem parcial da estrutura, tirando proveito de sua simetria, aplica-se o comando ASBA para restringir os deslocamentos na área de contato de simetria, que posteriormente transmitirá a restrição para os nós dos elementos da região. A Figura 3.25 apresenta o modelo simétrico.

Figura 3.25 – Modelo simétrico: a) Vista Frontal; b) Vista Lateral



(fonte: elaborado pelo autor)

Ainda em relação a vinculação, as lajes alveolares apresentam em sua composição a imposição de protensão em suas cordoalhas, sendo adotado a utilização de deformações no reforço pelo comando INISTATE. O comando INISTATE define parâmetros e ações iniciais na estrutura, sendo possível definir o sistema de coordenadas, aplicação de tensões e deformações em elementos previamente estabelecidos. Em relação às perdas de protensão, o modelo numérico consegue representar as perdas por encurtamento do concreto. Para o modelo da USERMAT, as perdas relacionadas à passagem de tempo, efeitos de fissuração e retração são calculadas internamente, e a relaxação é inserida no modelo da armadura PRONY. No modelo DP-DP, as perdas de protensão devem ser introduzidas pelo usuário no valor da tensão na armadura, com exceção da perda por encurtamento.

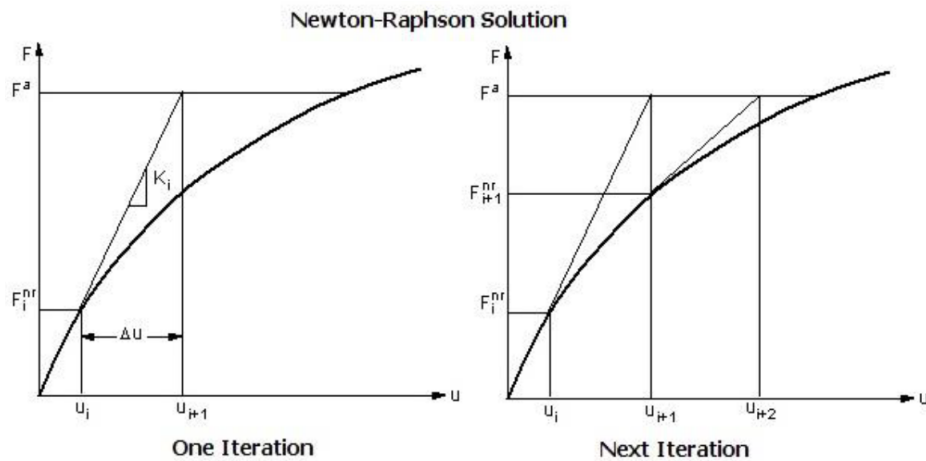
3.4.3 Solução

Conforme apresentado por Lazzari (2016), em diversas situações os materiais não apresentam um comportamento linear. Para o estudo de materiais, como concreto e aço, a não-linearidade torna-se um fator importante na formulação da solução de problemas. O MEF em análises de estruturas compostas de concreto reforçado por armadura de aço, resulta na solução de sistema de equações não-lineares.

Para a solução de sistemas não-lineares, foi adotado o Método de *Newton-Raphson*, disponível na biblioteca do ANSYS, com o uso do *solver* de matriz esparsas. O método busca a condição de equilíbrio da Figura 3.26, por intermédio de um processo iterativo que é delimitado pelo número máximo de iterações pelo comando NEQUIT e também por parâmetros de convergência, sendo

um deles a tolerância definida pelo comando CNVTOL. A não convergência da solução ocorre quando, após atingido o número máximo de iterações, não é alcançado o equilíbrio entre as forças externas e internas no subpasso investigado, de acordo com os parâmetros de convergência adotados.

Figura 3.26 – Método de Newton-Raphson



(fonte: ANSYS, 2022)

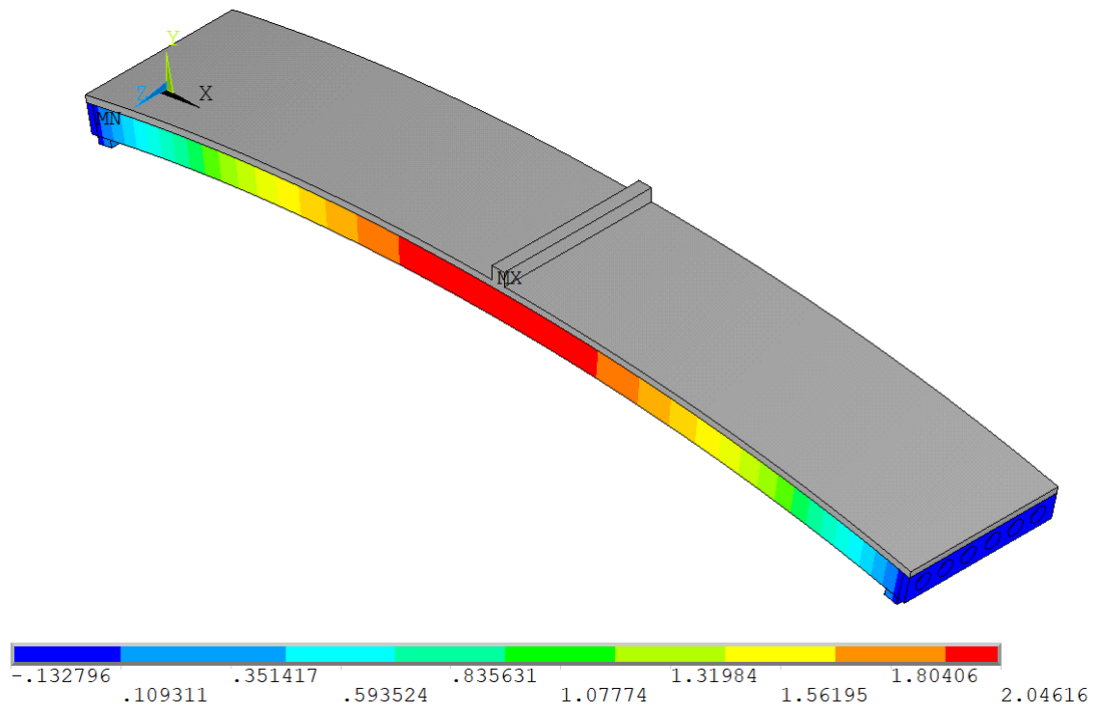
Na presente pesquisa adotaram-se alguns critérios nas análises, entre eles, o recurso de *Automatic Load Stepping*, que habilita o programa a variar o tamanho dos subpassos no processo de convergência. Foi adotado o comando OUTRES, possibilitando a visualização dos resultados mesmo que não ocorra a convergência. Caso ocorra dificuldade de convergência, é recomendável o aumento no número de subpassos e interações. A alteração da tolerância pode implicar na sensibilidade dos resultados obtidos pelo modelo numérico. Para análises de elementos pré-moldados, deve-se verificar se os casos de carga são condizentes com o ato de protensão e o início do carregamento da estrutura.

No que diz respeito à passagem do tempo, o modelo da USERMAT requer uma representação temporal completa de todas as etapas que a laje foi submetida, desde a protensão, estocagem e até o ensaio subsequente. Para o modelo DP-DP, não é necessária a representação completa do tempo; os dados informados são pertinentes ao momento do ensaio, e os efeitos relacionados à passagem do tempo são aproximados por meio da perda de protensão.

No que diz respeito à modelagem das lajes alveolares com capa no modelo da USERMAT, foi essencial representar o posicionamento da laje alveolar para posterior inserção da capa. Isso exigiu a utilização dos comandos EKILL e EALIVE, que desativam e reativam os elementos conforme necessário para a modelagem. No caso do modelo DP-DP, tais comandos não foram utilizados, e o efeito foi apenas aproximado com a resistência no momento do ensaio. A Figura 3.27 ilustra a representação dos elementos ativados/desativados no modelo, apresentando em

tons de cinza o elemento desativado.

Figura 3.27 – Representação da desativação de elementos



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a obtenção da curva força versus deslocamento, após o processamento da estrutura, realiza-se um ciclo na linguagem APDL aplicando o comando DO, para realizar a soma das reações nos nós que foram selecionados pelo o comando RFORCE, paralelamente a obtenção do deslocamento vertical obtido na posição que o leitor foi instalado no ensaio experimental ou ponto desejado pelo usuário.

3.5 ORGANIZAÇÃO DO *SCRIPT*

Para desenvolver o modelo numérico no programa ANSYS aplicando a interface APDL, foi desenvolvido um *script* organizado em quatro tópicos principais: inicialização, dados de entrada, pré-processamento e solução. Após o processamento da estrutura, um *script* auxiliar foi desenvolvido para apresentar os resultados e/ou gráficos pertinentes à pesquisa de acordo com cada ensaio experimental. O código apresenta comentários para auxiliar ao usuário e seus detalhes são apresentados nos itens 3.5.1 até o 3.5.4.

3.5.1 Inicialização

Na primeira seção do *script* são apresentados os comandos de inicialização, que encerram projetos atuais no programa para iniciar um projeto novo. É necessária a inserção de comandos padrões de inicialização do ANSYS e cabe ao usuário definir o nome do projeto e o tipo de análise, no caso desta pesquisa, estrutural.

3.5.2 Dados de entrada

Nesta seção são inseridos os dados de entrada, os quais podem ser alterados para simular diferentes arranjos de lajes alveolares. A princípio, o usuário deverá alterar apenas os dados desta seção, sendo o restante do código totalmente automatizado. Em casos especiais, como, alteração na geometria, carregamentos ou alterações no modelo do comportamento dos materiais, será necessário a alteração em outras seções do *script*, demandando conhecimento prévio do usuário na linguagem de programação da interface APDL. A seção está estruturada da seguinte maneira:

Definição dos elementos: Informam-se os elementos que serão aplicados no modelo, sendo o padrão inicial a adoção do elemento SOLID 186 para os apoios e componentes em concreto, enquanto para as armaduras a aplicação do elemento MESH 200;

Geometria: Define-se os dados geométricos, inserindo a altura e largura da laje, diâmetro dos alvéolos, vão, dimensões e posição dos apoios, área transversal das cordoalhas;

Materiais: Informam-se os dados dos materiais e os modelos adotados;

Protensão: Define-se a carga de protensão e suas perdas;

Divisão da Malha: Informam-se as divisões das linhas para delimitação da malha de elementos finitos, bem como o tamanho máximo dos elementos;

Carregamento: Define-se os deslocamentos impostos ou as cargas para simular os ensaios, informando os subpassos e as tolerâncias para cada caso de carga da análise.

3.5.3 Pré-processamento

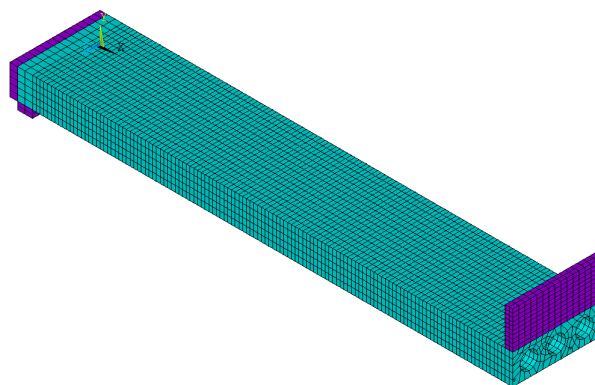
Nesta seção são utilizados, de forma automatizada, os parâmetros de entrada inseridos na seção anterior para a modelagem da laje e inserção dos modelos dos materiais. Primeiramente, são inseridas as informações referentes aos modelos dos materiais adotados, para em seguida, o desenvolvimento da geometria para posterior montagem da malha de elementos finitos. A seção está estruturada da seguinte maneira:

Modelo dos materiais: Associa-se para cada material ao seu modelo adotado, definindo seus respectivos parâmetros;

Modelagem da estrutura: Define-se a geometria da laje alveolar e seus apoios, associando cada material a seu respectivo volume, sendo delimitada sua malha a partir das linhas que compõe seus volume (Figura 3.28);

Comandos gerais: Aplicam-se comandos auxiliares para renumeração dos nós dos elementos e adoção de padrões de visualização do projeto;

Figura 3.28 – Modelo de laje alveolar



(fonte: elaborado pelo autor)

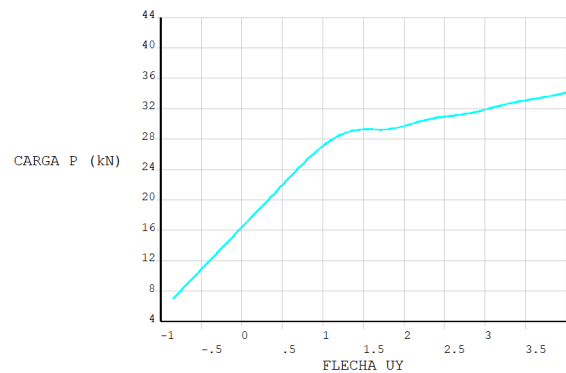
3.5.4 Solução

Nesta seção, são organizadas as informações para a produção da solução do problema, sendo determinadas todas as informações pertinentes a cada caso de carga. São definidas as tolerâncias para cada análise, delimitação dos subpassos e a aplicação dos deslocamentos impostos simulando a aplicação de cargas dos ensaios experimentais.

3.5.5 Pós-processamento

Nesta seção são automatizados os códigos do *script* para visualização de resultados e/ou geração de gráficos após o processamento da estrutura. Optou-se na pesquisa em realizar apenas o gráfico de força versus deslocamento. Outros resultados podem ser verificados na interface gráfica do ANSYS. Para a produção do gráfico de força versus deslocamento, o valor da força aplicada no ensaio é calculada pela soma das reações verticais em cada subpasso, enquanto o deslocamento é medido no ponto onde foi realizada a leitura dos resultados durante o procedimento experimental.

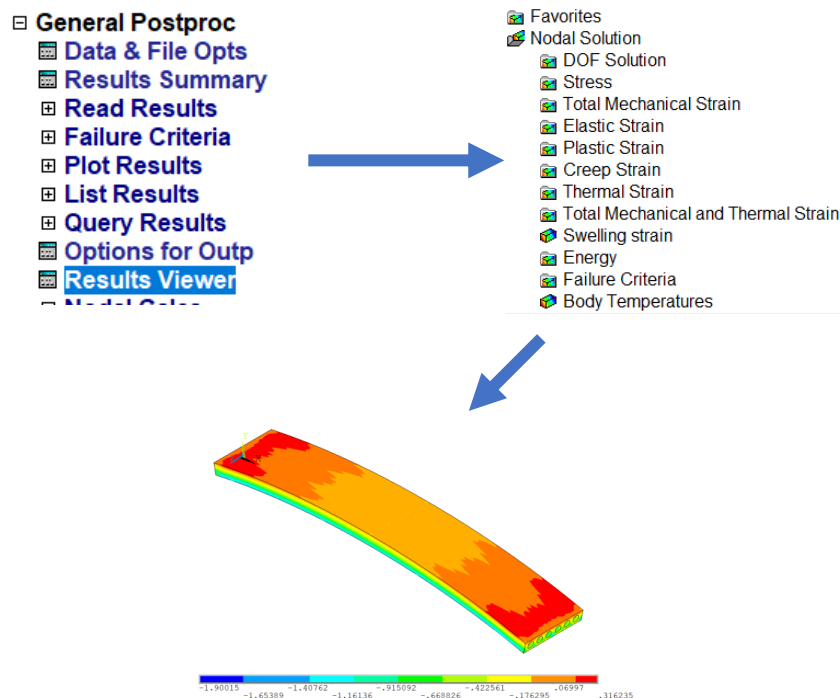
Figura 3.29 – Gráfico de forças x deslocamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a extração de outros resultados do programa ANSYS, o usuário deverá acessar o painel lateral do programa e selecionar a aba "Result Viewer", para após selecionar a opção desejada. O ANSYS disponibiliza uma vasta série de informações, citando algumas delas como, deslocamentos, tensões, deformações, dentre outras. A Figura 3.30 apresenta o passo a passo para seleção das informações.

Figura 3.30 – Retirada de dados do ANSYS

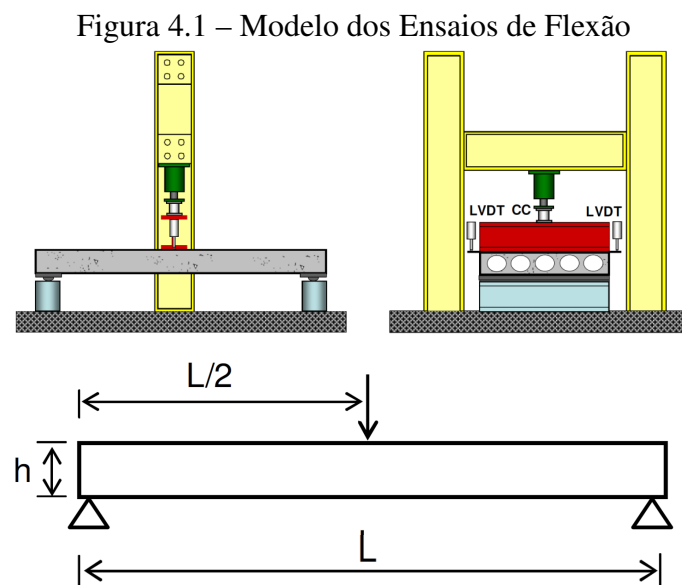


(fonte: elaborado pelo autor)

4 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE RUP-TURA À FLEXÃO

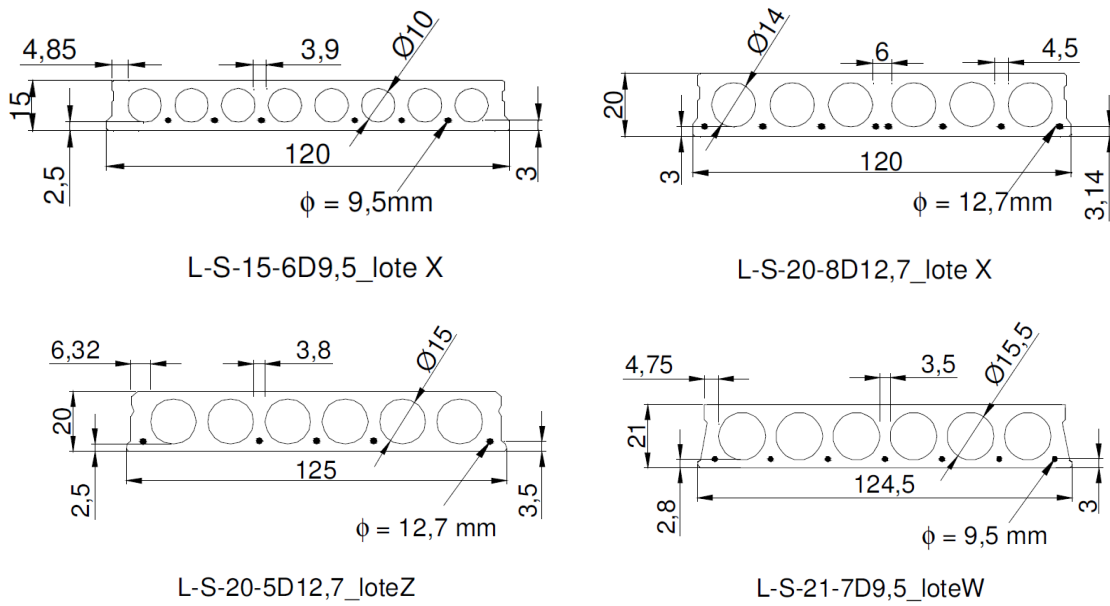
Catoia (2010) ensaiou um conjunto de lajes alveolares para exploração do comportamento do elemento perante diversos arranjos estruturais. A pesquisa buscava desenvolver o conhecimento do comportamento das lajes alveolares, através de estudo teórico dos equacionamentos existentes na literatura técnica, juntamente com a realização de ensaios experimentais das lajes. A disponibilidade destes dados experimentais possibilitou a validação do modelo numérico desenvolvido no presente estudo.

Para os ensaios de flexão foi aplicado um arranjo padrão de ensaio de flexão apresentado na Figura 4.1, com a tipologia da seção transversal e informações geométricas de acordo com seu modelo e fábrica onde a laje foi produzida (fábricas X, Y, W e Z). As lajes foram divididas em dois grupos, sem capa estrutural e com capa estrutural, sendo exibida as principais informações das tipologias das lajes nas Figura 4.2 a 4.3.



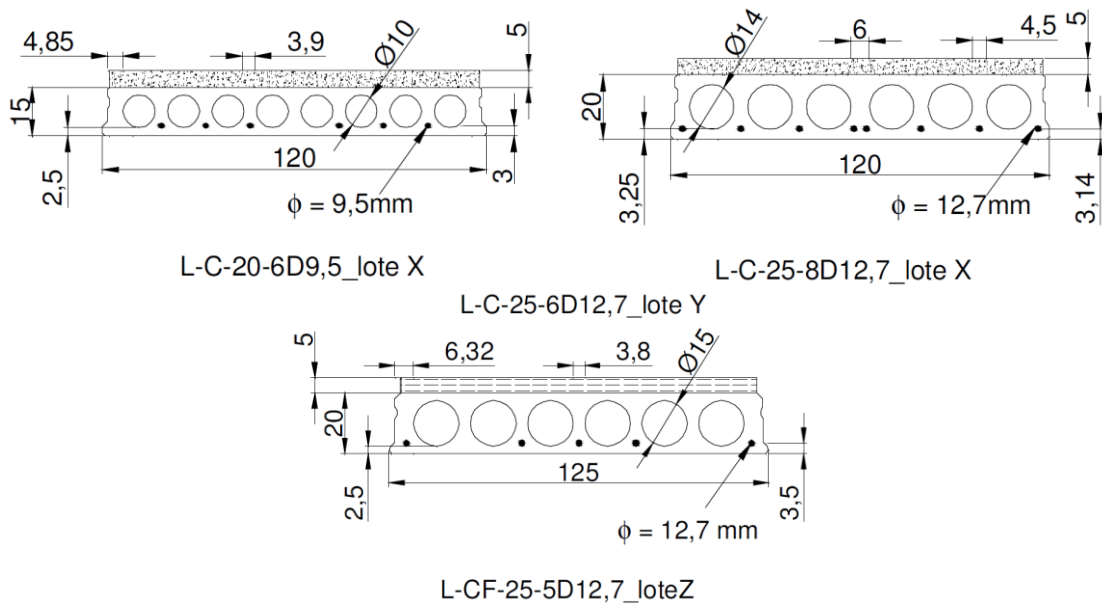
(fonte: adaptado de CATOIA, 2011)

Figura 4.2 – Tipologia das lajes sem capa estrutural



(fonte: CATOIA, 2011)

Figura 4.3 – Tipologia das lajes com capa estrutural



(fonte: CATOIA, 2011)

De acordo com a Figura 4.1, os ensaios das lajes ensaiadas à flexão apresentaram uma conjuntura biapoiada com a aplicação de força concentrada no centro do vão por meio do uso de atuador hidráulico, que aplica força sobre uma viga metálica que distribui nas lajes. Foram selecionadas 10 lajes para validação do modelo numérico proposto, comparando o comportamento do modelo com os resultados apresentados por Catoia (2011), tanto os dados do acervo fotográfico quanto a curva experimental obtida no ensaio. As informações das lajes ensaiadas à flexão são apresentadas

nos Quadros 4.1 ao 4.3. Em relação ao Quadro 4.1, ocorreram algumas divergências em relação aos valores apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, pois Catoia (2011) realizou as medições dos valores reais das lajes.

Quadro 4.1 – Características das seções das lajes

Laje	Altura (cm)	Base (cm)	Vão (cm)	Φ Alv (cm)	d' (cm)	d (cm)
L1_S_15-6D9.5-X_F	15	120	650	8,81	3,23	11,77
L2_S_15-6D9.5-X_F	15	120	650	8,81	3,78	11,22
L3_S_20-8D12.7-X_F	20	120	650	12,14	3,29	16,71
L4_S_20-8D12.7-X_F	20	120	650	12,14	3,29	16,71
L10_S_20-5D12.7-Z_F	20	125	610	15	3,5	16,5
L11_S_21-7D9.5-W_F	20,35	124,3	400	14,38	2,98	17,37
L1_C_20-6D9.5-X_F	20	120	650	9,19	3,06	16,94
L2_C_20-6D9.5-X_F	20	120	650	9,19	3,38	16,62
L3_C_25-8D12.7-X_F	25	120	650	12,04	3,29	21,71
L9_C_25-5D12.7-Z_F	25	125	610	15	3,5	21,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.2 – Características do concreto das lajes sem capa estrutural

Laje	fcm (28 dias) (MPa)	fcj (lib. pr.) (MPa)	fcj laje (ensaio) (MPa)	Idade laje (ensaio) (dias)
L1_S_15-6D9.5-X_F	52,63	31,58	56,02	124
L2_S_15-6D9.5-X_F	52,63	31,58	55,97	120
L3_S_20-8D12.7-X_F	45,65	27,4	48,27	99
L4_S_20-8D12.7-X_F	45,65	27,4	48,40	125
L10_S_20-5D12.7-Z_F	50,4	30	40	10
L11_S_21-7D9.5-W_F	-	28,2	47	33

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.3 – Características do concreto das lajes com capa estrutural

Laje	fcm (28 d) (MPa)	fcj (lib. pr.) (MPa)	fcj laje (ens.) (MPa)	fcj capa (ens.) (MPa)	Idade laje (ens.) (dias)	Idade capa (ens.) (dias)
L1_C_20-6D9.5-X_F	52,63	31,58	55,75	33,16	105	22
L2_C_20-6D9.5-X_F	52,63	31,58	55,86	33,74	112	29
L3_C_25-8D12.7-X_F	45,65	27,4	48,39	34,69	107	50
L9_C_25-5D12.7-Z_F	50,4	30	40	33	10	8

(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados referentes as informações seção da armadura e a protensão foram condensados no Quadro 4.4. Foram utilizadas cordoalhas do tipo CP-190 RB nas lajes, com os valores de resistência e dados adotados para o modelo de acordo com o Quadro 4.5.

Quadro 4.4 – Características das armaduras das lajes

Laje	Nº de cord.	Φ cord. (mm)	Fp por cabo (kN)	Fp total (kN)	Ap (mm ²)	σ_p (MPa)
L1_S_15-6D9.5-X_F	6	9,5	79	474	333	1423,42
L2_S_15-6D9.5-X_F	6	9,5	79	474	333	1423,42
L3_S_20-8D12.7-X_F	8	12,7	144,5	1156	811,2	1425,05
L4_S_20-8D12.7-X_F	8	12,7	144,5	1156	811,2	1425,05
L10_S_20-5D12.7-Z_F	5	12,7	114	570	500	1140
L11_S_21-7D9.5-W_F	7	9,5	81,03	567,21	388,5	1460
L1_C_20-6D9.5-X_F	6	9,5	79	474	333	1423,42
L2_C_20-6D9.5-X_F	6	9,5	79	474	333	1423,42
L3_C_25-8D12.7-X_F	8	12,7	144,5	1156	811,2	1425,05
L9_C_25-5D12.7-Z_F	5	12,7	114	570	500	1140

(fonte: elaborado pelo autor)

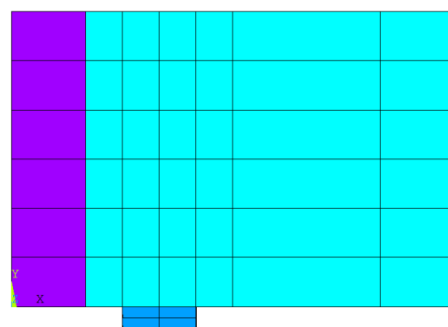
Quadro 4.5 – Dados da armadura

VARIÁVEL	VALOR
E_c	19000 kN/cm ²
V_c	0,30
f_{ptk}	190 kN/cm ²

(fonte: elaborado pelo autor)

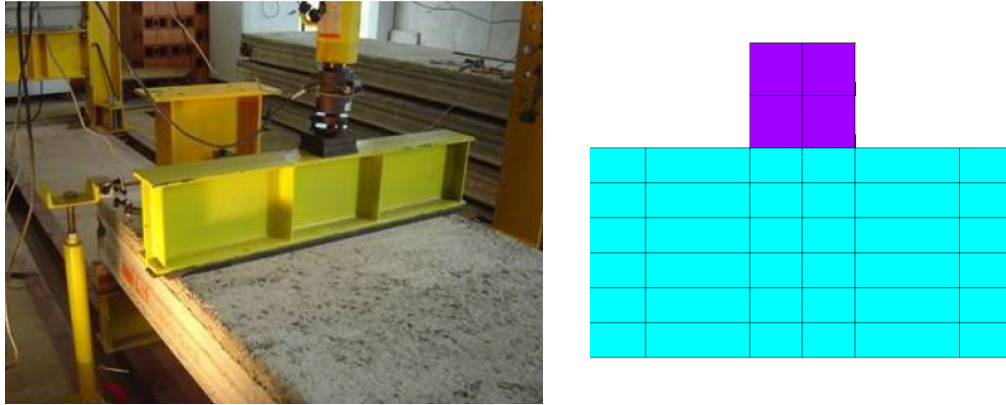
De acordo com Catoia (2011), em relação aos apoios, foram empregadas vigas metálicas posicionadas na laje de reação. O apoio é finalizado com o posicionamento de uma viga de madeira diretamente sob a viga metálica, e por último, a laje ficará em contato com uma tira de borracha com a largura de 5 cm, espessura de 1,5 cm, comprimento igual à largura da laje e dureza *shore* igual a 50. Em relação ao atuador hidráulico, aplicou-se a força sobre uma viga metálica. São apresentados os detalhes dos apoios e do atuador nas Figuras 4.4 e 4.5. No modelo numérico, foram modelados apenas os apoios representando as tiras de borracha, com a restrição de deslocamentos logo abaixo da tira de borracha, e o atuador através de um suporte metálico sob a laje, sendo apresentados os dados adotados para o modelo nos Quadros 4.6 e 4.7.

Figura 4.4 – Detalhe do apoio



(fonte: adaptado de CATOIA, 2011)

Figura 4.5 – Detalhe do atuador



(fonte: adaptado de CATOIA, 2011)

Quadro 4.6 – Dados dos apoios

VARIÁVEL	VALOR
E_c	10 kN/cm ²
V_c	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.7 – Dados do atuador

VARIÁVEL	VALOR
E_c	20000 kN/cm ²
V_c	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Para evitar a repetitividade mostra-se uma verificação minuciosa de uma laje por grupo, verificando todos os aspectos importantes do comportamento dessa laje, desde a sua produção até a ruptura, verificando as tensões no concreto e na armadura. Nas demais apenas os pontos notórios que divergem da primeira análise são mostrados, apresentando a comparação do momento fletor resistido e o deslocamento vertical para o restante das lajes.

Para os ensaios de flexão, o modelo numérico foi desenvolvido aplicando o conceito de armadura incorporada descrito por Lazzari (2015). Optou-se pela utilização do elemento SOLID 186 para os elementos de concreto e para a armadura elementos do tipo MESH 200 aliado ao uso do elemento REINF 264. Para o concreto foram utilizados dois modelos com duas superfícies distintas: Drucker-Prager que está presente na biblioteca do ANSYS; e um modelo customizado pelo usuário (USERMAT), detalhado por Spessato (2022). Em relação ao aço, nos modelos com o concreto representado pelo modelo de Drucker-Prager, foi empregado um modelo elastoplástico com endurecimento linear, enquanto para os modelos de concreto aplicando a USERMAT, foi empregado um modelo viscoelástico. Em relação ao modelo de aderência, foi aplicada o conceito de aderência perfeita entre o aço e o concreto.

4.1 UNIDADES ALVEOLARES SEM CAPA

Para a abordagem das lajes com ausência de capa estrutural, são apresentados apenas os resultados referentes à laje "L3_S_20-8D12.7-X_F". Para o desenvolvimento do modelo numérico, foram adaptadas as informações dos ensaios no programa ANSYS, de acordo com as limitações dos modelos dos materiais. Devido ao modelo de DP-DP ser nativo do ANSYS, as informações de entrada do modelo foram condensadas no Quadro 4.8, de acordo com a calibração previamente realizada por Benincá (2020). Os dados referentes ao modelo da USERMAT foram apresentados no Quadro 4.9. Vale ressaltar que o valor da perda de protensão adotado no modelo DP-DP, foi obtido através dos valores calculados pela USERMAT, para que ambas simulassem o mesmo valor de tensão no início do ensaio, sendo que a USERMAT calcula as perdas referentes a retração e fluência do concreto, e o modelo aplica a deformação por encurtamento.

Quadro 4.8 – Dados do modelo DP-DP

VARIÁVEL	VALOR
E_c	3310 kN/cm ²
ν	0,2
R_c	4,84 kN/cm ²
R_b	$R_c * (1,2 - R_c / 100)$ [kN/cm ²]
R_t	0,35 kN/cm ²
δ_t	1,0
δ_c	1,0
Ω_{ci}	0,4
Ω_{cr}	0,65
K_{cm}	$0,0021 - R_c / E_c$
K_{cr}	$0,0035 - \Omega_{cr} * R_c / E_c$
K_{tr}	0,001
Ω_{tr}	0,02
Perda protensão adot.	13 %

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.9 – Dados do modelo USERMAT

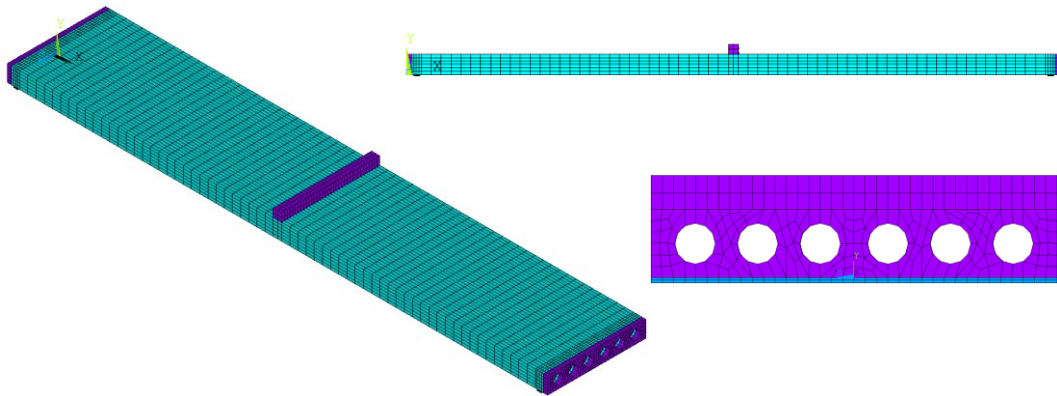
VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
fck	3,595 kN/cm ²
nurev	0,2
s	0,2
betasc	8
alpha	1
rh	70 %
hf	6,7
ti	0 dias
ts	3 dias
t0	99 dias
textst	0 dias
tinf	500 dias
ndec	10
ktime	99
kelemid	6697
kkDomInPt	2
ligafluencia	1
ligaretracao	1
ligafissura	1
desligatempo	501 dias
temperatura	25 C°

(fonte: elaborado pelo autor)

Em relação aos valores de perda de protensão, primeiramente foi executado o modelo USERMAT, que aplica os efeitos da retração e fluência, possibilitando a retirada da informação do valor de tensão que efetivamente está sob a laje no início do ensaio, para que ambos os modelos apresentem o mesmo valor inicial de tensão nas cordoalhas. No quesito dos valores da resistência do concreto, o valor médio da resistência do concreto inserido no modelo de DP-DP seria o referente ao momento do ensaio. No modelo da USERMAT, seria o valor da resistência que, após todos os dias em que a laje ficou estocada, atingirá o valor da resistência medido no momento do ensaio, justificando as diferenças nos Quadros 4.8 e 4.9.

Após a inserção das informações da seção transversal, condições de contorno e modelos dos materiais de acordo com a metodologia supracitada no Capítulo 3, o modelo numérico é apresentado na Figura 4.6. Para a obtenção da geometria de malha ideal, conciliando custo computacional *versus* obtenção de resultado adequados, foram analisadas diversas discretizações da malha de elementos finitos, sendo adotado tamanho máximo dos elementos na longitudinal de 5 cm, enquanto para os elementos da seção transversal tamanho de 4 cm, buscando um refinamento nas regiões próximas dos alvéolos.

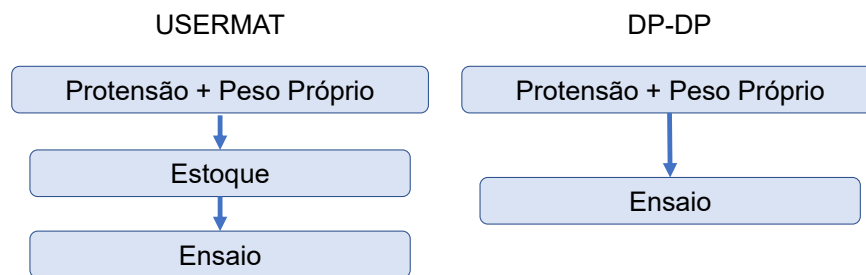
Figura 4.6 – Modelo numérico da laje L3_S_20-8D12.7-X_F



(fonte: elaborado pelo autor)

Em relação ao fluxo de carregamento, para o modelo USERMAT foram adotadas todas as etapas pelas quais a laje L3_S_20-8D12.7-X_F foi submetida, desde o ato da produção, protensão e estoque até o ensaio. Para o modelo DP-DP foi aplicada de forma simplificada com apenas duas divisões, uma etapa com o peso próprio e protensão, e outra para o início do ensaio. É apresentado na Figura 4.7 um organograma de como ocorreu o carregamento da laje para cada modelo.

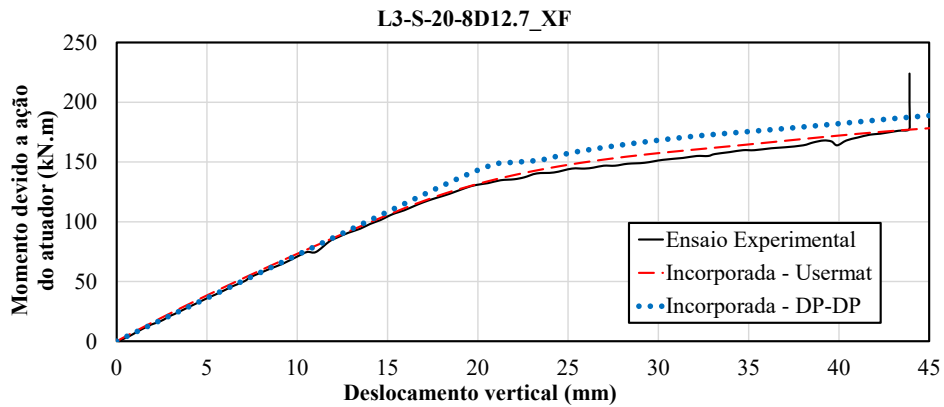
Figura 4.7 – Etapas de carregamento da laje L3_S_20-8D12.7-X_F



(fonte: elaborado pelo autor)

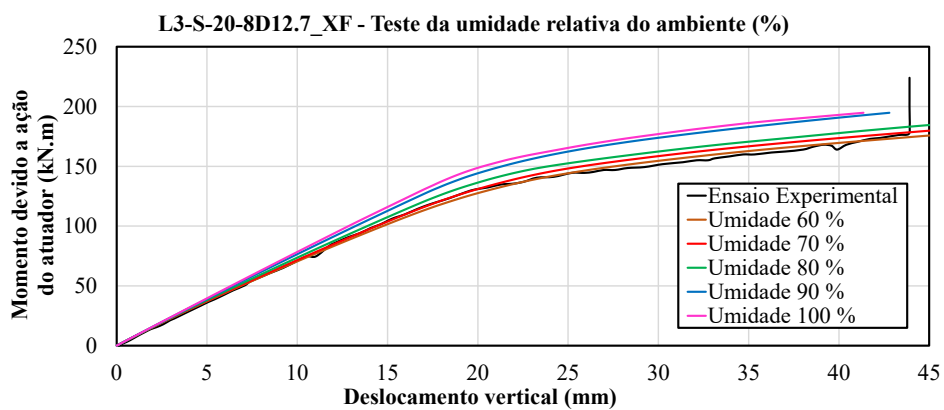
Para validação numérica, foram traçadas as curvas momento fletor versus deslocamento. O momento fletor seria aquele causado pela força do atuador no vão central e o deslocamento sendo o vertical, obtido pelos transdutores. No modelo DP-*Concrete* foram usados incrementos de deslocamentos. A Figura 4.8 ilustra os valores obtidos em comparação ao ensaio experimental. As Figuras 4.9 e 4.10 demonstram a relação entre a variação dos parâmetros da USERMAT e o desempenho do modelo numérico.

Figura 4.8 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3_S_20-8D12.7-X_F



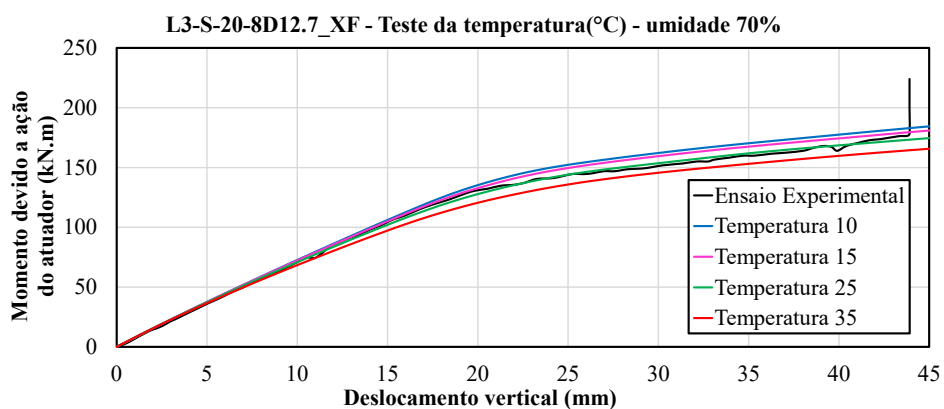
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.9 – Avaliação da variação na umidade no modelo de armadura incorporada - Usermat



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.10 – Avaliação da variação da temperatura no modelo de armadura incorporada - Usermat



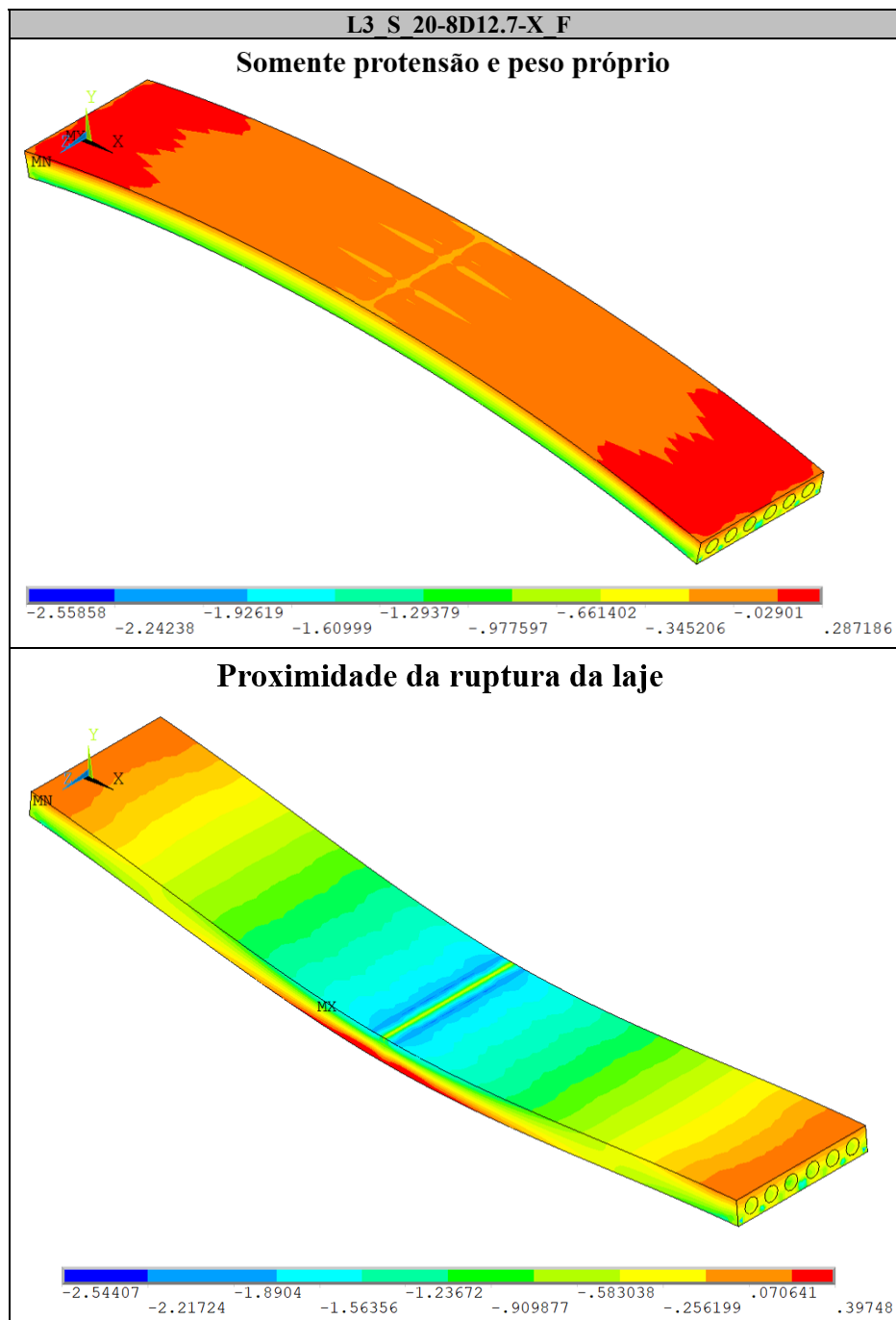
(fonte: elaborado pelo autor)

A análise da Figura 4.8 indica uma boa correspondência entre os resultados obtidos a partir do modelo numérico e os resultados do ensaio experimental, com curvas semelhantes que se estendem desde a região elástica até a fase plástica. O modelo USERMAT mostrou uma correlação mais próxima em comparação com o modelo DP-DP, a diferença está no final do ensaio, com menos tensão na armadura no modelo DP-DP. Isso deve-se aos diferentes leis constitutivas de tração dos modelos de acordo com as Figuras 3.13 e 3.16. Além disso, a USERMAT possui capacidade de considerar os efeitos da retração e fluência. Dado o caráter do elemento pré-moldado, esses efeitos são significativos, especialmente considerando o período de armazenamento e a posição da laje durante o ensaio. No entanto, tais efeitos são apenas aproximados no modelo DP-DP, que emprega um valor de perda de protensão diretamente no modelo.

A partir das Figuras 4.9 e 4.10, pode-se observar como a variação de fatores, como temperatura e umidade do ambiente, é crucial para o desempenho estrutural das lajes. Na Figura 4.9, é evidente que o aumento da umidade resulta em uma redução da rigidez da laje. Por outro lado, na Figura 4.10, quanto maior a temperatura do ambiente, ocorre a diminuição da rigidez da laje. Portanto, as Figuras destacam a importância de considerar os efeitos da fissuração e retração no modelo numérico, mostrando como o modelo é sensível à sua variação.

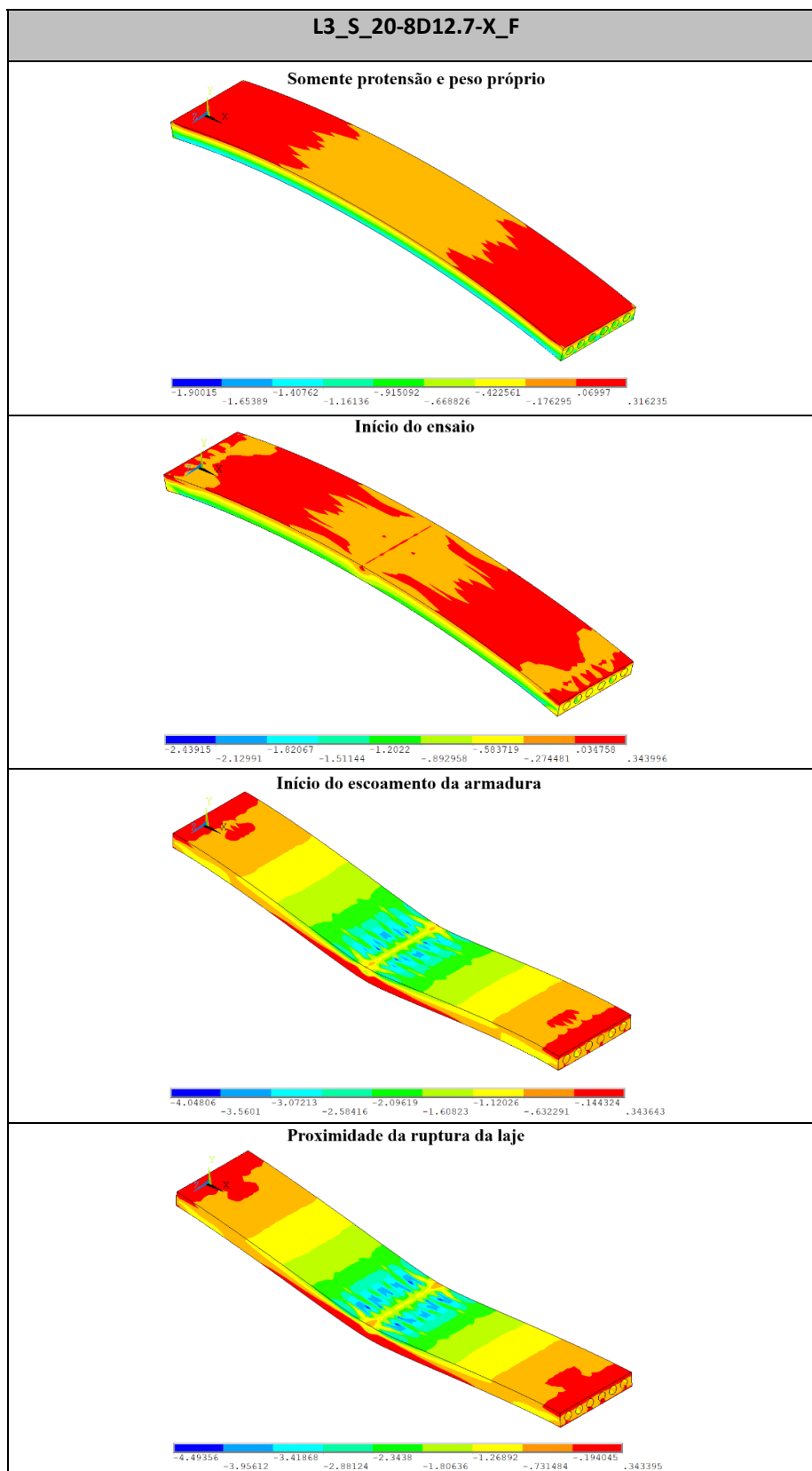
As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram a evolução das componentes de tensão no eixo x do concreto da laje para ambos os modelos. Além da análise do momento Fletor e das tensões no concreto, foi realizada uma comparação entre a foto do rompimento das laje ensaiada à flexão por Catoia (2011) e os valores de tensão no eixo x do modelo da USERMAT, conforme demonstrado na Figura 4.13.

Figura 4.11 – Evolução da componente de tensão σ_x dos elementos de concreto DP-DP (kN/cm²)



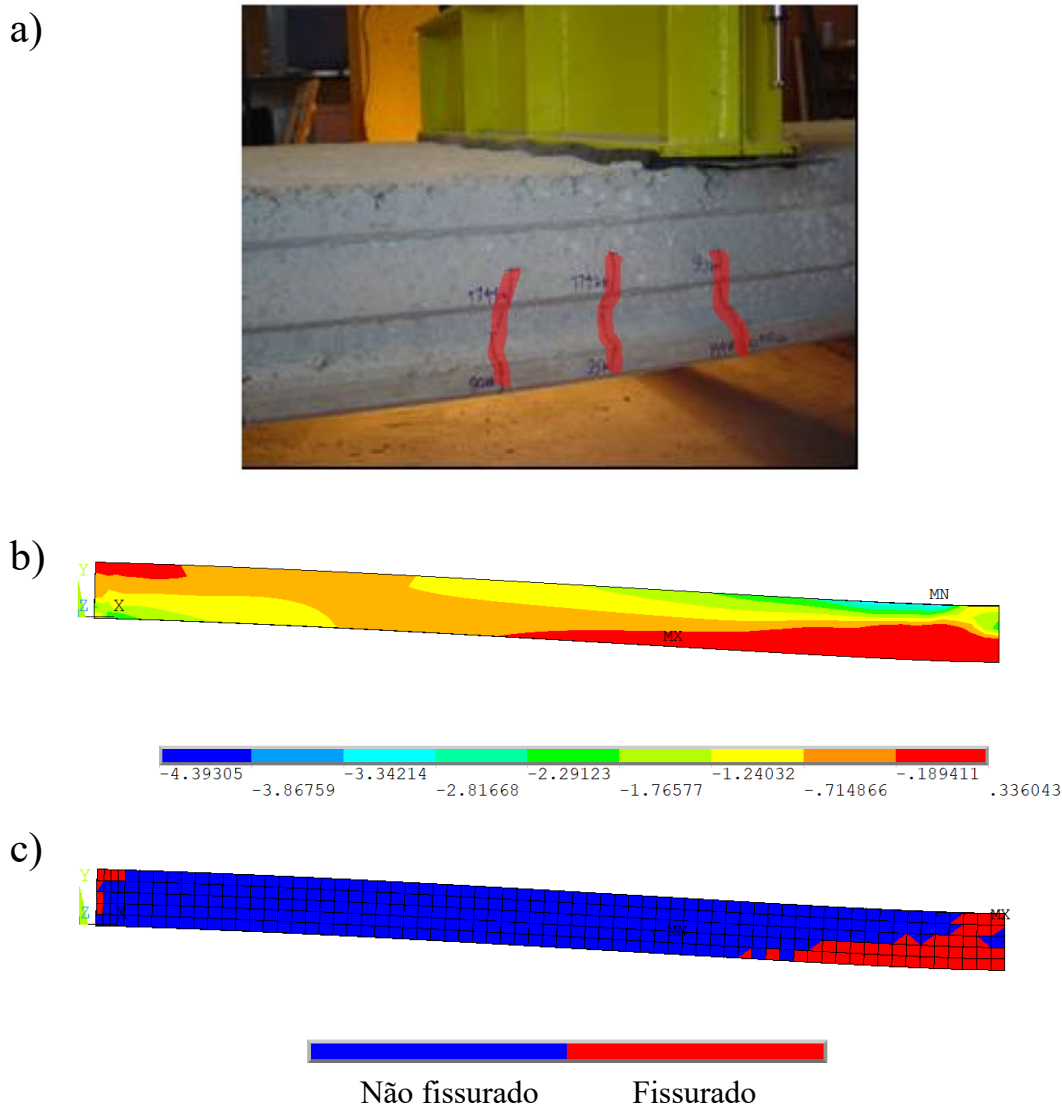
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.12 – Evolução da componente de tensão σ_x dos elementos de concreto USERMAT (kN/cm²)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.13 – Comparação da fissuração na laje: a) Ensaio; b) Modelo de armadura incorporada USERMAT - tensão σ_x dos elementos de concreto (kN/cm²); c) Elementos fissurados na USERMAT apresentados apenas na simetria da laje



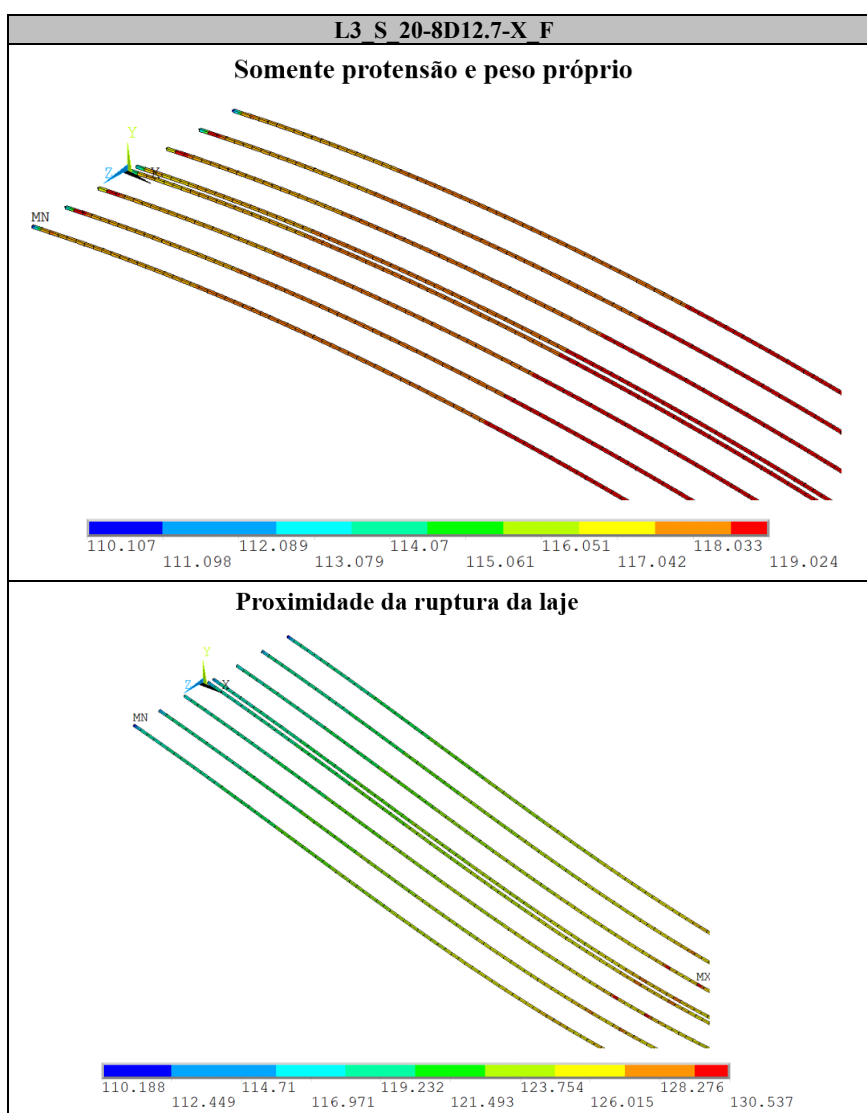
(fonte: elaborado pelo autor)

As Figuras 4.11 e 4.12 oferecem uma visualização clara da evolução da tensão no concreto da laje ao longo do tempo. Ao analisar essas figuras, é evidente que as regiões destacadas em tons de vermelho, representando as maiores tensões de tração, coincidem com a localização das fissuras no ensaio experimental. Isso indica que o modelo é capaz de prever a distribuição das fissuras nas proximidades da ruptura da laje. O modelo da USERMAT representa toda a passagem do tempo e seus efeitos nos materiais que compõem a laje, desde o ato da protensão até a ruptura (levando em conta o tempo que a laje ficou estocada), enquanto o modelo DP-DP apenas o efeito da protensão e a realização do ensaio. Observa-se que o modelo USERMAT é capaz de representar toda a evolução das tensões no concreto, enquanto o modelo DP-DP abrange apenas a fase da

aplicação da protensão até a ruptura. No entanto, para ambos os modelos, os resultados mostram uma consistência notável, com as tensões no eixo x apresentando valores muito próximos.

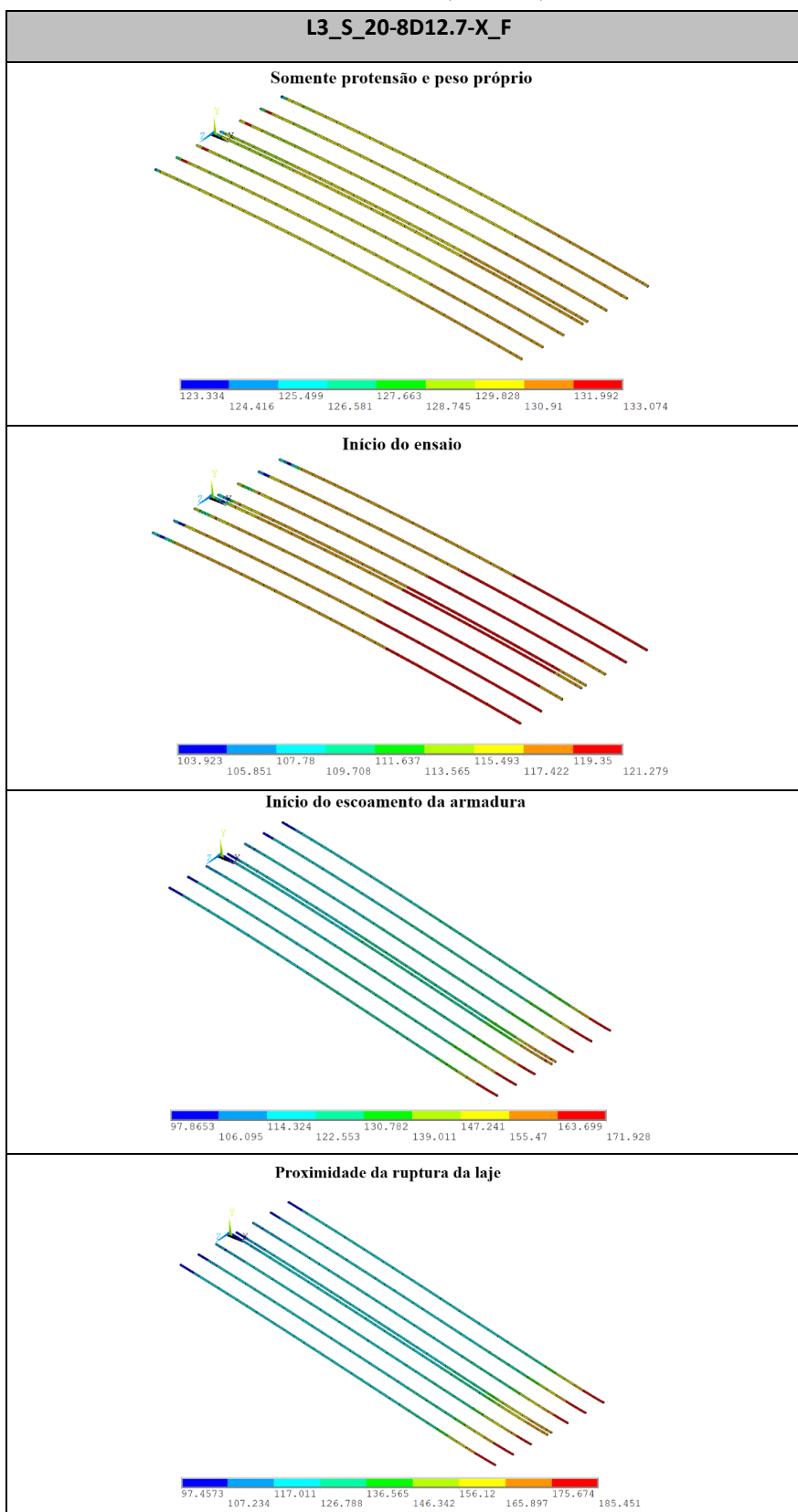
Para uma melhor compreensão dos resultados relacionados ao comportamento do aço, nas Figuras 4.14 e 4.15, parte das armaduras foi representada longitudinalmente, tirando proveito da simetria do modelo no centro do vão. Isso foi feito para ilustrar a evolução da componente de tensão no eixo x das armaduras da laje. Na Figura 4.16, é apresentada a distribuição das tensões na armadura próxima à ruptura da laje no modelo da USERMAT.

Figura 4.14 – Evolução da componente de tensão axial dos elementos da armadura DP-DP (kN/cm²)



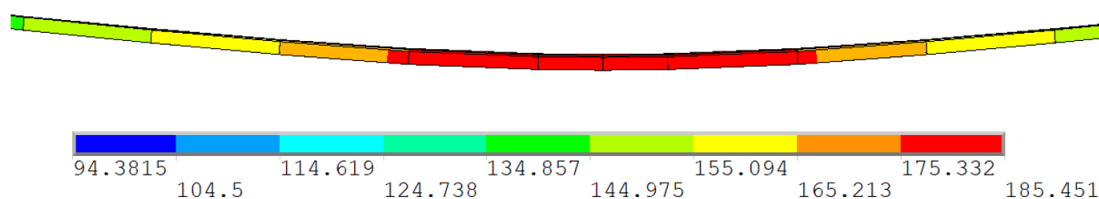
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.15 – Evolução da componente de tensão axial dos elementos da armadura USERMAT (kN/cm²)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.16 – Avaliação detalhada da tensão na armadura pelo modelo da USERMAT no centro do vão(kN/cm²)

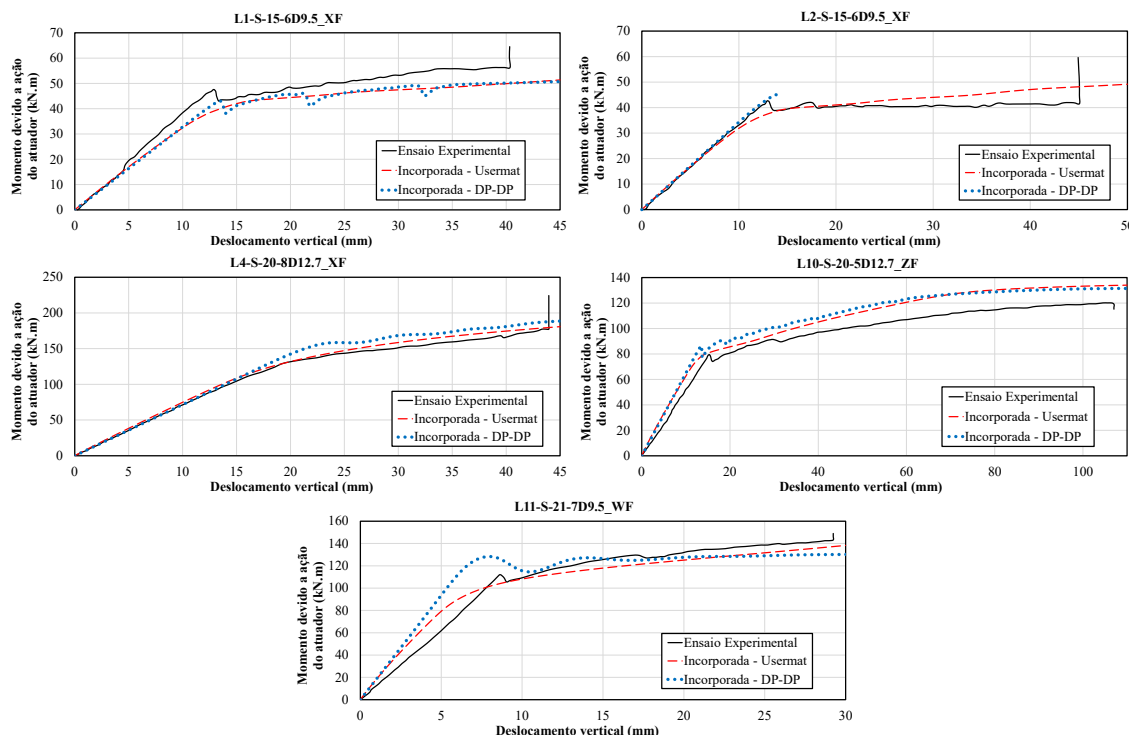


(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 4.15, é possível observar o efeito da relaxação na armadura, mostrando a variação de tensão entre o momento da protensão e o início do ensaio. Por outro lado, na Figura 4.14, a tensão ainda estava evoluindo no momento da ruptura, indicando que a capacidade do aço no modelo DP-DP não foi esgotada. Do ponto de vista do comportamento estrutural, a ocorrência do escoamento da armadura e a fissuração do concreto são evidenciadas na Figura 4.13 e na Figura 4.16, confirmando o esgotamento da capacidade resistente da laje devido à flexão, conforme determinado no ensaio experimental.

Como mencionado anteriormente, a Figura 4.17 é apresentada para evitar a repetição nas análises, mostrando apenas as curvas de momento em função do deslocamento vertical para as demais lajes sem capa estrutural, aplicando a mesma tolerância e número de incrementos nas análises. No Quadro 4.10 são apresentadas as comparações dos resultados experimentais e os modelos numéricos.

Figura 4.17 – Comparação momento x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.10 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes sem capa submetidas à flexão

Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{u,usermat}$ (kN.m)	$M_{u,dp}$ (kN.m)	$\frac{M_{u,usermat}}{M_{u,exp}}$ (adm.)	$\frac{M_{u,dp}}{M_{u,exp}}$ (adm.)
L1_S_15-6D9.5-X_F	56,26	50,09	50,11	0,89	0,89
L2_S_15-6D9.5-X_F	41,90	47,94	45,09	1,142	1,08
L3_S_20-8D12.7-X_F	176,94	177,42	187,00	1,01	1,06
L4_S_20-8D12.7-X_F	175,40	175,29	187,57	0,99	1,07
L10_S_20-5D12.7-Z_F	120,09	133,67	131,43	1,11	1,09
L11_S_21-7D9.5-W_F	143,16	137,14	130,11	0,96	0,90

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar a Figura 4.17 e o Quadro 4.10, é possível constatar a concordância entre os resultados obtidos pelos modelos numéricos e os ensaios experimentais, com curvas semelhantes. É importante observar que, mesmo considerando lajes produzidas na mesma fábrica e com a mesma constituição geométrica e materiais, ocorreu uma certa variação nos resultados experimentais. Isso ressalta as inconsistências às quais os elementos pré-moldados e os ensaios experimentais estão sujeitos, como observado na comparação entre as lajes "L1_S_15-6D9.5-X_F" e "L2_S_15-6D9.5-X_F", assim como "L3_S_20-8D12.7-X_F" e "L4_S_20-8D12.7-X_F". Além disso, em

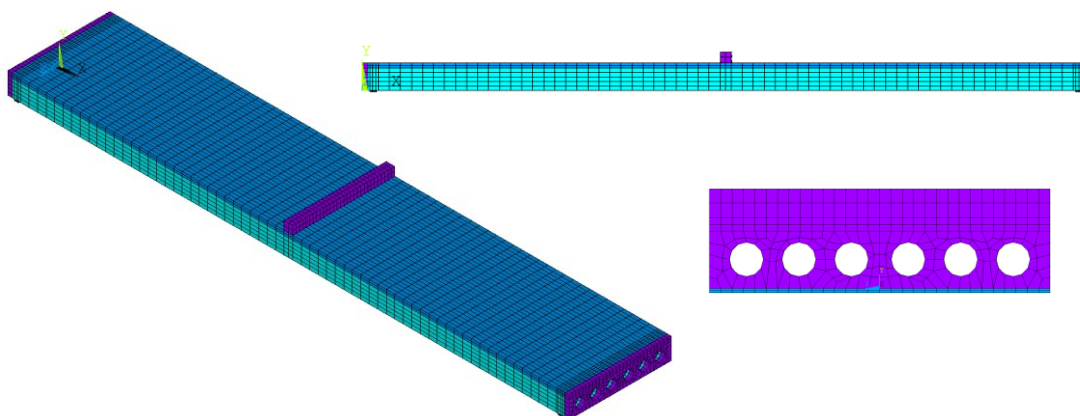
relação à Figura 4.17, é possível identificar que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento das lajes provenientes de diferentes fábricas e com distintas tipologias, validando assim o modelo de flexão para as lajes sem capa estrutural.

Do ponto de vista de falha estrutural, as lajes mostraram um comportamento similar ao ilustrado nas Figuras 4.13 e 4.16. Isso se traduziu na perda de capacidade da laje devido à flexão, escoamento da armadura e formação de fissuras no concreto. Um ponto de destaque é que, em comparação, às lajes mais espessas e com maior valor de protensão demonstraram uma resistência final superior. Isso ressalta a influência significativa que a variação na espessura e na tipologia das lajes pode ter nos resultados experimentais.

4.2 UNIDADES ALVEOLARES COM CAPA

Na análise das lajes com capa estrutural, foram discutidos os resultados da laje denominada "L3-C-25-8D12,7-X_F". A aplicação da capa estrutural é um procedimento comum na utilização de lajes alveolares, com o objetivo de aumentar sua resistência. A Figura 4.18 mostra o modelo numérico da laje com capa, destacando sua modelagem.

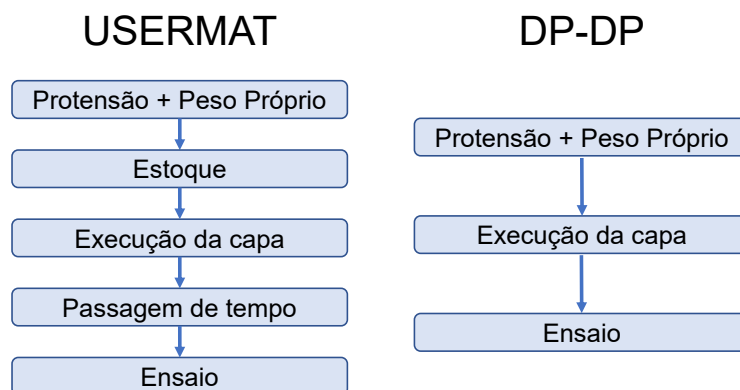
Figura 4.18 – Modelo numérico da laje L3-C-25-8D12,7-X_F



(fonte: elaborado pelo autor)

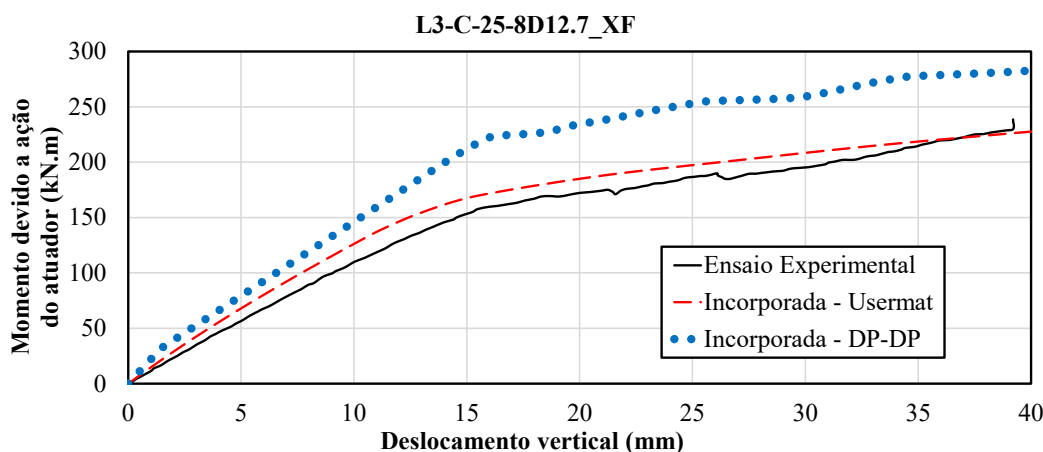
Em relação ao fluxo de carregamento, para o modelo USERMAT foram adotadas todas as etapas pelas quais a laje L3-C-25-8D12,7-X_F foi submetida, desde o ato da produção, protensão e estoque, lançamento da capa estrutural, até a execução do ensaio. Para o modelo DP-DP foi aplicada de forma simplificada com apenas duas divisões, uma etapa com o peso próprio e protensão, e outra para o início do ensaio. É apresentado na Figura 4.19 um organograma de como ocorreu o carregamento da laje para cada modelo. Para a validação numérica, a Figura 4.20 representa a curva de momento em relação ao deslocamento vertical.

Figura 4.19 – Etapas de carregamento da laje L3-C-25-8D12,7-X_F



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.20 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3-C-25-8D12,7-X_F



(fonte: elaborado pelo autor)

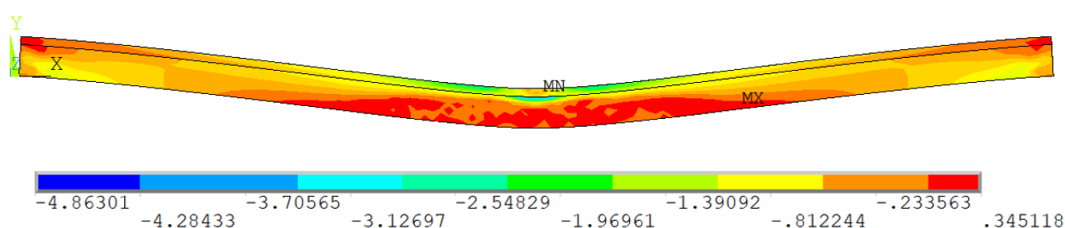
Com base na Figura 4.20, observa-se uma concordância entre os resultados obtidos pelo modelo numérico e o teste experimental, com curvas semelhantes. O modelo USERMAT apresentou uma correlação mais próxima do que o modelo DP-DP, devido à complexidade em simular todos os processos pelos quais a laje alveolar passou durante sua produção, incluindo efeitos de protensão, aplicação da capa e o próprio teste experimental.

O modelo USERMAT consegue abordar os efeitos do tempo, incluindo relaxação e fluência. Em contraste, o modelo DP-DP aproxima tais efeitos, considerando a perda de protensão e as resistências do concreto com base nos resultados do modelo USERMAT. No entanto, o modelo DP-DP não consegue avaliar o aumento de resistência do concreto devido à aplicação da capa em uma laje com idade e resistência diferentes das do teste. No modelo USERMAT, todo o processo

de protensão, passagem de tempo, lançamento da capa e uma segunda passagem do tempo até o início do ensaio são considerados. Além disso, como mencionado anteriormente, foram adotadas diferentes leis constitutivas de tração dos modelos.

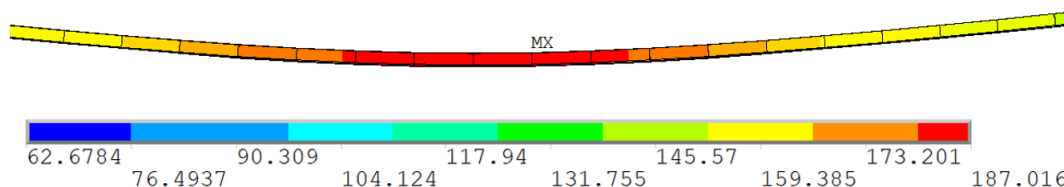
Do ponto de vista computacional e de modelagem, aplicar o modelo DP-DP é vantajoso devido à menor quantidade de informações necessárias para sua criação e à rápida convergência da solução, se comparada com o modelo que emprega a USERMAT. As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam o comportamento da tensão no eixo x para o concreto e o aço nas lajes com capa estrutural.

Figura 4.21 – σ_x dos elementos de concreto na proximidade ruptura da laje com capa



(fonte: elaborado pelo autor)

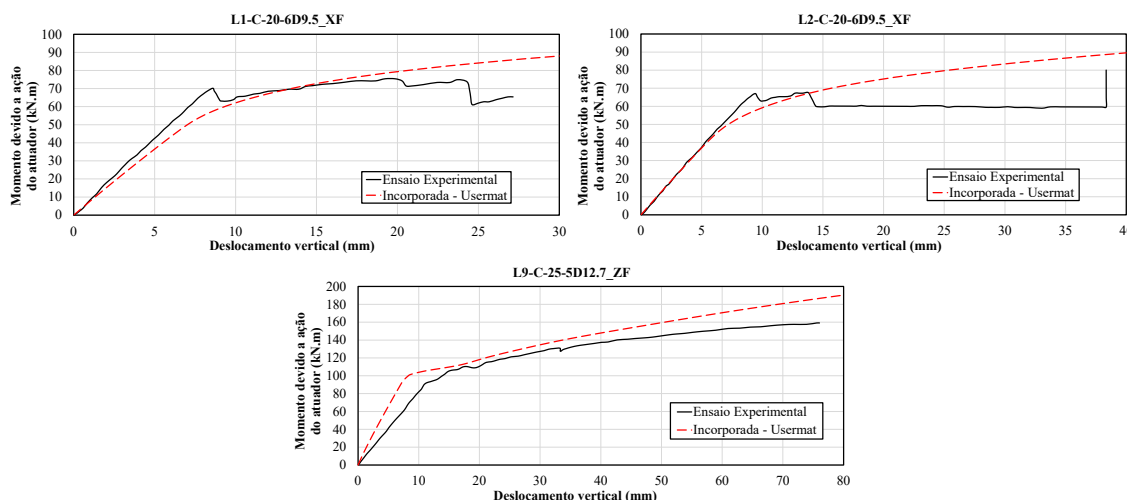
Figura 4.22 – σ_x dos elementos de aço na ruptura da laje



(fonte: elaborado pelo autor)

Do ponto de vista do comportamento estrutural, é observado nas Figuras 4.21 e 4.22 a elevada tensão da armadura e a fissuração do concreto, indicando que a capacidade resistente da laje foi esgotada principalmente devido à flexão, como determinado no ensaio experimental. A Figura 4.23 mostra as curvas de momento em relação ao deslocamento vertical das demais lajes com capa estrutural. Devido às limitações do modelo DP-DP em representar a situação com capa estrutural, as curvas foram geradas apenas com o modelo de concreto usando a USERMAT. No Quadro 4.11 são apresentadas as comparações dos resultados experimentais e os modelos numéricos.

Figura 4.23 – Comparação momento x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 4.11 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes com capa submetidas à flexão

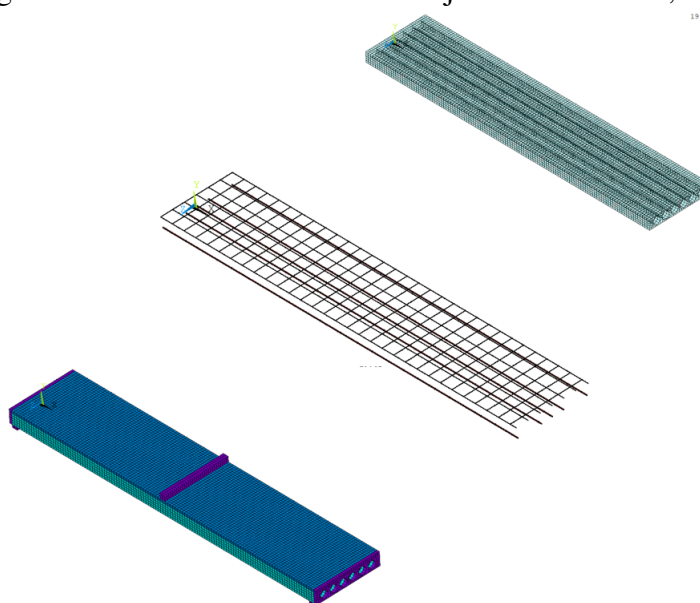
Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{u,usermat}$ (kN.m)	$\frac{M_{u,usermat}}{M_{u,exp}}$ (adm.)
L1_C_20-6D9.5-X_F	68,57	84,48	1,23
L2_C_20-6D9.5-X_F	66,98	70,2	1,05
L3_C_25-8D12.7-X_F	226,53	221,47	0,98
L9_C_25-5D12.7-Z_F	159,09	185,29	1,16

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da Figura 4.23 e o Quadro 4.11, é possível constatar concordância entre os resultados obtidos dos modelos numérico com os ensaios experimentais, apresentando curvas similares, reafirmando os resultados obtidos para o grupo de lajes alveolares sem capa estrutural. Outro ponto a ser verificado, para lajes com mesma tipologia, ocorreu um aumento da carga de ruptura, constatando o ganho da resistência conforme relatado na pesquisa de Catoia (2011). Comparando o gráfico da laje "L3_S_20-8D12.7-X_F" e a laje com capa "L3_C_25-8D12.7-X_F", que apresentam a mesma tipologia, materiais próximas, foi possível constatar o ganho na resistência, conforme já mencionado, demonstrando a eficiência no uso da capa estrutural.

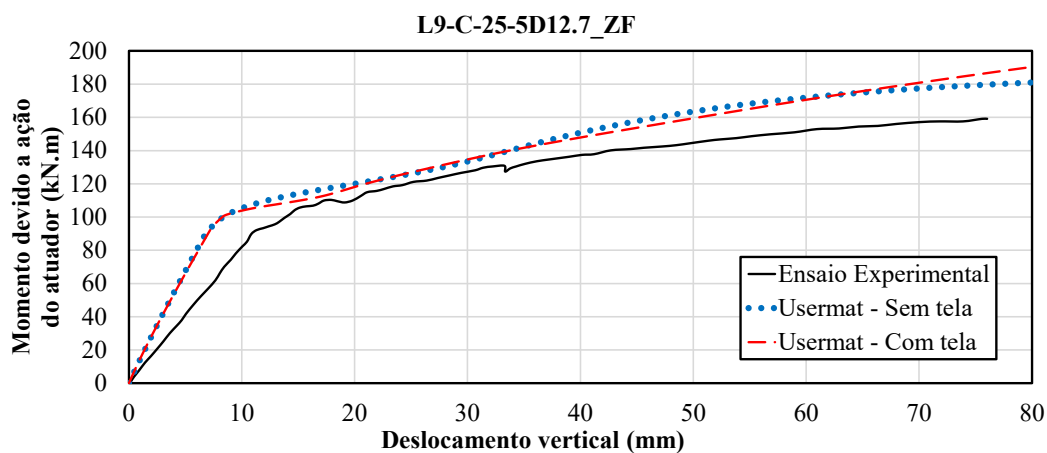
Como ponto notório de análise, a laje "L9-C-25-5D12,7-Z_F" foi produzida com capa estrutural e tela soldada para combater os efeitos de retração, procedimento usual na prática do uso de lajes alveolares. A Figura 4.24 ilustra o modelo numérico produzido para essa situação, demonstrando a presença da tela soldada e a Figura 4.25 a comparação do gráfico momento x deslocamento vertical para situação com e sem tela soldada.

Figura 4.24 – Modelo numérico da laje L9-C-25-5D12,7-Z_F



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.25 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L9-C-25-5D12,7-Z_F



(fonte: elaborado pelo autor)

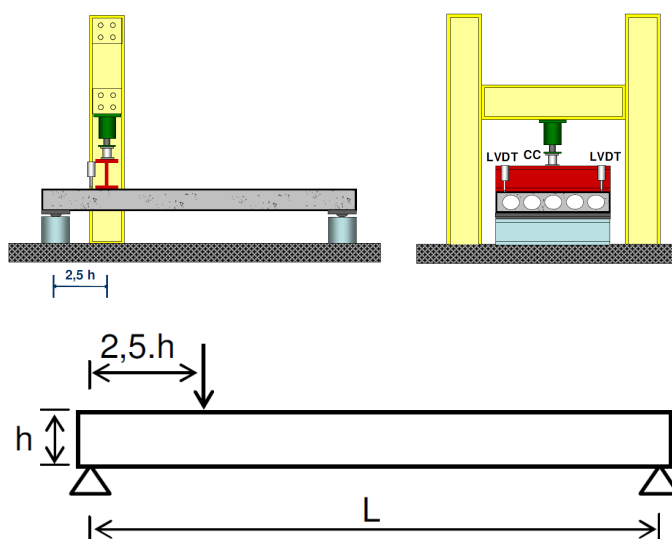
Do ponto de vista de ruptura, a laje apresentou comportamento semelhante ao das Figuras 4.21 e 4.22, conforme mencionado anteriormente, atingindo o esgotamento da capacidade da laje por flexão, pelo escoamento da armadura e fissuração do concreto. A ideia principal da análise desta laje seria verificar a influência da tela soldada no conjunto da estrutura, que não teve grande interferência nos resultados na rigidez da laje na ruptura, como foi apresentando na Figura 4.25.

5 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE RUPTURA AO ESFORÇO CORTANTE

Para validar o modelo numérico no ensaio de lajes alveolares sujeitas a ruptura ao esforço cortante, foi necessário incluir a modelagem da região de ancoragem. Essa modelagem visa representar o comportamento da aderência entre o aço e o concreto. Para este novo modelo, continuou-se a utilizar o elemento SOLID186 para os elementos de concreto e, para a armadura, uma representação discreta com o emprego do elemento LINK180 e um elemento de combinação COMBIN39. Foi introduzida a relação de força-deslizamento entre os materiais para representar o comportamento da aderência na interface das cordoalhas com o concreto. Em relação aos modelos constitutivos do concreto e do aço, a metodologia utilizada foi a mesma dos ensaios de flexão do capítulo 4.

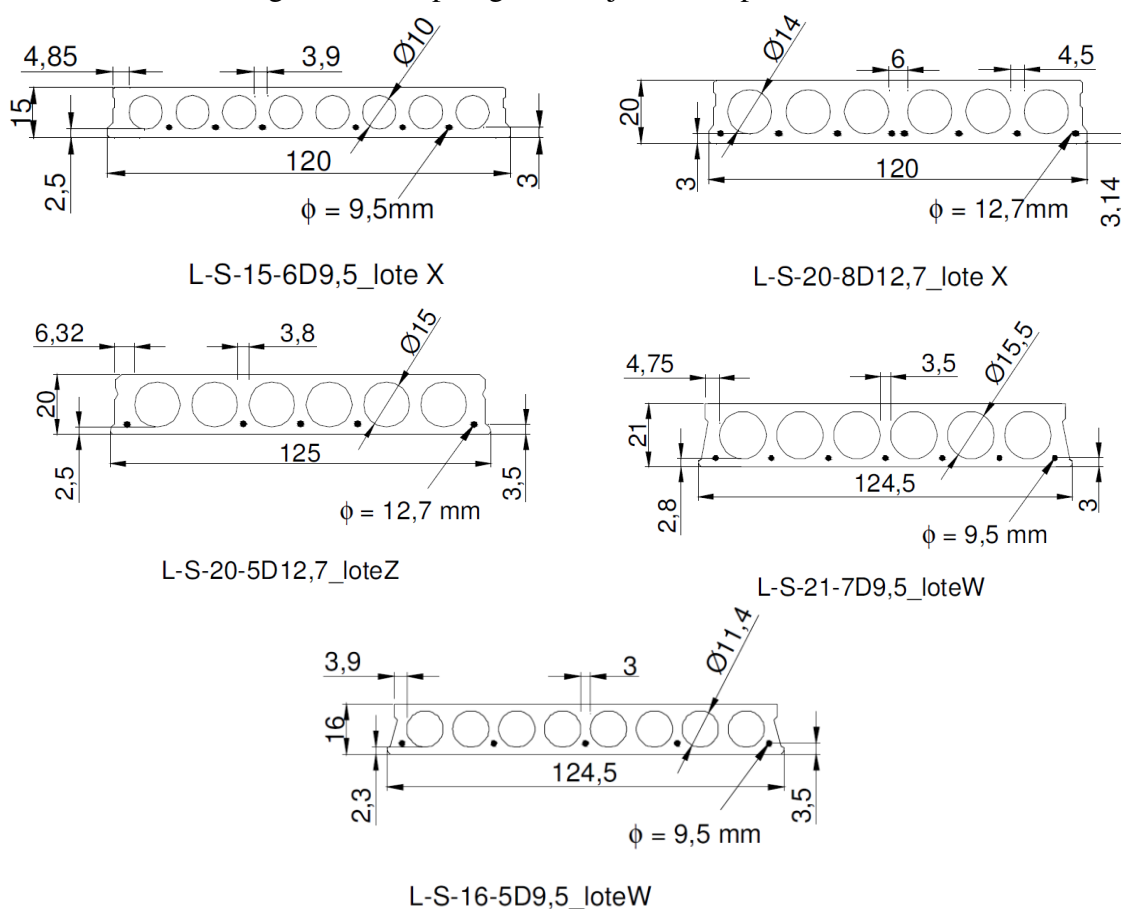
Para os ensaios de cisalhamento, foi utilizado um arranjo padronizado de acordo com a norma NBR 14861 (ABNT, 2022), conforme mostrado na Figura 5.1. Este arranjo foi aplicado considerando a tipologia específica da seção transversal e as informações geométricas de cada modelo de laje, levando em conta a fábrica em que foi produzida (fábricas X, Y, W e Z). Foram modeladas apenas as lajes com ausência de capa estrutural. Os detalhes essenciais das tipologias das lajes são ilustrados na Figura 5.2 para uma melhor compreensão.

Figura 5.1 – Modelo dos Ensaios de Cisalhamento



(fonte: adaptado de CATOIA, 2011)

Figura 5.2 – Tipologia das lajes sem capa estrutural



(fonte: CATOIA, 2011)

Conforme mostrado na Figura 5.1, os ensaios das lajes submetidas ao cisalhamento apresentaram uma configuração biapoada, com a aplicação de força concentrada próxima ao apoio, utilizando um atuador hidráulico. Esse atuador aplicou uma carga em uma viga metálica que a distribui nas lajes, variando a distância de acordo com a altura de cada conjunto de lajes. A pesquisa de Catoia (2011) disponibilizou dados do acervo fotográfico e a curva experimental obtida pelos leitores referentes às lajes. As informações dos ensaios experimentais das lajes alveolares são detalhadas nos Quadros 5.1 ao 5.3. Em relação aos apoios, atuador e cordoalhas foram adotados a mesma tipologia e os mesmos dados apresentados no capítulo anterior, apresentando nas Figuras 4.4 e 4.5, e nos Quadros 4.6 e 4.7.

Quadro 5.1 – Características das seções das lajes

Laje	Altura (cm)	Base (cm)	Vão (cm)	Φ Alv (cm)	d' (cm)	d (cm)
L1_S_15-6D9.5-X_C	15	120	650	8,81	3,38	11,52
L2_S_20-8D12.7-X_C	20	120	650	12,14	3,29	16,71
L18_S_21-7D9.5-W_C	20	124,5	400	14,37	3,1	17,29
L26_S_16-5D9.5-W_C	16	124	399	9,99	2,45	13,57

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5.2 – Características do concreto das lajes sem capa estrutural

Laje	fcm (28 dias) (MPa)	fcj (lib. pr.) (MPa)	fcj laje (ensaio) (MPa)	Idade laje (ensaio) (dias)
L1_S_15-6D9.5-X_C	52,63	31,58	55,94	118
L2_S_20-8D12.7-X_C	45,65	27,40	48,40	108
L18_S_21-7D9.5-W_C	-	28,2	47	30
L26_S_16-5D9.5-W_C	-	28,2	47	28

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5.3 – Características das armaduras das lajes

Laje	Nº de cord.	Φ cord. (mm)	Fp por cabo (kN)	Fp total (kN)	Ap (mm ²)	σ_p (MPa)
L1_S_15-6D9.5-X_C	6	9,5	79	474	333	1423,42
L2_S_20-8D12.7-X_C	8	12,7	144,5	1156	811,2	1425,05
L18_S_21-7D9.5-W_C	7	9,5	81,03	567,21	388,5	1460
L26_S_16-5D9.5-W_C	5	9,5	81,03	405,15	277,5	1460

(fonte: elaborado pelo autor)

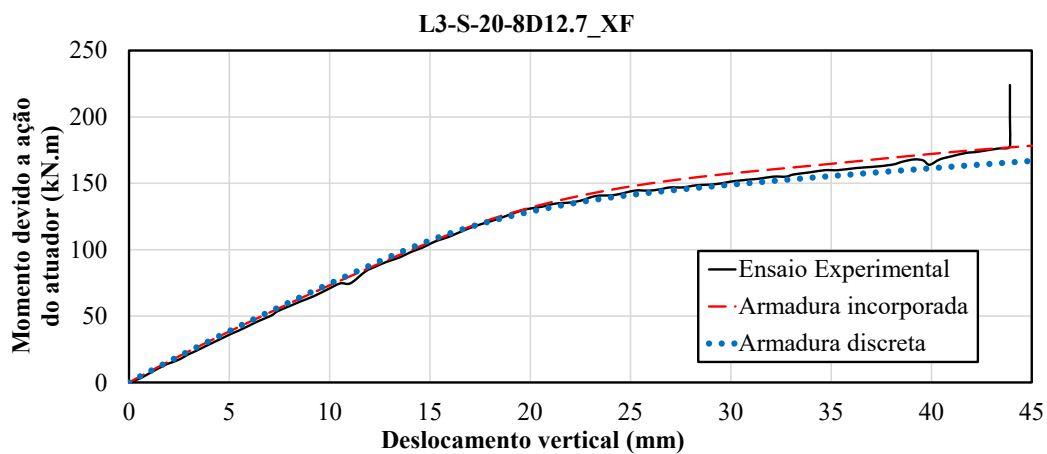
Para evitar repetições nas análises, é realizada uma minuciosa verificação do comportamento de uma laje por grupo, abrangendo todos os seus aspectos. Isso envolve uma verificação abrangente desde a fase de produção até a ruptura, com atenção especial às tensões no concreto e na armadura. As lajes com capa estrutural não foram representadas devido à impossibilidade de desativar o elemento COMBIN39 com o comando de *EKILL*. Esse comando foi necessário para representar todas as etapas do carregamento da capa na laje alveolar, proporcionando uma melhor representação do comportamento da laje, constatada na seção 4.2.

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O ENSAIO DE RUPTURA À FLEXÃO

Antes da aplicação diretamente nos ensaios de cisalhamento, ocorreu a validação do modelo para a laje "L3_S_20-8D12.7-X_F", que foi submetida ao ensaio de flexão, com seus dados presentes na Capítulo 4. A seguir são apresentadas as comparações entre os modelos com a armadura

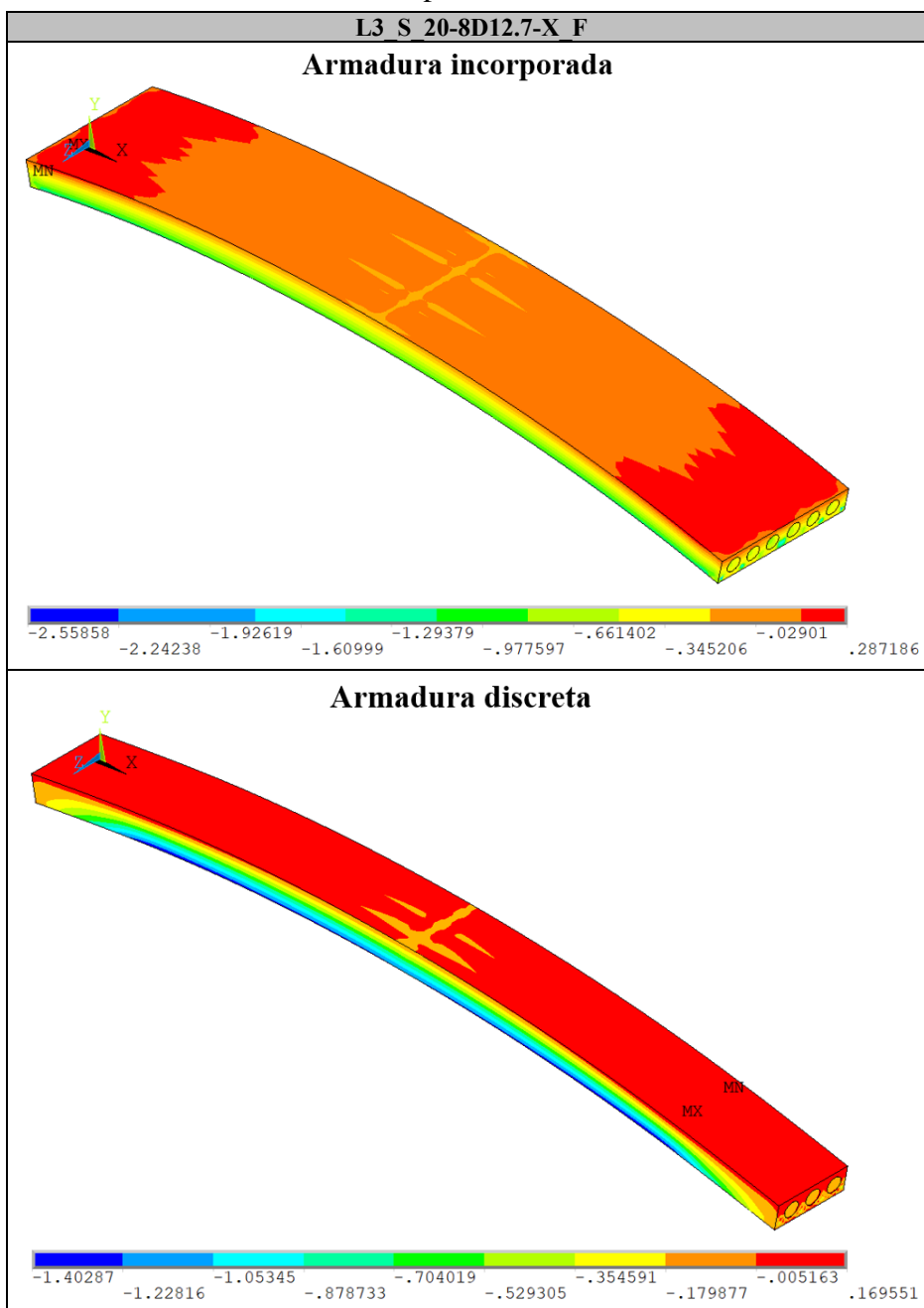
incorporada e com armadura discreta, comparando a curva momento x deslocamento vertical e os valores das tensões no decorrer do ensaio, demonstrados nas Figuras 5.3 a 5.7.

Figura 5.3 – Comparação momento x deslocamento vertical da laje L3_S_20-8D12.7-X_F para os modelos de armadura incorporada e discreta, ambos com a USERMAT



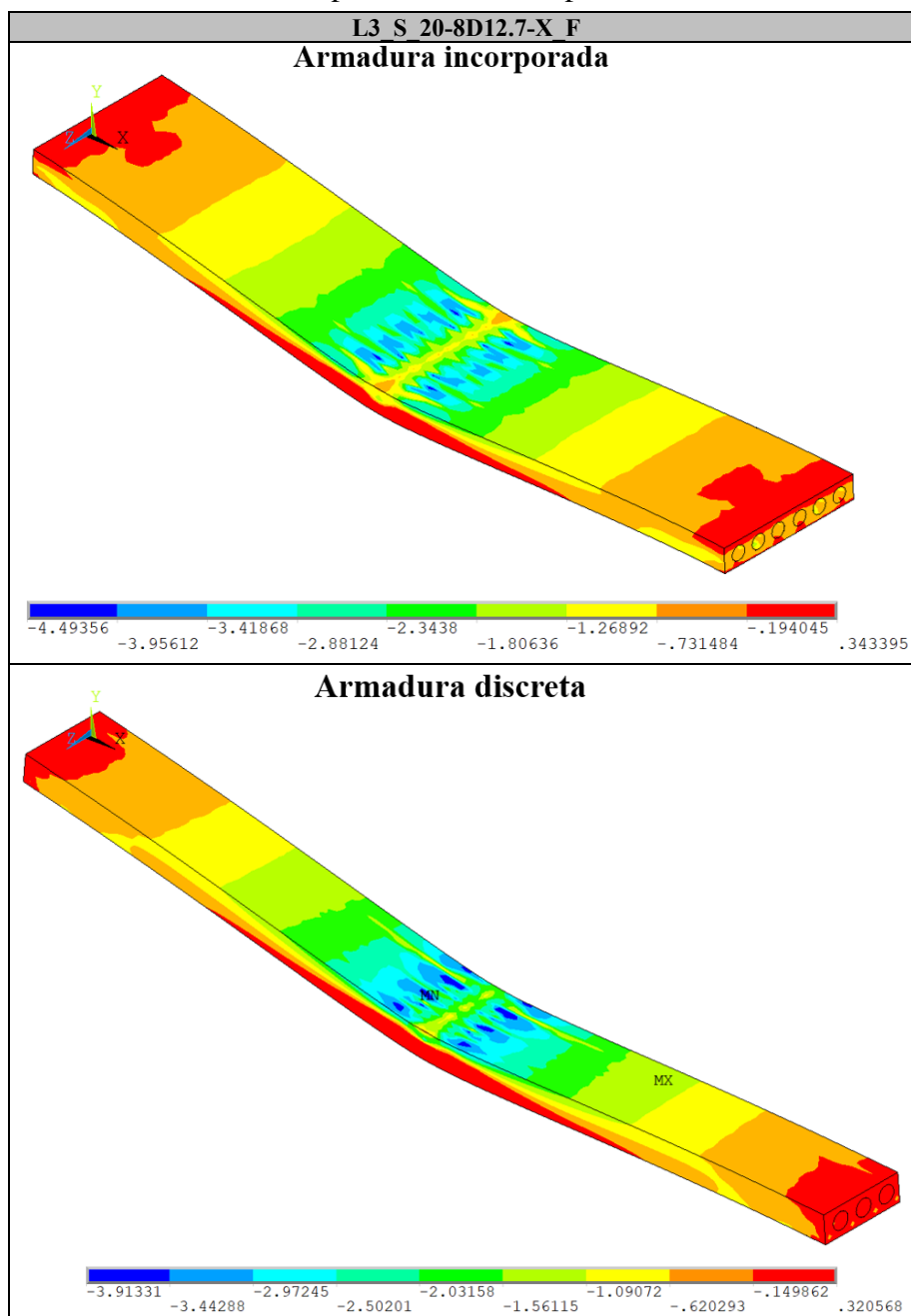
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.4 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de concreto no ato da protensão



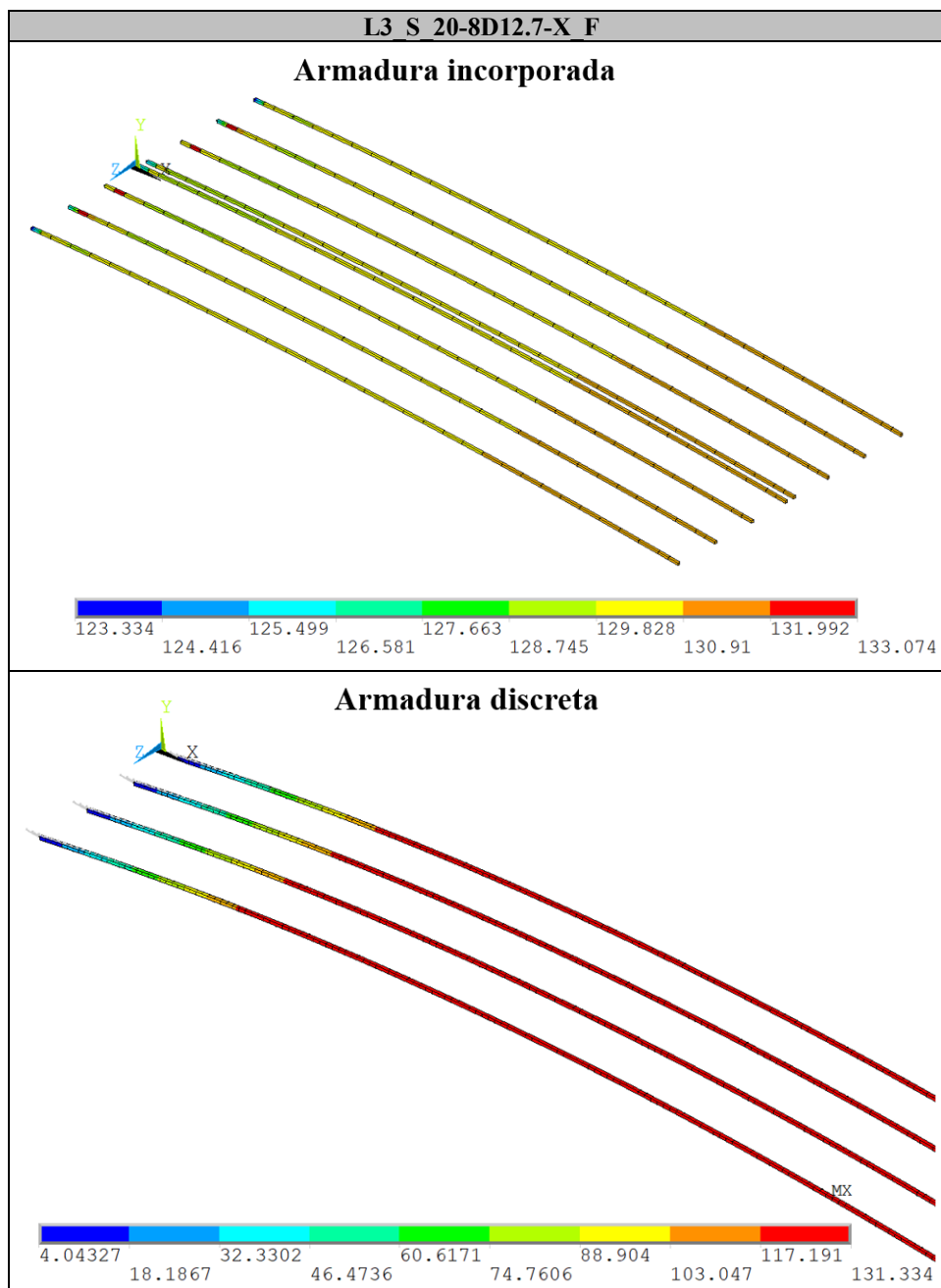
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.5 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de concreto na proximidade da ruptura



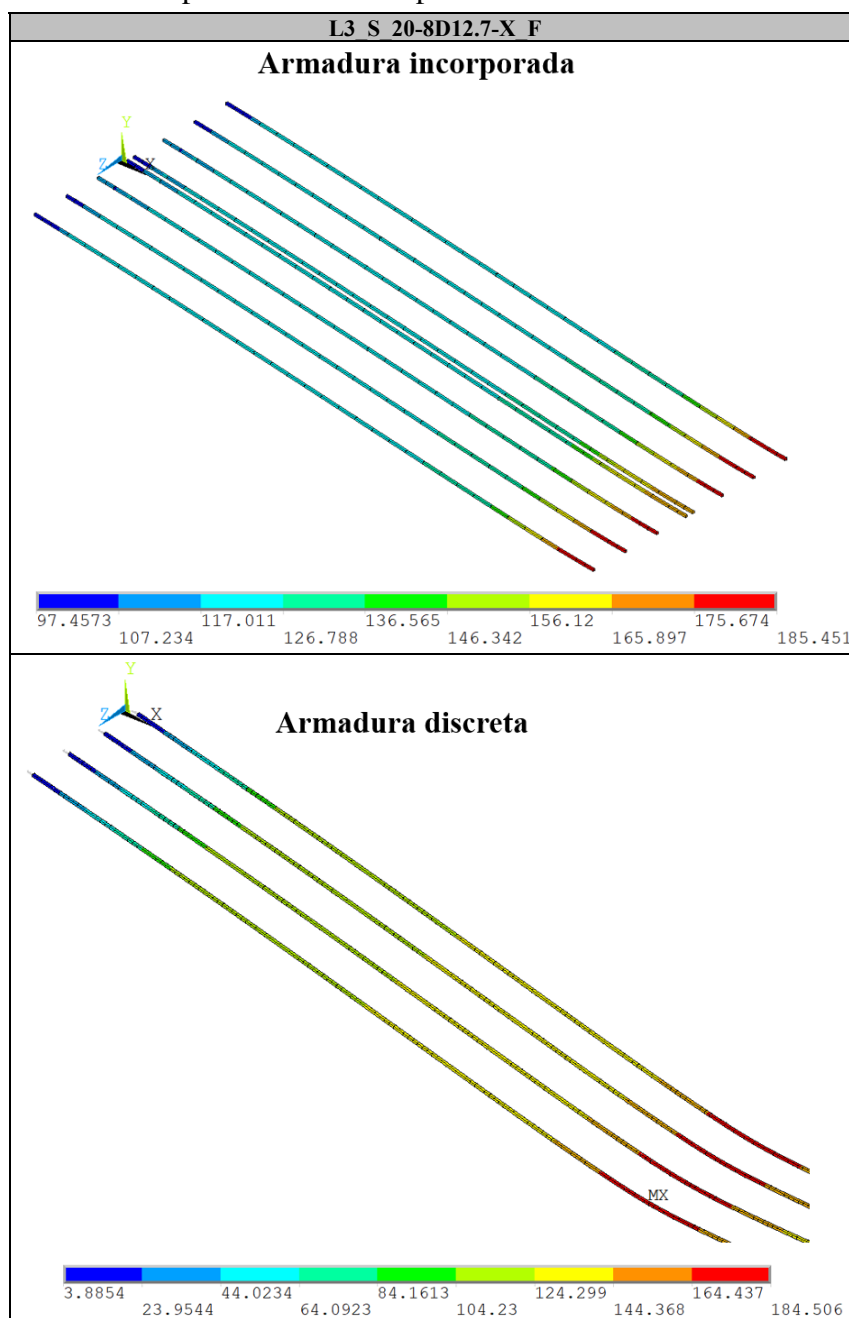
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.6 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de aço no ato da protensão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.7 – Comparação dos valores da tensão σ_x dos elementos de aço na proximidade da ruptura



(fonte: elaborado pelo autor)

A análise da Figura 5.3 revela uma boa correspondência entre os resultados obtidos em ambos os modelos, validando a eficácia do modelo com a representação discreta da armadura e a consideração do deslizamento entre a cordoalha e o concreto. Ao comparar as Figuras 5.4 e 5.5, observa-se uma concordância no comportamento do concreto, com valores semelhantes para ambos os modelos, tanto no ato da protensão quanto na ruptura.

Ao examinar as Figuras 5.6 e 5.7, notam-se algumas discrepâncias devido à presença do modelo

de aderência, evidenciando variações, especialmente nas extremidades das cordoalhas durante a protensão, onde ocorreram os maiores valores de deslizamento. No entanto, para os valores de tensão no centro do vão, que representam um ponto crucial para a ruptura devido à flexão, os valores de tensão da armadura são semelhantes, demonstrando a capacidade do modelo com armadura discreta e deslizamento aço-concreto.

Na comparação dos modelos, observa-se que o modelo com armadura discreta e deslizamento aço-concreto poderia ser utilizado nos ensaios de flexão. No entanto, devido à técnica de modelagem, que requer uma correspondência precisa da malha entre os elementos de concreto e de armadura, juntamente com a inclusão de um maior número de informações para o modelo de aderência, torna-se mais vantajoso adotar a modelagem pelo método de armadura incorporada nos ensaios de flexão.

5.2 UNIDADES ALVEOLARES SEM CAPA

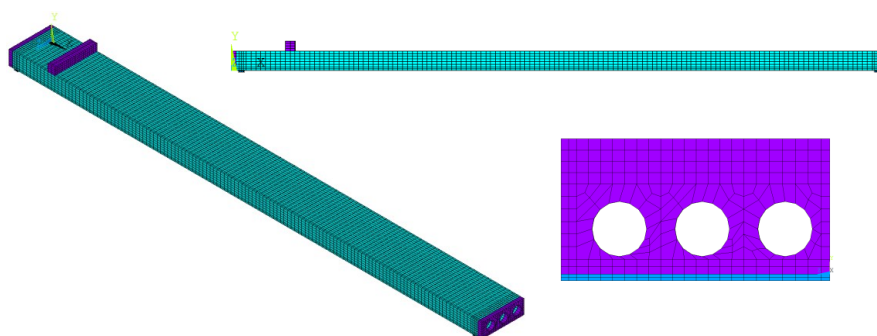
Para a abordagem das lajes com ausência de capa estrutural, foi apresentado os resultados referentes a laje "L2_S_20-8D12.7-X_C". O modelo numérico das lajes foi apresentado na Figura 5.8, com sua informação em relação a aderência apresentada no Quadro 5.4. Para validação numérica, foram traçadas as curvas esforço cortante versus deslocamento vertical na Figura 5.9 para os modelos de armadura incorporada e discreta. No Quadro 5.5 é apresentada a comparação do resultado experimental e o modelo numérico.

Quadro 5.4 – Dados do modelo com a armadura discreta

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
T_b	4,05 kN
τ_{max}	4,06 MPa

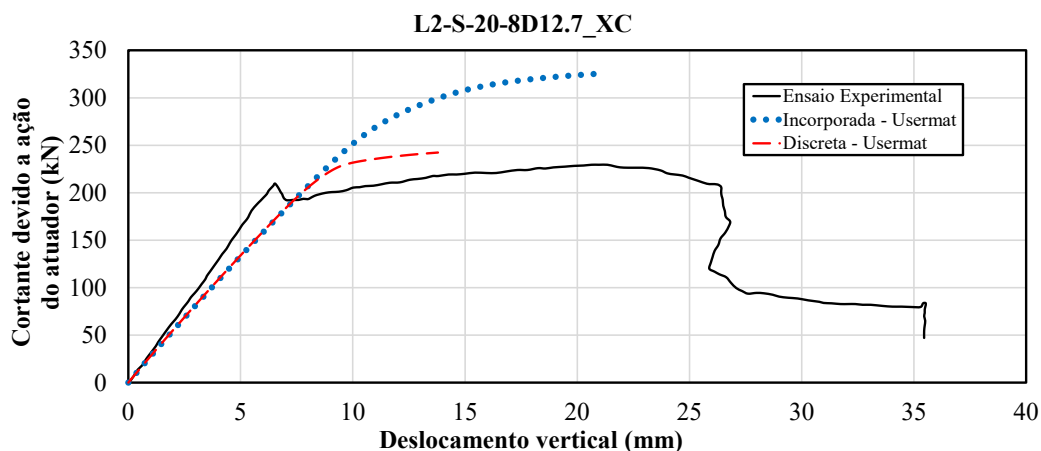
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.8 – Modelo numérico da laje L2_S_20-8D12.7-X_C



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.9 – Comparação cortante x deslocamento vertical da laje Laje L2_S_20-8D12.7-X_C



(fonte: elaborado pelo autor)

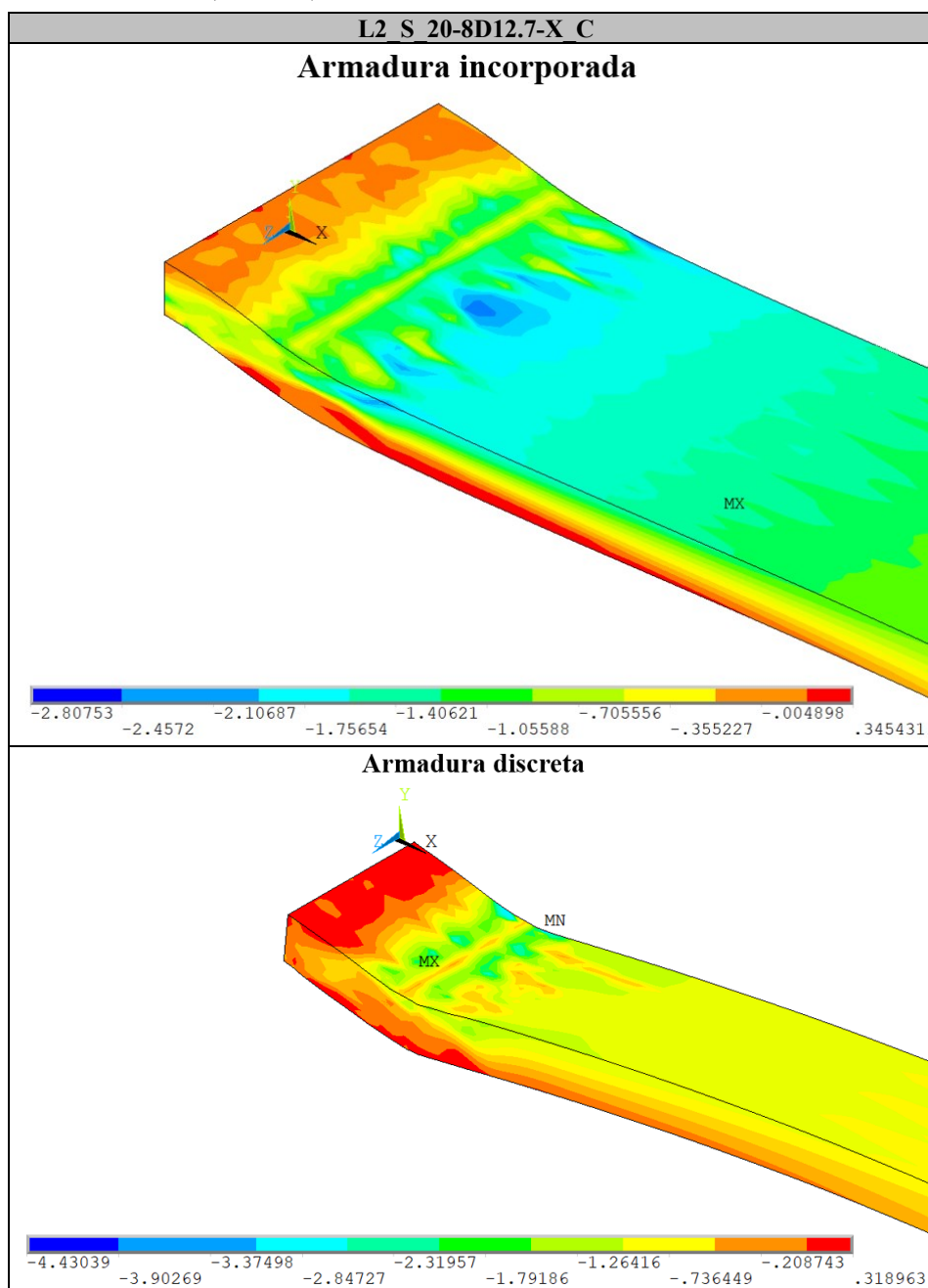
Quadro 5.5 – Comparação resultados experimentais versus modelo da laje sem capa submetida a ruptura ao cortante

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,incorp}$ (kN)	$V_{u,disc}$ (kN)	$\frac{V_{u,incorp}}{V_{u,exp}}$ (adm.)	$\frac{V_{u,disc}}{V_{u,exp}}$ (adm.)
L2_S_20-8D12.7-X_C	229,41	325,57	242,50	1,42	1,06

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na Figura 5.9 e no Quadro 5.5, observa-se boa correlação nos resultados do modelo com armadura discreta em comparação com os resultados experimentais. O modelo com armadura discreta, ao incluir o modelo de aderência, conseguiu simular o comportamento da curva de maneira mais próxima do valor de ruptura por força cortante. No entanto, houve uma pequena diferença entre a rigidez do modelo e o valor experimental, que é aceitável considerando a natureza frágil da ruptura por cortante. As Figuras 5.10 a 5.13 ilustram o comportamento do aço e do concreto para os modelos de flexão e cisalhamento.

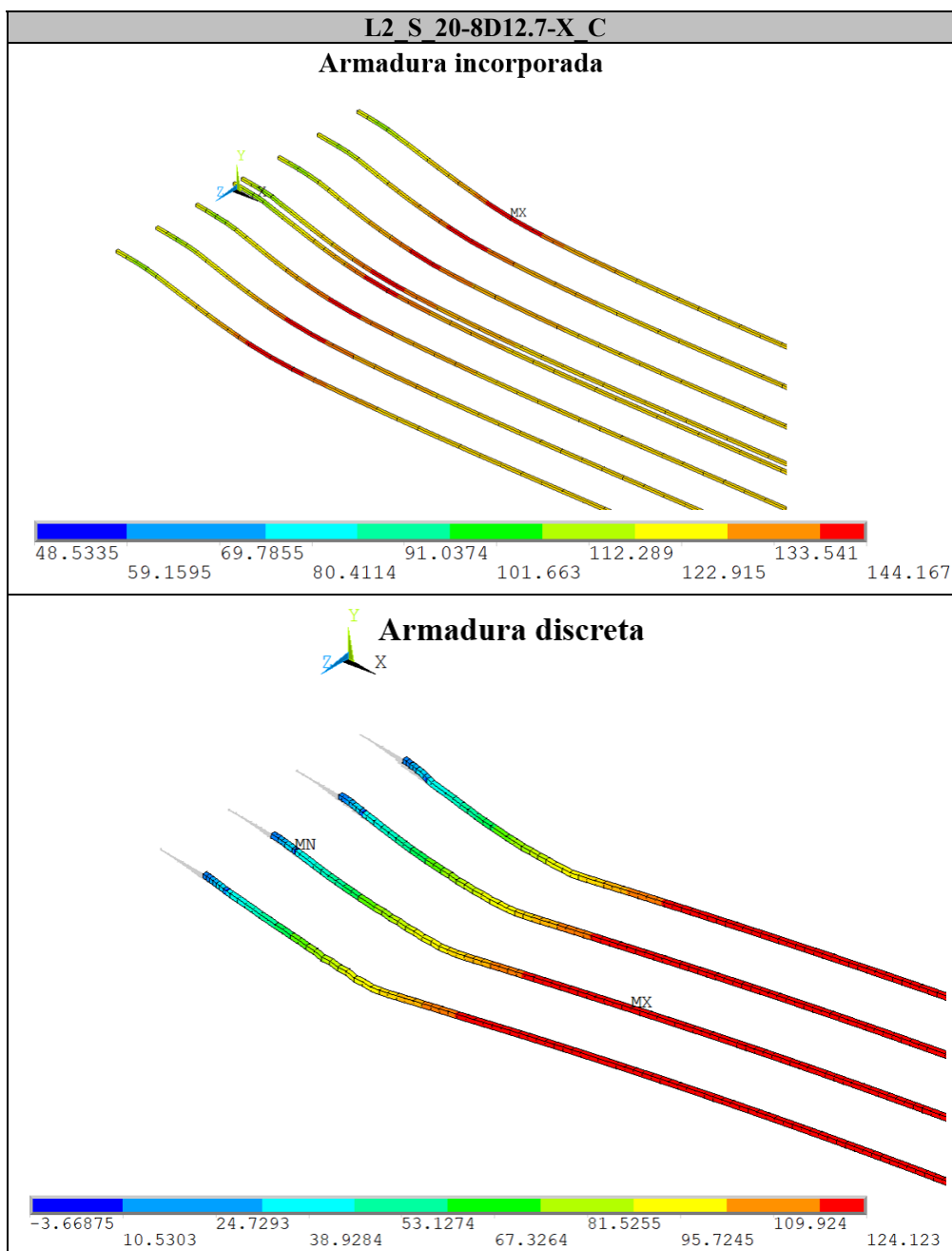
Figura 5.10 – Tensão σ_x dos elementos da concreto na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm²)



(fonte: elaborado pelo autor)

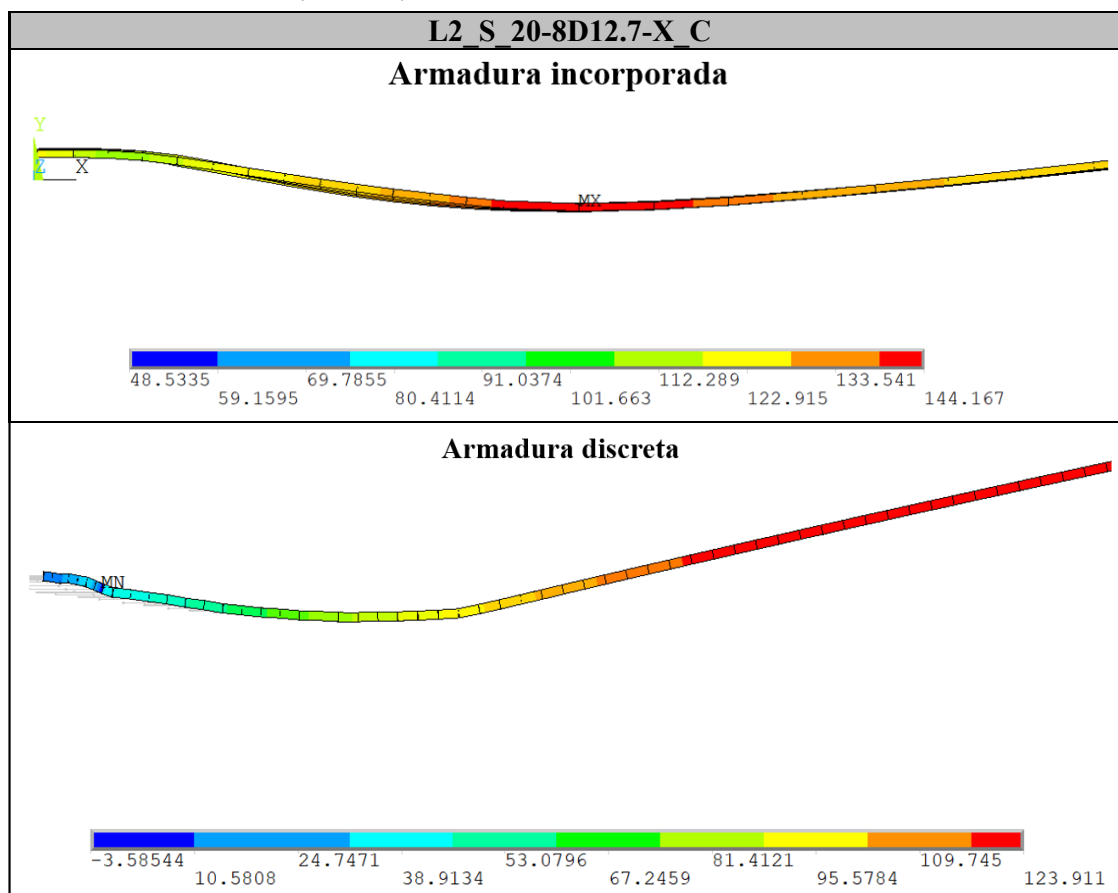
Ao observar a Figura 5.10, fica claro que o modelo de armadura incorporada revela uma distribuição de tensões de tração ao longo da parte inferior das lajes, apresentando fissuras características da flexão. Por outro lado, o modelo de armadura discreta indica uma concentração de tensões desde a área de aplicação da carga até o suporte, com uma inclinação típica de fissuração associada ao esforço cortante, sendo evidenciado posteriormente na Figura 5.13.

Figura 5.11 – Tensão σ_x dos elementos da armadura na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm²)



(fonte: elaborado pelo autor)

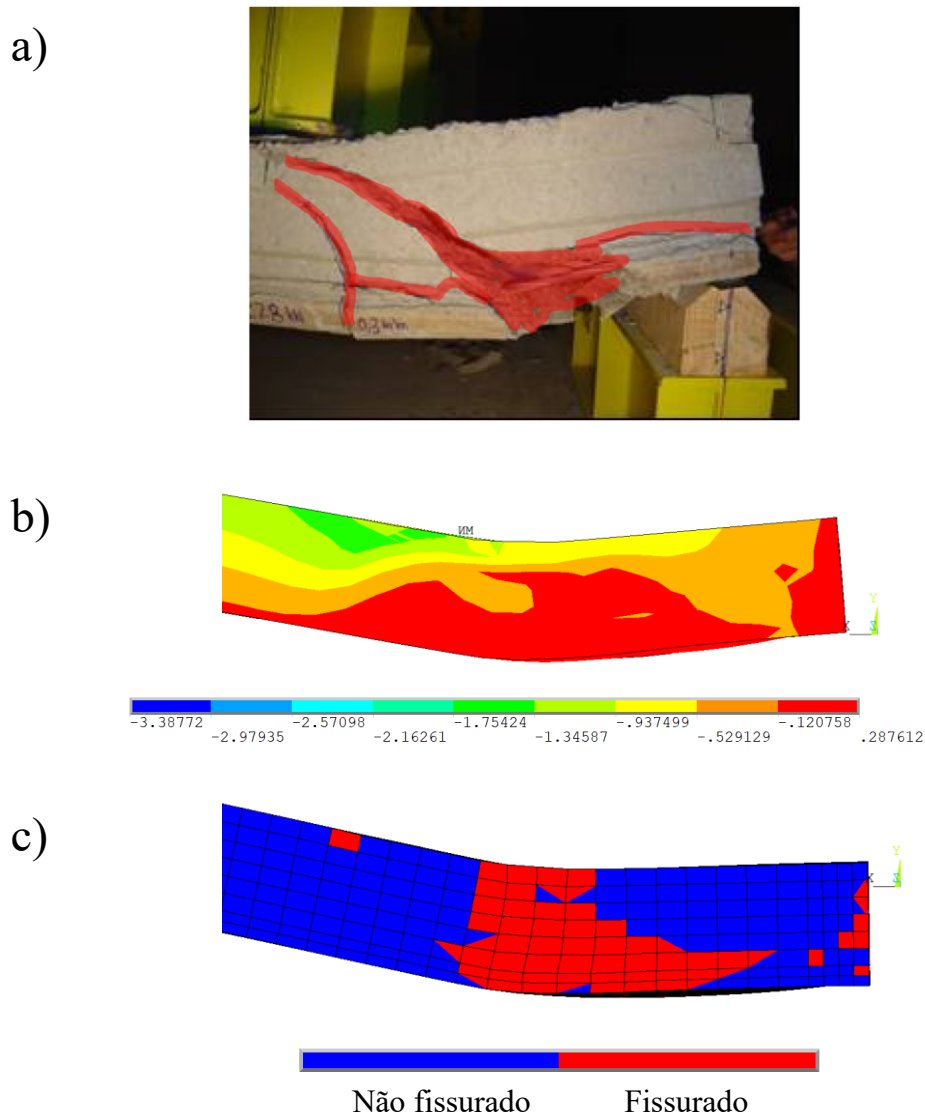
Figura 5.12 – Tensão σ_x dos elementos da armadura na proximidade da ruptura modelo de armadura incorporada e discreta (kN/cm²)



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nas Figuras 5.11 e 5.12, é evidente no modelo de armadura incorporada o aumento das tensões na armadura, tendendo ao escoamento da armadura e ao esgotamento da capacidade do concreto, como previsto na ruptura por flexão. Em contraste, no modelo de armadura discreta, não há aumento de tensão nas cordoalhas, indicando um deslizamento excessivo e falha na ancoragem da armadura, resultando no fendilhamento da armadura e acumulação de tensões no concreto próximo ao apoio, conforme mostrado na Figura 5.10, caracterizando a falha devido ao esforço cortante.

Figura 5.13 – Comparação ruptura da laje no: a) Ensaio, b) Modelo de armadura incorporada USERMAT - tensão σ_x nos elementos de concreto (kN/cm²); c) Elementos fissurados na USERMAT

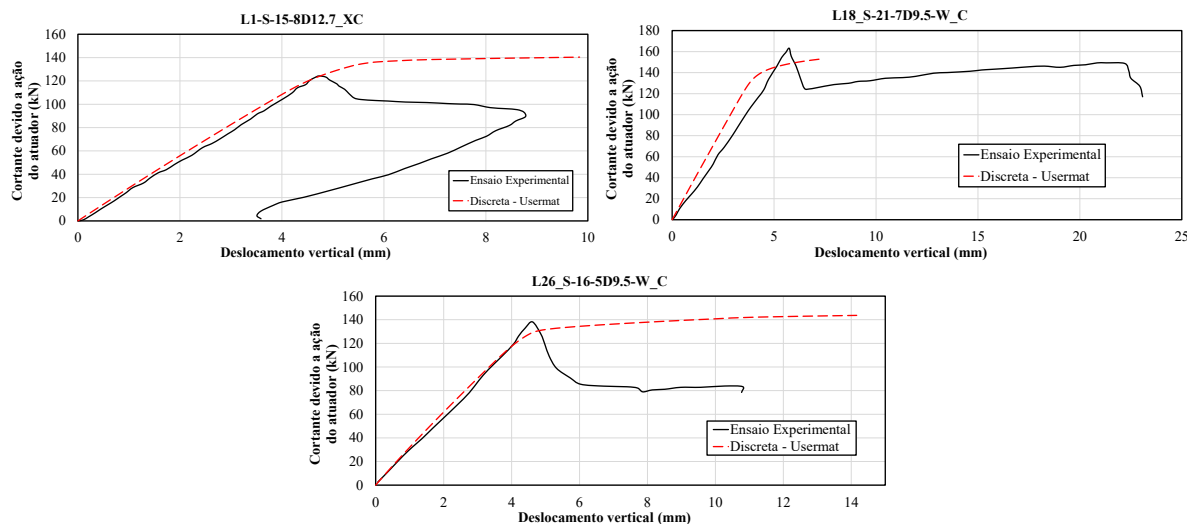


(fonte: elaborado pelo autor)

A análise visual da Figura 5.13 claramente indica que o modelo de armadura discreta e consideração do deslizamento aço-concreto conseguiu reproduzir o padrão de fissuração observado no ensaio. De acordo com Catoia (2011), a falha no ensaio experimental resultou da formação de fissuras típicas de cisalhamento, combinadas com fendilhamento e falha de ancoragem na armadura. Essa situação foi adequadamente representada no modelo de armadura discreta, mas não foi capturada no modelo de armadura incorporada, explicando a discrepância dos resultados observados no ensaio de força cortante conforme ilustrado na Figura 5.9. A Figura 5.14 mostra as curvas de cortante em relação ao deslocamento vertical para as demais lajes sem capa estrutural. No Quadro 5.6 são apresentadas as comparações dos resultados experimentais e os modelos

numéricos.

Figura 5.14 – Comparação cortante x deslocamento vertical das lajes sem capa estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5.6 – Comparação resultados experimentais versus modelos das lajes sem capa submetidas a ruptura ao cortante

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,disc}$ (kN)	$\frac{V_{u,disc}}{V_{u,exp}}$ (adm.)
L1_S_15-6D9.5-X_C	124,23	140,43	1,13
L18_S_21-7D9.5-W_C	163,24	152,86	0,94
L26_S_16-5D9.5-W_C	138,22	143,63	1,04

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na Figura 5.14 e no Quadro 5.6, verifica-se uma boa concordância entre os resultados obtidos no modelo numérico de armadura discreta e nos ensaios experimentais, especialmente em relação à carga de ruptura. De acordo com Catoia (2011), a ruptura das lajes exibiu um comportamento que envolve a interação entre flexão e cisalhamento, conforme mencionado anteriormente. É importante ressaltar que as lajes foram produzidas por fabricantes diferentes e armazenadas por períodos variados, o que pode explicar as diferenças de rigidez observadas em cada grupo de laje.

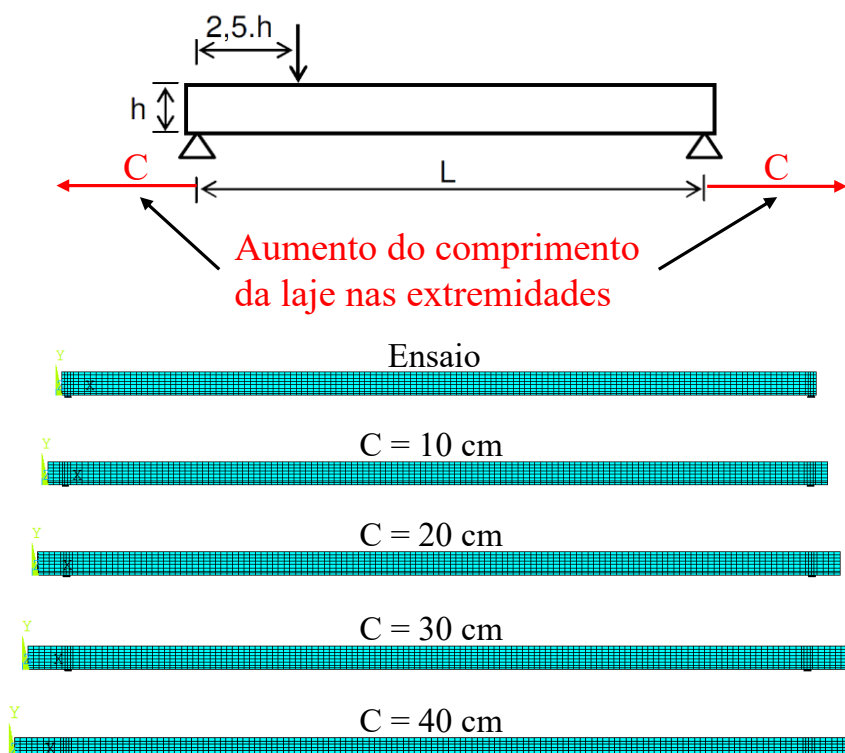
De uma forma geral, fica evidente que o modelo de armadura discreta com a consideração do deslizamento é capaz de representar o comportamento das lajes alveolares submetidas ao esforço cortante, inclusive indicando o valor da carga de ruptura, o que justifica a complexidade do processo de modelagem e a inclusão de informações relevantes sobre a aderência. Paralelamente, fica evidente que o modelo com armadura incorporada não consegue capturar nem o comportamento nem a carga de ruptura nos ensaios de cisalhamento.

5.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ANCORAGEM

Para avaliar o efeito da ancoragem entre o aço e o concreto na laje alveolar, foi realizado um estudo paramétrico da laje "L2_S_20-8D12.7-X_C" aumentando o comprimento da laje para além dos apoios mantendo o mesmo vão entre os apoios. A análise busca verificar a transferência de tensões na região próxima dos apoios em situações de ruptura sujeitas principalmente ao efeito cortante, realizando uma comparação entre o modelo de armadura incorporada (aderência perfeita) e o de armadura discreta com o modelo de aderência de Khalaf e Huang (2016).

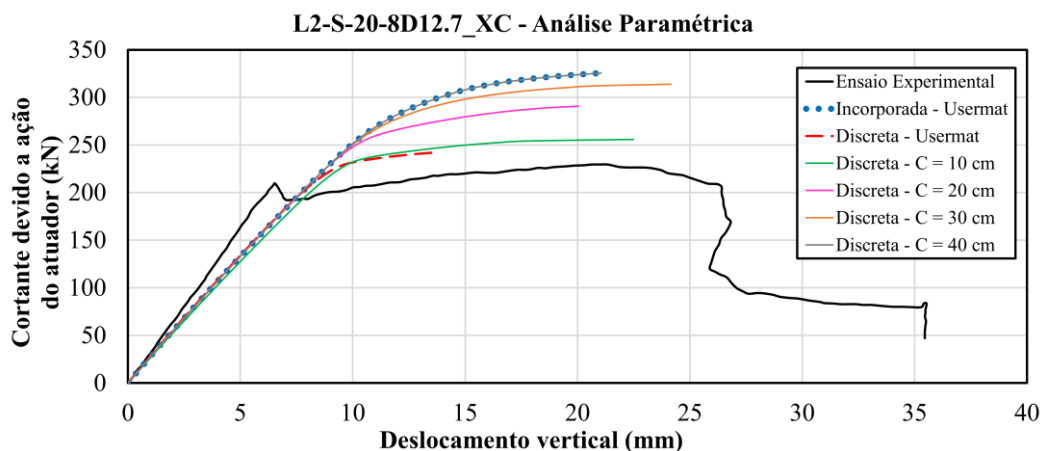
A análise paramétrica foi realizada com base no ensaio de cisalhamento descrito na Figura 5.1 para a laje "L2_S_20-8D12.7-X_C". A avaliação paramétrica consistiu em aumentar o comprimento da laje para além dos apoios, mantendo o valor do vão constante em relação à posição dos apoios. A análise foi conduzida tanto para o modelo com armadura incorporada (aderência perfeita) quanto para o modelo de armadura discreta que considera o modelo de Khalaf e Huang (2016) de aderência entre o concreto e o aço. A Figura 5.15 descreve todos os procedimentos realizados na análise paramétrica. A comparação dos valores de cortante x deslocamento vertical da laje "L2_S_20-8D12.7-X_C" foi apresentada na Figura 5.16.

Figura 5.15 – Esquema da análise paramétrica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.16 – Comparação cortante x deslocamento vertical da laje Laje L2_S_20-8D12.7-X_C na análise paramétrica

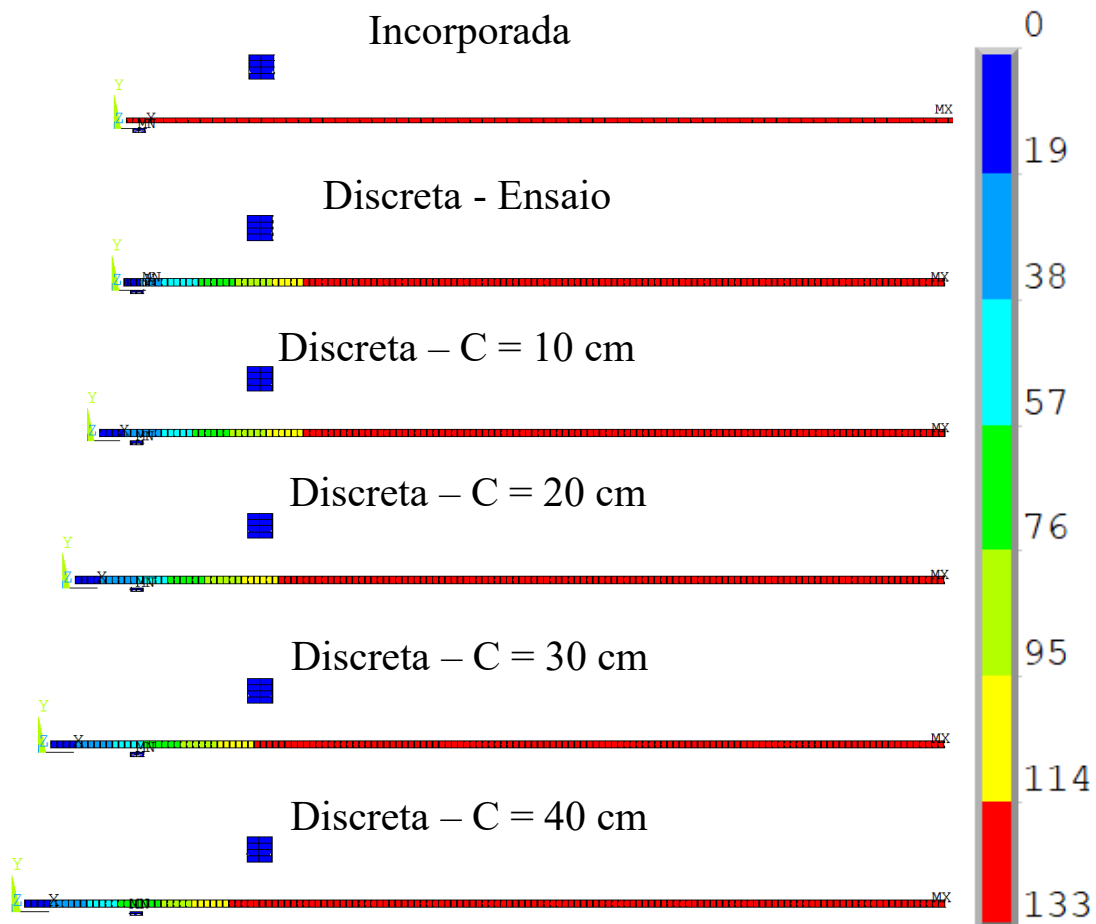


(fonte: elaborado pelo autor)

Constata-se na Figura 5.16 que à medida que o comprimento de ancoragem (posicionado nas extremidades da laje) aumenta, o comportamento do modelo de armadura discreta se aproxima do comportamento de aderência perfeita com armadura incorporada, tornando-se equivalente a este último quando há um aumento do comprimento da laje de aproximadamente 40 centímetros em cada extremidade. No caso do modelo de armadura incorporada, a carga de ruptura e o comportamento do modelo permaneceram constantes mesmo diante das alterações das análises paramétricas. Isso evidencia a importância da região de deslizamento da armadura e da transferência de tensões na determinação da carga de ruptura da laje alveolar.

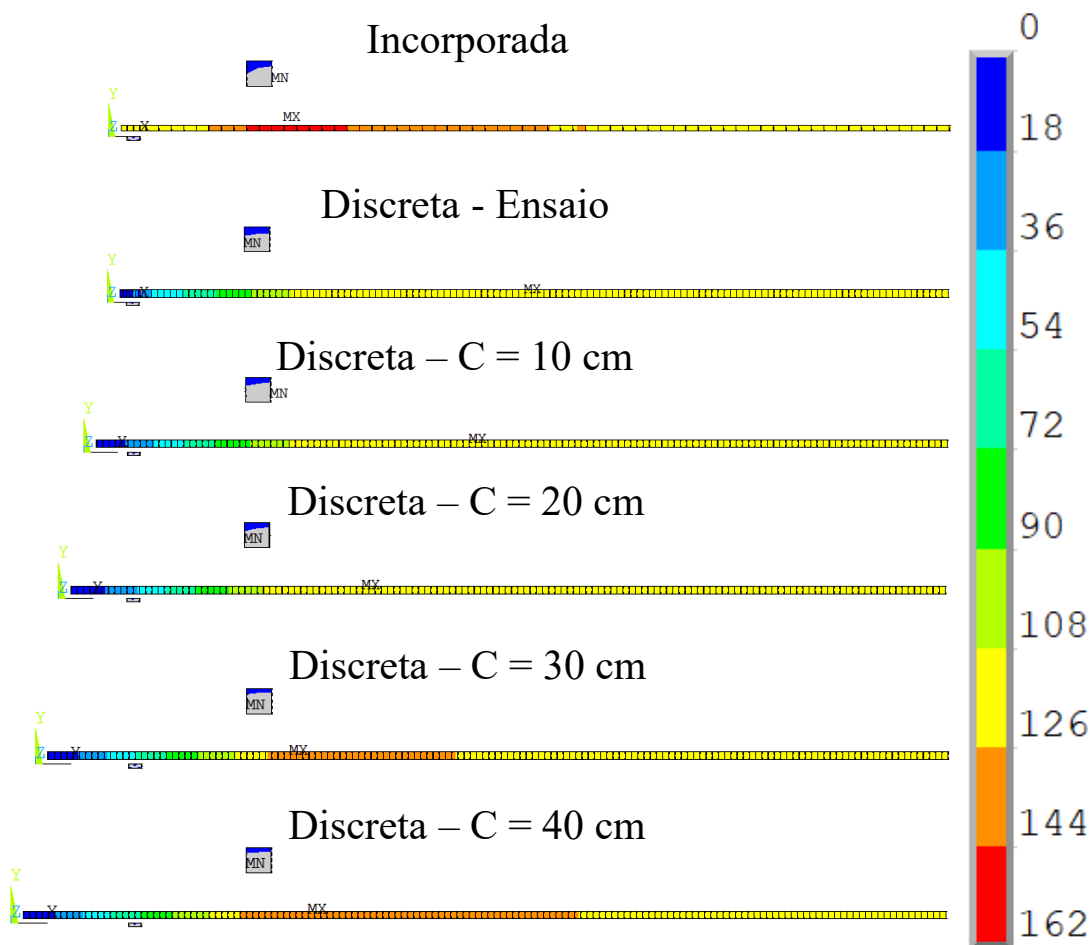
Após a avaliação dos deslocamentos em relação ao cortante, foram realizadas análises das tensões axiais na armadura para cada modelo, levando em consideração o efeito de deslizamento da armadura em relação à posição do comprimento de ancoragem durante o processo de protensão e sua proximidade com a ruptura. Os resultados são apresentados na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Avaliação na tensão axial (kN/cm²) nas armaduras na análise paramétrica - Ato da Protensão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.18 – Avaliação na tensão axial (kN/cm²) nas armaduras na análise paramétrica - Proximidade da Ruptura



(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar as Figuras 5.17 e 5.18, a região de transferência de tensões interfere diretamente na ruptura da laje. Um maior comprimento de ancoragem fez com que o modelo de armadura discreta simulasse o comportamento de aderência perfeita do modelo de armadura incorporada, resultando em um aumento efetivo da carga de ruptura, apenas variando geometricamente a posição do comprimento de ancoragem.

Em relação a avaliação paramétrica, constatou-se que a variação da posição do comprimento da ancoragem influenciou diretamente no comportamento do modelo de armadura discreta com o modelo de aderência de Khalaf e Huang (2016). Um maior comprimento de ancoragem promove uma aderência próxima à perfeita para o modelo de armadura discreta, resultando em um aumento da carga de ruptura da laje alveolar. Em geral, essa avaliação demonstra a importância do comprimento da ancoragem para as lajes alveolares. Uma maior extensão da ancoragem promove uma transferência de tensões mais eficaz, tornando-se um fator favorável para o aumento da carga de ruptura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste estudo foi desenvolver modelos que permitissem simular numericamente o comportamento de lajes alveolares protendidas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no programa ANSYS. Por meio de uma metodologia de geração de malhas e definição de condições de contorno, esses modelos puderam simular ensaios experimentais de lajes alveolares, abrangendo desde sua geometria até seu comportamento em condições de ruptura para diferentes arranjos estruturais.

Durante a pesquisa, foi realizada uma análise comparativa entre dois modelos de material para representar o concreto, DP-DP e USERMAT. A comparação dos gráficos de momento em relação ao deslocamento vertical revelou que o modelo USERMAT demonstrou uma maior proximidade com os resultados experimentais. Essa observação está principalmente associada à diferença dos modelos constitutivos em relação ao comportamento a tração.

Para abordar as situações de ruptura por flexão, foi elaborado um modelo que aplicava o conceito de armadura incorporada e aderência perfeita entre o concreto e o aço. O modelo exibiu uma boa correspondência ao comparar as curvas de momento versus deslocamento vertical. Além disso, o modelo permitiu uma clara visualização da evolução da tensão ao longo do tempo e previu a distribuição das fissuras próximas à ruptura da laje. Os resultados demonstraram que, nas situações de ruptura por flexão, o comportamento entre o escorregamento do aço e do concreto não foi determinante nos resultados. Apenas a aderência perfeita se mostrou necessária para representar o comportamento das lajes.

Para lidar com as situações de ruptura relacionadas ao esforço cortante das lajes alveolares, foi necessário modelar a região da ancoragem utilizando a metodologia de armadura discreta, introduzindo uma relação de força-deslizamento entre o aço e o concreto. O modelo conseguiu representar a carga de ruína do ensaio. Em relação a avaliação paramétrica, constatou-se que a variação do comprimento da ancoragem influenciou diretamente no comportamento do modelo de armadura discreta em relação a armadura incorporada. No contexto geral, esta análise ressalta a relevância do comprimento de ancoragem para as lajes alveolares. Uma maior extensão da ancoragem resulta em uma distribuição de tensões mais eficiente, o que se revela como um elemento propício para potencializar a capacidade de carga antes da ruptura.

A comparação entre os ensaios experimentais e os resultados dos modelos revelou uma clara correlação entre os resultados, tanto em termos de deformabilidade da laje quanto no surgimento de tensões no modelo, demonstrando que os modelos são capazes de representar o comportamento

das lajes alveolares diante da ruptura por cortante ou flexão. Com os resultados positivos obtidos por meio desses modelos numéricos, pode-se concluir que eles efetivamente reproduzem o comportamento experimental de lajes alveolares protendidas, podendo ser utilizados como uma ferramenta auxiliar na fase de projeto.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se um estudo mais aprofundado sobre os efeitos da fissuração na rigidez do modelo para lajes alveolares, além de uma análise mais detalhada da ancoragem para situações de ruptura relacionadas ao esforço cortante. Além disso, seria interessante realizar a validação dos modelos para outras tipologias de ensaios, incluindo lajes com alvéolos de diferentes formatos, lajes com espessura maior e a avaliação do efeito da continuidade em lajes alveolares.

REFERÊNCIAS

- ADAWI, A.; YOUSSEF, M. A.; MESHALY, M. E. Finite element modeling of the composite action between hollowcore slabs and the topping concrete. **Engineering Structures**, v. 124, p. 302–315, 2016. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616302875>>.
- ALARCON, I. C. A. **Customização do software ANSYS para análise de lajes de concreto protendido pelo método dos elementos finitos**. 2017. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017.
- ANSYS. **Theory reference**. 2022. ed. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, INC, 2022.
- ARAUJO, C. A. M. **Contribuições para projeto de lajes alveolares protendidas**. 2011. 325 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.
- ARAUJO, M. F. S. B. **Simulação pelo Método dos Elementos Finitos de Peças em Concreto Têxtil**. 2019. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.
- ASSAP. **The Hollow Core Floor Design and Applications**. 1. ed. Verona - Italy: Offset Print Veneta, 2002. 220 p.
- BARBIERI, R. A. **Análise numérico-experimental de elementos pré-moldados protendidos com continuidade posterior por adição de armadura**. 1999. 144 p. — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- BARBOSA, P. R. O. **Análise Probabilística de Pilares de Concreto Armado através do Método dos Elementos Finitos**. 2017. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017.
- BATHE, K.-J. **Finite element procedures**. 2. ed. Watertown: Klaus-Jurgen Bathe, 2014. 1043 p.
- BENINCÁ, M. E. **Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto : modelo parametrizado de elementos finitos**. 2020. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.
- BROO, H.; LUNDGREN, K. **Finite element analyses of hollow core units subjected to shear and torsion**. Sweden, 2002.
- BROO, H.; LUNDGREN, K.; ENGSTRÖM, B. Shear and torsion interaction in prestressed hollow core units. **Magazine of Concrete Research**, v. 57, n. 9, p. 521–533, 2005.
- BRUNESI, E.; BOLOGNINI, D.; NASCIMBENE, R. Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: numerical and experimental comparisons. **Materials and Structures**, Springer, v. 48, n. 5, p. 1503–1521, 2015.

CAMPOS FILHO, A. **Fundamentos da análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos**. Notas de aula do programa de pós-graduação em engenharia civil. Porto Alegre: UFRGS, 2022.

CAMPOS, M. A. **Resistência ao cisalhamento em lajes alveolares: Análise via modelagem computacional**. 136 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Estruturas) — Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, 2017.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2012.

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. 2011. 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

CHEN, W.-F.; HAN, D.-J. **Plasticity for structural engineers**. 1. ed. New York: Springer New York, 1988.

COSTA, O. O. **Avaliação de Desempenho de Elementos de Lajes Alveolares Protendidas Pré-fabricadas**. 2009. 155 p. — Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2 ed. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 456 p.

FIP. **Guide to good practice: special design**. 1. ed. England: London, 1992.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: solicitações tangenciais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

_____. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETON. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Lausanne, Switzerland: fib, 2013.

GIRHAMMAR, U. Design principles for simply supported prestressed hollow core slabs. **Structural Engineering Review**, v. 4, n. 4, p. 301–316, 1992.

HOFFMAN, I. S. **Simulação Numérica em Elementos Finitos da Construção em Balanços Sucessivos de uma Ponte Estaiada**. 2020. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

HONSCHA, M. L. **Estudo Comparativo do Nível de Confiabilidade Obtido em Vigas de Concreto Armado Projetadas segundo as Normas NBR 6118:2014 e pelo ACI 318-19**. 2019. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

JENSEN, B. M. **Modelagem Tridimensional em Elementos Finitos de Túneis Superficiais Revestidos em Concreto Armado**. 2019. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

KHALAF, J.; HUANG, Z. Analysis of the bond behaviour between prestressed strands and concrete in fire. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 12–23, 2016. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816316208>>.

KONG, F.; EVANS, R. **Reinforced and Prestresse Concrete**. 1. ed. UK: Spon Press, 2001.

LAZZARI, B. M. **Análise por Elementos Finitos de Peças de Concreto Armado e protendido sob estados planos de tensão**. 2015. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

LAZZARI, B. M. **Análise Estática, Modal E Dinâmica Das Etapas Construtivas De Uma Ponte Estaiada Através Do Análise Estática, Modal E Dinâmica Das Etapas**. 2020. 276 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil), Porto Alegre, 2020.

LAZZARI, P. M. **Simulação Numérica Das Etapas Construtivas De Pontes Estaiadas Através Do Método Dos Elementos Finitos**. 2016. 301 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

LEONHARDT, F. **Construções de concreto: concreto protendido**. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1983.

MACHADO, G. G. **Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos das Etapas Construtivas de uma Ponte Segmentada Pré-Moldada com Protensão**. 2022. 231 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

MATOS, C. C. D. **Análise Numérica de Vigas em Concreto Reforçado com Fibras Via Método dos Elementos Finitos**. 2021. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2021.

MCGUIRE, W.; GALLAGHER, R. H.; ZIEMIAN, R. D. **Matrix structural analysis**. 2. ed. US: Wiley, 2015.

MEDEIROS, M. V. **Simulação Numérica do Comportamento de Peças Fletidas Reforçadas com PRFC**. 2019. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

MERCX, W.; WALRAVEN, J. **The bearing capacity of prestressed Hollow Core**. Netherlands: Delft University of Technology, 1983.

MICHELINI, E.; BERNARDI, P.; CERIONI, R.; BELLETTI, B. Experimental and numerical assessment of flexural and shear behavior of precast prestressed deep hollow-core slabs. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, Springer, v. 14, n. 1, p. 1–17, 2020.

MOHANDOSS, P.; PILLAI, R. G.; GETTU, R. Determining bond strength of seven-wire strands in prestressed concrete. **Structures**, v. 33, p. 2413–2423, 2021. ISSN 2352-0124. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421004975>>.

ORDONEZ, J. A. F. **Pre-Fabricación – teoría y práctica**. 1. ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1974.

OTTOSEN, N. S. A failure criterion for concrete. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, American Society of Civil Engineers, v. 103, n. 4, p. 527–535, 1977.

PACHALLA, S. K. S.; PRAKASH, S. S. Experimental evaluation on effect of openings on behavior of prestressed precast hollow-core slabs. **ACI Structural Journal**, American Concrete Institute, v. 114, n. 2, p. 427, 2017.

PAJARI, M. **Design of prestressed hollow core slabs**. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 1989.

_____. Shear-torsion interaction tests on single hollow core slabs. VTT Technical Research Centre of Finland, Finland, 2004.

PARKHATS, V.; KRZYWOŃ, R.; HULIMKA, J.; KUBICA, J. Determination of bond model for 7-wire strands in pretensioned concrete beam. *Acta Polytechnica*, v. 61, n. 6, p. 740–748, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0740>>.

PCI. The history of spancrete-bringing excellence to the construction industry for sixty years. *PCI Journal*, v. 50, 2005.

PETRUCELLI, N. S. **Considerações sobre Projeto e Fabricação de Lajes Alveolares Protendidas**. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.

PINHEIRO, G. L. **Estudo Sobre a Influência de Aberturas e Cortes Oblíquos na Resistência ao Esforço Cortante em Lajes Alveolares Protendidas Pré-Fabricadas**. 2017. 266 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.

QUEVEDO, F. P. M. **Comportamento a longo prazo de túneis profundos revestidos com concreto : modelo em elementos finitos**. 2017. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

RACHINHAS, B. C. **Simulação Computacional do Processo Construtivo da Estrutura de Edifícios em Concreto Armado**. 2020. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

RAMBERG, W.; OSGOOD, W. R. **Description of stress-strain curves by three parameters**. US, 1943.

RETTNE, L.; EDEKLING, K. **Improved design method for web shear tension failure in hollow core units**. 153p. 2006. 153 p. Master's Thesis- Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering — Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.

SALES, M. W. R. **Estudo numérico-experimental da influência dos mecanismos na resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas**. 2020. 215 p. Doutorado em Engenharia Civil — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

SILVA, I. P. C. **Análise numérica de lajes alveolares protendidas submetidas ao esforço cortante com a presença de aberturas**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de São Carlos, 2020.

SOARES, P. B. **Simulação através do Método dos Elementos Finitos do Reforço ao Esforço Cortante de Vigas de Concreto utilizando Polimeros Reforçados com Fibras de Carbono**. 2022. - p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

SPESSATTO, R. P. **Análise pelo Método dos Elementos Finitos do Comportamento das Juntas de Tabuleiro de Ponte Composto por Aduelas Pré-Moldadas de Concreto**. 2022. - p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

VELLASCO, P. C. G. da S.; LIMA, L. R. O. de; ANDRADE, S. A. L. de; VELLASCO, M. M. B. R.; SILVA, L. A. P. S. da. **Modelagem de Estrutura de Aço e Mistas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.

WILLAM, K.; WARNKE, E. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete, international association of bridge and structural engineers, seminar on concrete structure subjected to triaxial stresses, paper iii-1. **IABSE Proc. 19**, Bergamo, Italy, 1975.

YANG, L. Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure. **ASCE Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 9, p. 2675–2696, 1994.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method**. 1. ed. London: McGraw-Hill Company, 1977.

APÊNDICES

**APENDICE A – SCRIPT APDL LAJE L3_S_20-8D12.7-X_F DE
CATOIA (2011) - LAJE SEM CAPA - ARMADURA INCORPORADA – FLEXÃO
USERMAT**

```

! *****
!
! Programador: Victor Eduardo Kraeski
! Data: 21/02/24
! unidades: cm, kN
! Modelo: L3_S_20-8D12.7-X_F
!
! *****
! -----
! * 1. COMANDOS DE INICIALIZAÇÃO
! -----
!
! /NOPR                ! Suppress printing of UNDO process
! /PMACRO              ! Echo following commands to log
! FINISH               ! Make sure we are at BEGIN level
! /CLEAR,NOSTART       ! Clear model since no SAVE found
! /NOPR
! /PMETH,OFF,0
! /title, L3_S_20-8D12.7-X_F
!
! * *****
! -----
! * 2. DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! -----
!
! KEYW,PR_SET,1
! KEYW,PR_STRUC,1
!
! * *****
! -----
! * 3. DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! -----
!
! /PREP7
! *
! ET,1,SOLID186        ! Define elementos SOLID186 para o concreto
! KEYOPT,1,2,1
!
! ET,2,SOLID186        ! Define elementos SOLID186 para as placas de apoio
! KEYOPT,1,2,1
!
! ET,3,MESH200         ! Define elementos MESH200 para armadura
! KEYOPT,3,1,3        ! Define MESH200 como elementos "Linhas"
!
! Elementos do tipo REINF264 são definidos
! automaticamente durante a execução do
! comando EREINF. Não sendo necessário
! defini-los no script.
!
! * *****
! -----
! * 4. PARAMETROS DOS MATERIAIS
! -----
!
! ----APOIOS-E-PONTOS-DE-CARGA----- (MATERIAL-2) -----
!
! v2                    = 0                    ! Coeficiente de Poisson
! ES2                   = 20000                ! Módulo de elasticidade
!
! ----ARMADURA-DE-PROTENSÃO----- (MATERIAL-3) -----
!
! v3                    = 0.3                  ! Coeficiente de Poisson
! ES3                   = 19000                ! Módulo de elasticidade
! FY33                  = 190                  ! Tensão de ruptura
!
! ----APOIOS----- (MATERIAL-4) -----
!
! v4                    = 0                    ! Coeficiente de Poisson
! ES4                   = 10                   ! Módulo de elasticidade

```

```

!
! -----
!  CONCRETO - MATERIAL 1
! -----
!
!
Temperatura = 25 ! [°C] Média de temperatura
nurev = 0.2 ! [adm] Coeficiente de Poisson do concreto
s = 0.2 ! [adm] coef. que depende do tipo de concreto (0.2 RS; 0.25 N e R; 0.38 SL) (CEB-
MC90, item2.1.6.1 - eq2.1-54,p51)
rh = 70 ! [%] umidade relativa do ambiente (CEB-MC90, eq 2.1-66,p55; 2.1-71,p55; 2.1-78,p58)
betasc = 8d0! [adm] coeficiente que depende do tipo de cimento (4 - SL, 5 - N e R, 8 - RS)
alpha = 1! [adm] efeito do tipo de cimento durante a cura (-1 SL; 0 N; 1 RS) (CEB-MC90,
eq.2.1-72)
fck = 3.6 ! [kN/cm²] resistencia caracteristica do concreto (CEB-MC90, eq 2.1-1, p.34)
!
hf = 6.7 ! [cm] espessura ficticia (2Ac/u onde Ac - area da secao, u - perimetro em contato
com a atmosfera) (CEB-MC90, eq2.1-79,p55; eq2.1-66,p55)!
ti = 0 ! [dias] inicio do concreto
ts = 3 ! [dias] idade do concreto no inicio da secagem (CEB-MC90, eq2.1-74,p57)
t0 = 99 ! [dias] idade do concreto no inicio do carregamento
textist = 0 ! [dias] Idade do concreto no lançamento do balanço sucessivo
!
Tinf = 500 ! [dias] tempo final da análise
ndec = 10 ! [década] No. de pontos por decada utilizado para calcular os intervalos de
tempo para o ajuste da cadeia de Kelvin (DIAS,2013: m da eq3.6,p45; m da Tabela B1,p167)
ktime = 99 ! [dias] tempo da análise para saída de dados
keleimid = 6697 ! [un] identificação do elemento para saída
kkDomIntPt = 2 ! [un] identificação do ponto de integração para saída!
ligafluencia = 1 ! [un] 1 - liga fluência, 0 - desliga fluência
ligaretracao = 1 ! [un] 1 - liga retração, 0 - desliga retração
ligafissura = 1 ! [un] 1 - liga fissuração, 0 - desliga fissuração
desligatempo = 501 ! [dias] tempo máximo em dias para considerar o efeito da fluência no
concreto
!
TB,USER,1,1,21
TBTEMP,1,0
TBDATA,1,ligafluencia,ligaretracao
TBDATA,3,ti
TBDATA,4,ts,t0,tinf
TBDATA,7,fck,nurev
TBDATA,9,s,rh,hf,betasc,alpha
TBDATA,14,ndec
TBDATA,15,ktime,keleimid,kkDomIntPt
TBDATA,18,desligatempo
TBDATA,19,ligafissura
TBDATA,20,temperatura
TBDATA,21,textist
TB,STATE,1,,710
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! -----
!  APOIOS E PONTOS DE CARGA - MATERIAL 2
! -----
!
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,V2
!
! -----
!  ARMADURA PROTENDIDA - MATERIAL 3
! -----
!
! Modelo linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3 ! Especifica o modulo de elasticidade do
material 2
MPDATA,PRXY,3,,v3 ! Especifica o coef. de Poisson do material
2
!
!

```

```

! Modelo Viscoelastico
!
TB,PRONY,3,,5,BULK
TBDATA,1,234.83193558894/ES3,1
TBDATA,3,132.228398650865/ES3,10
TBDATA,5,248.82316770027/ES3,100
TBDATA,7,809.388091997494/ES3,1000
TBDATA,9,17510.9099767405/ES3,10E30
!
! -----
!   APOIOS - MATERIAL 4
! -----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,V4
!
! -----
! * 5. MODELAGEM DA ESTRUTURA
! -----
!
! 5.0 - ENTRADA DE DADOS
! -----
!
! 5.1 - CONCRETO INICIAL
! -----
!
hl = 20           ! Altura da laje
ll = 60           ! Largura da laje
na = 3           ! Número de alveolos
cax = 10          ! Coordenda alveolo x
cay = 10          ! Coordenda alveolo y
da = 6           ! Raio alveolo
ea = 18.5        ! Espaço entre alveolos
lp = 5           ! Largura placa
la = 10          ! Largura apoio
vl = 640         ! Vao da laje
ac = 3.3         ! Altura da cordoalha
ha = 10          ! Altura atuador
lat = 5          ! Largura Atuador
dpc = 2          ! Distância primeira cordoalha
dsc = 17.3       ! Distância segunda cordoalha
dtc = 18.5       ! Distância terceira cordoalha
dqc = 18.8       ! Distância terceira cordoalha
das = dpc+dsc    ! Distancia acumulada segunda cordoalha
dat = das+dtc    ! Distancia acumulada terceira cordoalha
daq = dat+dqc    ! Distancia acumulada quarta cordoalha
iat = vl/2+lp    ! Distância início carga
zc = iat-lp-la   ! Zona de cisalhamento
conctotal = iat-lp ! Elementos em concreto
Aslp = 1.014     ! Área de armadura protensao 1 cm² aprox
!
TP = 142.5       ! Força de protensão 142.5
!
! Divisões na malha
!
divl = 4.0       ! Tamanho max do elemento transversal
divpl = 1        ! Divisões na placas
divc = 2         ! Número de divisões na placas
diva = 1         ! Número de divisões no atuador
divzc = zc/5     ! Número de divisões na zona de simetria
!
! Força na placa
!
pressf = 0.30    ! Pressão na placa
!
! Time na aplicacao
!
timeprot = 3
stepsprot = 1.22
!
timeens = 125
stepscar = 0.01
!

```

```

timefinal = 126
!
! -----
! 5.1 - CONCRETO INICIAL
! -----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z) / RECORTES NA
GEOMETRIA
!
wpro,,, -90.000000
!
K,100001,0,0,0           ! Posiciona os KP para geração da área de concreto
K,100002,0,h1,0
K,100003,0,0,11
K,100004,0,h1,11
!
L,100001,100002
L,100003,100004
L,100001,100003
L,100002,100004
!
A,100001,100002,100004,100003
!
ALLSEL,ALL
CM,AUX,AREA
!
CYL4,cax,cay,da         ! Desenha os alveolos diametro de 6.07 mas pra
arredondar 6
CMSEL,U,AUX
!
AGEN,na,ALL, , , , ,ea, ,0       ! Copia os alveolos
!
ALLSEL,ALL
CMSEL,U,AUX
CM,CIL,AREA
!
ALLSEL,ALL
ASBA,AUX,CIL
!
CMDELE,AUX
!
LESIZE,ALL,div1, , , , , , ,
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , , ,lp, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , , ,3*lp, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , , ,iat, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
VEXT,all, , , ,lp, , , , , ,
!
ASEL,S,LOC,X,lp
VEXT,all, , , ,la, , , , , ,
!
ASEL,S,LOC,X,3*lp
VEXT,all, , , ,zc, , , , , ,
!
ASEL,S,LOC,X,iat
VEXT,all, , , ,lat, , , , , ,
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VOVLAP,ALL
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VSEL,R,LOC,X,lp,iat+lat
CM,CONCRETO,VOLU
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
CMSEL,U,CONCRETO
CM,PLACA,VOLU
!
! -----
! 5.2 - ARMADURA DE PROTENSÃO

```

```

! -----
!
NUMSTR,LINE,1000
!
wpro,,,90.000000
K,1001,lp,ac,dpc

K,1002,iat+lp,ac,dpc
K,1003,lp,ac,das

K,1004,iat+lp,ac,das
K,1005,lp,ac,dat

K,1006,iat+lp,ac,dat
K,1007,lp,ac,daq

K,1008,iat+lp,ac,daq
!
L,1001,1002
L,1003,1004
L,1005,1006
L,1007,1008
!
LSEL,S,LOC,Y,ac
CM,ARMPRO,LINE
!
! -----
! 5.3 - DIVISÃO DA ESTRUTURA
! -----
!
K,100005,7.5,-1.5,0          ! Posiciona os KP para geração da linha da armadura inferior
K,100006,7.5,0,0
K,100007,7.5,-1.5,11
K,100008,7.5,0,11
!
L,100005,100006
L,100007,100008
L,100005,100007
L,100006,100008
!
A,100005,100006,100008,100007
!
ASEL,S,LOC,X,7.5
ASEL,R,LOC,Y,-1.5,0
VEXT,all,,,lp,,,,,
!
K,100009,iat,ha+h1,0
K,100010,iat,h1,0
K,100011,iat,ha+h1,11
K,100012,iat,h1,11
!
L,100009,100010
L,100011,100012
L,100009,100011
L,100010,100012
!
A,100009,100010,100012,100011
!
ASEL,S,LOC,X,iat
ASEL,R,LOC,Y,ha+h1,0
VEXT,all,,,lat,,,,,
!
VSEL,S,LOC,Y,-lp,0          ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
CMSEL,U,CONCRETO            componentes
CMSEL,U,PLACA               ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
CM,APOIOS,VOLU             componentes
!
VSEL,S,LOC,Y,h1,ha+h1      ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
CMSEL,U,CONCRETO            componentes
CMSEL,U,PLACA               ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
CM,ATUADOR,VOLU           componentes
!
! Ajustando placas

```

```

!
LSEL,S,LOC,X,0,lp
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,divpl,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,0,lp
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,divpl,,,,,1
!
! Ajustando cargas
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,S,LOC,X,iat
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,S,LOC,X,iat
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,S,LOC,X,iat+lat
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,S,LOC,X,iat+lat
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,diva,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,diva,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,diva,,,,,1
!
! Ajustando Apoios
!
divap = 2 ! Número de divisões nos apoios
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,X,lp
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,l1
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LSEL,R,LOC,X,7.5
LESIZE,ALL,divl,,,,,
!
LSEL,S,LOC,X,lp,3*lp
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,4,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LESIZE,ALL,2.5,,,,,
!
LSEL,S,LOC,Z,l1
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LESIZE,ALL,2.5,,,,,
!
LSEL,S,LOC,X,lp,3*lp
LSEL,R,LOC,Y,h1

```

```

LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,4,,,,,1
!
!
! Ajustando Meio
!
LSEL,S,LOC,X,3*lp,iat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,divzc,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,3*lp,iat
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,divzc,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,diva,,,,,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,diva,,,,,1
!
! -----
! *. 6. SECTION
! -----
!
! -----
! 6.1 - ARMADURA DE PROTENSÃO
! -----
!
SECTYPE,1,REINF,DISC ! Reforço seção 1,reinf,reforço discreto
SECDATA,3,Aslp,MESH ! Material 3, area da secao,mesh
!
! * *****
! -----
! *. 7. MESH
! -----
!
! -----
! 7.1 - CONCRETO
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1 ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 1 ! Define mesh com material (1)
!
CMSEL,S,CONCRETO ! Seleciona componente com os volumes de concreto
!
VSWEEP,all ! Aplica a mesh 1
!
CM,CONCRETO,ELEM ! Define componente com os elementos do concreto
!
! -----
! 7.2 - PLACA
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2 ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 2 ! Define mesh com material (1) - Concreto
!
CMSEL,S,PLACA ! Seleciona componente com os volumes de concreto
!
VSWEEP,all ! Aplica a mesh 1
!
CMSEL,U,CONCRETO ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CM,PLACA,ELEM ! Define componente com os elementos do concreto
!
! -----
! 7.3 - APOIOS

```

```

! -----
!
! Repete o procedimento realizado para o concreto
!
TYPE, 2 ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 4 ! Define mesh com material (2) Apoios
!
CMSEL,S,APOIOS
!
VSWEEP,all ! Mesh
!
VSEL,S,LOC,Y,-1.5,0
ESLV,S
CMSEL,U,CONCRETO
CMSEL,U,PLACA
CM,APOIOS,ELEM
!
! -----
! 7.5 - ATUADOR
! -----
!
! Repete o procedimento realizado para o concreto
!
TYPE, 2 ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 2 ! Define mesh com material (2) Apoios
!
CMSEL,S,ATUADOR
!
VSWEEP,all ! Mesh
!
VSEL,S,LOC,Y,h1,ha+h1
ESLV,S
CMSEL,U,CONCRETO ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA
CM,ATUADOR,ELEM
!
! -----
! 7.6 - ARMADURA DE PROTENSÃO
! -----
!
! Especifica as características do elemento mesh200 (ET = 3, material 4 e seção 1)
!
TYPE, 3
MAT, 3
SECNUM,1
!
CMSEL,S,ARMPRO ! Seleciona componentes da linha
LESIZE,ALL,,1
LMESH,ALL ! Aplica a mesh nas linhas
!
! -----
! 7.6 - INISTATE
! -----
!
! Aplica tensão inicial ao elemento mesh200
!
INISTATE,SET,DTYPE,EPEL ! Altera o comando INISTATE para a aplicação de
deformação inicial
INISTATE,SET,NODE,1 ! Altera o comando INISTATE para aplicação nos nós
ESEL,S,MAT,,3 ! Seleciona elementos definidos com o material 4
NSLE ! Dos elementos, são selecionados os nós
INISTATE,DEFINE,,,,,TP/ES3,,,, ! Aplica deformação inicial em todos os nós da
seleção (MESH200)
!
! -----
! 7.6 - GERANDO EREINF
! -----
!
! Para transformar elementos MESH200 em elementos REINF264,
! são selecionados os elementos MESH200 e os elementos base (SOLID186)
! Embora existam maneiras mais compactas de executar o processo, a fim
! de redefinir as componentes, foi adotada a seleção por material.
!
! Para transformar elementos MESH200 em elementos REINF264,
! são selecionados os elementos MESH200 e os elementos base (SOLID186)

```



```

! Embora existam maneiras mais compactas de executar o processo, a fim
! de redefinir as componentes, foi adotada a seleção por material.
!
ESEL,S,TYPE,,1           ! Seleciona elementos do tipo SOLID186 (Concreto)
ESEL,A,MAT,,2           ! Adiciona à seleção os elementos do material (3)
ESEL,A,MAT,,3           ! Adiciona à seleção os elementos do material (3)
EREINF                   ! Transforma elementos MESH200 em REINF264 dentro dos
elementos de concreto
ESEL,S,ENAME,,REINF264 ! Seleciona elementos do tipo REINF264
CM,ARMPRO,ELEM          ! Transforma seleção em componente
!
LSEL,S,TYPE,,3
LCLEAR,all              ! Remove elementos MESH200 não mais necessários
LDELE,all
!
! -----
! 7.7 - COMANDOS GERAIS
! -----
!
! Esse comando executa um merge dos nós - Elimina nós repetidos e faz a renumeração dos nós
!
!
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE,, , ,LOW
NUMCMP,NODE             ! Renumerar os nós
!
ESEL,S,TYPE,,1         ! Seleciona elementos do tipo SOLID186 (CONCRETO)
/TRLCY,ELEM,0.8        ! Aplica transparência nos elementos
ESEL,all               ! Seleciona todos os elementos
/VIEW,1,1,1,1         ! Muda a vista para isométrica
!
/ESHAPE,1              ! Permite a visualização da seção nos elementos de reforço
EPLOT                  ! Plota elementos na janela de visualização
!
! * *****
! -----
! * 8. RESTRIÇÕES
! -----
!
! -----
! 8.1 - APOIO
! -----
!
NSEL,S,LOC,Y,-1.5      ! Seleciona os nós
NSEL,R,loc,x,2*lp-0.1,2*lp+0.1 ! Seleciona nós no eixo central da "caixa" de ap
D,all,uy
!
ASEL,S,loc,Z,0         ! Seleciona áreas do plano zy na metade do vão
DA,all,UZ,             ! Aplica restrição de deslocamento na direção x
!
ASEL,S,loc,X,iat+lp   ! Seleciona áreas do plano zy na metade do vão
DA,all,UX,             ! Aplica restrição de deslocamento na direção x
!
! * *****
! -----
! * 9. CARREGAMENTOS
! -----
!
! *****
! 9.1 ENTRADA DE DADOS
! *****
!
FINISH
/SOL
!
ANTYPE,0,NEW           ! Análise estática
OUTRES,ERASE           ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL         ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL        ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON          ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON      ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F,,0.1,2,,     ! Critério de convergência em resíduo de forças com tolerância
de 10%
CNVTOL,U,,0.1,2,,     ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%

```

```

AUTOTS,ON          ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGEOM,OFF        ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos de
grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF   ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR        ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO       ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON
e OFF entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLN,OFF         ! Não usa o método de comprimento de arco
NCNV,2,0,0,0,0    ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100         ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência
ERESX,NO          ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
OUTRES,ESOL,ALL   ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
ESTIF,1.0E-12     ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
ALLSEL,ALL
!
DELTIME,3,3,3
TIME,3
!
OUTRES,ALL,ALL    ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
! *****
! -----!
! **** APLICAÇÃO DO PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA
! -----!
! *****
SOLVE
SAVE
FINISH
!
EPLOT
ESEL,ALL
!
! *****
! =====!
! ****          2° CASO DE CARGA
! =====!
!
/SOLU
!
! -----!
! **** DADOS DA ANÁLISE
! -----!
!
ANTYPE,0,RESTART  ! Análise estática
OUTRES,ERASE      ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL    ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL   ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON     ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON  ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F, ,0.5,2, , ! Critério de convergência em resíduo de forças com
tolerância de 10%
CNVTOL,U, ,0.5,2, , ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%
AUTOTS,ON          ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGEOM,OFF        ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos
de grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF   ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR        ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO       ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON
e OFF entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLN,OFF         ! Não usa o método de comprimento de arco

```

```

NCNV,2,0,0,0,0          ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100                ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência
ERESX,NO                 ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
OUTRES,ESOL,ALL          ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
ESTIF,1.0E-12           ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ALLSEL,ALL
!
DELTIME,0.48,0.48,0.48
TIME,99
!
OUTRES,ALL,ALL           ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
ALLSEL,ALL
!
!ASEL,S,LOC,Y,h1+ha
!ASEL,R,LOC,X,v1/2+1p,v1/2+3*1p
!SFA,ALL,,PRES,0.0001
!
SOLVE
SAVE
FINISH
!
EPLOT
ESEL,ALL
!
=====
=====
! ****                    3° CASO DE CARGA - ETAPA 3 - CARGAS
=====
=====
!
/SOLU
!
!-----!
! **** DADOS DA ANÁLISE
!-----!
!
ANTYPE,0,RESTART        ! Análise estática
OUTRES,ERASE             ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL           ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL         ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON           ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON        ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F, ,0.5,2, ,     ! Critério de convergência em residuo de forças com
tolerância de 10%
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,     ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%
AUTOTS,ON                ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGEOM,OFF               ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos
de grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF         ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR               ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO              ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON
e OFF entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLLEN,OFF              ! Não usa o método de comprimento de arco
NCNV,2,0,0,0,0          ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100                ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência
ERESX,NO                 ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
OUTRES,ESOL,ALL          ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
ESTIF,1.0E-12           ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ALLSEL,ALL

```

```
!  
ASEL,S,LOC,Y,h1+ha  
ASEL,R,LOC,X,v1/2+1p,v1/2+3*1p  
SFA,ALL,,PRES,0.10  
!  
DELTIME,0.005,0.005,0.005  
TIME,100  
!  
OUTRES,ALL,ALL           ! Salva todos os resultados a nível de elemento  
!  
ALLSEL,ALL  
!  
! *****  
SOLVE  
SAVE  
FINISH  
!  
EPLOT  
ESEL,ALL  
!
```

**APENDICE B – SCRIPT APDL LAJE L2_S_20-8D12.7-X_C DE
CATOIA (2011) - LAJE SEM CAPA - ARMADURA DISCRETA – CISALHAMENTO
USERMAT**

```

! *****
!
! Programador: Victor Eduardo Kraeski
! Data: 21/02/2024
! unidades: cm, kN
! Modelo: L2_S_20-8D12.7-X_C
!
! *****
! -----
! * 1. COMANDOS DE INICIALIZAÇÃO
! -----
!
! /NOPR          ! Suppress printing of UNDO process
! /PMACRO        ! Echo following commands to log
! FINISH         ! Make sure we are at BEGIN level
! /CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
! /NOPR
! /PMETH,OFF,0
! /title, L2_S_20-8D12.7-X_C
!
! *****
! -----
! * 2. DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! -----
!
! KEYW,PR_SET,1
! KEYW,PR_STRUC,1
!
! *****
! -----
! * 3. DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! -----
!
! /PREP7
! ET,1,SOLID186 ! Define elementos SOLID186 para o concreto
! ET,2,SOLID186 ! Define elementos SOLID186 para as placas de apoio
! ET,3,LINK180
! ET,4,COMBIN39
! KEYOPT,4,1,0
! KEYOPT,4,2,0
! KEYOPT,4,3,0
! KEYOPT,4,4,0
! KEYOPT,4,6,0
! R,1,0,0,0.00025,0.405,0.0005,0.572756492761103
! RMORE,0.00075,0.701480577065395,0.001,0.81,0.00125,0.905607530887415
! RMORE,0.0015,0.992043345827187,0.00175,1.07152928098116,0.002,1.14551298552221
! RMORE,0.00225,1.215,0.0025,1.28072245236819,0.00275,1.34323304009394
! RMORE,0.003,1.40296115413079,0.00325,1.46024826656292,0.0035,1.51537124164345
! RMORE,0.00375,1.568558255214,0.004,1.62,0.00425,1.66985777837515
! RMORE,0.0045,1.71826947828331,0.00475,1.76535407213397,0.005,1.81121506177483
! RMORE,0.00525,1.85594315645712,0.0055,1.89961838272849,0.00575,1.94231176694165
! RMORE,0.006,1.98408669165437,0.00625,2.025,0.0065,2.06510290300508
! RMORE,0.00675,2.10444173119619,0.007,2.14305856196232,0.00725,2.18099174688947
! RMORE,0.0075,2.21827635789592,0.00775,2.25494456694616,0.008,2.29102597104441
! RMORE,0.00825,2.3265478718479,0.0085,2.36153551741235,0.00875,2.39601231215534
! RMORE,0.009,2.43,0.00925,2.46351882477078,0.0095,2.49658767120244
! RMORE,0.00975,2.52922418935135,0.01,2.56144490473639,0.01025,2.5932653161603
! RMORE,0.0105,2.62469998285518,0.01075,2.65576260234231,0.011,2.68646608018787
! RMORE,0.01125,2.71682259266224,0.0115,2.74684364316573,0.01175,2.77654011316242
! RMORE,0.012,2.80592230826158,0.01225,2.835,0.0125,2.86378246380552
! RMORE,0.01275,2.89227851355985,0.013,2.92049653312583,0.01325,2.94844450515861
! RMORE,0.0135,2.97613003748156,0.01375,3.00356038727374,0.014,3.03074248328689
! RMORE,0.01425,3.05768294628465,0.0145,3.08438810787488,0.01475,3.11086402788679
! RMORE,0.015,3.13711651042801,0.01525,3.16315111874219,0.0155,3.18897318897478
! RMORE,0.01575,3.21458784294348,0.016,3.24,0.01625,3.26521438806091
! RMORE,0.0165,3.29023555387756,0.01675,3.31506787260834,0.017,3.3397155567503
! RMORE,0.01725,3.36418266448182,0.0175,3.38847310746301,0.01775,3.41259065813643
! RMORE,0.018,3.43653895656662,0.01825,3.4603215168536,0.0185,3.48394173315226
! RMORE,0.01875,3.50740288532698,0.019,3.53070814426795,0.01925,3.55386057689381

```

```

RMORE,0.0195,3.57686315086278,0.01975,3.59971873901281,0.02,3.62243012354966
RMORE,0.02025,3.645,0.0205,3.66743098094565,0.02075,3.68972559955344
RMORE,0.021,3.71188631291423,0.02125,3.73391550520362,0.0215,3.75581549067576
RMORE,0.02175,3.77758851650097,0.022,3.79923676545698,0.02225,3.82076235848292
RMORE,0.0225,3.84216735710458,0.02275,3.86345376573863,0.023,3.8846235338833
RMORE,0.02325,3.90567855820215,0.0235,3.92662068450723,0.02375,3.94745170964763
RMORE,0.024,3.96817338330875,0.02425,3.98878740972742,0.0245,4.00929544932772
RMORE,0.02475,4.02969912028181,0.025,4.05,0.0275,3.94875
RMORE,0.03,3.8475,0.0325,3.74625,0.035,3.645
RMORE,0.0375,3.54375,0.04,3.4425,0.0425,3.34125
RMORE,0.045,3.24,0.0475,3.13875,0.05,3.0375
RMORE,0.08,3.13875,0.11,3.24,0.14,3.34125
RMORE,0.17,3.4425,0.2,3.54375,0.23,3.645
RMORE,0.26,3.74625,0.29,3.8475,0.32,3.94875
RMORE,0.35,4.05,0.395,3.78675,0.44,3.5235
RMORE,0.485,3.26025,0.53,2.997,0.575,2.73375
RMORE,0.62,2.4705,0.665,2.20725,0.71,1.944
RMORE,0.755,1.68075,0.8,1.4175,
!
! * *****
! -----
! * . 4. PARAMETROS DOS MATERIAIS
! -----
!
! ----PONTOS-DE-CARGA----- (MATERIAL-2) -----
!
v2 = 0.0 ! Coeficiente de Poisson
ES2 = 20000 ! Módulo de elasticidade
!
! ----ARMADURA-DE-PROTENSÃO----- (MATERIAL-3) -----
!
v3 = 0.3 ! Coeficiente de Poisson
ES3 = 19000 ! Módulo de elasticidade
FY33 = 190 ! Tensão de ruptura
!
! ----APOIOS----- (MATERIAL-4) -----
v4 = 0.0 ! Coeficiente de Poisson
ES4 = 10 ! Módulo de elasticidade
!
! -----
! CONCRETO - MATERIAL 1
! -----
!
! CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL CONCRETO (CIMENTO E AGREGADOS):
!
temperatura = 25 ! [°C] Média de temperatura
nurev = 0.2 ! [adm] Coeficiente de Poisson do concreto
s = 0.2 ! [adm] coef. que depende do tipo de concreto (0.2 RS; 0.25 N e R; 0.38 SL) (CEB-
MC90, item2.1.6.1 - eq2.1-54,p51)
rh = 70 ! [%] umidade relativa do ambiente (CEB-MC90, eq 2.1-66,p55; 2.1-71,p55; 2.1-78,p58)
betasc = 8d0 ! [adm] coeficiente que depende do tipo de cimento (4 - SL, 5 - N e R, 8 - RS)
alpha = 1 ! [adm] efeito do tipo de cimento durante a cura (-1 SL; 0 N; 1 RS) (CEB-MC90,
eq.2.1-72)
fck = 3.6 ! [kN/cm²] resistencia característica do concreto (CEB-MC90, eq 2.1-1, p.34)
!
hf = 6.7 ! [cm] espessura fictícia (2Ac/u onde Ac - area da secao, u - perimetro em contato
com a atmosfera) (CEB-MC90, eq2.1-79,p55; eq2.1-66,p55)
!
ti = 0 ! [dias] inicio do concreto
ts = 3 ! [dias] idade do concreto no inicio da secagem (CEB-MC90, eq2.1-74,p57)
t0 = 108 ! [dias] idade do concreto no inicio do carregamento
texist = 0 ! [dias] Idade do concreto no lançamento do balanço sucessivo
!
tinf = 500 ! [dias] tempo final da análise
ndec = 10 ! [década] No. de pontos por decada utilizado para calcular os intervalos de tempo
para o ajuste da cadeia de Kelvin (DIAS,2013: m da eq3.6,p45; m da Tabela B1,p167)
ktime = 108 ! [dias] tempo da análise para saída de dados
kelemid = 17819 ! [un] identificação do elemento para saída
kkDomIntPt = 2 ! [un] identificação do ponto de integração para saída
!
ligafluencia = 1 ! [un] 1 - liga fluência, 0 - desliga fluência
ligaretracao = 1 ! [un] 1 - liga retração, 0 - desliga retração
ligafissura = 1 ! [un] 1 - liga fissuração, 0 - desliga fissuração
desligatempo = 501 ! [dias] tempo máximo em dias para considerar o efeito da fluência no
concreto
!
TB,USER,1,1,21

```

```

TBTEMP,1,0
TBDATA,1,ligafuencia,ligaretracao
TBDATA,3,ti
TBDATA,4,ts,t0,tinf
TBDATA,7,fck,nurev
TBDATA,9,s,rh,hf,betasc,alpha
TBDATA,14,ndec
TBDATA,15,ctime,kelekid,kkDomIntPt
TBDATA,18,desligatempo
TBDATA,19,ligafissura
TBDATA,20,temperatura
TBDATA,21,teexist
TB,STATE,1,,710
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! -----
! PONTOS DE CARGA - MATERIAL 2
! -----
!
MPTEMP,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,V2
!
! -----
! ARMADURA PROTENDIDA - MATERIAL 3
! -----
!
! Modelo linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3 ! Especifica o modulo de elasticidade do material 2
MPDATA,PRXY,3,,v3 ! Especifica o coef. de Poisson do material 2
!
! Modelo Viscoelastico
!
TB,PRONY,3,,5,BULK
TBDATA,1,234.83193558894/ES3,1
TBDATA,3,132.228398650865/ES3,10
TBDATA,5,248.82316770027/ES3,100
TBDATA,7,809.388091997494/ES3,1000
TBDATA,9,17510.9099767405/ES3,10E30
!
! -----
! APOIOS - MATERIAL 4
! -----
!
MPTEMP,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,V4
!
! -----
! * 5. MODELAGEM DA ESTRUTURA
! -----
!
! -----
! 5.0 - ENTRADA DE DADOS
! -----
!
! -----
! 5.1 - CONCRETO INICIAL
! -----
!
!
hl = 20           ! Altura da laje
ll = 60           ! Largura da laje
na = 3           ! Número de alveolos
cax = 10         ! Coordenda alveolo x
cay = 10         ! Coordenda alveolo y
da = 6.1         ! Raio alveolo
ea = 18.50       ! Espaço entre alveolos

```

```

lp = 5          ! Largura placa Ok
la = 10         ! Largura apoio Ok
vl = 640        ! Comprimento da laje
ac = 3.29       ! Altura da cordoalha Ok
ha = 10         ! Altura atuador Ok
lat = 10        ! Largura Atuador Ok
dpc = 1.95      ! Distância primeira cordoalha
dsc = 17.3      ! Distância segunda cordoalha
dtc = 18.5      ! Distância terceira cordoalha
dqc = 18.8      ! Distância quarta cordoalha
das = dpc+dsc   ! Distancia acumulada segunda cordoalha
dat = das+dtc   ! Distancia acumulada terceira cordoalha
daq = dat+dqc   ! Distancia acumulada quarta cordoalha
dtt = dpc+dsc+dtc ! Soma todos as distâncias
apc = 2.5*hl    ! Distancia aplicação carga
iat = hl*2.5+2*lp-lat/2 ! Coordenada de início do atuador
zc = iat-lp-la  ! Zona de cisalhamento
zl = vl+lp-iat-lat ! Zona livre
mc = lp/2       ! Malha cordoalha
fc = vl+la+lp   ! Fim Concreto
!
! Divisões na malha
!
divl = 4        ! Tamanho max do elemento transversal
divpl = 1       ! Divisões na placas
divc = 2        ! Número de divisões na placas
diva = 3        ! Número de divisões no atuador
divzc = zc/5    ! Número de divisões na zona de cisalhamento
divm = zl/5    ! Número de divisões no meio
!
! Força na placa
!
pressf = 0.20 ! Pressão na placa
!
! Time na aplicacao
!
timeprot = 3
!
timeens = 108
stepstempo = 1.05
!
timefinal = 109
stepscarga = 0.01
!
! -----
! ARMADURA DE PROTENSÃO
! -----
!
TP          = 142.5      !
!
! -----
! 5.1 - CONCRETO INICIAL
! -----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z) / RECORTES NA
GEOMETRIA
!
wpro,,, -90.000000
!
K,100001,0,0,0          ! Posiciona os KP para geração da área de concreto
K,100002,0,hl,0
K,100003,0,0,1l
K,100004,0,hl,1l
!
L,100001,100002
L,100003,100004
L,100001,100003
L,100002,100004
!
A,100001,100002,100004,100003
!
ALLSEL,ALL
CM,AUX,AREA
!
CYL4,cax,cay,da        ! Desenha os alveolos diametro de 6.07 mas pra
arredondar 6
CMSEL,U,AUX

```



```

!
AGEN,na,ALL, , , , ,ea, ,0      ! Copia os alveolos
!
ALLSEL,ALL
CMSEL,U,AUX
CM,CIL,AREA
!
ALLSEL,ALL
ASBA,AUX,CIL
!
CMDELE,AUX
!
wpro,,-90.000000
wpoff,0,0,-dpc
ASBW,ALL
!
wpoff,0,0,-dsc
ASBW,ALL
!
wpoff,0,0,-dte
ASBW,ALL
!
wpoff,0,0,-dqe
ASBW,ALL
!
wpoff,0,ac,0
wpro,,90.000000,
ASBW,ALL
!
wpro,,-90.000000,
wpoff,0,-ac,daq
wpro,,90.000000
!
divl=3
!
LESIZE,ALL,divl, , , , , ,
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , ,lp, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , ,3*lp, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , ,iat, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
AGEN,2,ALL, , ,iat+lat, , , ,0
!
ASEL,S,LOC,X,0
VEXT,all,,,lp,,,,,
!
ASEL,S,LOC,X,lp
VEXT,all,,,2*lp,,,,,
!
ASEL,S,LOC,X,3*lp
VEXT,all,,,zc,,,,,
!
ASEL,S,LOC,X,iat
VEXT,all,,,lat,,,,,
!
ASEL,S,LOC,X,iat+lat
VEXT,all,,,zl,,,,,
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VSEL,R,LOC,X,lp,3*lp
VGEN,2,ALL,,,v1,,,0
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VSEL,R,LOC,X,0,lp
VGEN,2,ALL,,,fc,,,0
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VOVLAP,ALL
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VSEL,R,LOC,X,lp,fc

```

```

CM, CONCRETO, VOLU
!
VSEL, S, LOC, Y, 0, h1
CMSEL, U, CONCRETO
CM, PLACA, VOLU
!
! -----
! 5.3 - DIVISÃO DA ESTRUTURA
! -----
!
K,100005,7.5,-1.5,0          ! Posiciona os KP para geração da linha da armadura inferior
K,100006,7.5,0,0
K,100007,7.5,-1.5,11
K,100008,7.5,0,11
!
L,100005,100006
L,100007,100008
L,100005,100007
L,100006,100008
!
A,100005,100006,100008,100007
!
wpro, , , -90.000000
wpoff, 7.5, 0, -dpc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dsc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dsc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dqc
ASBW, ALL
!
wpro, , 90.000000,
ASBW, ALL
!
wpro, , -90.000000,
wpoff, -7.5, 0, daq
wpro, , 90.000000
!
ASEL, S, LOC, X, 7.5
ASEL, R, LOC, Y, -1.5, 0
VEXT, all, , , 5, , , , ,
!
VSEL, S, LOC, Y, 0, -5
VSEL, R, LOC, X, 5, 3*1p
VGEN, 2, ALL, , , v1, , , , 0
!
K,100009,iat,ha+h1,0
K,100010,iat,h1,0
K,100011,iat,ha+h1,11
K,100012,iat,h1,11
!
L,100009,100010
L,100011,100012
L,100009,100011
L,100010,100012
!
A,100009,100010,100012,100011
!
wpro, , , -90.000000
wpoff, iat, 0, -dpc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dsc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dsc
ASBW, ALL
!
wpoff, 0, 0, -dqc
ASBW, ALL
!
wpro, , 90.000000,
ASBW, ALL

```

```

!
wpro,,-90.000000,
wpoft,-iat,0,daq
wpro,,,90.000000
!
ASEL,S,LOC,X,iat
ASEL,R,LOC,Y,ha+h1,0
VEXT,all,,,lat,,,,,
!
VSEL,S,LOC,Y,-lp,0
CMSEL,U,CONCRETO           ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA              ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CM,APOIOS,VOLU
!
VSEL,S,LOC,Y,h1,ha+h1
CMSEL,U,CONCRETO           ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA              ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CM,ATUADOR,VOLU
!
!
! Ajustando placas
!
divpl = 1   ! Número de divisões na placas
!
LSEL,S,LOC,X,0,lp
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL, , ,divpl, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,0,lp
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL, , ,divpl, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,fc,fc+lp
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL, , ,divpl, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,fc,fc+lp
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL, , ,divpl, , , , ,1
!
! Ajustando cargas
!
divc = 2   ! Número de divisões na placas
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,S,LOC,X,iat
LESIZE,ALL,divl, , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,S,LOC,X,iat
LESIZE,ALL,divl, , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,S,LOC,X,iat+lat
LESIZE,ALL,divl, , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,S,LOC,X,iat+lat
LESIZE,ALL,divl, , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL, , ,divc, , , , ,1
!

```

```

LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divc, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,ha+h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divc, , , , ,1
!
! Ajustando Apoios
!
divap = 2 ! Número de divisões nos apoios
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,X,5
LESIZE,ALL,div1, , , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LSEL,R,LOC,X,7.5
LESIZE,ALL,div1, , , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,X,5,3*lp
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,4, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,7.5,12.5
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divap, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,X,v1+lp
LESIZE,ALL,div1, , , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,Z,0,11
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LSEL,R,LOC,X,647.5
LESIZE,ALL,div1, , , , , , ,
!
LSEL,S,LOC,X,v1+lp,fc
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,4, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,v1+lp,fc
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,4, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,647.5,652.5
LSEL,R,LOC,Y,-1.5
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divap, , , , , ,1
!
! Ajustando Meio
!
LSEL,S,LOC,X,3*lp,iat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divzc, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,3*lp,iat
LSEL,R,LOC,Y,h1
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divzc, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,diva, , , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat,iat+lat

```

```

LSEL,R,LOC,Y,hl
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,diva, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat+lat,vl+lp
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divm, , , , ,1
!
LSEL,S,LOC,X,iat+lat,vl+lp
LSEL,R,LOC,Y,hl
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,, ,divm, , , , ,1
!
! -----
! * 6. SECTION
! -----
!
! -----
! 6.1 - ARMADURA DE PROTENSÃO
! -----
!
!
Aslp= 1.014                                ! Área de armadura protensao 1 cm² aprox
!
SECTYPE,1,LINK, ,1
SECDATA,Aslp,
SECCONTROL,0,0
!
! * *****
! -----
! * 7. MESH
! -----
!
! -----
! 7.1 - CONCRETO
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1                                ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 1                                ! Define mesh com material (1)
!
CMSEL,S,CONCRETO                       ! Seleciona componente com os volumes de concreto
!
VSWEEP,all                             ! Aplica a mesh 1
!
CM,CONCRETO,ELEM                       ! Define componente com os elementos do concreto
!
! -----
! 7.2 - PLACA
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2                                ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 2                                ! Define mesh com material (1) - Concreto
!
CMSEL,S,PLACA                          ! Seleciona componente com os volumes de concreto
!
VSWEEP,all                             ! Aplica a mesh 1
!
CMSEL,U,CONCRETO                       ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CM,PLACA,ELEM                          ! Define componente com os elementos do concreto
!
! -----
! 7.3 - APOIOS
! -----
!
! Repete o procedimento realizado para o concreto
!
TYPE, 2                                ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 4                                ! Define mesh com material (2) Apoios
!
CMSEL,S,APOIOS
!

```

```

VSWEEP,all                ! Mesh
!
VSEL,S,LOC,Y,-5,0
ESLV,S
CMSEL,U,CONCRETO
CMSEL,U,PLACA
CM,APOIOS,ELEM
!
! -----
! 7.5 - ATUADOR
! -----
!
! Repete o procedimento realizado para o concreto
!
TYPE, 2                    ! Define mesh com elementos SOLID186
MAT, 2                     ! Define mesh com material (2) Apoios
!
CMSEL,S,ATUADOR
!
VSWEEP,all                ! Mesh
!
VSEL,S,LOC,Y,h1,ha+h1
ESLV,S
CMSEL,U,CONCRETO          ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA
CM,ATUADOR,ELEM
!
! -----
! 7.7 - COMANDOS GERAIS
! -----
!
! Esse comando executa um merge dos nós - Elimina nós repetidos e faz a renumeração dos nós
!
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE                ! Renumerar os nós
!
! -----
! 7.8 - REAJUSTANDO ELEMENTOS
! -----
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
VSEL,R,LOC,X,5,fc
ESLV,S
CM,CONCRETO,ELEM
!
VSEL,S,LOC,Y,0,h1
ESLV,S
CMSEL,U,CONCRETO
CM,PLACA,ELEM
!
VSEL,S,LOC,Y,-5,0
CMSEL,U,CONCRETO          ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA             ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
ESLV,S
CM,APOIOS,ELEM
!
VSEL,S,LOC,Y,h1,ha+h1
CMSEL,U,CONCRETO          ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
CMSEL,U,PLACA             ! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem
componentes
ESLV,S
CM,ATUADOR,ELEM
!
! -----
! 7.4 - ARMADURA DE PROTENSÃO
! -----
!
TYPE, 3
!
MAT, 3
SECNUM, 1
!

```

```

I=0
*DO,I,0,260
N52=1100000+I
N,N52,5+2.5*I,ac,dpc
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,259
N52=1100000+I
N53=N52+1
E,N52,N53
N52 = 0
N53 = 0
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1200000+I
N,N52,5+2.5*I,ac,das
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,259
N52=1200000+I
N53=N52+1
E,N52,N53
N52 = 0
N53 = 0
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1300000+I
N,N52,5+2.5*I,ac,dat
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,259
N52=1300000+I
N53=N52+1
E,N52,N53
N52 = 0
N53 = 0
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1400000+I
N,N52,5+2.5*I,ac,daq
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,259
N52=1400000+I
N53=N52+1
E,N52,N53
N52 = 0
N53 = 0
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
ESEL,S,MAT,,3
CM,ARMPRO,ELEM
!
! -----
! 7.5 - CONTATO
! -----
!
TYPE,4
!
I=0
J = 0
K = 0
L = 0
*DO,I,0,260
N52=1100000+I
NSEL,S,LOC,Y,ac

```

```

NSEL,R,LOC,Z,dpc
NSEL,R,LOC,X,4.999+2.5*I,5.001+2.5*I
NSEL,U,,N52
*GET,NODECONC,NODE,0,NUM,MIN
E,NODECONC,N52
ALLSEL,ALL
L =J+1
K= L+1
CP,L,UY,NODECONC,N52
CP,K,UZ,NODECONC,N52
J = J+2
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1200000+I
NSEL,S,LOC,Y,ac
NSEL,R,LOC,Z,das
NSEL,R,LOC,X,4.999+2.5*I,5.001+2.5*I
NSEL,U,,N52
*GET,NODECONC,NODE,0,NUM,MIN
E,NODECONC,N52
ALLSEL,ALL
L =J+1
K= L+1
CP,L,UY,NODECONC,N52
CP,K,UZ,NODECONC,N52
J = J+2
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1300000+I
NSEL,S,LOC,Y,ac
NSEL,R,LOC,Z,das
NSEL,R,LOC,X,4.999+2.5*I,5.001+2.5*I
NSEL,U,,N52
*GET,NODECONC,NODE,0,NUM,MIN
E,NODECONC,N52
ALLSEL,ALL
L =J+1
K= L+1
CP,L,UY,NODECONC,N52
CP,K,UZ,NODECONC,N52
J = J+2
*ENDDO
!
I=0
*DO,I,0,260
N52=1400000+I
NSEL,S,LOC,Y,ac
NSEL,R,LOC,Z,das
NSEL,R,LOC,X,4.999+2.5*I,5.001+2.5*I
NSEL,U,,N52
*GET,NODECONC,NODE,0,NUM,MIN
E,NODECONC,N52
ALLSEL,ALL
L =J+1
K= L+1
CP,L,UY,NODECONC,N52
CP,K,UZ,NODECONC,N52
J = J+2
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
CMSEL,U,CONCRETO
componentes
CMSEL,U,ARMPRO
CMSEL,U,PLACA
CMSEL,U,APOIOS
CMSEL,U,ATUADOR
CM,CONTATO,ELEM
!
! -----
! 7.7 - COMANDOS GERAIS
! -----
!

```

! Da seleção, são removidos os elementos que já possuem


```

ESEL,S,TYPE,,1          ! Seleciona elementos do tipo SOLID186 (CONCRETO)
/TRLCY,ELEM,0.8        ! Aplica transparencia nos elementos
ESEL,all               ! Seleciona todos os elementos
/VIEW,1,1,1,1         ! Muda a vista para isométrica
!
/ESHAPE,1              ! Permite a visualização da seção nos elementos de reforço
EPLOT                  ! Plota elementos na janela de visualização
!
ALLSEL,ALL
EPLOT
!
! -----
! 7.6 - INISTATE
! -----
!
! Aplica tensão inicial ao elemento mesh200
!
INISTATE,SET,DTYPE,EPEL      ! Altera o comando INISTATE para a aplicação de
deformação inicial
INISTATE,SET,NODE,1          ! Altera o comando INISTATE para aplicação nos nós
! Seleciona elementos definidos com o material 4
ESEL,S,ENAME,,ARMPRO
NSLE                          ! Dos elementos, são selecionados os nós
INISTATE,DEFINE,,,,,TP/ES3,,,, ! Aplica deformação inicial em todos os nós da
seleção (MESH200)
!
! * *****
! -----
! * 8. RESTRIÇÕES
! -----
!
! -----
! 8.1 - APOIO
! -----
!
NSEL,S,LOC,y,-1.5          ! Seleciona os nós
NSEL,R,loc,x,650-0.1,650+0.1 ! Seleciona nós no eixo central da "caixa" de ap
D,all,uy
!
NSEL,S,LOC,Y,-1.5          ! Seleciona os nós
NSEL,R,loc,x,2*lp-0.1,2*lp+0.1 ! Seleciona nós no eixo central da "caixa"
de ap
D,all,ux
D,all,uy
!
NSEL,S,LOC,Y,-1.5          ! Seleciona os nós
NSEL,R,loc,x,2*lp-0.1,2*lp+0.1 ! Seleciona nós no eixo central da "caixa" de ap
NSEL,R,loc,z,0             ! Seleciona nós no eixo central da "caixa" de ap
D,all,uz
!
ASEL,S,loc,Z,0             ! Seleciona áreas do plano zy na metade do vão
DA,all,UZ,                 ! Aplica restrição de deslocamento na direção x
!
! * *****
! -----
! * 9. CARREGAMENTOS
! -----
!
!*****
! 9.1 ENTRADA DE DADOS
!*****
!
FINISH
/SOL
!
ANTYPE,0,NEW              ! Análise estática
OUTRES,ERASE              ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL            ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL          ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON             ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON         ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F,,0.1,2,,        ! Critério de convergência em resíduo de forças com tolerância
de 10%
CNVTOL,U,,0.1,2,,        ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%

```

```

AUTOTS,ON                ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGgeom,OFF              ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos
de grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF         ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR               ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO              ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON
e OFF entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLen,OFF               ! Não usa o método de comprimento de arco
NCNV,2,0,0,0,0          ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100                ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência
ERESX,NO                 ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
ESTIF,1.0E-12            ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
ALLSEL,ALL
!
DELTIME,timeprot,timeprot,timeprot
TIME,timeprot
!
! *****
! -----!
! **** APLICAÇÃO DO PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA
! -----!
! *****
SOLVE
SAVE
FINISH
!
EPLOT
ESEL,ALL
!
! *****
! =====!
! ****                2° CASO DE CARGA - ETAPA 2 -
! =====!
!
/SOLU
!
! -----!
! **** DADOS DA ANÁLISE
! -----!
!
ANTYPE,0,RESTART        ! Análise estática
OUTRES,ERASE            ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL          ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL        ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON           ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON       ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F, ,0.5,2, ,     ! Critério de convergência em resíduo de forças com
tolerância de 10%
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,     ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%
AUTOTS,ON                ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGgeom,OFF              ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos
de grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF         ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR               ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO              ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON
e OFF entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLen,OFF               ! Não usa o método de comprimento de arco
NCNV,2,0,0,0,0          ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100                ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência

```

```

ERESX,NO                                ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
ESTIF,1.0E-12                            ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ASEL,S,LOC,Y,ha+h1
ASEL,R,LOC,X,iat,iat+lat
SFA,ALL,,PRES,0.0001
!
ALLSEL,ALL
!
DELTIME,stepstempo,stepstempo,stepstempo
TIME,timeens
!
ALLSEL,ALL
!
SOLVE
SAVE
FINISH
!
EPLOT
ESEL,ALL
!
=====
=====!
! ****                                3° CASO DE CARGA - ETAPA 3 - CARGAS
=====
=====!
!
/SOLU
!
-----!
! **** DADOS DA ANÁLISE
-----!
!
ANTYPE,0,RESTART                          ! Análise estática
OUTRES,ERASE                              ! Todos os itens de solução, exceto SVAR, LOCI e NAR
OUTRES,ALL,ALL                            ! Salva todos os resultados a nível de elemento
OUTRES,SVAR,ALL                          ! Salva todos os resultados a nível de elemento
!
SOLCONTROL,ON                            ! O ANSYS controla os parâmetros de NR
PSCONTROL,ALL,ON                         ! Liga e desliga processamento paralelo
!
CNVTOL,F, ,0.5,2, ,                      ! Critério de convergência em resíduo de forças com
tolerância de 10%
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,                      ! Critério de convergência de deslocamento com tolerância de
10%
AUTOTS,ON                                ! ON - usa escalonamento de tempo automático
NLGEOM,OFF                                ! OFF - ignora os efeitos de grande deflexão; ON - inclui efeitos
de grande deflexão ou deformação.
NROPT,INIT,,OFF                          ! Newton-Raphson completo com descida adaptativa
EQSLV,SPAR                                ! Solucionador de equações diretas esparsas
LNSRCH,AUTO                               ! O programa alterna automaticamente a pesquisa de linha ON e OFF
entre os substeps de uma load step, conforme necessário
ARCLN,OFF                                 ! Não usa o método de comprimento de arco
NCNV,2,0,0,0,0                            ! 2: Termina a análise, não a execução do programa, se a
solução convergir
NEQIT,100                                 ! Número de equações de equilíbrio adotada para critério de
convergência
ERESX,NO                                ! Transfere os valores dos ptos.Gauss para os nós sem
majoração
!
ESTIF,1.0E-12                            ! Specifies the matrix multiplier for deactivated elements
!
ALLSEL,ALL
!
ASEL,S,LOC,Y,ha+h1
ASEL,R,LOC,X,iat,iat+lat
SFA,ALL,,PRES,pressf
!
DELTIME,stepscarga,stepscarga,stepscarga
TIME,timefinal
!
ALLSEL,ALL
!

```

```
! *****  
SOLVE  
SAVE  
FINISH  
!  
EPLOT  
ESEL,ALL  
!
```