

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GEOVANA IZABEL DE MACÊDO CARVALHO

**CONTRIBUIÇÃO PARA PROJETO DE TERÇAS
ALVEOLARES PROTENDIDAS SEM ARMADURA
TRANSVERSAL**

SÃO CARLOS

2024

GEOVANA IZABEL DE MACÊDO CARVALHO

**CONTRIBUIÇÃO PARA PROJETO DE TERÇAS ALVEOLARES PROTENDIDAS
SEM ARMADURA TRANSVERSAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Araújo
Ferreira
Coorientadora: Dra. Bruna Catoia

Área de concentração: Estruturas e
Geotecnia

SÃO CARLOS

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, pela compreensão e orientação.

A Dra. Bruna Catoia, pelo apoio, compreensão e orientação.

Ao Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho e Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima, pelas considerações e contribuição com a pesquisa.

Ao laboratório do Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPre).

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) e a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

A empresa fabricante de elementos pré-moldados de concreto, Marka, por fornecer as peças para o ensaio e tornar a pesquisa possível.

Aos meus pais, Iria Izabel de Macedo Carvalho e Jaime Justino de Carvalho, pela vida, compreensão e amor incondicional.

A toda minha família e amigos, por compreenderem o tempo que dediquei aos estudos e estive ausente.

A Deus, por tudo.

CARVALHO, G. I. M. **Contribuição para projeto de terças alveolares protendidas sem a utilização de armadura transversal.** 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

RESUMO

Ao seccionar uma laje alveolar em duas nervuras, tem-se um elemento estrutural com processo de fabricação modificado, aqui denominado terça alveolar, por propor uma solução às estruturas de telhado. Embora seja uma solução capaz de propor aumento da produção para fabricantes de elementos pré-moldados de concreto, as terças alveolares não possuem prescrição normativa, pois não contemplam armadura transversal. Com isso, o objetivo do estudo é realizar um programa experimental que verifique a viabilidade técnica do elemento estrutural e verificar um procedimento de cálculo que reproduza o comportamento da peça. Para alcançar o objetivo, foram estudadas seis amostras de terças alveolares. Primeiramente, foram realizadas análises visuais sobre as características de fabricação e variações na geometria da seção transversal de cada unidade de terça. Em seguida, as peças foram submetidas a ensaio de resistência à flexão positiva não destrutivo a fim de caracterizar a rigidez e valores efetivos de resistência à tração do concreto. Posteriormente, foram realizados ensaios para obtenção da resistência à força cortante a fim de identificar o mecanismo de ruptura dos elementos. Por fim, os valores obtidos experimentalmente foram comparados a valores teóricos de cálculo baseados na resistência a compressão do concreto, advinda do controle de qualidade fabril para estabelecer uma relação que demonstra o mecanismo de tração diagonal, publicado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022), como o procedimento de cálculo que melhor representa o comportamento das peças por reproduzir considerações sobre a geometria da seção transversal. Os testes conduzidos neste estudo demonstraram que as peças são capazes de resistir a esforços cortantes, considerado a principal preocupação na análise estrutural do elemento, e garantem um desempenho estrutural em conformidade com os padrões normativos estabelecidos, assegurando, assim, a viabilidade técnica das terças alveolares.

Palavras-chave: Terça Alveolar; Projeto; Estruturas de cobertura; Ensaio; Força Cortante.

CARVALHO, G. I. M. **Contribution to the design of prestressed hollow core purlins without transverse reinforcement.** 2024. Dissertation (Master's) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2024.

ABSTRACT

Upon sectioning a hollow core slab into two ribs, a structural element with an innovative manufacturing process is obtained, here referred to as hollow core purlins, proposing a solution for roof structures. Although it offers a potential increase in production for manufacturers of precast concrete elements, hollow core purlins lack regulatory prescriptions, as they do not include transverse reinforcement. Therefore, the objective of the study is to conduct an experimental program to verify the technical feasibility of the structural element and to propose a calculation procedure that reproduces the behavior of the piece. To achieve this goal, six samples of hollow core purlins were studied. Initially, visual analyses were conducted on the manufacturing characteristics and variations in the cross-sectional geometry of each purlin unit. Subsequently, the pieces underwent a non-destructive positive bending strength test to characterize the stiffness and effective tensile strength values of the concrete. Following this, tests were performed to determine the resistance to shear force in order to identify the rupture mechanism of the elements. Finally, the experimentally obtained values were compared to theoretical calculation values based on the concrete compression strength, derived from factory quality control, to establish a relationship that demonstrates the tension shear mechanism, as published by the Brazilian Association of Technical Standards in NBR 14861 (2022), as the calculation procedure that best represents the behavior of the pieces by reproducing considerations about the cross-sectional geometry. The tests conducted in this study demonstrated that the pieces are capable of resisting shear forces, which are considered the main concern in the structural analysis of the element and ensure structural performance in accordance with established regulatory standards, thus ensuring the technical feasibility of hollow core purlins.

Key words: Hollow Core Purlin; Design; Roof Structures; Test; Shear Force.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: TIPOS DE TERÇA.....	15
FIGURA 1.2: POSICIONAMENTO DAS TERÇAS EM UM TELHADO COMUM.....	16
FIGURA 1.3: TERÇAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO.	16
FIGURA 1.4: ESBOÇO DE UMA ESTRUTURA DE GALPÃO PRÉ-MOLDADO DE CONCRETO.	17
FIGURA 1.5: LAJE ALVEOLAR SECCIONADA COMO TERÇA ALVEOLAR.	18
FIGURA 2.1: ARMAÇÃO DE TERÇA T.	24
FIGURA 2.2: MÁQUINA UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DE TERÇAS EM T.	25
FIGURA 2.3: ALOCAÇÃO DOS MACACOS DE PROTENSÃO.	26
FIGURA 2.4: TERÇA T.	26
FIGURA 2.5: ARMAZENAMENTO DAS TERÇAS.....	27
FIGURA 2.6: PONTO DE FIXAÇÃO DA TERÇA T.	27
FIGURA 2.7: EXTENSÃO DOS PILARETES AO LONGO DA VIGA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO.	28
FIGURA 2.8: PISTA DE CONCRETAGEM E POSICIONAMENTO DE CABOS DE PROTENSÃO.	29
FIGURA 2.9: MÁQUINA MOLDADORA EM OPERAÇÃO.	30
FIGURA 2.10: CONCRETAGEM DE LAJE ALVEOLAR EM PISTA DE PRODUÇÃO FABRIL.	30
FIGURA 2.11: ENDURECIMENTO E CURA DO CONCRETO DE LAJE ALVEOLAR.	31
FIGURA 2.12: LIBERAÇÃO DA PROTENSÃO E CORTE DAS PEÇAS DE LAJES ALVEOLARES.	31
FIGURA 2.13: IÇAMENTO DE LAJE ALVEOLAR.	32
FIGURA 2.14: LAJE ALVEOLAR RECÉM PRODUZIDA.....	33
FIGURA 2.15: REPRESENTAÇÃO DE SECCIONAMENTO DE LAJE PARA TERÇA ALVEOLAR.....	33
FIGURA 2.16: EXEMPLO DE PISTAS DE CONCRETAGEM.....	34
FIGURA 2.17: SEÇÃO TRANSVERSAL DE TERÇA PRÉ-MOLDADA, SEÇÃO T, COM MEDIDAS EXPRESSAS EM CENTÍMETROS.....	35
FIGURA 2.18: TRAJETÓRIA DE FISSURAS DE FLEXÃO E CISALHAMENTO EM VIGAS.	37
FIGURA 2.19: ELEMENTO DE CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDO À FLEXÃO E CISALHAMENTO.	38
FIGURA 2.20: MECANISMOS DE RUPTURA APRESENTADOS POR DOIS DIFERENTES TIPOS DE LAJE.	39
FIGURA 2.21: FISSURA POR TRAÇÃO NA FIBRA SUPERIOR DE UMA LAJE ALVEOLAR.....	39

FIGURA 2.22: FISSURA DE FLEXÃO NA FACE INFERIOR DE LAJE ALVEOLAR.....	40
FIGURA 2.23: IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES NA EQUAÇÃO BRASILEIRA PARA FLEXO- CORTANTE.....	42
FIGURA 2.24: GRÁFICO DE RUPTURA POR ARRANCAMENTO (A) E RUPTURA POR FENDILHAMENTO (B).	48
FIGURA 2.25: RUPTURA POR (A) FENDILHAMENTO E (B) POR ARRANCAMENTO.	49
FIGURA 2.26: TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS POR ADERÊNCIA.	49
FIGURA 2.27: FENDILHAMENTO DA PEÇA.....	50
FIGURA 2.28: <i>BURSTING</i>	51
FIGURA 2.29: <i>SPLITTING</i>	52
FIGURA 2.30: <i>SPALLING</i>	52
FIGURA 3.1: PEÇAS DE TERÇA ALVEOLAR.....	55
FIGURA 3.2: COMPRIMENTO DA PEÇA ORIGINAL PRODUZIDA.	56
FIGURA 3.3: ESPECIFICAÇÃO DO COMPRIMENTO E EXTREMIDADES DAS PEÇAS RECEBIDAS PARA ENSAIO.	56
FIGURA 3.4: EXTREMIDADES DAS PEÇAS RECEBIDAS.....	56
FIGURA 3.5: ATUADOR HIDRÁULICO E CÉLULA DE CARGA.	58
FIGURA 3.6: TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL LVDT.	58
FIGURA 3.7: CHAPAS METÁLICAS AUXILIARES.	59
FIGURA 3.8: RÓTULA.	59
FIGURA 3.9: PAQUÍMETRO.	60
FIGURA 3.10: ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.	61
FIGURA 3.11: ARRANJO DE ENSAIO A FLEXÃO POSITIVA.	62
FIGURA 3.12: ESQUEMA DE ENSAIO UTILIZADO PARA RESISTÊNCIA A FLEXÃO POSITIVA.	62
FIGURA 3.13: POSICIONAMENTO DAS PEÇAS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO. ...	63
FIGURA 3.14: ARRANJO DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE.	64
FIGURA 3.15: ESQUEMA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE.....	64
FIGURA 3.16: CORTE DO ESQUEMA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE.	65
FIGURA 3.17: PEÇA POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE. ...	65
FIGURA 3.18: ESQUEMA PARA CÁLCULO DO MOMENTO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO.....	66

FIGURA 3.19: ESQUEMA DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DO DESLOCAMENTO.	67
.....	67
FIGURA 3.20: IDENTIFICAÇÃO DA REGIÃO ONDE SERÁ RETIRADO O VALOR DE EI DA PEÇA. .	68
FIGURA 3.21: FORÇA CORTANTE CALCULADA APÓS ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA	
CORTANTE.....	70
FIGURA 4.1: TERÇA ALVEOLAR TA01, UNIDADES EM CM.	72
FIGURA 4.2: TERÇA ALVEOLAR TA02, UNIDADES EM CM.	73
FIGURA 4.3: TERÇA ALVEOLAR TA03, UNIDADES EM CM.	73
FIGURA 4.4: TERÇA ALVEOLAR TA04, UNIDADES EM CM.	74
FIGURA 4.5: TERÇA ALVEOLAR TA05, UNIDADES EM CM.	74
FIGURA 4.6: TERÇA ALVEOLAR TA06, UNIDADES EM CM.	74
FIGURA 4.7: IDENTIFICAÇÃO GEOGRÁFICA E NUMÉRICA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A	
FLEXÃO.....	76
FIGURA 4.8: EVOLUÇÃO DA FISSURAÇÃO TA 01.	77
FIGURA 4.9: FISSURA DIAGONAL TA 01.....	78
FIGURA 4.10: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 01 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À	
FLEXÃO.....	78
FIGURA 4.11: EVOLUÇÃO DA FISSURAÇÃO TA 02.	79
FIGURA 4.12: FISSURA DIAGONAL TA 02.....	79
FIGURA 4.13: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 02 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À	
FLEXÃO.....	80
FIGURA 4.14: EVOLUÇÃO DA FISSURAÇÃO TA 03.	80
FIGURA 4.15: FISSURA DIAGONAL TA 03.....	81
FIGURA 4.16: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 03 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À	
FLEXÃO.....	81
FIGURA 4.17: EVOLUÇÃO DA FISSURAÇÃO TA 04.	82
FIGURA 4.18: FISSURA DIAGONAL TA 04.....	82
FIGURA 4.19: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 04 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À	
FLEXÃO.....	83
FIGURA 4.20: PANORAMA DE FISSURAÇÃO DA TA 05.	83
FIGURA 4.21: FISSURA DIAGONAL TA 05.....	84

FIGURA 4.22: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 05 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	84
FIGURA 4.23: EVOLUÇÃO DA FISSURAÇÃO NA TA 06.	85
FIGURA 4.24: ABERTURA DIAGONAL TA 06.....	85
FIGURA 4.25: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 06 NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	86
FIGURAS 4.26: REGIÃO DE FISSURAÇÃO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO, MEDIDAS EM CM.....	86
FIGURA 4.27: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 01 SOB FLEXÃO.	87
FIGURA 4.28: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 02 SOB FLEXÃO.	87
FIGURA 4.29: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 03 SOB FLEXÃO.	88
FIGURA 4.30: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 04 SOB FLEXÃO.	88
FIGURA 4.31: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 05 SOB FLEXÃO.	89
FIGURA 4.32: RELAÇÃO MOMENTO X CURVATURA PARA A TA 06 SOB FLEXÃO.	89
FIGURA 4.33: TA 01 LADO A POSICIONADA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	91
FIGURA 4.34: RELAÇÃO ENTRE FORÇA X DESLOCAMENTO TA 01 LADO A.	92
FIGURA 4.35: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 01 – LADO A.	92
FIGURA 4.36: TA 01– LADO B, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	93
FIGURA 4.37: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 01 LADO B.....	93
FIGURA 4.38: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 01 – LADO B.....	94
FIGURA 4.39: TA 02 – LADO A, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	94
FIGURA 4.40: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 02 LADO A.....	95
FIGURA 4.41: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 02 – LADO A.	95
FIGURA 4.42: TA 02 – LADO B, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	96
FIGURA 4.43: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 02 – LADO B.....	96
FIGURA 4.44: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 02 – LADO B.....	97

FIGURA 4.45: TA 03 – LADO A, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	97
FIGURA 4.46: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 03 – LADO A.....	98
FIGURA 4.47: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 03 – LADO A.	98
FIGURA 4.48: TA 03 – LADO B, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	99
FIGURA 4.49: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 03 – LADO B.....	99
FIGURA 4.50: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 03 – LADO B.....	100
FIGURA 4.51: TA 04 – LADO A, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	100
FIGURA 4.52: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 04 – LADO A.....	101
FIGURA 4.53: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 04 – LADO A.	101
FIGURA 4.54: TA 04 – LADO B, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	102
FIGURA 4.55: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO TA 04 – LADO B.....	102
FIGURA 4.56: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 04 – LADO B.....	103
FIGURA 4.57: TA 05 – LADO A, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	103
FIGURA 4.58: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO DA TA 05 – LADO A.....	104
FIGURA 4.59: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 05 – LADO A.	104
FIGURA 4.60: TA 05 – LADO B, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	105
FIGURA 4.61: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO DA TA 05 – LADO B.....	105
FIGURA 4.62: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 05 – LADO B.....	106
FIGURA 4.63: TA 06 – LADO A, POSICIONADA PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	106
FIGURA 4.64: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO DA TA 06 – LADO A.....	107
FIGURA 4.65: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 06 – LADO A.	107
FIGURA 4.66: TA 06 – LADO B, POSICIONADA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE.....	108
FIGURA 4.67: RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO DA TA 06 – LADO B.....	108

FIGURA 4.68: FISSURA IDENTIFICADA NA RUPTURA DA PEÇA TA 06 – LADO B.....	109
FIGURA 4.69: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 01 – LADO A.	109
FIGURA 4.70: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 01 – LADO B.	110
FIGURA 4.71: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 02 – LADO A.	110
FIGURA 4.72: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 02 – LADO B.	110
FIGURA 4.73: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 03 – LADO A.	111
FIGURA 4.74: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 03 – LADO B.	111
FIGURA 4.75: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 04 – LADO A.	112
FIGURA 4.76: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 04 – LADO B.	112
FIGURA 4.77: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 05 – LADO A.	113
FIGURA 4.78: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 05 – LADO B.	113
FIGURA 4.79: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 06 – LADO A.	114
FIGURA 4.80: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO E ANGULAÇÃO DA FISSURA TA 06 – LADO B.	114
FIGURA 5.1: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO PARA AS SEIS TERÇAS ALVEOLARES.	119
FIGURA 5.2: RELAÇÃO ENTRE MOMENTO E CURVATURA ENCONTRADO PARA AS TERÇAS ALVEOLARES.....	120
FIGURA 5.3: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO PARA TODAS AS TERÇAS EM AMBAS AS EXTREMIDADES.	124

FIGURA 5.4: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO DAS PEÇAS EXTREMIDADE LADO A.	125
FIGURA 5.5: RELAÇÃO ENTRE FORÇA E DESLOCAMENTO DAS PEÇAS EXTREMIDADE LADO B.	126
FIGURA 5.6: RELAÇÃO ENTRE FORÇA CORTANTE E DESLOCAMENTO VERTICAL DAS PEÇAS.	127
FIGURA 5.7: RELAÇÃO ENTRE FORÇA CORTANTE E DESLOCAMENTO VERTICAL TODAS AS TERÇAS LADO A.	128
FIGURA 5.8: RELAÇÃO ENTRE FORÇA CORTANTE E DESLOCAMENTO VERTICAL TODAS AS TERÇAS LADO B.	129
FIGURA 5.9: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 01.	130
FIGURA 5.10: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 02.	131
FIGURA 5.11: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 03.	131
FIGURA 5.12: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 04.	132
FIGURA 5.13: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 05.	132
FIGURA 5.14: AFUNDAMENTO DAS CORDOALHAS DA TA 06.	132
FIGURA 5.15: RELAÇÃO GRÁFICA ENTRE A RAZÃO DOS VALORES ENCONTRADOS DE V_{EXP} E VRK, FL	135
FIGURA 5.16: RELAÇÃO GRÁFICA ENTRE A RAZÃO DOS VALORES ENCONTRADOS DE V_{EXP} E VRK, C	137

INDÍCE DE TABELAS

TABELA 2.1: COMPARAÇÃO DE PESO PRÓPRIO ENTRE PEÇAS.....	35
TABELA 3.1: IDENTIFICAÇÃO DAS TERÇAS ALVEOLARES.	57
TABELA 3.2: COMPOSIÇÃO DAS TERÇAS – CONCRETO.	57
TABELA 3.3: COMPOSIÇÃO DAS TERÇAS – AÇO.	58
TABELA 4.1: IDENTIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DAS PEÇAS.....	75
TABELA 4.2: ESPECIFICAÇÃO DAS NERVURAS E COBRIMENTOS DAS PEÇAS.	75
TABELA 4.3: DIÂMETRO DA ABERTURA DAS TERÇAS ALVEOLARES LADO A.	76
TABELA 4.4: MÓDULO DE ELASTICIDADE E INÉRCIA EFETIVA DAS PEÇAS.	90
TABELA 4.5: MÓDULO DE ELASTICIDADE INICIAL E MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE A PARTIR DO f_{ck}	90
TABELA 4.6: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MÉDIA DAS PEÇAS OBTIDO EXPERIMENTALMENTE.	90
TABELA 4.7: VALORES DE $f_{ctk, inf}$ E $f_{ctk, sup}$ DAS TERÇAS ALVEOLARES.	91
TABELA 4.8: MECANISMO DE RUPTURA IDENTIFICADO PARA AS TERÇAS ALVEOLARES.	115
TABELA 4.9: ESCORREGAMENTO DAS CORDOALHAS.	115
TABELA 4.10: VALORES DE $V_{Rk, fl}$ CONSIDERANDO $f_{ctk, inf}$ EXPERIMENTAL.	116
TABELA 4.11: VALORES DE $V_{Rk, c}$ CONSIDERANDO $f_{ctk, inf}$ EXPERIMENTAL PARA EXTREMIDADE LADO A.....	116
TABELA 4.12: VALORES DE $V_{Rk, c}$ CONSIDERANDO $f_{ctk, inf}$ EXPERIMENTAL PARA EXTREMIDADE LADO B.....	117
TABELA 5.1: ABERTURA DAS FISSURAS.	119
TABELA 5.2: FORÇA E DESLOCAMENTO IDENTIFICADOS NA MUDANÇA DE COMPORTAMENTO GRÁFICO.	120
TABELA 5.3: RELAÇÃO ENTRE MOMENTO FLETOR MÁXIMO E CURVATURA CALCULADA PARA AS TERÇAS.....	121
TABELA 5.4: RELAÇÃO ENTRE FORÇA MÁXIMA APLICADA E DESLOCAMENTO MÁXIMO REGISTRADO.	123
TABELA 5.5: VARIAÇÃO NA FORÇA RESISTIDA ENTRE EXTREMIDADES.	124
TABELA 5.6: VALOR MÁXIMO OBTIDO DE FORÇA CORTANTE E DESLOCAMENTO VERTICAL PARA AS PEÇAS.	127

TABELA 5.7: TRIANGULAÇÃO E ANGULAÇÃO DAS FISSURAS IDENTIFICADAS NA RUPTURA DAS TERÇAS.	129
TABELA 5.8: RAZÃO ENCONTRADA PARA VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DE RESISTÊNCIA PARA O MECANISMO DE FLEXO-CORTANTE, UTILIZANDO V_{exp} E $VR_{k, fl}$ COM OS VALORES DE $f_{ctk, inf}$ CALCULADOS.....	133
TABELA 5.9: RAZÃO ENCONTRADA PARA VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DE RESISTÊNCIA PARA O MECANISMO DE FLEXO-CORTANTE, UTILIZANDO V_{exp} E $VR_{k, fl}$ COM O VALOR DE f_{ck} CALCULADO.....	134
TABELA 5.10: RAZÃO ENCONTRADA PARA O MECANISMO DE TRAÇÃO DIAGONAL, COM $f_{ctk, inf}$	136
TABELA 5.11: RAZÃO ENCONTRADA PARA O MECANISMO DE TRAÇÃO DIAGONAL, COM O VALOR DE f_{ck}	136

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivos específicos	20
1.4 RESUMO DA METODOLOGIA	20
1.5 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 TERÇAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO CONVENCIONAIS.....	24
2.2 TERÇA ALVEOLAR: PROCESSO PRODUTIVO MODIFICADO.....	28
2.3 COMPARAÇÕES: ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA TERÇA ALVEOLAR	33
2.4 MECANISMOS DE RUPTURA.....	36
2.4.1 Flexão	39
2.4.2 Força cortante	41
2.4.3 Flexo-cortante	42
2.4.4 Tração diagonal	45
2.4.5 Falha de ancoragem	48
2.5 ESTADO DA ARTE	53
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS	55
3.2 INSTRUMENTAÇÃO.....	58
3.3 METODOLOGIA	60
3.3.1 Inspeção visual das terças alveolares	60
3.3.2 Momento de inércia efetiva das peças	61
3.3.3 Verificação experimental da resistência à flexão	61
3.3.4 Verificação experimental da resistência à força cortante	64
3.3.5 Verificação do momento.....	66
3.3.6 Medição dos deslocamentos	66
3.3.7 Determinação do módulo de elasticidade efetivo	67
3.3.8 Resistência à tração média	69
3.3.9 Força cortante	69
3.3.10 Escorregamento das cordoalhas.....	70

4	RESULTADOS	72
4.1	INSPEÇÃO VISUAL	72
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POSITIVA	76
4.2.1	Panorama de fissuração e relação força <i>versus</i> deslocamento	77
4.2.2	Relação entre momento <i>versus</i> curvatura	87
4.2.3	Módulo de elasticidade efetivo das peças	90
4.2.4	Resistência à tração média	90
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE	91
4.3.1	Relação entre força <i>versus</i> deslocamento e fissuração das peças.....	91
4.3.2	Relação entre força cortante e deslocamento vertical e angulação das fissuras.....	109
4.3.3	Mecanismos de ruptura das peças	115
4.3.4	Escorregamento das cordoalhas	115
4.4	VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DAS TERÇAS ALVEOLARES PARA O MECANISMO FLEXO-CORTANTE	116
4.5	VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DAS TERÇAS ALVEOLARES PARA O MECANISMO DE TRAÇÃO-DIAGONAL	116
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	118
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POSITIVA.....	118
5.1.1	Análise do panorama de fissuração e relação entre força e deslocamento	118
5.1.2	Análise da relação entre momento fletor e curvatura	120
5.1.3	Análise do módulo de elasticidade efetivo das peças.....	121
5.1.4	Análise da resistência à tração média	122
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE	123
5.2.1	Análise da relação entre força e deslocamento e fissuração das peças	123
5.2.2	Análise da relação entre força cortante calculada, deslocamento vertical e angulação das fissuras.....	127
5.2.3	Análise do mecanismo de ruptura das peças	130
5.2.4	Análise do escorregamento das cordoalhas	130
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS ..	133
5.3.1	Análise da verificação de cálculo da resistência das terças alveolares para o mecanismo de flexo-cortante	133
5.3.2	Análise da verificação de cálculo da resistência das terças alveolares para o mecanismo de tração diagonal.....	135
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	138

6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
6.2	CONCLUSÃO	140
6.3	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
7	REFERÊNCIAS	142
APÊNDICE A		146
1.	PERDAS DE PROTENSÃO CONSIDERANDO O FCK DO CONCRETO	146
1.1	DADOS GERAIS.....	146
1.1.1	Características geométricas	146
1.1.2	Características mecânicas do concreto	146
1.1.3	Resistência à tração do concreto	147
1.1.4	Dados relativos ao aço de protensão	147
1.1.5	Dados complementares	148
1.2	PERDAS INICIAIS	148
1.2.1	Deformação por ancoragem.....	148
1.2.2	Relaxação inicial da armadura	149
1.2.3	Deformação imediata do concreto.....	150
1.3	PERDAS DIFERIDAS	152
1.3.1	Retração do concreto	152
1.3.2	Fluência do concreto	155
1.3.3	Relaxação da armadura	159
1.4	PERDA TOTAL EM RELAÇÃO À TENSÃO INICIAL.....	160
2.	PERDAS DE PROTENSÃO CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA EXPERIMENTAL	161
2.1	DADOS GERAIS.....	161
2.2	PERDAS INICIAIS	161
2.2.1	Deformação imediata do concreto.....	161
2.3	PERDAS DIFERIDAS	163
2.3.1	Retração do concreto	163
2.3.2	Fluência do concreto	163
2.3.3	Relaxação da armadura	164
2.4	PERDA TOTAL EM RELAÇÃO À TENSÃO INICIAL, CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA EXPERIMENTAL	165
APÊNDICE B		167
1	MOMENTO DE FISSURAÇÃO	167

1.1 CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL.....	168
1.1.1 MOMENTO RESISTENTE NA SEÇÃO CENTRAL, CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL.....	168
1.1.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO A 2,5 h DO APOIO, CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL.....	171
1.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO, CONSIDERANDO O VALOR DE F_{CTM} CONFORME PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	174
1.2.1 MOMENTO RESISTENTE NA SEÇÃO CENTRAL, CONSIDERANDO VALORES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	175
1.2.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO A 2,5 H DO APOIO, CONSIDERANDO VALORES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	177
APÊNDICE C.....	178
1 MECANISMO DE FLEXO-CORTANTE.....	178
1.1 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO, CONSIDERANDO O f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL (NBR 14861:2022).....	179
1.2 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO, CONSIDERANDO $F_{CTM,EXP}$ E OS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE (NBR 14861:2022).....	181
2 MECANISMO DE TRAÇÃO DIAGONAL.....	182
2.1 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE POR TRAÇÃO DIAGONAL EM REGIÃO NÃO FISSURADA POR FLEXÃO, CONSIDERANDO O f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL (NBR 14861: 2022).....	183
2.2 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE POR TRAÇÃO DIAGONAL EM REGIÃO NÃO FISSURADA POR FLEXÃO, CONSIDERANDO $F_{CTM,EXP}$ E OS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE (NBR 14861:2022).....	184

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda considerações iniciais destinadas a introduzir o tema da dissertação, justificando a relevância e necessidade de realizar o trabalho proposto. São apresentados os objetivos que se almeja alcançar e delimitados os limites do tema em questão. Ao final, tem-se a apresentação da dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Terças são elementos constituintes do sistema de cobertura de edificações. No mercado da construção civil, as terças estão disponíveis em diferentes configurações, sendo possível encontrá-las de madeira, elemento comum em edificações residenciais, aço e concreto pré-moldado. A Figura 1.1 mostra os três tipos de terça mais comuns em construções brasileiras.



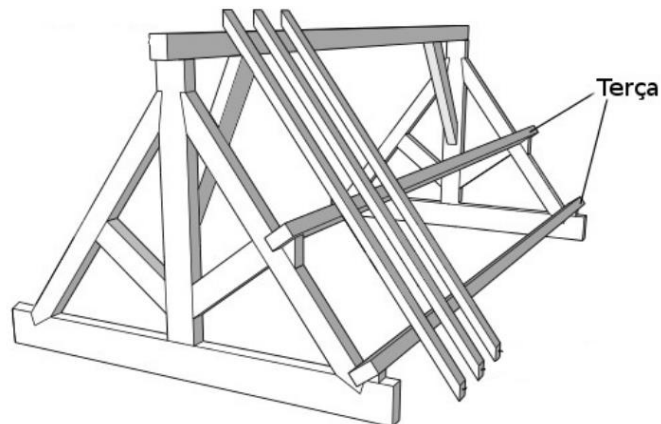
Fontes: a) Central Norte Madeiras (2023), b) Waniferro Comércio de Ferro e Aço (2016), c) Alves e Moraes Pré Fabricados (2018).

Segundo Alvarenga Junior (2021) a função das terças é suportar, além do seu peso próprio, o peso dos elementos que são utilizados na cobertura. Os elementos utilizados na cobertura são telhas, forros, luminárias e ações variáveis, como o peso da água da chuva, o peso de pessoas para eventuais manutenções e a ação do vento.

Maxime (2023) definiu que as terças de concreto são elementos estruturais fabricados sob medida de acordo com as características do projeto, podendo fixar telhas metálicas, de fibrocimento ou sanduíche.

As terças, quando em seu local de aplicação, são posicionadas na horizontal, em seções de pequena espessura e grande comprimento, colocados em direção perpendicular às tesouras, que estão nas pontas da estrutura do telhado e servem como apoio às terças. A Figura 1.2 ilustra o posicionamento de terças em um sistema de cobertura comum, a fim de demonstrar sua posição.

Figura 1.2: Posicionamento das terças em um telhado comum.

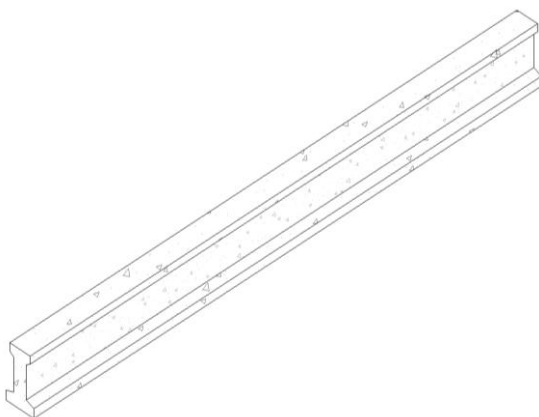


Fonte: Adaptado de Ponderevo (2018).

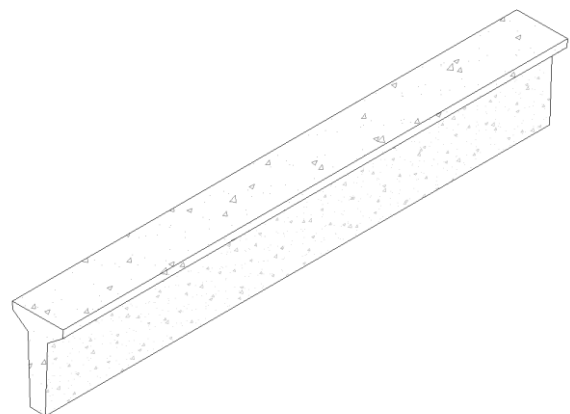
Explorando a indústria de elementos de concreto pré-moldado, têm-se, na Figura 1.3, dois exemplos de terças mais comuns, sendo a primeira em formato I e, a segunda, em formato T.

Figura 1.3: Terças de concreto pré-moldado.

a) Terça de concreto pré-moldado em formato I



b) Terça em concreto pré-moldado em formato T



Fonte: Maxime (2023).

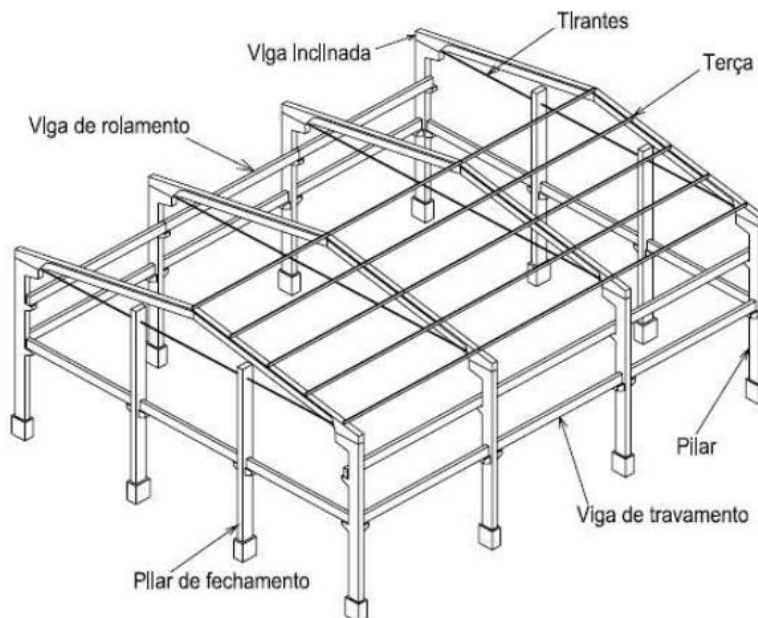
Quando comparadas, uma das vantagens encontradas na viga I, em relação à viga T, está em sua resistência à torção, que é maior. Ainda, possuem espaçamento variável, onde a distância entre eixos de pilares pode chegar até 7,5 m para terças I e

até 12 m para terças em T.

Alvarenga Junior (2021) concluiu que terças pré-fabricadas de concreto protendido são empregadas, em sua maioria, em galpões; que são edificações térreas de grandes vãos, projetadas para funções determinadas, a variar conforme o setor qual a obra se destina, facilitando a modulação e emprego de elementos pré-moldados de concreto.

A Figura 1.4 ilustra uma estrutura de galpão a ser construído com elementos pré-moldados de concreto, incluindo em seu sistema de cobertura a utilização de terças.

Figura 1.4: Esboço de uma estrutura de galpão pré-moldado de concreto.



Fonte: Santos (2010).

Tendo em vista a concepção de obras pré-moldadas, a terça alveolar é um elemento com processo produtivo modificado que propõe agilidade ao processo produtivo. A agilidade vem da possibilidade de se obter um maior número de terças fabricadas em somente um ciclo de concretagem de pistas dentro da indústria.

A linha de produção consegue ser mais rápida na fabricação de terças alveolares, pois estas são derivadas do seccionamento de uma laje alveolar, ou seja, após a concretagem, a laje passa por corte, a cada duas nervuras, tornando-se então a terça alveolar, como é exemplificado na Figura 1.5.

Figura 1.5: Laje alveolar seccionada como terça alveolar.

a) Laje alveolar



b) Terça alveolar



Fonte: Autora (2024).

Analisando a geometria da peça, pode-se considerá-la como uma viga, mas sem a presença de armadura transversal. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 6118 (2023), com exceção de lajes, vigas-parede e consolos curtos, demais elementos lineares de concreto, que serão submetidos a força cortante, devem conter armadura transversal mínima constituída por estribos.

Isto significa que na literatura técnica atual o seccionamento de uma laje para utilizá-la como um elemento que deva resistir a força cortante não é permitido. Embora tenha a recomendação para utilização de estribos, existem especulações de que as terças alveolares consigam resistir aos esforços de sua aplicação e apresentarem desempenho que atenda limites normativos.

Considerando que a força cortante é uma das principais preocupações na análise das terças alveolares, a última atualização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 14861 (2022), estabelece modelos de cálculo para verificar a resistência das lajes alveolares, destacando os mecanismos de flexo-cortante e tração diagonal.

Ao realizar ensaios de resistência à força cortante em terças alveolares tem-se sua capacidade estrutural. Assim, torna possível o dimensionamento e verificação das peças para projeto.

Considerando a viabilidade técnica e instruções para projeto, o elemento propõe uma inovação promissora à indústria de elementos pré-moldados de concreto, oferecendo eficiência estrutural e produtividade.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 6118 (2023), estabelece que os elementos lineares sujeitos a força cortante, com poucas exceções, devem ser providos de armadura transversal, apresentando essa exigência como um dos principais entraves na adoção das terças alveolares, um elemento com processo produtivo já existente porém modificado.

As terças alveolares são derivadas do seccionamento de lajes alveolares. A geometria da peça a caracteriza como viga, o que, conforme mencionado, requer a inclusão de armadura transversal. Contudo, apesar dessa divergência em relação às normativas, especulações favoráveis circundam a utilização das terças alveolares, especialmente em relação à sua capacidade de resistir a esforços cortantes, graças à presença de armadura ativa, que incrementa a resistência característica dos elementos estruturais.

A presente pesquisa se justifica pela necessidade de confirmar experimentalmente essas especulações, sugerindo a melhor forma para verificação do elemento estrutural. A validação desse elemento pode impulsionar a produção na indústria de pré-moldados de concreto, aumentando significativamente a capacidade produtiva em uma mesma linha de produção.

O processo de seccionamento das lajes alveolares para obtenção de terças, quando analisado sob uma perspectiva industrial, apresenta uma vantagem considerável, pois permite a utilização de uma mesma linha de produção para dois produtos com finalidades distintas.

Além disso, ao comparar a produção de terças alveolares com as terças convencionais do modelo T, observa-se um aumento significativo na produtividade, estimando uma produção diária 525% maior.

No âmbito acadêmico, a pesquisa sobre a aplicação de terças alveolares avança em consonância com estudos recentes que contemplam a geometria de elementos estruturais alveolares. Destaca-se, ainda, a última revisão da NBR 14861 (2022), que passou a incorporar a avaliação do desempenho estrutural considerando a seção efetiva das peças.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento mecânico das lajes alveolares seccionadas em duas nervuras, mediante ensaios de resistência à flexão positiva e à força cortante. Por meio desses ensaios experimentais, busca-se determinar se o objeto de estudo é capaz de suportar esforços cortantes e desempenhar a função estrutural de uma terça.

1.3.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho, se faz necessário:

- Caracterização da rigidez a partir de ensaio padrão de resistência à flexão das terças alveolares, com a determinação do módulo de elasticidade efetivo, deduzido a partir da consideração do momento de inércia calculado com a geometria real das peças.
- Por meio do gráfico força x deslocamento, estimar os valores efetivos para resistência a tração média (f_{ctm}) e a força de protensão efetiva no modelo ensaiado.
- Por meio do ensaio padrão para resistência a força cortante, identificar o mecanismo de ruptura e, então, comparar o resultado experimental com valores teóricos determinados sem a consideração de fatores parciais de minoração da resistência dos materiais, com base nos modelos apresentados pela ABNT NBR 14861 (2022).

1.4 RESUMO DA METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, foi estabelecida a seguinte metodologia de trabalho:

a) Definição dos mecanismos de ruptura e cenários a serem estudados

A seleção e delineamento dos mecanismos de ruptura a serem investigados na pesquisa devem ser embasados na literatura existente. O Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE) já engloba estudos correlatos, portanto, é pertinente iniciar a pesquisa a partir do conhecimento já estabelecido no meio acadêmico. Além disso, é essencial avaliar as condições do mercado para a produção das terças alveolares antes de iniciar o estudo. É crucial compreender as

vantagens e desvantagens de investir em um elemento com processo produtivo modificado, considerando o contexto atual do mercado.

b) Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica proporciona uma base sólida de conhecimento teórico e experimental sobre a tipologia de lajes alveolares e vigas de concreto protendido. Ao compreender o comportamento de elementos similares, estabelece-se um ponto de partida fundamental e se obtêm dados potenciais para a comparação de aspectos como deformabilidade, resistência e rigidez. Além disso, essa revisão possibilita a definição de uma metodologia teórica e experimental mais adequada e alinhada ao escopo do estudo em questão.

c) Programa Experimental

O programa experimental se inicia com o recebimento das peças, onde as unidades destinadas aos ensaios são meticulosamente analisadas para a obtenção de dados cruciais relacionados à sua geometria e condições construtivas. Nesta fase inicial, é realizada uma análise detalhada da geometria de cada terça alveolar, bem como da composição do concreto e da armadura utilizada em sua fabricação. A medição desses dados é fundamental, pois permite estabelecer a inércia efetiva, peso próprio e força de protensão efetiva de cada elemento.

Antes da realização dos ensaios, é feita a seleção da instrumentação a ser utilizada e a elaboração dos esquemas de ensaio, alinhados com os objetivos específicos e os dados experimentais pretendidos. No contexto desta pesquisa, as peças são submetidas a dois ensaios distintos.

O primeiro ensaio é conduzido para avaliar a resistência à flexão positiva das peças. A partir dos dados obtidos neste ensaio, é possível realizar a caracterização da rigidez das peças, determinando o módulo de elasticidade efetivo. Esse cálculo é realizado considerando a inércia calculada com base na geometria real das peças, que foi previamente analisada durante o recebimento das terças.

Além disso, os resultados do ensaio de resistência à flexão permitem a criação de um gráfico de força versus deslocamento, viabilizando a estimativa dos valores efetivos para a resistência à tração média do concreto. Um segundo gráfico, de momento versus curvatura, também é obtido após a realização deste primeiro ensaio.

O segundo ensaio é realizado para verificar a resistência à força cortante dos elementos. Esse ensaio permite identificar o mecanismo de ruptura, possibilitando a comparação dos resultados experimentais com valores teóricos deduzidos sem considerar fatores parciais de minoração da resistência dos materiais. Esses cálculos são baseados em modelos apresentados pela ABNT NBR 14861 (2022).

d) Análise dos Resultados

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, que incluem dados como força versus deslocamento, momento versus curvatura e o modo de ruptura de cada elemento, é viável realizar uma análise comparativa com os valores calculados por meio das expressões prescritas pela norma técnica em vigor. Essa comparação permite uma avaliação criteriosa e ponderada sobre a eficácia dos diferentes métodos, favorecendo assim o projeto dos elementos estruturais denominados Terças Alveolares.

1.5 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A ordenação e conteúdo dos capítulos que constituem a dissertação discorrem sobre:

Capítulo 1 – Introdução: Traz considerações iniciais para contextualização do assunto, a justificativa, objetivos e um resumo da metodologia empregada para se atingir o objetivo estabelecido.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Este capítulo se dedica à exploração das características distintivas da Terça Alveolar, considerada um material de processo produtivo modificado. Nessa análise, são comparadas suas propriedades com as de peças existentes, com destaque para a Terça T, que compartilha semelhanças em sua composição. Ao examinar as nuances entre esses elementos estruturais, são debatidas tanto suas vantagens quanto desafios. Além disso, são investigados os possíveis mecanismos de ruptura das peças, para uma visão abrangente dos desafios enfrentados na utilização desse material, com base em pesquisas relacionadas. Por fim, uma incursão no estado da arte a fim de contextualizar o desenvolvimento subsequente da dissertação.

Capítulo 3 – Programa experimental: Descreve a caracterização dos modelos ensaiados, incluindo a quantidade de amostras, detalhes de instrumentação e metodologia dos ensaios. Ainda, apresenta os procedimentos minuciosos dos ensaios, condições de inspeção, forma para obtenção de resultados, métodos para verificações e modelos de cálculo a serem utilizados.

Capítulo 4 – Resultados: Apresenta os resultados obtidos com análises e ensaios, organizados cronologicamente conforme a sua obtenção.

Capítulo 5 – Análise dos resultados: Compara os resultados teóricos aos experimentais e discute detalhes analíticos dos resultados.

Capítulo 6 – Conclusão e considerações finais: Expõe as conclusões derivadas da análise e oferece comentários relevantes para trabalhos futuros.

Capítulo 7 – Referências: Listagem de todas as referências utilizadas na dissertação, organizadas em ordem alfabética.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo dispõe de uma comparação entre terças alveolares e terças “T”, delineando os aspectos positivos e negativos associados à sua utilização e fabricação. Além disso, explora os principais mecanismos de funcionamento próximo ao colapso dos elementos alveolares, bem como aborda pesquisas correlatas pertinentes.

2.1 TERÇAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO CONVENCIONAIS

Terças em concreto pré-moldado são normalmente dispostas em coberturas de edificações industriais, apoiadas nas vigas de cobertura por meio da aplicação de calços em locais designados. Premart (2024) dispõe que as terças podem ser empregadas em edificações com modulações de até 12 m e espaçamento entre eixo delas, no plano de cobertura, podendo chegar a até 3 m.

As terças pré-moldadas em formato T têm um vão máximo de 12 metros, e a capacidade produtiva das fábricas varia de acordo com a disponibilidade de maquinário e mão-de-obra.

O processo de fabricação dessas terças começa com a equipe de armação, onde os armadores se reúnem em uma mesa de montagem para a produção da armadura passiva das peças. Nessa fase, são inseridos os estribos. A Figura 2.1 ilustra um modelo de armação de Terças Pré-Moldadas em T.

Figura 2.1: Armação de Terça T.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 2.1 apresenta uma armação passiva, com a intenção de destacar o

processo de armadura e colocação de estribos na terça. Essa figura ilustra conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em particular a NBR 6118 (2023), que estipula a presença de armadura transversal mínima em elementos lineares sujeitos a força cortante, com poucas exceções.

Após a conclusão da armadura passiva, esta é inserida na forma de terças, como exemplificado na Figura 2.2. A forma é parte integrante de uma máquina utilizada para moldar as peças de terças pré-fabricadas, determinando assim o formato e as dimensões finais das peças.

Figura 2.2: Máquina utilizada para fabricação de Terças em T.



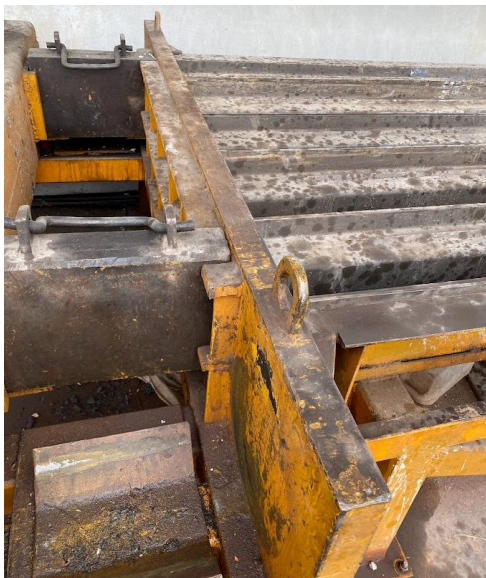
Fonte: Autora (2024).

Com a Figura 2.2 é entendida que a produção das terças “T” se limita a esta máquina, que representa a capacidade produtiva do fabricante. Assim, com a imagem é possível entender que são fabricadas seis peças por ciclo de concretagem.

Na etapa subsequente da produção das terças T, após a inserção dos estribos na forma, as cordoalhas ou a armadura ativa correspondente ao projeto são colocadas dentro da forma de cada peça, utilizando-se uma máquina específica.

O maquinário mencionado é equipado com mecanismos para a realização da protensão, a qual é executada por meio de um macaco posicionado nas extremidades, conforme ilustrado na Figura 2.3. O macaco é protegido por uma chapa metálica, o mesmo componente utilizado nas formas das terças, visando garantir a segurança dos trabalhadores.

Figura 2.3: Alocação dos macacos de protensão.



Fonte: Autora (2024).

Para finalizar, o concreto é despejado por toda extensão da forma, preenchendo-a e prensado no fechamento, resultando após a secagem no formato da peça. A Figura 2.4 ilustra a seção transversal de uma terça em formato T após o processo de concretagem.

Figura 2.4: Terça T.



Fonte: Autora (2024).

As terças são armazenadas na fábrica após retirada da forma, conforme Figura 2.5, e, posteriormente, transportadas até a obra de destino. A respeito da locomoção das peças, é necessário considerar o comprimento da terça, pois a maioria dos caminhões que realizam o frete comportam peças com extensão máxima de 12 m. Para terças de maiores vãos, além de ser necessário maquinário especial, também é necessário transporte especial.

Figura 2.5: Armazenamento das terças.



Fonte: Autora (2024).

Na obra, a colocação e fixação das peças é realizada a partir do encaixe em outra peça, também pré-fabricada, disponibilizada acima da viga superior da edificação, conforme retratada na Figura 2.6.

Figura 2.6: Ponto de fixação da terça T.



Fonte: Autora (2024).

A extremidade evidenciada na Figura 2.6 serve para o encaixe das terças, posiciona-se a face inferior da peça e a superior se conecta pela extensão do encaixe, isso ocorre por toda extensão da obra planejada, sendo a Figura 2.7 um exemplo de extensão de uma viga e o espaçamento adotado entre as terças.

Figura 2.7: Extensão dos pilaretes ao longo da viga pré-moldada de concreto.



Fonte: Autora (2024).

Com a Figura 2.7 é possível observar também os furos na lateral da espera de terças, que torna possível a fixação das peças pré-moldadas uma na outra para montar a estrutura da obra como um todo.

2.2 TERÇA ALVEOLAR: PROCESSO PRODUTIVO MODIFICADO

Embora o processo produtivo a ser abordado se refira à fabricação de lajes alveolares, é importante notar que as terças seguem um processo similar, diferindo apenas no dimensionamento da seção durante a etapa de corte. Petrucelli (2009) pontuou que para fabricação de lajes alveolares, o processo pode ser dividido em oito etapas, sendo elas:

1. Preparação das pistas;
2. Posicionamento dos cabos de protensão;
3. Lançamento do concreto e produção da laje;
4. Marcação dos painéis (pré-cortes) e possíveis recortes na pista;
5. Endurecimento e cura;
6. Liberação da protensão e corte das lajes;
7. Içamento e estocagem;
8. Recortes e acabamentos (caso necessário);

O início do processo de produção de uma laje alveolar envolve a remoção dos resíduos remanescentes da produção anterior, uma vez que as fábricas operam em grande escala e de forma contínua. Em seguida, dá-se início à instalação dos cabos de protensão, como ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8: Pista de concretagem e posicionamento de cabos de protensão.



Fonte: Autora (2024).

As pistas de produção possuem comprimentos variados, geralmente entre 150 e 180 metros, e são constituídas de formas metálicas com trilhos, destinados ao suporte e deslocamento do maquinário utilizado. Quanto ao lançamento do concreto, este pode variar de acordo com o tipo de máquina utilizada no processo produtivo, sendo as principais classificadas em dois tipos: máquinas extrusoras e moldadoras.

No caso específico do estudo das terças alveolares, a fábrica utilizou o modelo de máquina moldadora. Um aspecto relevante a respeito do controle tecnológico durante a produção é a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, com base de 100 mm, para ensaio de resistência à compressão do concreto, realizada mecanicamente na mesa, conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT na NBR 5738 (2015).

Os corpos de prova são moldados simultaneamente às peças, acompanhando a mesma vibração, e posteriormente são rompidos em laboratório dentro da própria fábrica. Para cada concretagem, são moldados quatro corpos de prova, dos quais dois são rompidos após 12 horas, e os outros dois, após 28 dias, um para teste e o outro para contraprova.

A geometria dos alvéolos é determinada pela máquina moldadora utilizada no processo de fabricação. A Figura 2.9 apresenta o modelo da forma utilizada durante a produção das peças. No caso da fábrica visitada, a concretagem é realizada por

meio de uma máquina moldadora, e detalhes adicionais podem ser observados na mesma figura.

Figura 2.9: Máquina moldadora em operação.

a) Início da máquina moldadora durante concretagem



b) Lateral máquina moldadora durante concretagem



Fonte: Autora (2024).

À medida que a máquina avança ao longo da pista de concretagem, ela produz as peças em um concreto de baixa consistência, o menor teor de água permite uma rápida produção e moldagem do elemento, como ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Concretagem de laje alveolar em pista de produção fabril.



Fonte: Autora (2024).

O aspecto visual final do concreto é resultado da etapa de endurecimento e cura, na qual o concreto é protegido por uma cobertura, conforme demonstrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Endurecimento e cura do concreto de laje alveolar.



Fonte: Autora (2024).

Após um período estipulado pela indústria, entre 12 e 24 horas, dois dos corpos de prova são submetidos à ruptura para determinação da resistência característica à compressão, conhecida como f_{cj} . Sendo alcançada a resistência especificada em projeto, é feita a liberação da protensão e o corte das peças. Este processo pode ser observado na Figura 2.12, onde são realizados os cortes nas peças ainda na pista de concretagem.

Figura 2.12: Liberação da protensão e corte das peças de lajes alveolares.



Fonte: Autora (2024).

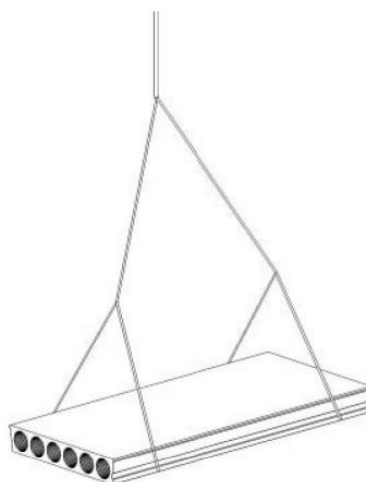
Neste momento, no processo produtivo para as terças alveolares, além do corte que seria apenas no comprimento da peça de laje, realiza-se também um corte separando os alvéolos a cada duas nervuras.

Além do corte que secciona a laje em terças, é realizado um furo que atravessa a peça desde a mesa superior até a inferior, em cada extremidade do comprimento da terça, que servirá para fixação das peças em sua montagem final.

Para pistas de protensão, é possível cortar os elementos no comprimento previsto em projeto, evidenciando respeito ao projeto e as condições de transporte da peça. Considerando tais fatores, as terças podem chegar a 15 metros de comprimento, ou avançarem este comprimento, a depender unicamente das etapas posteriores ao corte.

No processo subsequente, o içamento e a estocagem exigem o uso de equipamentos especiais para garantir a integridade estrutural das peças. A Figura 2.13 ilustra o içamento de uma laje alveolar, a fim de exemplificar o processo, que deve ser feito com cautela.

Figura 2.13: Içamento de laje alveolar.



Fonte: Munte (2007).

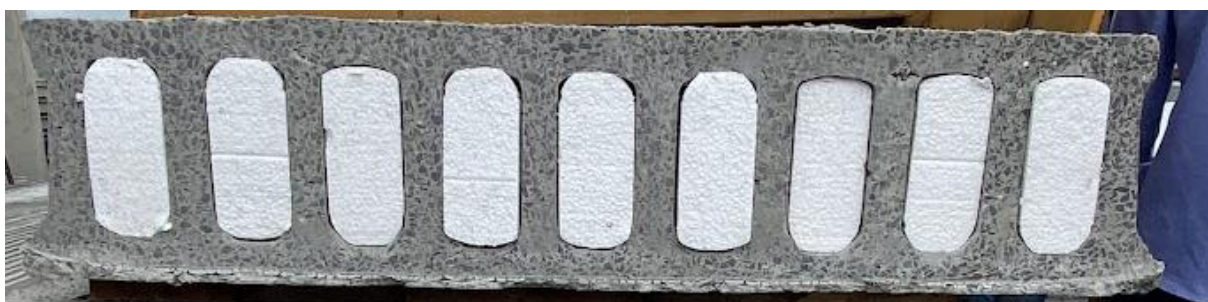
Ainda, a peça não sai direto da fábrica para seu local de aplicação, muitas vezes ela permanece estocada. Esse tempo de estocagem deverá ser sob condições controladas de armazenamento, pois intercorrências podem influenciar na resistência e aspecto visual final da peça.

2.3 COMPARAÇÕES: ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA TERÇA ALVEOLAR

Ao analisar o processo de fabricação de ambos os tipos de terças, torna-se evidente que as terças alveolares apresentam uma clara vantagem em termos de produtividade.

A Figura 2.14 fornece uma visão elucidativa, representando uma laje alveolar produzida por uma fábrica de elementos pré-moldados.

Figura 2.14: Laje alveolar recém produzida.



Fonte: Autora (2024).

Observada a imagem da laje alveolar, com a Figura 2.15, tem-se linhas que representam o corte na laje, deste seccionamento para obtenção de terça alveolar, é possível extrair cinco peças de um pano de laje.

Figura 2.15: Representação de seccionamento de laje para terça alveolar.



Fonte: Autora (2024).

Para produção de terças alveolares com 12 m de comprimento, nessa mesma fábrica, considerando a pista de concretagem com 180 m de extensão, é possível fabricar $(180 \div 12 = 15 \mid 15 \times 5 = 75)$ 75 unidades de terça alveolar por pista.

Deve-se levar ainda em consideração que a fábrica em questão possui não só uma pista de concretagem, mas quatro pistas, conforme ilustrado pela Figura 2.16.

Figura 2.16: Exemplo de pistas de concretagem.



Fonte: Autora (2024).

Na produção de terças T, a mesma fábrica é capaz de produzir 12 unidades em um dia. No entanto, ao utilizar as quatro pistas de concretagem, é possível fabricar 300 terças alveolares em um único dia.

Sob uma perspectiva de produtividade, ao utilizar apenas uma pista de concretagem para a produção de terças alveolares, a quantidade de peças produzidas é 525% maior do que a produção da terça T.

Esses números foram obtidos em uma fábrica específica e podem variar dependendo das instalações e do equipamento disponível em outros fabricantes. No entanto, o aumento da produtividade é um aspecto considerável na adoção de terças alveolares.

A terça alveolar oferece outro benefício, sendo o de permitir um aumento no comprimento específico, pois não está limitada pelo equipamento de produção, mas sim pela capacidade de projeto e transporte das peças.

No entanto, alguns aspectos desfavoráveis limitam a aceitação da terça alveolar, tais como:

- O peso próprio da peça;
- Realização de cortes pela extensão da pista;
- Viabilidade técnica;

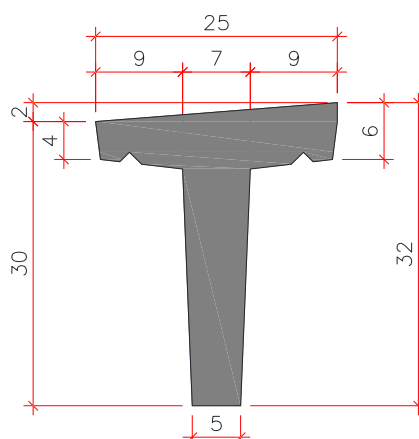
Para esclarecer a questão do peso próprio da peça foi realizado o projeto da seção transversal de uma terça T, para comparação com a seção transversal de uma terça alveolar.

Ao desenhar a seção transversal da peça é possível obter o valor da área e, conseqüentemente o valor do peso próprio, apenas multiplicando a área da seção

transversal pelo comprimento da peça e pelo valor estipulado para massa específica do concreto armado.

A seção da terça T está disposta na Figura 2.17, que apresenta as medidas em centímetros e retrata o projeto das mesmas terças descritas no subitem 2.1

Figura 2.17: Seção transversal de terça pré-moldada, seção T, com medidas expressas em centímetros.



Fonte: Autora (2024).

Para efeitos de comparação, multiplicou-se o valor da área da seção transversal média das terças alveolares pela massa específica do concreto e posteriormente pela extensão de 12 m. O mesmo foi realizado para a seção desenhada de terça T e os resultados dessa comparação estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comparação de peso próprio entre peças.

Terça	Área (m ²)	Pp (kg)
Alveolar	0,035	1050
T	0,028	840

Fonte: Autora (2024).

A diferença no peso próprio entre a terça alveolar e a terça T é de 210 kg, sendo o peso da terça alveolar 25% maior. Todavia, existem estudos recentes que avaliam a possibilidade de se reduzir o peso próprio de elementos alveolares, sem prejudicar seu desempenho estrutural.

Com relação ao segundo item listado como desvantagem para a terça alveolar, que seria a realização de corte por toda a extensão da pista de concretagem, tem-se como desvantagem que esse processo pode acarretar demanda de funcionários e materiais. Isto é, seria necessário um equipamento para corte e um funcionário para

realizar esse corte por toda a extensão da pista, considerando de 180 m.

Todavia, estima-se um prazo menor quando comparado a utilização de mão de obra para realizar a armadura passiva de terças em formato “T”. E, quanto ao gasto de material, também se estima que discos para corte são mais viáveis do que armadura passiva.

Para enfrentar essa possível desvantagem, cada fabricante deve conduzir um estudo de viabilidade econômica. No entanto, soluções para as desvantagens mencionadas podem ser consideradas.

Neste estudo, contempla-se a análise estrutural do elemento. Para analisar a viabilidade técnica das peças, torna-se imprescindível o entendimento dos mecanismos de ruptura que atuam nos elementos alveolares.

2.4 MECANISMOS DE RUPTURA

Catoia, Ferreira e Pinheiro (2016) concluíram que lajes alveolares podem romper devido a fatores. Tais como: falha por perda de ancoragem; falha por tensões de esforço cortante superiores à tensão de tração do concreto na nervura; falha combinada por esforço cortante, flexão e escorregamento da armadura ativa; falha combinada por torção e esforço cortante; falha por flexão com possibilidade de escorregamento da armadura ativa junto ao apoio; ou falha por interação dos mecanismos de flexão e de força cortante que podem ocorrer em peças com pequenos vãos e elevados carregamentos.

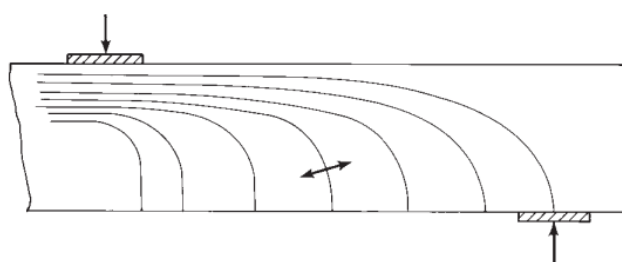
Ao buscar por referências sobre as terças alveolares, toma-se nota de estudos realizados sobre o comportamento das lajes alveolares. Para Yang (1994), o comportamento de lajes alveolares nos cálculos é simples e admite que atuem como vigas apoiadas, sem considerar tensão por momento fletor negativo ou por momento torçor.

Maciel (2017) pontuou que existem alguns modos de ruptura encontrados na literatura quando se investiga o comportamento de lajes alveolares, sendo os que mais se destacam: mecanismos de ruptura por flexo-cortante, que são rupturas ocasionadas em regiões já fissuradas por flexão e, mecanismo de ruptura por tração diagonal, que são àquelas ocasionadas antes das fissuras de flexão.

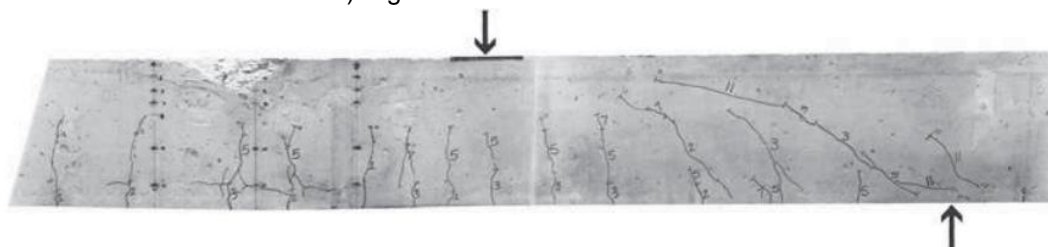
Wight e MacGregor (2012) concluíram que o padrão de fissuração em uma viga de teste com armadura de flexão longitudinal, mas sem armadura de cisalhamento, dois tipos de fissuras podem ser constatados: fissuras verticais e fissuras inclinadas. A Figura 2.18 apresenta a trajetória dessas fissuras em vigas, conforme descrito.

Figura 2.18: Trajetória de fissuras de flexão e cisalhamento em vigas.

a) Principal trajetória de fissuras diagonais em viga não fissurada por flexão



b) Viga de concreto armado fissurada



Fonte: WIGHT e MACGREGOR (2012).

As fissuras verticais surgem inicialmente devido às tensões de flexão, manifestando-se primeiramente na parte inferior da viga, onde as tensões de flexão são mais intensas. Por outro lado, as fissuras inclinadas, localizadas mais próximas das extremidades das vigas, resultam da combinação de esforços de cisalhamento e flexão, frequentemente denominadas como rachaduras de cisalhamento ou fissuras de tensão diagonais.

Para Wight e MacGregor (2012) embora haja uma semelhança entre os planos de tensão principal máxima de tração e o padrão de fissuração, essa relação não é perfeita. Em vigas de concreto armado, as fissuras de flexão geralmente ocorrem antes das tensões principais de tração e em altura média tornam-se críticos.

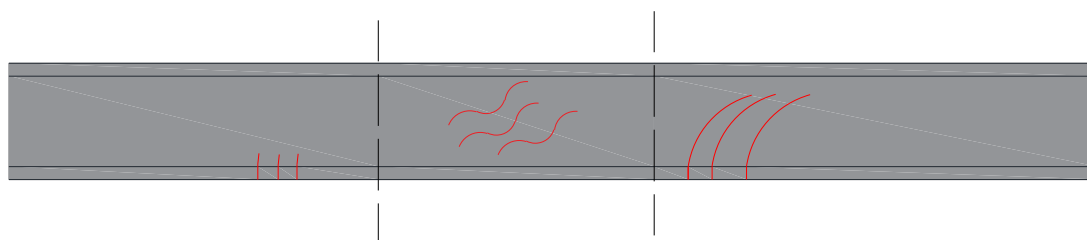
Uma vez que uma fissura de flexão tenha se desenvolvido, a tensão de tração perpendicular à fissura diminui para zero. Para manter o equilíbrio, é necessária uma redistribuição significativa de tensão. Como resultado, o início da fissuração inclinada em uma viga não pode ser previsto com base apenas nas tensões principais, a menos

que a fissuração por cisalhamento ocorra antes da fissuração por flexão. Este cenário é raro em concreto armado, mas pode ocorrer em algumas vigas de concreto protendido.

Inforsato (2018) indica três diferentes configurações de fissuras, sendo: (I) próximo ao apoio, onde o cisalhamento é maior e o momento praticamente nulo, aparecem fissuras inclinadas na diagonal, representando o cisalhamento quando a tensão de tração principal alcançar a resistência de tração do concreto no ponto crítico. (II) Quando carregamento distribuído, a região central da peça possui momento elevado e cisalhamento reduzido, sendo comum a incidência de fissuras por flexão. E, em (III) regiões intermediárias, as fissuras de flexão se propagam em fissuras de cisalhamento, por ter uma tensão de cisalhamento mais elevada, conforme indicado na Figura 2.19.

Figura 2.19: Elemento de concreto protendido submetido à flexão e cisalhamento.

a) Fissura de Flexão; B) Fissura de Cisalhamento; C) Fissura de Interação Flexo-Cortante;



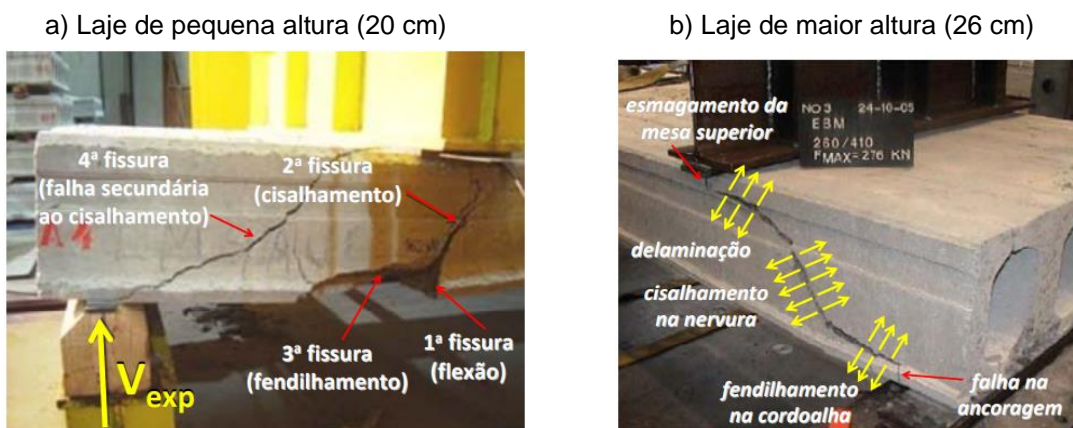
Fonte: Autora (2024).

Segundo Inforsato (2018) estas fissuras, visualizadas em peças protendidas, são denominadas fissuras de cisalhamento e flexão, pois de fato tem-se uma interação dos dois mecanismos, assim, o mecanismo de ruptura nem sempre pode ser bem definido, mas resultado da combinação de mecanismos distintos.

Fusco (2008) já dizia que com o acréscimo de carga ou carregamento, as tensões diagonais excedem o limite do concreto que acaba se rompendo e as fissuras deixam de ser perpendiculares ao eixo da peça, surgindo a fissura crítica com a qual sobrevém a ruptura final da peça.

Para Catoia, Ferreira e Pinheiro (2016) podem ser observados mecanismos de ruptura diferentes para cada tipologia de laje quando se encontram próximas ao colapso, a Figura 2.20 apresenta mecanismos de ruptura de dois diferentes tipos de laje.

Figura 2.20: Mecanismos de ruptura apresentados por dois diferentes tipos de laje.



Fonte: Catoia, Ferreira e Pinheiro (2016).

2.4.1 Flexão

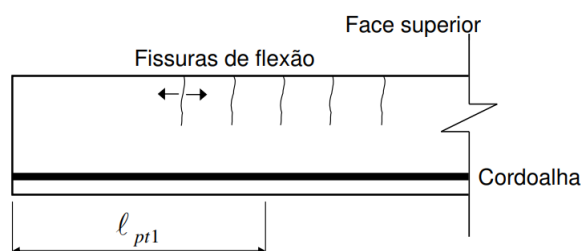
Segundo Alvarenga Junior (2021) no dimensionamento padrão das vigas de concreto é primeira analisada a resistência a flexão, conduzindo a determinação da seção transversal e ao arranjo das armaduras longitudinais.

Para o dimensionamento dessa armadura são estabelecidos critérios de projeto a fim de que, na ocorrência de alguma falha, os ocupantes possam ser avisados de que a estrutura está prestes a ruir, o aviso vem em forma de fissuração.

O efeito da fissuração em lajes sem armadura de cisalhamento, quando ocorre por flexão, não é o mesmo daquele que ocorre nas vigas. Em vigas, a angulação varia entre 35° e 45° . Para as lajes alveolares, este ângulo depende de alguns fatores, e tende a variar de 15° a 90° .

Catoia (2011), diz que os mecanismos de ruptura por flexão em lajes alveolares estão associados a mecanismos isolados ou combinados, sendo tais mecanismos: fissuração por tração na fibra superior, ilustrado na Figura 2.21; fissuração por tração na fibra inferior, ilustrado na Figura 2.22.

Figura 2.21: Fissura por tração na fibra superior de uma laje alveolar.



Fonte: Catoia (2011).

Com a Figura 2.21 é exemplificada as características da fissura de flexão, encontradas no sentido vertical, com início em uma das faces do elemento estrutural, no caso, as lajes alveolares com fissuras verticais que surgem a partir da face superior da peça, ao contrário da Figura 2.22, que ilustra as fissuras de flexão oriundas da face inferior do elemento protendido e acabam por se estender por toda altura da laje, provavelmente devida a carga aplicada no momento das fotos.

Figura 2.22: Fissura de flexão na face inferior de laje alveolar.



Fonte: Catoia (2011).

Para Catoia (2011) ao considerar ensaios de flexão com aplicação de força concentrada, dependendo do comprimento das lajes alveolares, as fissuras de flexão podem propagar na forma de fissura diagonal onde o cisalhamento seja pouco significativo. Isto torna-se uma interação de mecanismos de flexão e cisalhamento.

Para os casos dessa região estarem longe do apoio, o elemento estrutural deverá ainda ter uma boa condição de ancoragem e, a maior probabilidade é que a fissura percorra até a face superior do elemento, ocasionando uma ruptura por compressão do concreto. Catoia (2011) pontuou que para lajes de pequeno comprimento o mais presumível seria o desenvolvimento de fissura características por falha ao fendilhamento.

Para vigas, Alvarenga Junior (2021) discorre que atender as tensões admissíveis no concreto e no aço para o estado limite de serviço não é o suficiente para determinação da resistência real da peça, é necessário avaliar a capacidade última, calculada a partir do momento fletor último (M_{Rd}) e, com isso, também é assegurada uma margem de segurança entre os carregamentos de serviço e o carregamento último.

O dimensionamento da armadura longitudinal de flexão em concreto armado e protendido deve ser atendendo as condições dos estados limites últimos e de serviço (CARVALHO, 2017). Ainda, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 6118 (2023), estabelece que para casos de protensão além dos esforços atuantes, devem ser considerados os esforços hiperestáticos.

2.4.2 Força cortante

Diversas teorias são empregadas na tentativa de determinar a resistência de elementos sem armadura transversal na seção crítica, utilizando mecanismos de transferência de esforços pelo próprio elemento. No entanto, não há uma teoria aceita que abranja todas as situações e condições das peças.

De acordo com Wight e Macgregor (2012) os modos de falha são influenciados pela posição das ações sobre os elementos estudados. A razão entre a posição da ação em relação ao apoio (a) e a altura útil (d) do elemento é uma referência importante para identificar esses modos de falha.

Rocha (2023) elencou estudos experimentais que mostraram que:

- Para razões $a/d < 1,0$, os elementos tendem a sofrer ruptura por esmagamento do concreto da biela junto ao apoio, devido ao efeito arco.
- Para razões a/d entre 1 e 2,5, a ruptura ocorre por compressão devido ao cisalhamento, com formação de fissura diagonal que penetra no banzo comprimido.
- Quando a razão a/d está entre 2,5 e 6,5, o mecanismo de ruptura é fortemente influenciado pela flexão.

Rupturas por esforço cortante, que na realidade são ruínas ocasionadas pela combinação de força cortante e momentos fletores, são caracterizadas por pequenas flechas e falta de ductilidade (Inforsato, 2018).

Para Maciel (2017) a ruptura por esforço cortante ocorre quando a capacidade resistente à tração do concreto é superada antes de aparecerem as fissuras caracterizadas por flexão.

A ruptura por esforço cortante ocorre apresentando fissuras diagonais, que se expandem conforme a adição de carregamento na peça, conforme indicação de 2ª fissura apresentada na Figura 2.20.

Segundo Maciel (2017) os modos de ruptura mais comuns em lajes alveolares são a ruptura por flexo-cortante (em regiões fissuradas por flexão) e a ruptura por tração diagonal.

2.4.3 Flexo-cortante

Bazilio, Alvarenga Junior, Catoia e Ferreira (2022) destacaram que o mecanismo de flexo-cortante é influenciado por diversos fatores, incluindo a resistência à tração do concreto, a taxa de armadura longitudinal, o fator de escala, o esforço axial da protensão e o tipo de agregado utilizado na mistura.

De acordo com Marquesi (2014), os quatro primeiros fatores mencionados estão contemplados nas formulações do Eurocode 2 (EC2) e nas normas brasileiras NBR 14861 e NBR 6118. A equação presente na norma brasileira NBR 14861 (2022) está representada por meio da Figura 2.23.

Figura 2.23: Identificação dos fatores na equação brasileira para flexo-cortante.

$$V_{Rd,fl} = (0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho_1) \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d) + (0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d)$$

Largura das nervuras e altura útil da peça

Fonte: Autora (2024).

Conforme observado por Catoia (2011) em lajes de menor altura (≤ 20 cm) submetidas a uma carga a uma distância de 2,5 h do apoio, é comum a ocorrência inicial de fissuras de flexão na região onde a tensão de tração na fibra inferior atinge a resistência do concreto à tração.

Com a formação das fissuras, ocorre um aumento repentino da força de tração na armadura, uma vez que as tensões de tração na seção transversal do concreto, que ainda não fissurou acabam sendo transmitidas pela armadura. Essa força adicional precisa ser totalmente ancorada para garantir a estabilidade da estrutura.

Conforme destacado por Rocha (2023) as normas brasileiras (NBR 6118 e NBR 14861) consideram a contribuição da resistência à tração do concreto na resistência à força cortante, atribuindo uma parcela de 25% da resistência à tração do concreto (f_{ctd}).

As forças de tração em um elemento estrutural tendem a gerar fissuras e aumentar a abertura das já existentes, o que resulta na redução da resistência à força cortante. Por outro lado, as forças de compressão têm a capacidade de retardar o surgimento de fissuras e contribuir para o fechamento das fissuras existentes, assegurando a transferência eficaz dos esforços.

Tanto no Eurocode 2 (2004) quanto nas normas brasileiras, a influência da força axial na resistência à força cortante é considerada por meio da parcela $\alpha \cdot \sigma_{cp} \cdot b \cdot d$, onde α é igual a 0,15 e σ_{cp} representa a tensão axial de compressão. Essa parcela é positiva para forças de compressão e negativa para forças de tração.

Os modelos de cálculo empregados para determinar a resistência à força cortante em lajes alveolares protendidas são baseados em ensaios experimentais realizados em vigas de seção retangular. A contribuição da protensão (V_p) pode ser determinada por meio de dedução analítica.

Conforme estabelecido pela ABNT, na NBR 14861 (2022) a resistência ao esforço cortante de um elemento de concreto protendido é composta pela soma da resistência ao esforço cortante do elemento em concreto armado similar, adicionada à parcela da força cortante gerada pelo carregamento, o que levará à descompressão da seção.

Com isso, tem-se a Equação 1, que representa a força cortante resistente de cálculo, $V_{Rd,fl}$ das lajes alveolares com ou sem capa estrutural.

$$V_{Rd,fl} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$V_{Rd,fl}$ é a força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo na seção, expressa em quilonewtons (kN);

$V_{c,1}$ é a resistência ao cisalhamento da viga não protendida similar, obtida por meio da Equação 2.

$V_{p,1}$ é a contribuição da força de protensão na resistência ao cisalhamento, obtida por meio da Equação 3.

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1) \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad \text{Equação 2}$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

f_{ctd} a resistência de cálculo à tração do concreto pré-moldado, expressa em megapascals (MPa);

$\Sigma b_{w,1}$ o somatório das larguras das nervuras do elemento alveolar, expresso em metros (m);

d é a altura útil total da seção transversal, expressa em metros (m), considerando a altura do elemento alveolar;

$\sigma_{cp,1}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso de alvéolos não preenchidos, expressa em megapascals (MPa), obtido pela equação 4.

ρ_1 corresponde à taxa de armadura A_s em relação à seção do elemento alveolar pré-moldado, obtido com a equação 5.

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \quad \text{Equação 4}$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\Sigma b_{w,1} \cdot d} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

N_p é a força de protensão final, depois de todas as perdas, expressa em quilonewtons (kN);

A_c é a área da seção transversal de concreto do elemento alveolar, expressa em metros quadrados (m²).

A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal inferior tracionada, expressa em metros quadrados (m²), podendo também ser considerada a armadura passiva no alvéolo.

k o coeficiente resultante da Equação 6, considerando d em metros (m).

$$k = 1,6 - d \geq 1 \quad \text{Equação 6}$$

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022), identifica equações para situações em que os alvéolos são preenchidos antes da liberação da protensão e para situações em que são preenchidos após a liberação da protensão na pista. No entanto, essas equações não são relevantes para a dissertação, uma vez que as terças alveolares em questão não foram preenchidas.

2.4.4 Tração diagonal

O mecanismo de ruptura por tração diagonal ocorre quando a tensão de tração resistente do concreto é excedida pela tensão solicitante, sem que ocorra a fissuração por flexão na região.

Este modo de falha geralmente ocorre em regiões onde as tensões de compressão têm pouca influência, como na região de transferência da força de protensão próxima ao apoio.

Catoia (2011) concluiu que para lajes de maior altura submetidas a aplicação de força concentrada a 2,5 h em relação ao apoio houve mudança no mecanismo de ruptura, causando tensão por tração diagonal.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022), propõe que a verificação à força cortante da seção transversal na região do comprimento de transferência deva ser feita para a seção crítica definida pelo comprimento l_x , a partir da extremidade do elemento estrutural alveolar sobre seu apoio. Para elementos alveolares com alvéolos não circulares e altura nominal $250 \leq h \leq 400$ mm, tem-se a Equação 7.

$$V_{Rd,c} = \beta_{pc} \cdot \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + 0,9 \cdot \alpha_{pc} \cdot \sigma_{pc} \cdot f_{ctd}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

I é o momento de inércia da seção bruta de concreto, expresso em metros elevados à quarta potência (m^4);

b_w é o somatório das nervuras;

S é o momento estático com base no centróide, expresso em metros cúbicos (m^3);

f_{ctd} é o valor de projeto da resistência à tração do concreto, expressa em megapascals (MPa);

σ_{cp} é a tensão de compressão do concreto devida à força de protensão de projeto, expressa em megapascals (MPa);

α_{pc} é o fator de redução da tensão de protensão na posição longitudinal do ponto crítico, obtido por meio da Equação 8;

β_{pc} é o coeficiente de ajuste que considera os efeitos da geometria dos alvéolos e da posição da altura do ponto crítico na nervura da laje para a resistência à força cortante por tração diagonal, obtido por meio da Equação 9.

Sendo:

$$\alpha_{pc} = \frac{l_x}{l_{pt2}} \quad \text{Equação 8}$$

$$\beta_{pc} = 0,5 + \frac{h_{pc}}{h} \leq 1,0 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$$l_x = l_a + \frac{h_{pc}}{0,7} \quad \text{Equação 10}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{bpt} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:

l_a é a distância do apoio;

h_{pc} é a altura do ponto crítico;

l_{bpt} é o comprimento de transferência para lajes alveolares.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022) discorre que ao ser liberada a protensão, a transferência desta ação para o concreto é dada a partir da resistência de aderência f_{bpt} a qual deve ser calculada pela Equação 12.

$$f_{bpt} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

η_1 é o coeficiente que considera o tipo de barra e a situação de aderência na liberação da protensão, dados os valores:

- 2,7 para fios dentados;
- 3,2 para cordoalhas de 3 fios a 7 fios;

η_2 é o coeficiente que considera a qualidade da aderência, dados os valores:

- 1 para boa aderência;
- 0,7 para má aderência;

f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto da nervura, expressa em megapascals (MPa), sendo possível concluir por meio da Equação 13.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctkj,inf}}{\gamma_c} \quad \text{Equação 13}$$

Ao utilizar a resistência de aderência, o comprimento básico de transferência l_{bpt} deve ser calculado pela Equação 14.

$$l_{bpt} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{p0}}{f_{bpt}} \quad \text{Equação 14}$$

Sendo:

α_1 o coeficiente que considera como foi feita a liberação da protensão, dados os valores:

- 1 para liberação gradual;
- 1,25 para liberação não gradual;

α_2 o coeficiente de acordo com o formato da seção transversal da armadura ativa, dados os valores:

- 0,25 para fios com seção transversal circular;
- 0,19 para cordoalhas com 3 fios a 7 fios;

ϕ é o diâmetro nominal da armadura utilizada, expresso em milímetros (mm);

σ_{p0} é a tensão na armadura logo após a liberação da protensão, expressa em megapascals (MPa).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022), estipula que o valor de cálculo do comprimento de transferência deve ser selecionado como o mais desfavorável entre duas possibilidades, dependendo da situação, conforme as Equações 11 e 15. O menor valor é empregado para verificações locais no momento da liberação da protensão, enquanto o maior valor é utilizado no estado-limite último (cisalhamento, ancoragem, entre outros).

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{bpt} \quad \text{Equação 15}$$

2.4.5 Falha de ancoragem

Dumêt (2003) pontuou que o concreto protendido é um material resultante da ação conjunta de aço e concreto e que para que os dois materiais trabalhem em conjunto é necessária solidariedade entre eles, ou seja, que não permitam o escorregamento de um, em relação ao outro, sendo a solidariedade garantida pela aderência dos materiais.

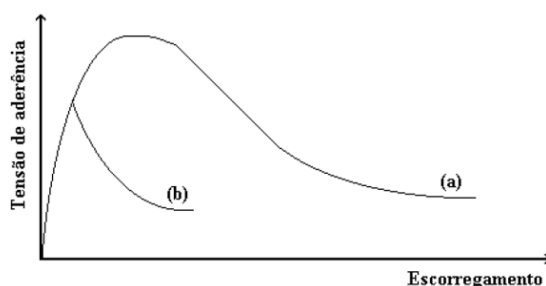
A aderência entre aço e concreto é possível de se obter por três formas distintas, seja para concreto armado ou concreto protendido: pode ser realizada a aderência química (ou também conhecida por adesão), aderência por atrito ou a aderência mecânica.

Catoia (2011) considerou dois tipos de ancoragem da armadura ativa, sendo: àquelas que dependem de elementos mecânicos adicionais e àquelas onde a transferência do esforço entre os elementos, aço e concreto, é obtido pela aderência entre eles.

Para Catoia (2011) ficou evidente que com o passar dos anos e pesquisas relacionadas, que a ancoragem por aderência não se mantém ao longo do tempo, pois ocorre o escorregamento dos fios e, conseqüentemente, a perda da protensão. Com isso, só se obtém ancoragem confiável por ancoragem mecânica.

Sabendo-se a respeito da aderência entre os materiais constituintes, Inforsato (2018) concluiu que existem dois modos de ruptura relacionados à perda da aderência, estes são: a ruptura por arrancamento e a ruptura por fendilhamento, onde a primeira é mais dúctil, quando comparada à segunda, mobilizando uma tensão de aderência maior para peças similares, como pode ser percebida na Figura 2.24.

Figura 2.24: Gráfico de ruptura por arrancamento (a) e ruptura por fendilhamento (b).

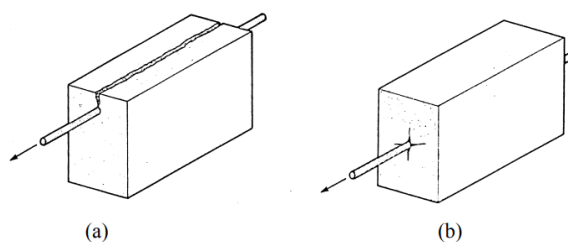


Fonte: Dumêt (2003).

Ciente dos dois modos de ruptura, seja por fendilhamento ou arrancamento, é

possível compreender, pela Figura 2.25 os diferentes padrões de fissuração.

Figura 2.25: Ruptura por (a) fendilhamento e (b) por arrancamento.

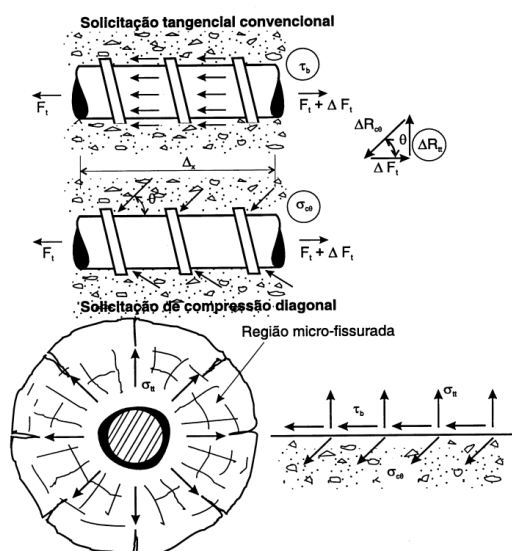


Fonte: Collins e Mitchell (1997, apud Dumêt 2003).

Para Dumêt (2003) quando o elemento estrutural se encontra em serviço e nele passam a atuar solicitações normais e tangenciais existem alguns possíveis modos de ruptura relacionados ao fendilhamento e ao escorregamento, dentre esses fatores de influência, estão: o tipo de armadura utilizado, se a superfície é lisa ou nervurada, o diâmetro da armadura, confinamento ou não, espaçamento entre as barras, cobrimento, tensão aplicada à barra, qualidade do concreto.

Para os casos de peças com barras nervuradas, quando a aderência começa a diminuir por causa do atrito, as próprias nervuras da barra começam a agir como pontos de apoio de bielas comprimidas, impedindo o deslocamento considerável da barra, mas, com isso, surgem tensões de tração perpendiculares às das bielas, formando um anel de tensão em volta da armadura, como é possível observar por meio da Figura 2.26.

Figura 2.26: Transferência de esforços por aderência.

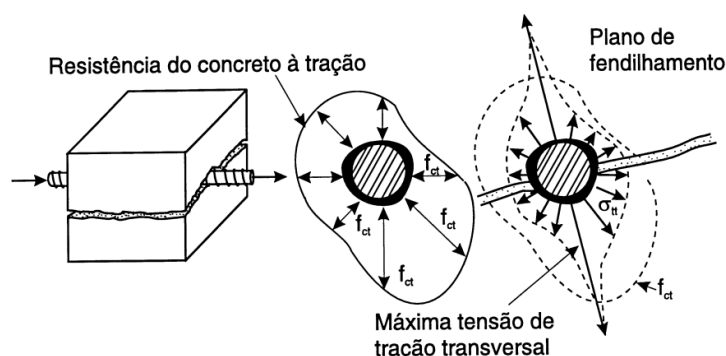


Fonte: Fusco (1995 apud Dumêt 2003).

Alvarenga Junior (2021) explicou que quando a barra passa a ser solicitada, a princípio a aderência é mantida, mas é facilmente perdida por ações de pequenos escorregamentos da armadura em pontos localizados, ou por efeito de Poisson com a redução do diâmetro, ocasionado pelo aumento de tensões. Em seguida, começam a surgir as primeiras fissuras, advindas da ação das forças de atrito, estas vão se dissipando e sendo reduzidas passando a aderência para encargo da resistência mecânica proveniente da superfície da barra. Em casos de peças com barras lisas, este processo leva à ruptura, uma vez que a barra lisa não possui aderência mecânica.

Segundo Dumêt (2003) conforme aumenta-se a força na armadura, acontece uma pulverização do concreto ao redor da barra, ocasionada pela compressão exercida pelas nervuras. Para as barras de alta aderência, antes que aconteça a pulverização total do concreto e a barra escorregue, acontece o fendilhamento da peça, justificado pelas altas tensões radiais de tração, possível de ser observada na Figura 2.27.

Figura 2.27: Fendilhamento da peça.



Fonte: Fusco (1995 *apud* Dumêt 2003).

Alvarenga Junior (2021) ressaltou a importância de considerar o formato helicoidal da cordoalha, pois caso ela gire durante a perda de aderência, pode ocorrer a falha por arrancamento, resultando na ausência de tensões radiais. No entanto, se o giro for interrompido, as tensões radiais surgem, levando ao fendilhamento.

Esses comportamentos mencionados estão diretamente relacionados ao ensaio de arrancamento, sendo importante observar que o cisalhamento exerce uma influência significativa sobre a aderência, uma vez que as fissuras inclinadas estão diretamente associadas ao processo de fendilhamento.

Conforme observado por Catoia (2011) a ancoragem de armaduras protendidas por aderência é fortemente influenciada por fissuras na região de transferência da

força de protensão. Portanto, para evitar a fissuração, é essencial verificar as tensões de tração nessa região.

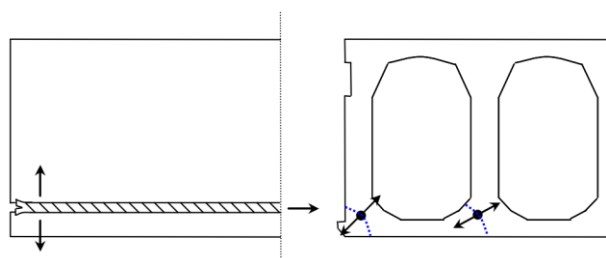
Em concordância, Alvarenga Junior (2021) pontuou sobre ainda não existir, no meio acadêmico, um consenso de qual fator seja mais ou menos importante com relação a aderência, pois algumas pesquisas apresentam resultados contraditórios, as contradições podem ocorrer por diversos motivos, incluindo mudanças climáticas, parâmetros de ensaio e até mesmo os materiais utilizados.

Quanto às situações de fissuração na região de ancoragem, estas são causadas por tensões de tração, denominadas: *bursting*, *splitting* e *spalling*.

O fenômeno conhecido como *bursting* é uma tensão que pode resultar na formação de pequenas fissuras nas extremidades da laje alveolar. Essa tensão de tração surge devido ao escorregamento das cordoalhas na extremidade da laje.

Catoia (2011) exemplificou que, nessa região, a armadura esticada pode funcionar como uma cunha e, durante a retração do concreto, gerar tensões de tração perpendiculares à armadura. Isso ocorre quando as cordoalhas estão posicionadas incorretamente em seções estreitas de concreto, conforme ilustrado na Figura 2.28.

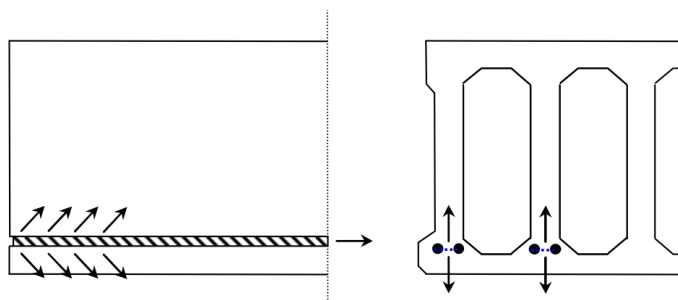
Figura 2.28: *Bursting*.



Fonte: ASSAP (2002 *apud* Catoia 2011).

As fissuras resultantes do *bursting* geralmente não excedem 10 cm de comprimento e sua principal consequência é o alongamento da região de ancoragem até a extensão da fissura, o que pode favorecer o escorregamento das cordoalhas para além dos limites aceitáveis.

Já o *splitting* é uma tensão que pode provocar pequenas fissuras, capazes de unir as cordoalhas próximas. Essa tensão é gerada pelo desenvolvimento da protensão na região de ancoragem, onde a ancoragem progressiva das barras tracionadas transfere gradualmente as forças de protensão para o concreto. A Figura 2.29 ilustra o efeito do *splitting* em uma extremidade de laje alveolar.

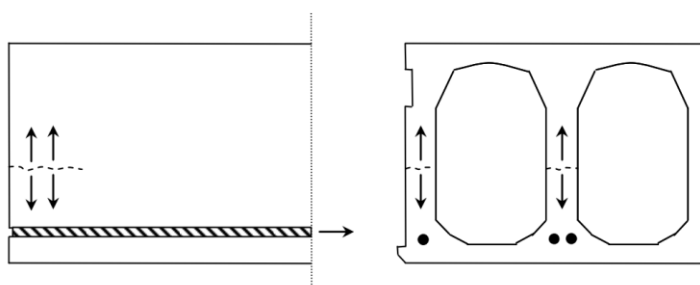
Figura 2.29: *Splitting*.

Fonte: ASSAP (2002 *apud* Catoia 2011).

Catoia (2011) esclarece que, devido à tendência de inclinação dessas forças ocasionadas pela protensão, são geradas tensões de tração no concreto. Se essa tensão exceder a resistência do concreto à tração, podem surgir fissuras horizontais características, estendendo-se de uma cordoalha para outra e, em alguns casos, até mesmo causando o descolamento da borda inferior da laje.

No entanto, tanto as lesões de *splitting* quanto as causadas pelo *bursting* são superficialmente limitadas, representando apenas problemas estéticos nas extremidades da laje. Ambas as tensões podem induzir o escorregamento das barras no concreto da extremidade, mas isso pode ser evitado mantendo-se um cobrimento adequado das cordoalhas. Além disso, como as lesões geralmente ocorrem na região de apoio da laje, se não se estenderem muito, a laje permanecerá em condições aceitáveis de uso.

Já o *spalling* é uma tensão capaz de causar danos na extremidade da laje protendida. No entanto, não deve ser confundido com o *splitting*, pois ocorre acima do eixo das cordoalhas, onde as nervuras estão em sua parte mais estreita, como ilustrado na Figura 2.30.

Figura 2.30: *Spalling*.

Fonte: ASSAP (2002 *apud* Catoia 2011).

A tensão de *spalling* surge devido ao desenvolvimento da protensão no

concreto da extremidade da laje. Se ocorrer apenas em uma nervura, a laje ainda pode ser aceitável, no entanto, se surgir em pelo menos duas nervuras, a peça deve ser descartada.

Segundo Catoia (2011) as fissuras horizontais nas extremidades podem se agravar durante o transporte ou o içamento das peças, comprometendo a resistência ao esforço cortante. Para mitigar a tensão de spalling, em nervuras com mais de uma cordoalha, reveste-se uma delas em um comprimento de 50 a 70 cm a partir da extremidade, neutralizando assim o efeito nocivo.

2.5 ESTADO DA ARTE

Partindo do pressuposto de que as terças alveolares são um desmembramento das lajes alveolares, é crucial examinar o comportamento dessas últimas. Uma pesquisa realizada no catálogo nacional de teses e dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) em 2023 revelou que 31% dos estudos sobre lajes alveolares têm a palavra "cisalhamento" ou "força cortante" em seus títulos.

Isso indica que uma das principais preocupações relacionadas à utilização de terças alveolares já foi objeto de estudo por um grupo de pesquisadores. Portanto, é razoável supor que já existam considerações relevantes a respeito desse aspecto.

Ao analisar os resultados de estudos anteriores, Costa (2009) concluiu que os mecanismos de funcionamento que atuam nas lajes alveolares são influenciados pela geometria da seção transversal. Com isso, para um estudo das terças deve-se considerar a altura efetiva da peça, espessura das nervuras, o formato dos alvéolos.

Ainda, deve-se considerar uma análise dos materiais utilizados, avaliando o nível de protensão, considerando todas as perdas, aderência entre armadura e concreto, a resistência à compressão e à tração do concreto.

Em um recente estudo conduzido pelo NETPRE, Rocha (2023) concluiu que os resultados obtidos pela equação de dimensionamento de lajes com alvéolos poligonais são compatíveis com os resultados experimentais, especialmente quando se considera a modificação do ponto crítico da laje.

A constatação de Rocha (2023) destacou a importância de estudar a geometria dos alvéolos, principalmente quando estes não possuem formato circular,

para o desenvolvimento de projetos estruturais mais precisos e eficientes, reforçando a conclusão de Costa (2009), de que os mecanismos de funcionamento que atuam sobre as lajes são influenciados pela geometria da seção transversal.

Com base nestes estudos, considera-se a avaliação da geometria efetiva das peças, como parte essencial para a avaliação do desempenho estrutural das terças alveolares. Contribuindo para o estudo do comportamento estrutural, Alvarenga Junior (2021) avaliou o desempenho estrutural de terças protendidas sem armadura transversal, verificando sua resistência ao esforço cortante, seguindo as equações da NBR 14861, EN 1168 e Eurocode 2.

No trabalho de Alvarenga Junior (2021), terças protendidas sem armadura transversal produzidas por uma fábrica no interior de São Paulo e destinadas a uma obra apresentaram deformações visuais desconfortáveis. Para corrigir esse problema, a empresa adotou um sistema de ligação com chapas metálicas para reforçar as ligações da estrutura.

Os testes não destrutivos realizados por Alvarenga Junior (2021) demonstraram que as terças protendidas sem armadura transversal apresentaram desempenho satisfatório em relação à resistência ao esforço cortante. Além disso, o estudo de Alvarenga Junior (2021) abordou diferentes métodos de cálculo e concluiu que a norma europeia EN 1168 foi a mais adequada para descrever o comportamento das terças estudadas, enquanto o Eurocode 2 apresentou valores contra a segurança.

Sahoo, Veerendar e Prakash (2023) publicaram um estudo sobre o uso de concreto leve em lajes alveolares protendidas, visando proporcionar elementos sustentáveis e leves. No que tange a perspectiva estrutural, concluíram que a adição de fibras na mistura de concreto aumentou a resistência às fissuras e a tensão de absorção de energia, resultando em uma redução significativa do peso próprio da peça.

Diminuir o peso próprio das terças alveolares seria capaz de reduzir as desvantagens encontradas para utilização. Nos ensaios de flexão, realizados por Sahoo, Veerendar e Prakash (2023), apontaram que a inclusão de uma dose mínima de 0,4% de fibra foi suficiente para fornecer uma absorção adequada de energia de deformação sem comprometer a resistência e a rigidez das lajes alveolares protendidas leves, apontando uma solução para a desvantagem de utilização das terças, que diz respeito ao peso próprio elevado do elemento.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são abordados os modelos ensaiados, assim como a instrumentação e a descrição dos ensaios.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

O laboratório NETPRE recebeu seis amostras de terças alveolares para realização do estudo. As peças foram identificadas na Figura 3.1.

Figura 3.1: Peças de Terça Alveolar



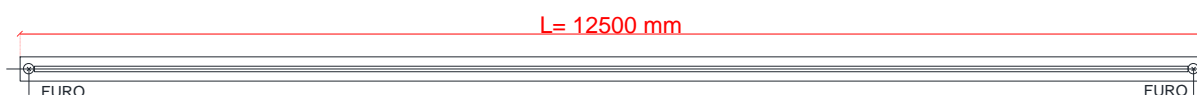
Fonte: Autora (2024).

As anotações em vermelho e amarelo presentes nas peças não possuem relação com o trabalho desenvolvido, foram realizadas antes da entrega para o

laboratório.

As terças alveolares foram produzidas como lajes alveolares. Em sua produção, contavam com o comprimento de 12,5 m e em cada extremidade fora realizado um furo que atravessa a mesa superior até a inferior, realizados na pista de protensão, conforme o ilustrado pela Figura 3.2, cerca de 12 horas após a concretagem.

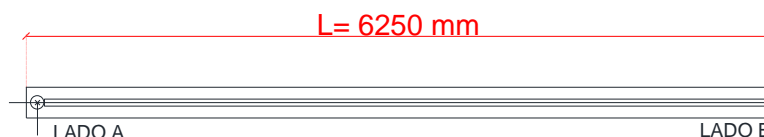
Figura 3.2: Comprimento da peça original produzida.



Fonte: Autora (2024).

Todavia, as peças recebidas para o trabalho foram cortadas ao meio, para facilitar a logística até o laboratório e possuem comprimento de 6,25 m. Isto significa que as peças possuem furo em uma extremidade, Lado A, e o outro lado, que seria o eixo da peça original, Lado B, não possui detalhes, conforme ilustrado pela Figura 3.3.

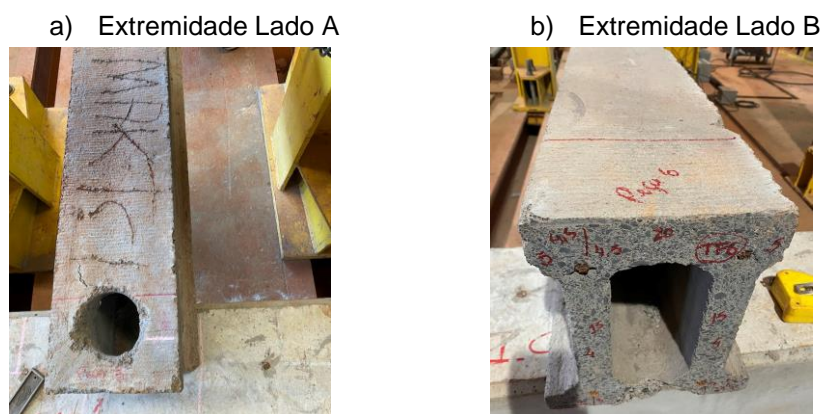
Figura 3.3: Especificação do comprimento e extremidades das peças recebidas para ensaio.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 3.4 exemplifica cada extremidade de peças após recebimento.

Figura 3.4: Extremidades das peças recebidas.



Fonte: Autora (2024).

As terças foram fornecidas por um mesmo fabricante e detalhadas, quanto às suas especificidades na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Identificação das Terças Alveolares.

ID	L (m)	h (m)	Área da seção transversal (m ²)	Contra flecha (m)
TA 01	6,2500	0,2700	0,0340	0,0200
TA 02	6,2500	0,2700	0,0360	0,0250
TA 03	6,2500	0,2700	0,0330	0,0200
TA 04	6,2500	0,2700	0,0342	0,0170
TA 05	6,2500	0,2700	0,0359	0,0300
TA 06	6,2500	0,2700	0,0335	0,0190

Fonte: Autora (2024).

A identificação (ID) das peças foi estabelecida com as letras “T” e “A” para abreviar a palavra “terça alveolar” e, o código a frente foi estabelecido conforme a ordenação das peças escolhidas para ensaio.

A contra flecha encontrada foi medida no eixo da peça a uma distância de 3,125 m das bordas, antes do início de qualquer ensaio. Porém, não foi medida a contra flecha instantânea, após a saída da peça da pista de protensão. Tem-se esse valor apenas para a data de recebimento das peças no laboratório NETPre.

O concreto utilizado para obtenção das terças alveolares foi de resistência estimada ≥ 40 MPa, composto por aglomerante CP V ARI CSN, aditivo redutor de água, areia britada, areia fina, pedrisco e *slump* de 50 mm. A mistura é uniforme para e tende a reduzir o consumo de água.

Na Tabela 3.2 estão descritos os valores obtidos de resistência à compressão do concreto, referente corpos de prova que foram vibrados na máquina no momento da fabricação e rompidos após 12 horas e após 28 dias, considerado o momento de desforma e o prazo de cura do concreto, respectivamente.

Tabela 3.2: Composição das terças – concreto.

Peça (fabricação)	Resistência à compressão 12 hrs (f_{ck})	Resistência à compressão 28 dias (f_{ck})
16/02	27,2 MPa	60,75 MPa
21/02	28 MPa	62,95 MPa

Fonte: Autora (2024).

Com a Tabela 3.2, tem-se que as peças não foram oriundas de uma mesma linha de produção. Foram cortes de concretagens realizadas em dias distintos.

Além do concreto, as Terças Alveolares também possuem armação ativa. O resumo do aço está apresentado na Tabela 3.3, que contempla a quantidade, bitola e

alongamento após pressão no macaco para protensão.

Tabela 3.3: Composição das terças – aço.

Aço e bitola	Posição na peça	Pressão inicial no macaco	Pressão final no macaco	Alongamento
CP190 Ø 9,5 mm	Mesa superior	20 kgf/mm ²	60 kgf/mm ²	47 cm
CP190 Ø 12,7 mm	Mesa inferior	20 kgf/mm ²	165 kgf/mm ²	95 cm

Fonte: Autora (2024).

As perdas de protensão foram calculadas e encontram-se no Apêndice A.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

A aplicação de carga para realização dos ensaios é realizada com a utilização de um atuador hidráulico e célula de carga com capacidade de 500 kN, ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Atuador hidráulico e célula de carga.



Fonte: Autora (2024).

Para obtenção dos deslocamentos, foram utilizados transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) com curso total de 10 mm, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6: Transdutor de deslocamento variável LVDT.



Fonte: Autora (2024).

Apenas para auxiliar no processo de ensaio, foram utilizadas chapas metálicas de altura e peso variados, para ajuste de posicionamento das peças, conforme possível observar na Figura 3.7. Essas chapas foram consideradas como sobrecarga.

Figura 3.7: Chapas metálicas auxiliares.



Fonte: Autora (2024).

As chapas menores servem para apoio de altura, a fim de complementar o espaço entre a peça e a célula de carga. A chapa metálica de maior dimensão contribui para a distribuição da carga na peça, conforme necessidade do ensaio.

Também foram utilizadas rótulas, para situação de apoio nos ensaios de resistência a flexão, identificada na Figura 3.8.

Figura 3.8: Rótula.



Fonte: Autora (2024).

O escorregamento das cordoalhas foi medido com a utilização de um paquímetro universal, identificado na Figura 3.9.

Figura 3.9: Paquímetro.



Fonte: Autora (2024).

3.3 METODOLOGIA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017), na NBR 9062, colocou que parte do procedimento de projeto pode ser executado baseando-se em verificações experimentais. Isso permite que se realize ensaios de peças já fabricadas para validação de projetos.

3.3.1 Inspeção visual das terças alveolares

Antes de conduzir os ensaios, o primeiro passo é realizar uma inspeção visual das peças estudadas. Nessa etapa inicial, são avaliadas as dimensões, incluindo altura e comprimento, e a seção transversal é minuciosamente analisada e projetada no software AutoCAD.

Além disso, durante a inspeção visual, são verificadas possíveis inconformidades produtivas, conforme destacado por Bazilio (2021), essas irregularidades podem incluir falhas de moldagem, má compactação do concreto, presença de fissuras pré-existentes ou provenientes de diversos mecanismos, quebras na peça, deslocamentos na cordoalha e posicionamento inadequado delas.

A medição dos cobrimentos mínimos é realizada levando em consideração questões relacionadas à durabilidade do material. Variações geométricas, como espessura das nervuras e mesas superiores e inferiores, são verificadas, assim como

a contraflecha. Todavia, a contraflecha medida foi somente a da entrega do produto ao laboratório. Com isso, tem-se pequenas considerações a respeito deste dado.

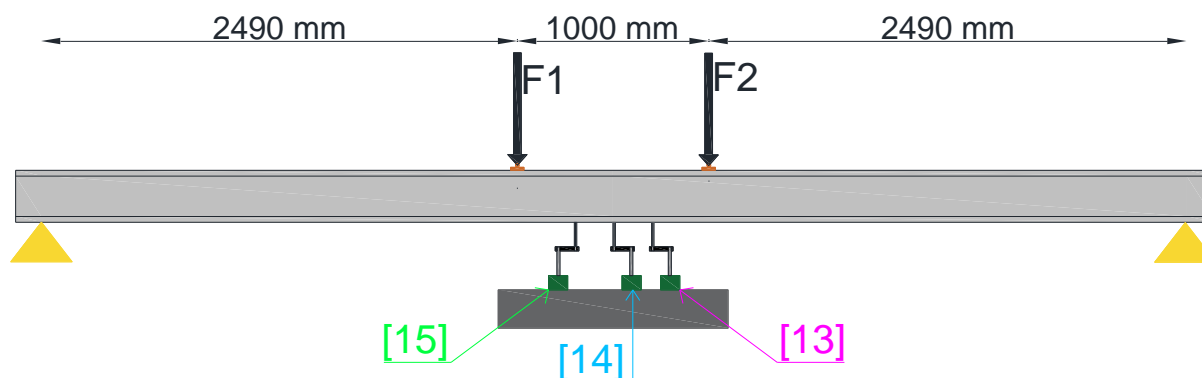
3.3.2 Momento de inércia efetiva das peças

Após a inspeção visual e o desenho da seção transversal efetiva, todas as extremidades das peças foram meticulosamente medidas e desenhadas utilizando o software AutoCAD. Por meio desse programa, foi possível obter informações precisas sobre a área da seção transversal, dimensões e momento de inércia efetivo das peças.

3.3.3 Verificação experimental da resistência à flexão

Inforsato (2018) definiu o objetivo do ensaio de resistência à flexão positiva como uma forma de obter informações sobre a força de protensão e a resistência do concreto à tração na flexão. O arranjo para ensaios de flexão positiva está detalhado na Figura 3.10.

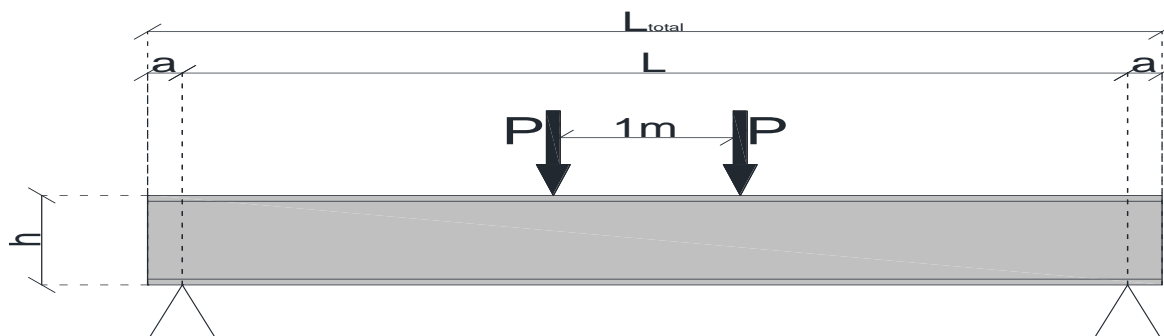
Figura 3.10: Ilustração esquemática do ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autora (2024).

Seguindo as diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022), a determinação da distância dos apoios é realizada utilizando a fórmula $h/2$. Na Figura 3.11, são exploradas e exemplificadas as medidas h e a , oferecendo uma compreensão visual clara desses parâmetros.

Figura 3.11: Arranjo de ensaio a flexão positiva.

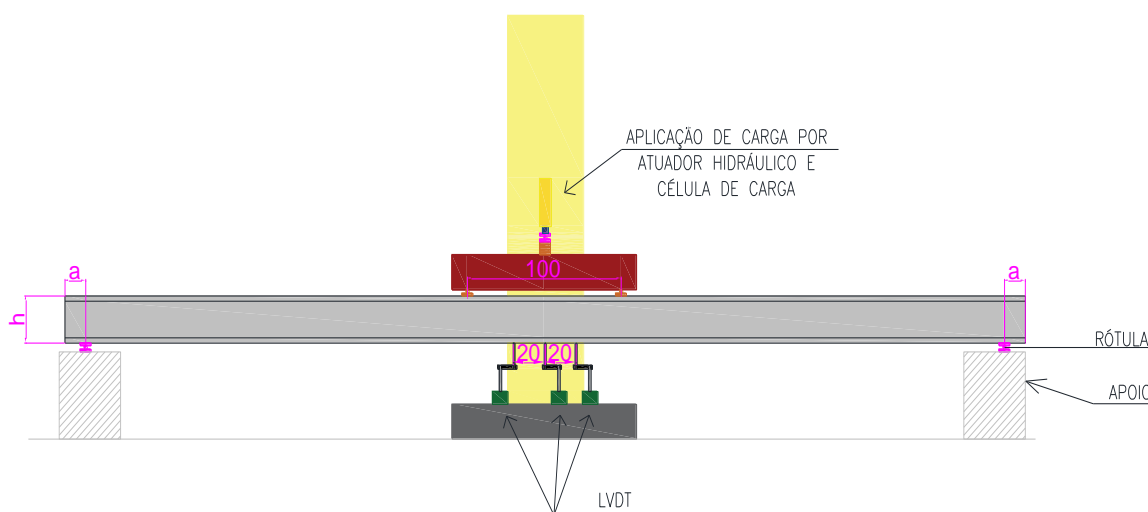


Fonte: Autora (2024).

Considerando que a altura das peças é de 27 cm, os apoios são posicionados a uma distância de 13,5 cm a partir da borda das peças, o que corresponde à cota "a" conforme representado na Figura 3.11. Além disso, a distância entre os dois apoios é representada como "L". Na mesma figura, a legenda "P" indica a carga que será aplicada, concentrada no eixo da peça.

Já na Figura 3.12, temos o esquema completo do ensaio de resistência à flexão, onde é evidenciado o posicionamento das chapas, do atuador e dos transdutores. Também é possível observar a posição esquemática de cada força aplicada e dos medidores para obtenção dos deslocamentos.

Figura 3.12: Esquema de ensaio utilizado para resistência a flexão positiva.



Fonte: Autora (2024).

A distância dos apoios "a" foi mantida constante em todos os ensaios, devido à semelhança no comprimento das amostras, onde todas as seis peças possuíam o mesmo comprimento (com variação de apenas 5 mm) e compartilham a mesma altura.

Para aplicar a carga concentrada foi utilizado um atuador hidráulico com célula de carga, acrescentando uma chapa metálica (55,55 kg) sob a face inferior do atuador. Isso foi feito para distribuir igualmente a carga concentrada para dois pontos localizados a uma distância de 1 m entre eles.

Além da chapa para redistribuição das cargas, foram adicionadas chapas metálicas sem especificações adicionais, pois sua única finalidade era permitir o contato entre a célula de carga e a chapa metálica, devido à altura dos apoios utilizados. Essas chapas foram utilizadas igualmente em todos os ensaios.

Considerando todas essas adições, a sobrecarga totaliza 75,65 kg. Composta por: chapa de 55,55 kg, duas rótulas pequenas, somadas totalizam 3,90 kg, uma rótula maior de 6,20 kg e chapas para ajuste de altura nos apoios, com carga de 10 kg.

Os deslocamentos verticais são medidos por meio de três transdutores de deslocamento variável linear (LVDT), posicionados sob a peça ensaiada. O transdutor central é posicionado no eixo da peça, enquanto os transdutores laterais ficam a uma distância de 20 cm do transdutor central.

A Figura 3.13 ilustra o posicionamento de uma peça durante o ensaio, proporcionando uma compreensão visual do processo.

Figura 3.13: Posicionamento das peças para o ensaio de resistência à flexão.

a) Posicionamento da peça



b) Posicionamento das chapas e LVDTs

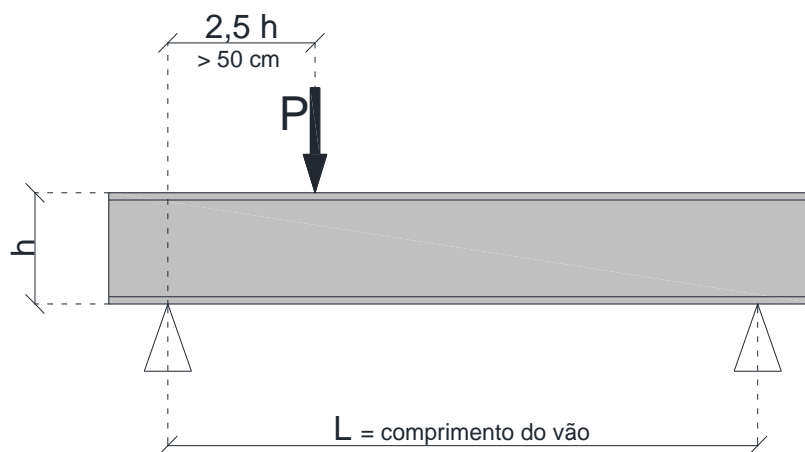


Fonte: Autora (2024).

3.3.4 Verificação experimental da resistência à força cortante

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), na NBR 14861, dispõe de uma padronização do procedimento experimental para avaliação da conformidade de resistência à força cortante, cujo arranjo está evidenciado na Figura 3.14.

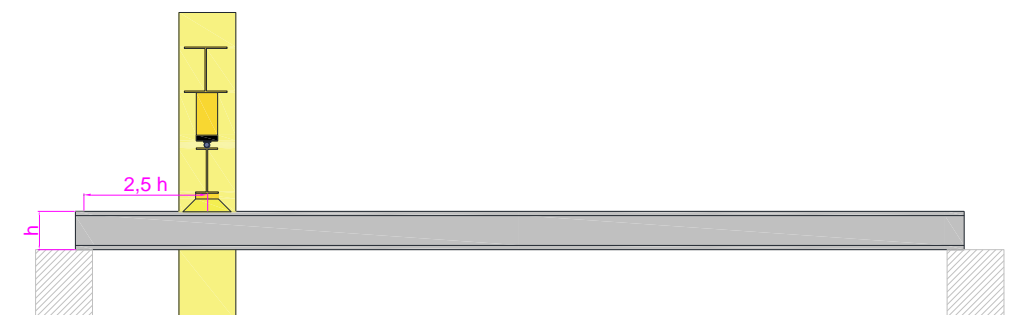
Figura 3.14: Arranjo de ensaio de resistência à força cortante.



Fonte: Autora (2024).

Para os ensaios, o carregamento é aplicado a uma distância $2,5 h$ do apoio, onde h é a altura da laje, sendo essa distância sempre maior do que 50 cm. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), na NBR 14861, a transferência de força para a laje deve ser realizada por uma viga metálica rígida. Com isso, o esquema de ensaio está relacionado na Figura 3.15.

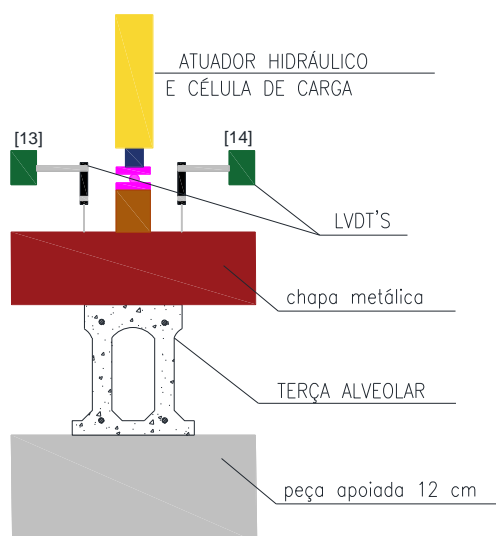
Figura 3.15: Esquema de ensaio de resistência à força cortante.



Fonte: Autora (2024).

Para melhor compreensão do esquema de ensaio, a Figura 3.16 ilustra por outro ângulo a disposição de materiais para realização do ensaio, a fim de evidenciar o posicionamento do atuador hidráulico, célula de carga e transdutores utilizados.

Figura 3.16: Corte do esquema de ensaio de resistência à força cortante.



Fonte: Autora (2024).

As chapas pequenas, a rótula e a chapa metálica, utilizadas para que o atuador transfira carga até a peça, são consideradas como sobrecarga de ensaio, totalizando 49,70 kg. Essa sobrecarga é a mesma em todos os ensaios realizados de resistência à força cortante.

É importante ressaltar que o ensaio de resistência à força cortante não danifica a peça como um todo; apenas a distância entre o apoio e o ponto de aplicação de carga é afetada. Portanto, é viável realizar o ensaio em ambas as extremidades de cada peça, possibilitando resultados que permitem comparações referentes ao processo produtivo. A Figura 3.17 destaca o ensaio de resistência à força cortante.

Figura 3.17: Peça posicionada para o ensaio de resistência à força cortante.

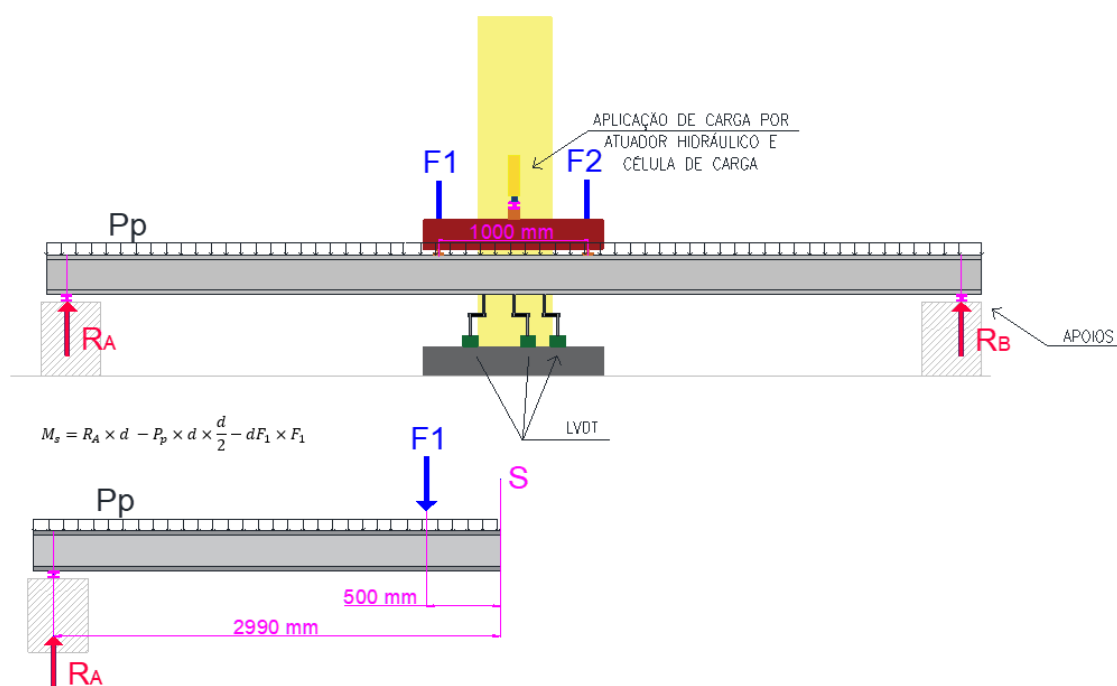


Fonte: Autora (2024).

3.3.5 Verificação do momento

Foram calculados os momentos para cada força aplicada pelo atuador nos modelos ensaiados a flexão positiva. Foram considerados os valores referentes a sobrecarga, oriunda das chapas e rótulas e o peso próprio das terças. A Figura 3.18 mostra o modelo utilizado para cálculo do momento.

Figura 3.18: Esquema para cálculo do momento no ensaio de resistência a flexão.



Fonte: Autora (2024).

Com o valor do momento junto ao deslocamento obtido em cada intervalo de aplicação de força, é possível gerar um gráfico de momento x deslocamento para análise.

3.3.6 Medição dos deslocamentos

Catoia (2007) apresenta uma relação para obtenção de deslocamentos quando submetidos ao ensaio de flexão positiva em dois pontos de transferência de força aplicada. Para a obtenção dos deslocamentos é utilizada a Equação 16.

$$f_1 = \frac{P \cdot a}{24 \cdot EI} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad \text{Equação 16}$$

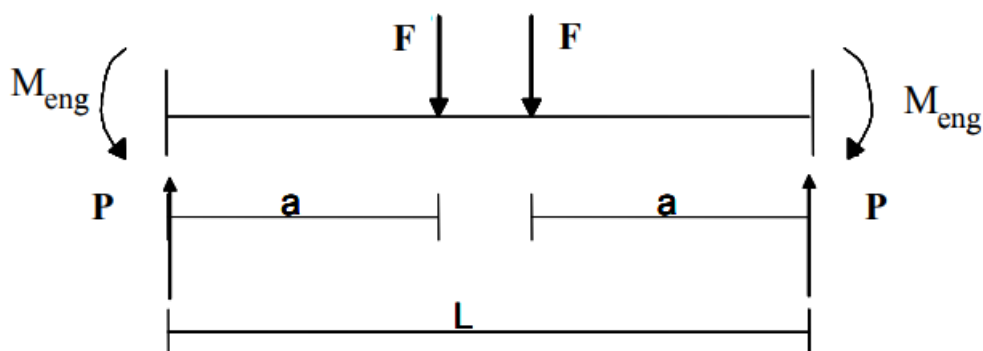
Sendo:

E a rigidez do elemento estudado;

I a inércia do elemento;

E os valores de P , a e L estão representados por meio do esquema evidenciado na Figura 3.19.

Figura 3.19: Esquema do ensaio de flexão para identificação do deslocamento.



Fonte: Catoia (2007).

No ensaio de flexão positiva, são também obtidas leituras diretas de flecha no meio do vão por meio de três transdutores de deslocamento variável linear (LVDT), o primeiro posicionado é o medidor central, a uma distância de 3,12 m da extremidade da terça. Os demais, deslocados a 0,20 m do transdutor central, um a leste e o outro a oeste.

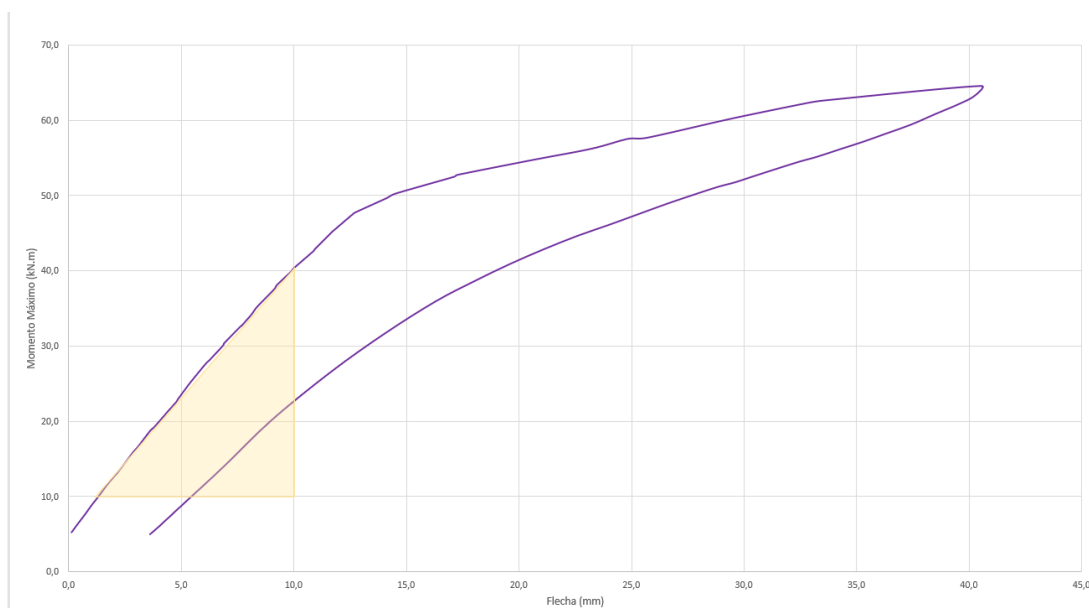
3.3.7 Determinação do módulo de elasticidade efetivo

A determinação do módulo de elasticidade do concreto (E_c) pode ser realizada considerando a Equação 16, porém isolando o valor de EI . Com isso, tem-se a Equação 17.

$$EI = \frac{P}{f_1} \cdot \frac{a}{24} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad \text{Equação 17}$$

Para determinar o valor de EI , é crucial considerar uma relação gráfica que desempenha um papel significativo: o instante em que o gráfico de momento *versus* flecha deixa de seguir uma trajetória linear, que corresponde ao ponto de fissuração da peça. Nesse ponto, a rigidez do material é estabelecida, fornecendo importantes entendimentos sobre o comportamento da estrutura. A Figura 3.20 ilustra essa relação de forma mais clara e compreensível.

Figura 3.20: Identificação da região onde será retirado o valor de EI da peça.



Fonte: Autora (2024).

Os valores de EI são calculados para cada momento encontrado. No entanto, quando a curva de comportamento deixa de ser linear, o valor de EI é dividido pelo momento de inércia (I), obtendo-se assim a rigidez do elemento, representada por E.

Ainda, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 6118 (2023), dispõe que o valor do módulo de elasticidade inicial, quando não se tem valores experimentais, pode ser calculado por meio de duas equações, sendo Equação 18 e 19:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 18}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 19}$$

A distinção entre o uso da Equação 18 e da Equação 19 está relacionada ao valor do f_{ck} das peças de concreto. A primeira equação é aplicada quando o f_{ck} é igual ou inferior a 50 MPa, enquanto a segunda é empregada para concretos com f_{ck} superior a 50 MPa.

Sendo α_E um coeficiente adotado para a composição do concreto utilizado, variando de 0,7 a 1,2.

Ainda, o módulo de deformação secante pode ser obtido por ensaio ou expressão normativa, apresentada na Equação 20:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$$\alpha_i = 0,80 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad \text{Equação 21}$$

3.3.8 Resistência à tração média

A resistência do concreto à tração pode ser determinada por meio do ensaio de resistência à flexão positiva. Esse procedimento é adotado para assegurar uma maior confiabilidade nos valores da resistência do concreto à tração. Para isso, utiliza-se a equação do momento de fissuração, isolando o valor médio da resistência do concreto à tração, conforme apresentado na Equação 22.

$$f_{ctm} = \frac{\left[\frac{N_p}{A_{c,hom}} + \frac{N_p \times e_p \times y_{t,hom}}{I_{hom}} - \frac{M_{r,exp} \times y_{t,hom}}{I_{hom}} \right]}{\alpha_f} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$M_{r,exp}$: representa o momento de fissuração relativo à força aplicada pelo atuador, no instante da primeira fissura, considerando o peso próprio da laje;

N_p : força de protensão descontando todas as perdas;

$A_{c,hom}$: área de concreto da seção homogeneizada;

I_{hom} : momento de inércia da seção homogeneizada;

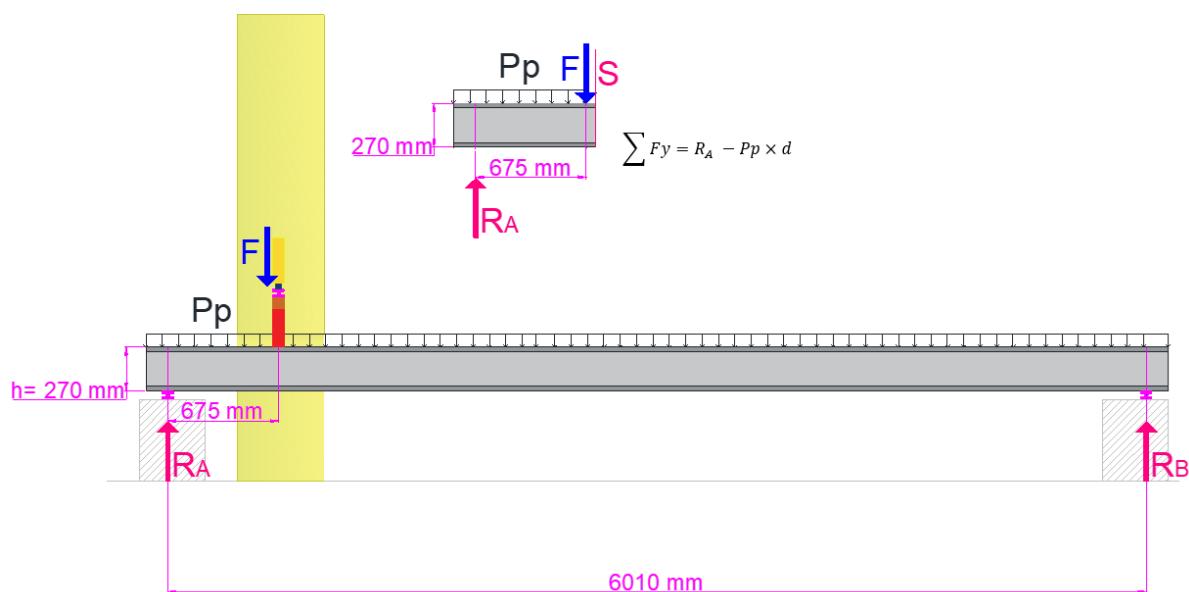
$y_{t,hom}$: distância do centro de gravidade até a borda mais tracionada da seção;

α_f : coeficiente equivalente a 1,2 para elementos T ou duplo T.

3.3.9 Força cortante

No que diz respeito aos ensaios de resistência à força cortante, uma análise detalhada dos valores da força aplicada no atuador, peso próprio de cada terça e distância da aplicação da força, considerando a relação entre a altura da peça, foi conduzida para determinar a força cortante, conforme ilustrado no esquema apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.21: Força cortante calculada após ensaio de resistência a força cortante.



Fonte: Autora (2024).

O detalhamento fornecido pela Figura 3.21 apresenta as distâncias em milímetros necessárias para o cálculo da força cortante. Esses valores, juntamente com as leituras dos LVDTs, são utilizados para gerar os gráficos de deslocamento vertical em função da força cortante.

3.3.10 Escorregamento das cordoalhas

Durante os ensaios, as cordoalhas tendem a se deslocar devido à força resistida. Para avaliar o quanto a armadura escorregou, realizamos medições da posição inicial das cordoalhas, antes do ensaio de resistência à força cortante, e após o ensaio. Essas medições fornecem uma análise crítica do comportamento da armadura ativa em cada peça, sendo essencial para detectar possíveis desvios nos resultados relacionados ao mecanismo de ruptura.

O escorregamento médio das cordoalhas nas extremidades das lajes alveolares, a ser considerado no cálculo das perdas de protensão, pode ser obtido por meio da Equação 23.

$$\Delta l_0 = 0,5 \cdot l_{pbt} \cdot \frac{\sigma_{cp0}}{E_p}$$

Equação 23

O escorregamento-limite da cordoalha em cada extremidade das lajes alveolares é dado pela Equação 24.

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \cdot \Delta l_0 \quad \text{Equação 24}$$

Sendo:

Δl_0 o escorregamento médio das cordoalhas, expresso em milímetros (mm);

σ_{cp0} a tensão de protensão no instante da liberação da protensão, expressa em megapascals (MPa);

l_{pbt} o comprimento básico de transferência, expresso em milímetros (mm);

E_p o módulo de elasticidade da armadura ativa, expresso em megapascals (MPa).

4 RESULTADOS

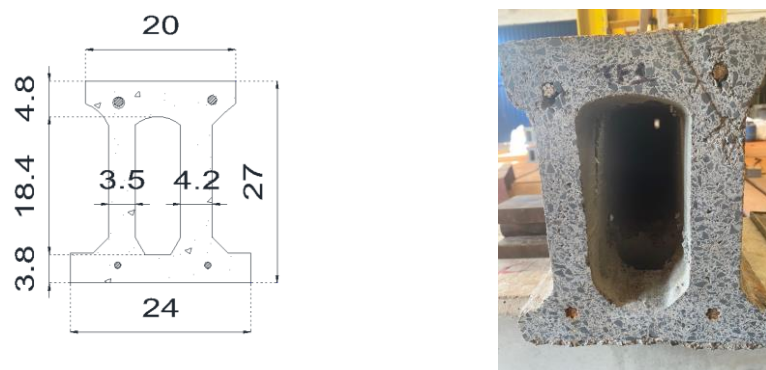
Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos no estudo, organizados em ordem cronológica de obtenção. Primeiramente, são destacadas as observações visuais das amostras, seguidas pelos resultados dos ensaios de resistência à flexão positiva, seguida dos resultados dos ensaios de resistência à força cortante e, por fim, as verificações de cálculo da resistência das terças alveolares para os mecanismos de flexo-cortante e tração-diagonal, com base nos resultados experimentais.

Os detalhamentos de cálculo para perdas de protensão estão dispostos no Apêndice A. Os detalhamentos de cálculo para momento de fissuração estão dispostos no Apêndice B e, por fim, o cálculo para força resistente de cálculo para os mecanismos de flexo-cortante e tração-diagonal teóricos estão dispostos no Apêndice C.

4.1 INSPEÇÃO VISUAL

Ao realizar uma análise visual das peças, é possível identificar discrepâncias em seu formato. Essas diferenças podem ser atribuídas a diversos fatores, como variações no processo produtivo, manuseio durante o corte, içamento, transporte ou mesmo exposição ao sol, chuva ou condições de armazenamento. Por essa razão, cada seção transversal foi fotografada e desenhada utilizando o software AutoCAD, garantindo uma obtenção mais precisa da geometria das peças. A Figura 4.1 mostra a TA 01.

Figura 4.1: Terça alveolar TA01, unidades em cm.

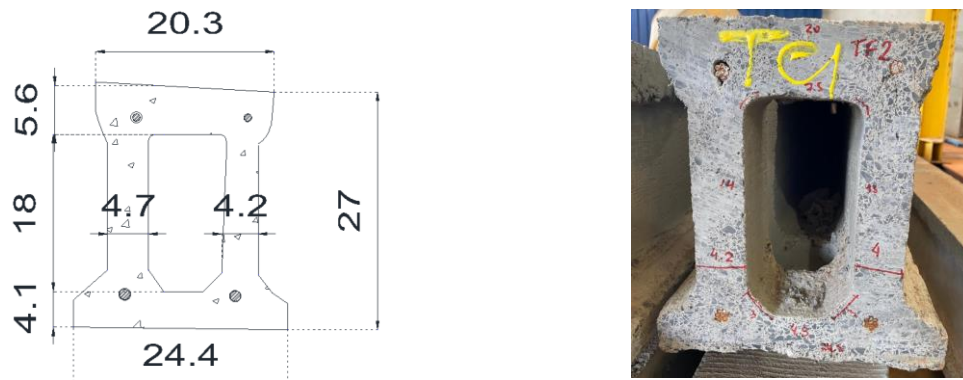


Fonte: Autora (2024).

É possível destacar, ao analisar a fotografia e o desenho cotado que as nervuras possuem espessuras diferentes, a diferença encontrada entre elas é de 0,7 cm.

A Figura 4.2 representa o projeto e o registro fotográfico da TA 02.

Figura 4.2: Terça alveolar TA02, unidades em cm.

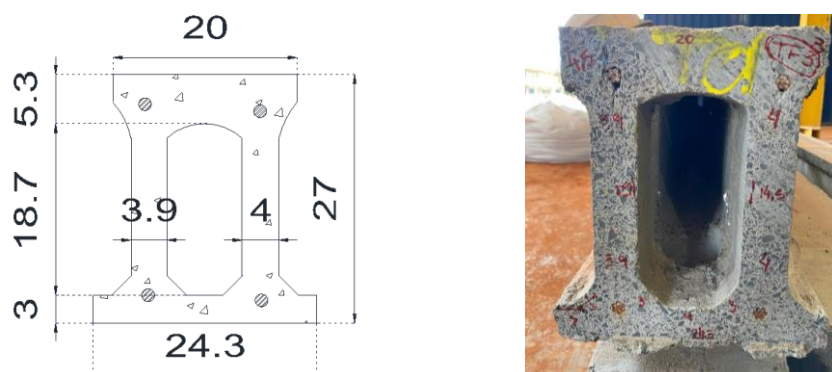


Fonte: Autora (2024).

A TA 02 se destacou por sua maior assimetria em comparação com as outras terças. É evidente na imagem e no desenho que a face superior não é plana, ainda há discrepância de 2 mm entre as nervuras. Além disso, observa-se um formato divergente na geometria das mesas, tanto superior quanto inferior, que estão mais arredondadas.

A Figura 4.3 apresenta a TA 03 e suas particularidades.

Figura 4.3: Terça alveolar TA03, unidades em cm.



Fonte: Autora (2024).

Quando relacionada a TA 03 com as terças TA 01 e TA 02, observa-se menor discrepância geométrica. As nervuras continuam apresentando diferença entre elas, mas de apenas 1 mm.

A TA 06 possui nervuras de mesma espessura e mesas com superfície uniforme. Na Tabela 4.1 estão organizadas as informações obtidas com a geometria das peças.

Tabela 4.1: Identificação geométrica das peças.

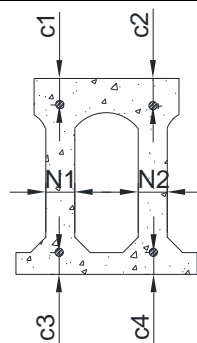
TA	Área (cm ²)	I (cm ⁴)	h (cm)	d' (cm)	d	b (cm)	L (cm)	bw (cm)
TA 01	336,58	28908	27,00	2,40	24,60	24,00	625,00	7,70
TA 02	373,84	32656	27,00	3,80	23,20	24,50	625,00	8,20
TA 03	328,82	28067	27,00	3,00	24,00	24,30	625,00	7,90
TA 04	341,49	29094	27,00	3,00	24,00	25,00	625,00	8,00
TA 05	359,34	30098	27,00	3,00	24,00	24,50	625,00	8,50
TA 06	335,34	28526	27,00	2,80	24,20	24,50	625,00	8,00

Fonte: Autora (2024).

A assimetria das peças revela detalhes do processo produtivo, mesmo oriundas da mesma máquina e sequência executiva, existem fatores que contribuem para a discrepância geométrica, sendo observada que a área transversal varia, em ordem crescente, de 328,82 cm² (TA 03) até 373,84 cm² (TA 02).

A Tabela 4.2, evidencia as espessuras medidas de ambas as nervuras e o valor de cobertura da armadura das amostras, sendo que estão as duas nervuras apresentadas por “N” e o cobrimento representado por “c”, medido nos quatro pontos de distância entre a borda da peça e a armadura, conforme a legenda.

Tabela 4.2: Especificação das nervuras e cobrimentos das peças.



	N1 (mm)	N2 (mm)	C1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C4 (mm)
T01	35	42	29,3	25,6	23,6	23,5
T02	42	40	40,8	31,4	37,9	38,2
T03	39	40	32,4	40,0	30,0	24,4
T04	40	40	36,3	37,8	30,1	30,0
T05	45	40	30,0	30,0	30,0	30,0
T06	40	40	36,7	37,7	22,2	21,9

Fonte: Autora (2024).

As peças “Lado A” foram analisadas conforme a abertura do furo e distância deste até a extremidade mais próxima, os resultados não foram iguais para todas as peças, apresentaram variações de até 3 centímetros, os dados estão evidenciados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Diâmetro da abertura das terças alveolares Lado A.

Terça Alveolar	Diâmetro (cm)	Distância da extremidade (cm)
TA 01	8	6
TA 02	7	6
TA 03	7	7
TA 04	8	5
TA 05	10	5
TA 06	8	4

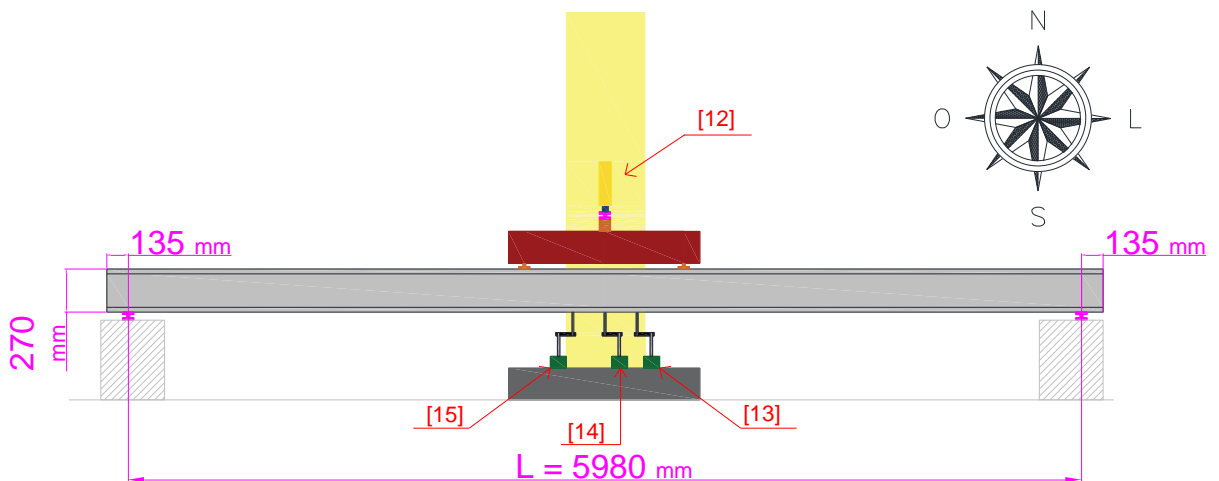
Fonte: Autora (2024).

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POSITIVA

No ensaio de resistência a flexão positiva para medir os deslocamentos, foram utilizados os três transdutores, conforme esquema de ensaio, mas para leitura e interpretação dos resultados, considera-se de leste a oeste as identificações: [13], [14] e [15] e a aplicação de carga pelo atuador e célula de carga, identificados como [12].

As terças posicionadas nos apoios a uma distância a sobre as rótulas metálicas. As orientações descritas estão apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.7: Identificação geográfica e numérica do ensaio de resistência a flexão.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados medidos pelos transdutores geram um número de deslocamento, representado por mm, a cada segundo de duração do ensaio. Isto é, mesmo que não

seja aplicada força, se iniciado o ensaio, os transdutores registram o deslocamento da peça a cada segundo, até que o ensaio seja interrompido.

O ensaio de resistência à flexão positiva das seis peças foi interrompido ao identificar fissura diagonal correspondente à falha pelo mecanismo de flexo-cortante. A paralisação do ensaio no instante de percepção dessa fissura o caracteriza como ensaio não destrutivo, validando a utilização da mesma peça para ensaios posteriores, em conformidade com a base de dados do laboratório NETPre.

4.2.1 Panorama de fissuração e relação força *versus* deslocamento

Na TA 01, a primeira fissura identificada visualmente surgiu quando uma carga de 40 kN foi aplicada. Ao longo do ensaio, houve uma evolução gradual na abertura das fissuras, culminando na aparição da fissura diagonal com 48 kN de carga aplicada.

A Figura 4.8 (a) mostra a primeira fissura identificada na peça TA 01, enquanto na Figura 4.8 (b) observa-se a evolução dessa fissura à medida que a carga fora aplicada.

Figura 4.8: Evolução da fissuração TA 01.

a) Fissura inicial a aplicação de 40 kN.

b) Fissura intermediária a 42 kN aplicados.



Fonte: Autora (2024).

Conforme mostrado na Figura 4.8, foi identificada fissuração por flexão na borda inferior da peça quando uma força de 40 kN foi aplicada, resultando em uma abertura de 0,1 mm. Com o aumento da carga para 42 kN, essa fissura aumentou sua espessura para 0,2 mm. O ensaio foi interrompido quando ocorreu a fissuração por cisalhamento na peça. Na TA 01, essa fissura foi observada quando a carga atingiu

48 kN, com uma abertura de 0,4 mm, como evidenciado na Figura 4.9.

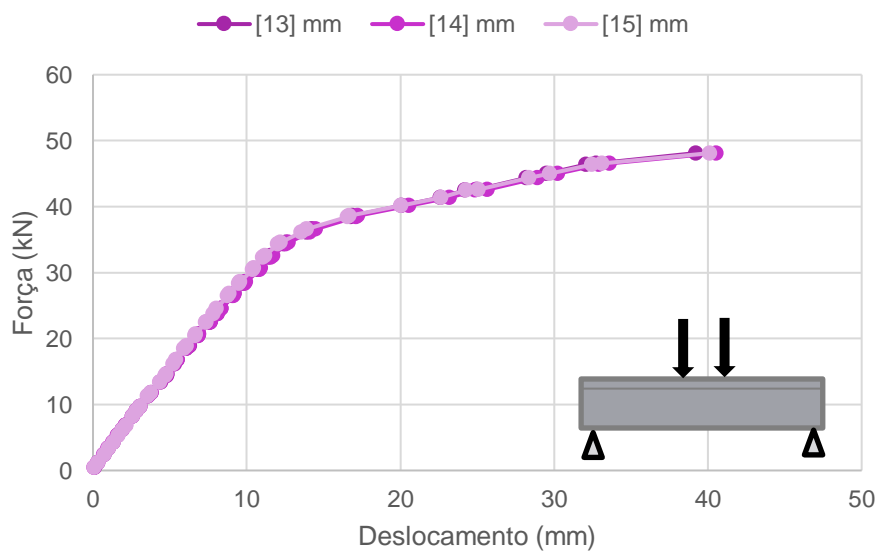
Figura 4.9: Fissura diagonal TA 01.



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 4.10, referente à TA 01, é apresentada a relação entre a força aplicada e o deslocamento, onde o eixo vertical representa a força em kN e o eixo horizontal representa o deslocamento em milímetros.

Figura 4.10: Relação força x deslocamento TA 01 no ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autora (2024).

Pelo gráfico, é possível observar uma mudança no comportamento da peça. O ensaio e o registro dos dados foram interrompidos quando uma fissura diagonal foi visualizada, ocorrendo com a aplicação de 48 kN de carga e um deslocamento medido de 40 mm.

Na peça TA 02, a primeira fissura identificada visualmente surgiu quando a carga aplicada atingiu 38 kN. A Figura 4.11 ilustra a evolução das fissuras ao longo

do ensaio.

Figura 4.11: Evolução da fissuração TA 02.

a) Fissura inicial de 0,1 mm a 38 kN



b) Fissura intermediária de 0,2 mm a 43 kN



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que a fissuração na TA 02, aumentou em 0,1 mm de espessura com a aplicação adicional de 5 kN de carga e se manteve estável na abertura até ser encontrada a fissura de cisalhamento.

A fissura diagonal, característica para interrupção do ensaio, foi identificada com uma carga aplicada de 48 kN, mas conforme observado, sem aumento subsequente na espessura da fissura, como mostrado na Figura 4.12.

Figura 4.12: Fissura diagonal TA 02.

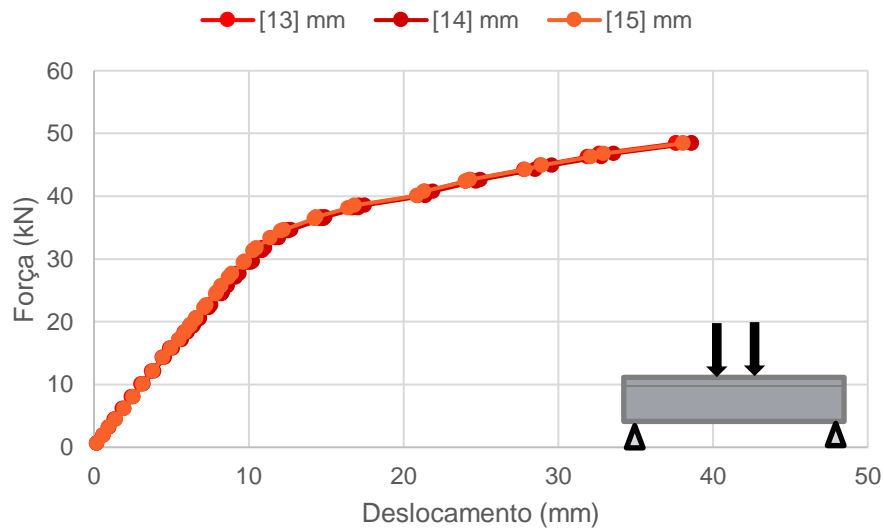


Fonte: Autora (2024).

A fissura diagonal observada na TA 02 apresentou uma espessura de apenas 0,2 mm. A relação entre a força aplicada e o deslocamento obtido da peça TA 02 está

ilustrada na Figura 4.13.

Figura 4.13: Relação força x deslocamento TA 02 no ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.14 mostra a evolução da fissuração na TA 03, onde a primeira fissura foi identificada com uma carga aplicada de 39,5 kN e, até a aparição visual da fissura diagonal, com 45 kN, foram observadas singelas mudanças nas aberturas das fissuras.

Figura 4.14: Evolução da fissuração TA 03.

- a) Fissura inicial de 0,1 mm a 39,5 kN
- b) Fissura intermediária de 0,15 mm a 41 kN



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.15 retrata a fissura diagonal aberta na terça alveolar TA 03,

percebida na aplicação da carga de 45 kN, com abertura de 0,15 mm.

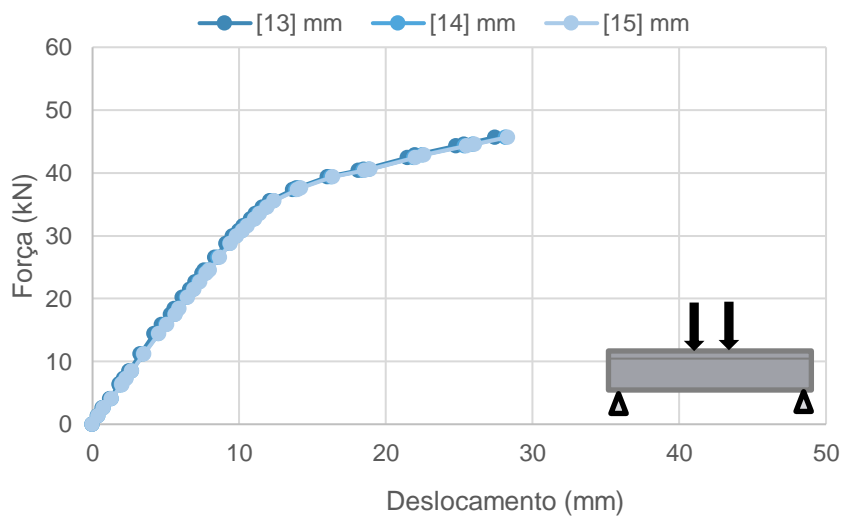
Figura 4.15: Fissura diagonal TA 03.



Fonte: Autora (2024).

A relação gráfica entre a força aplicada e o deslocamento obtido da TA 03 está expressa na Figura 4.16.

Figura 4.16: Relação força x deslocamento TA 03 no ensaio de resistência à flexão.

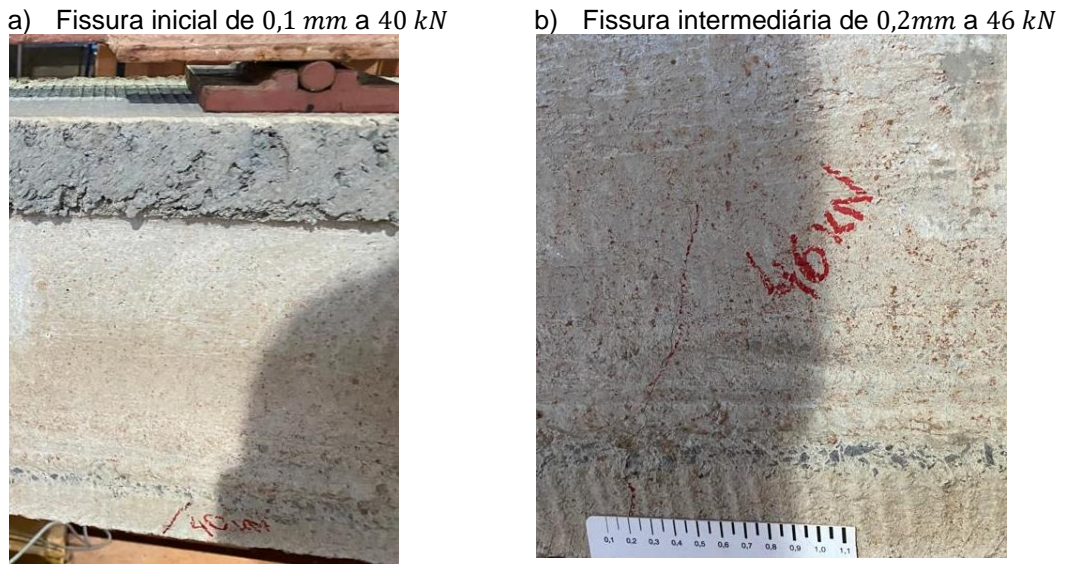


Fonte: Autora (2024).

A TA 03 apresentou fissura diagonal com uma menor carga aplicada, quando comparada às demais terças. O comportamento gráfico da peça passou a ser elástico-plástico com a identificação de microfissuras a uma força aplicada de 30 kN.

A Figura 4.17 apresenta a TA 04, onde visualmente foi observada a primeira fissura, vertical, com aplicação de 40 kN e a evolução da mesma fissura a uma carga aplicada de 46 kN.

Figura 4.17: Evolução da fissuração TA 04.



Fonte: Autora (2024).

A mudança de comportamento da fissura foi observada a uma carga aplicada de 50 kN, onde foi caracterizada fissura de cisalhamento, observada por meio da Figura 4.18.

Figura 4.18: Fissura diagonal TA 04.

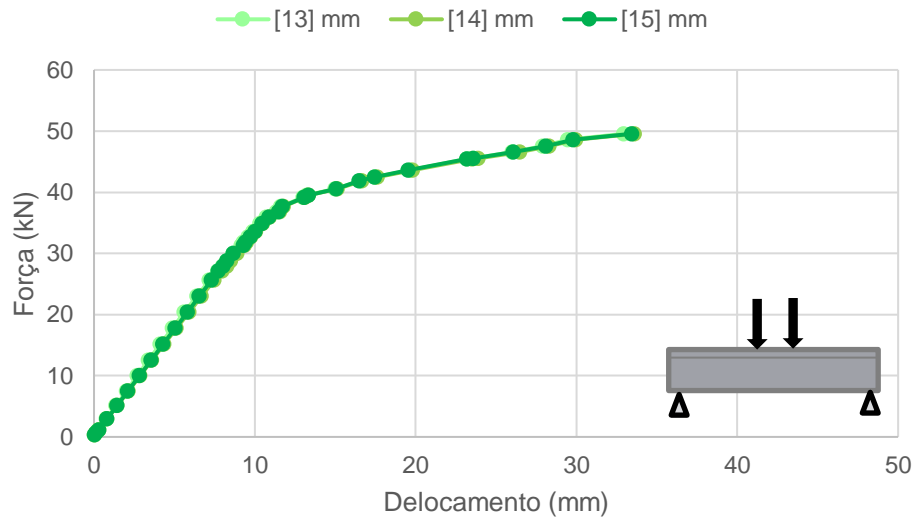


Fonte: Autora (2024).

A TA 04, teve comportamento progressivo até atingir a carga de 32 kN, momento em que surgiram as microfissuras. A partir da aplicação de 38 kN, a peça passou por um estágio elástico-plástico, até que, com a carga de 41 kN, houve uma mudança significativa de comportamento, culminando na fissura característica de

ruptura da peça, resultado expresso graficamente, desde o início do ensaio até a paralisação, na identificação da fissura diagonal, pela Figura 4.19.

Figura 4.19: Relação força x deslocamento TA 04 no ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autora (2024).

A TA 05, seguindo o padrão observado nas demais peças, exibiu um comportamento similar em relação à evolução das fissuras. As fissuras iniciais identificadas nesta peça apresentaram uma abertura de 0,10 mm, refletindo uma consistência notável com os resultados das outras amostras.

A Figura 4.20 mostra o processo evolutivo das fissuras ao longo do ensaio, proporcionando uma compreensão visual abrangente da resposta estrutural da peça. Essa análise visual é fundamental para avaliar a integridade e a capacidade de carga das terças alveolares submetidas a esforços significativos.

Figura 4.20: Panorama de fissuração da TA 05.



Fonte: Autora (2024).

A mudança na direção da fissura foi observada na TA 05 quando a carga aplicada atingiu 49 kN, com uma abertura medida de 0,25 mm, conforme mostrado na Figura 4.21.

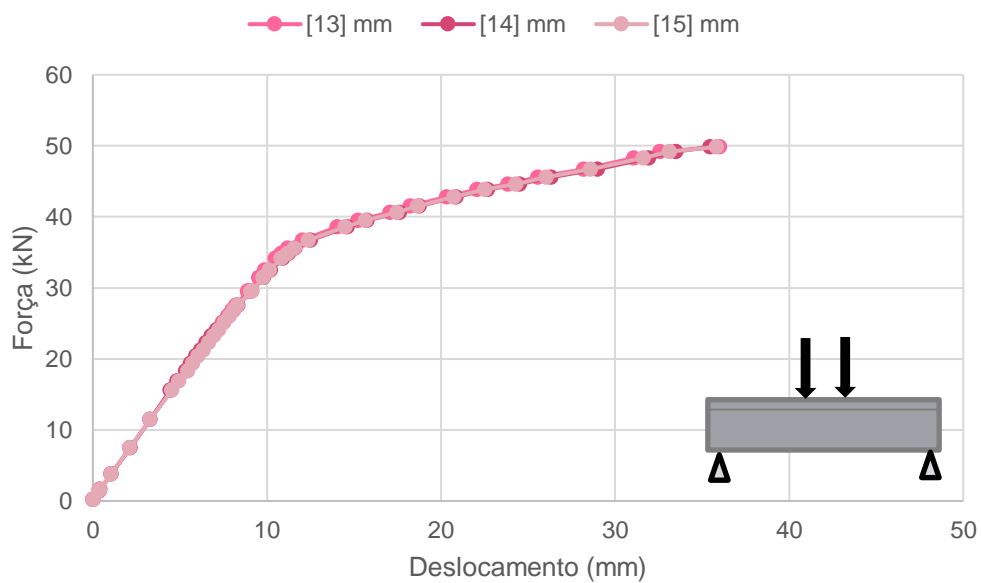
Figura 4.21: Fissura diagonal TA 05.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento da peça TA 05 durante o ensaio está representado na Figura 4.22.

Figura 4.22: Relação força x deslocamento TA 05 no ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autora (2024).

Por fim, durante o ensaio de resistência à flexão positiva, a TA 06 mostrou a primeira abertura perceptível ao atingir uma carga de 39 kN, com uma abertura de 0,10 mm. Essa abertura aumentou discretamente à medida que mais força foi aplicada, chegando a 0,15 mm, conforme evidenciado na Figura 4.23.

Figura 4.23: Evolução da fissuração na TA 06.

a) Fissura inicial de 0,1 mm a 39 kN



b) Fissura intermediária de 0,15mm a 41kN



Fonte: Autora (2024).

A TA 06 apresentou a abertura diagonal com 45 kN, conforme indicado na Figura 4.24.

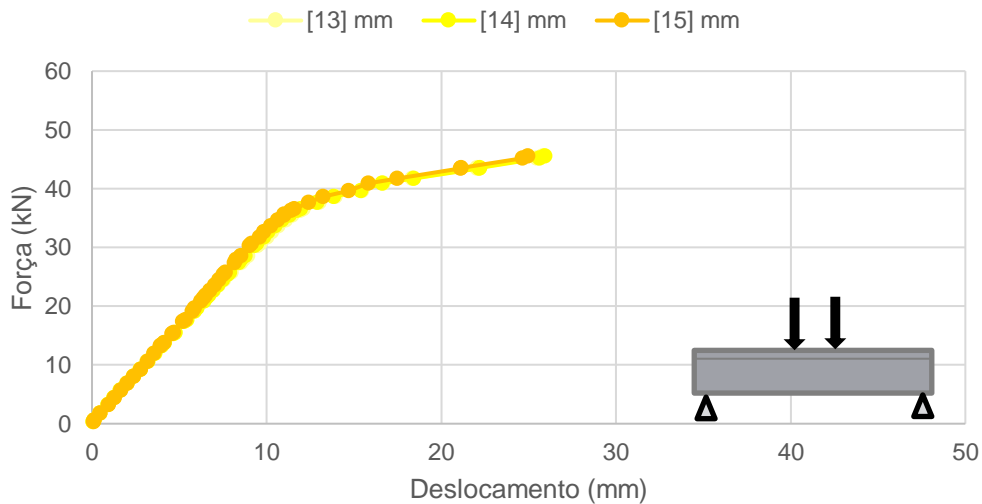
Figura 4.24: Abertura diagonal TA 06.



Fonte: Autora (2024).

A fissura diagonal foi um progresso de uma fissura de flexão, apontada com 41 kN de carga aplicada e abertura de 0,20 mm. O comportamento de toda a peça durante o ensaio está ilustrado na Figura 4.25.

Figura 4.25: Relação força x deslocamento TA 06 no ensaio de resistência à flexão.

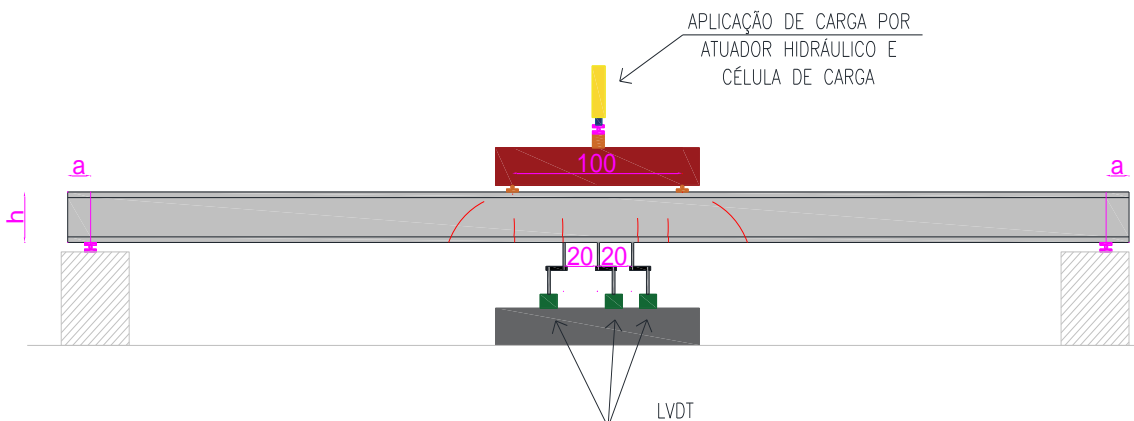


Fonte: Autora (2024).

Uma análise quanto a relação entre força e deslocamento encontradas para as seis peças está disposta no capítulo 5.

Quanto ao panorama de fissuração, tem-se ainda a verificação da região onde foram encontradas as fissuras. Em todas as peças, foram encontradas fissuras na região central, conforme mostra a Figura 4.26.

Figuras 4.26: Região de fissuração no ensaio de resistência a flexão, medidas em cm.



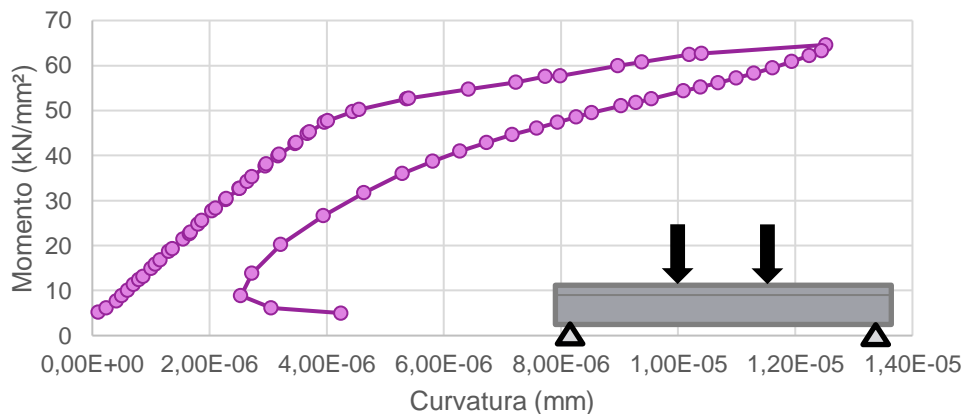
Fonte: Autora (2024).

Uma análise a respeito do panorama de fissuração está disposta no capítulo 5.

4.2.2 Relação entre momento *versus* curvatura

O cálculo do momento para cada força aplicada pelo atuador foi conduzido levando em conta o peso próprio da terça, juntamente com a sobrecarga de ensaio. Concomitantemente, foram registrados os deslocamentos para estabelecer uma relação entre momento e curvatura. Em relação à TA 01, a Figura 4.27 ilustra essa relação de momento *versus* curvatura.

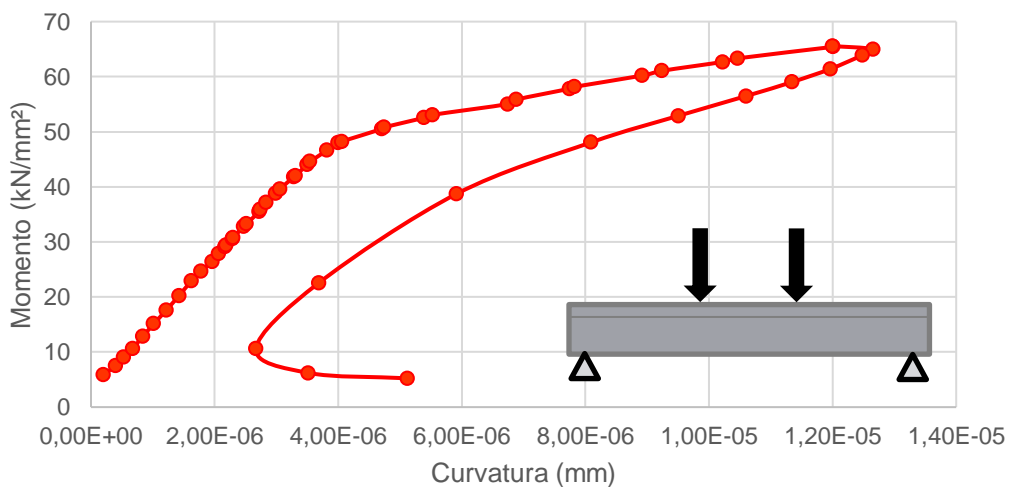
Figura 4.27: Relação momento \times curvatura para a TA 01 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

O mesmo procedimento fora adotado para as demais terças. A Figura 4.28 revela a relação entre momento e curvatura obtido com o resultado do ensaio para a TA 02.

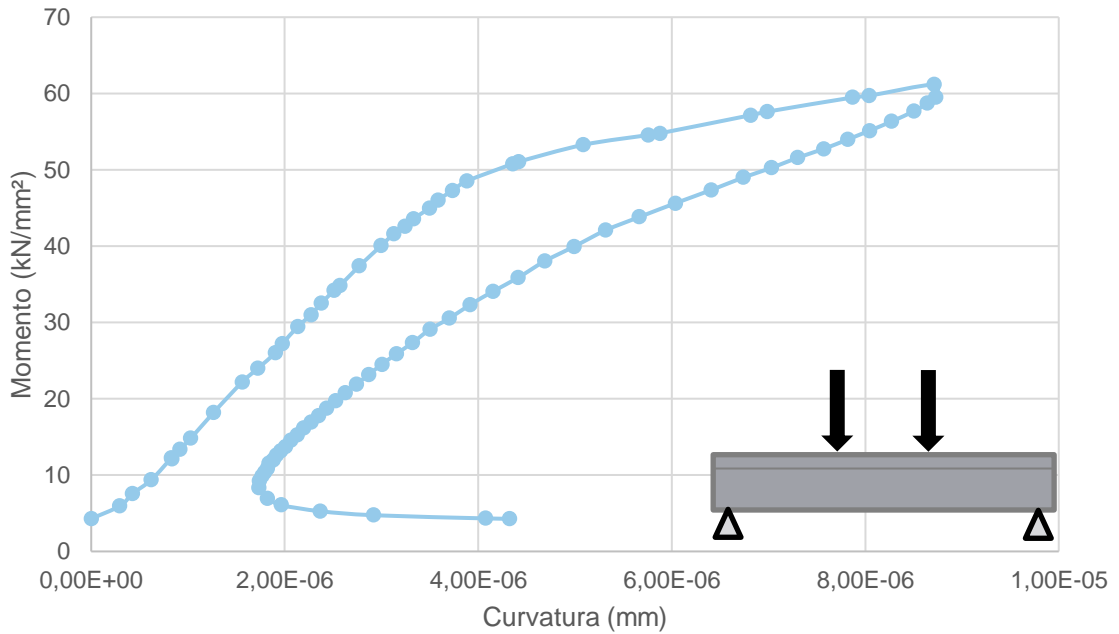
Figura 4.28: Relação momento \times curvatura para a TA 02 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

A relação gráfica para a TA 03 está apresentada na Figura 4.29.

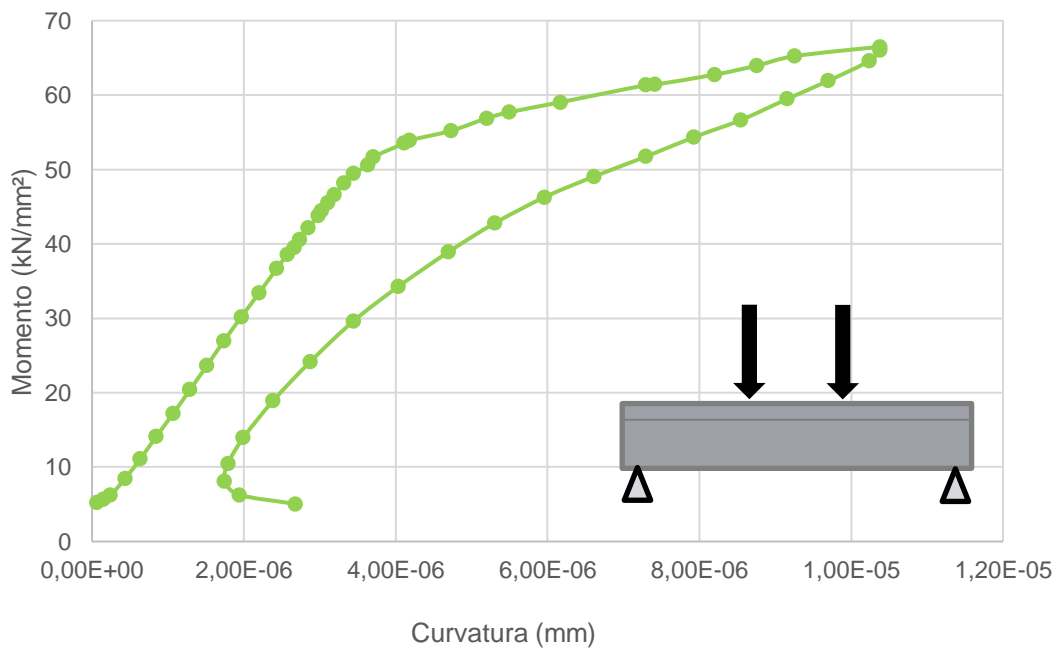
Figura 4.29: Relação momento \times curvatura para a TA 03 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

A relação entre momento e curvatura da TA 04 está na Figura 4.30.

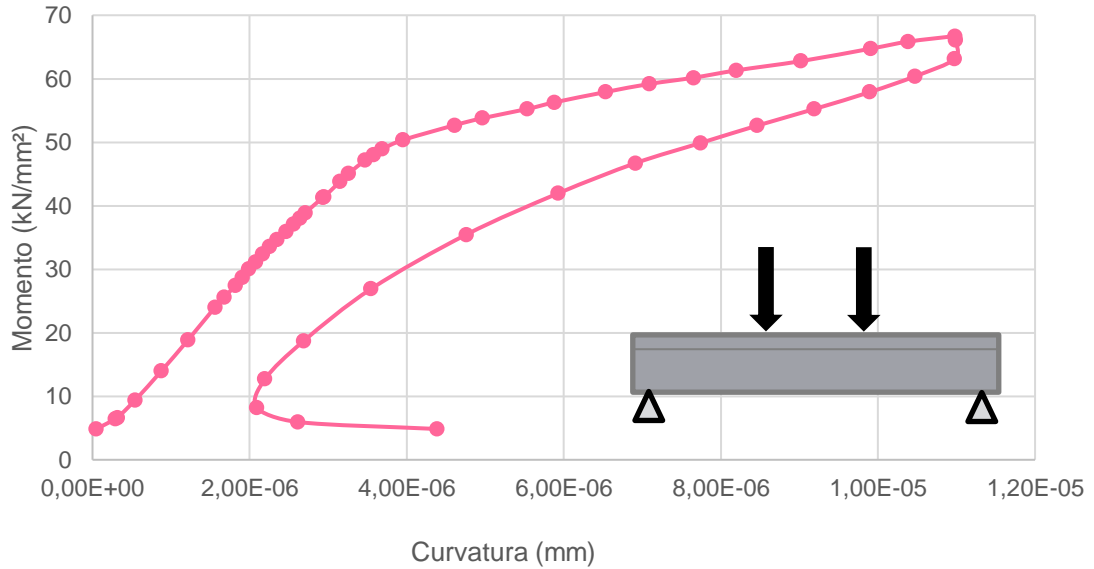
Figura 4.30: Relação momento \times curvatura para a TA 04 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

Para a TA 05, a relação gráfica pode ser observada por meio da Figura 4.31.

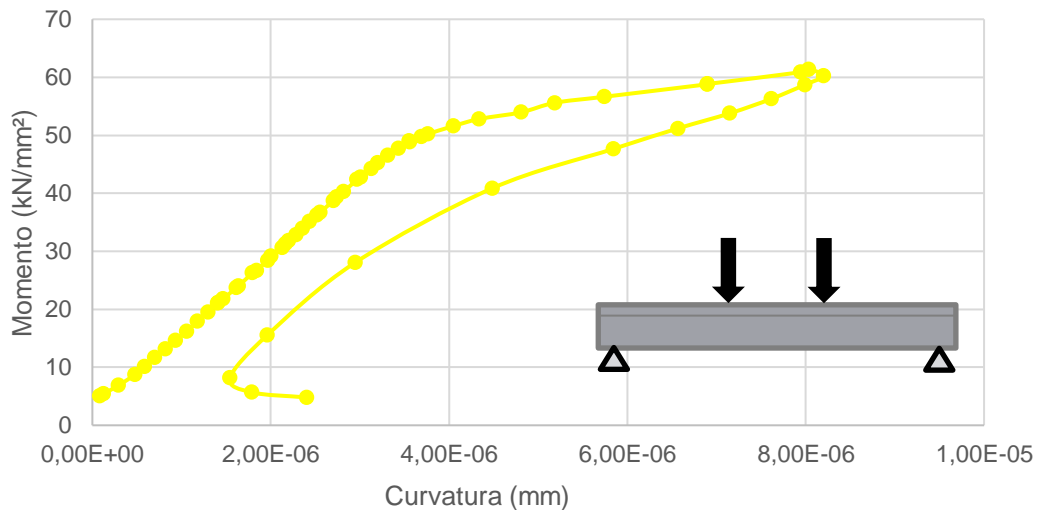
Figura 4.31: Relação momento \times curvatura para a TA 05 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

Por fim, a relação para a TA 06 pode ser observada na Figura 4.32.

Figura 4.32: Relação momento \times curvatura para a TA 06 sob flexão.



Fonte: Autora (2024).

A análise comparativa entre os resultados obtidos para a relação entre momento e curvatura das peças está disposto no capítulo 5.

4.2.3 Módulo de elasticidade efetivo das peças

Para as seis terças alveolares, foi estabelecida a relação indicada em 3.3.7 para determinação do módulo de elasticidade efetivo. Os valores principais foram agrupados para avaliação da rigidez das peças na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Módulo de elasticidade e inércia efetiva das peças.

TA	I (mm ⁴)	P (kN/mm)	f (mm)	a (mm)	L (mm)	EI (kN/mm ²)	E (GPa)
TA 01	2,89E+08	15	9,9	2490	5980	12965731818	45
TA 02	3,27E+08	14	9,4	2490	5980	12745038511	39
TA 03	2,81E+08	15	9,4	2490	5980	13655398404	49
TA 04	2,91E+08	18	10,9	2490	5980	14131458165	49
TA 05	3,01E+08	19	12,5	2490	5980	13007222160	43
TA 06	2,85E+08	18	11,3	2490	5980	13631229558	48

Fonte: Autora (2024).

Ainda, fora empregada a Equação 19 e 20, utilizando o valor de f_{ck} calculado para as peças, chegando aos valores expressos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Módulo de elasticidade inicial e módulo de deformação secante a partir do f_{ck} .

Terça	f_{ck} (MPa)	E_{ci} (MPa)	E_{cs} (MPa)
TA 01, TA 02, TA 03, TA 04, TA 05 E TA 06	57,73	41173	38881

Fonte: Autora (2024).

4.2.4 Resistência à tração média

Para determinar a resistência à tração média experimental das peças, foram selecionados os valores de momento experimental, antes de o gráfico mudar seu comportamento. Os resultados obtidos para cada uma das terças estão detalhados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resistência à tração média das peças obtido experimentalmente.

Terça	Mr (exp) (kN.m)	α	f_{ctm} (MPa)	Np (kN)	A_{hom} (m ²)	I (m ⁴)	$y_{t,hom}$ (m)	ep (m)
TA 01	47,8	1,2	3,85	330,21	0,0345	0,00030	0,14	0,11
TA 02	48,3	1,2	3,85	334,02	0,0382	0,00034	0,14	0,11
TA 03	48,5	1,2	2,87	331,13	0,0337	0,00029	0,14	0,11
TA 04	49,5	1,2	2,45	332,13	0,0350	0,00030	0,14	0,11
TA 05	50,4	1,2	1,98	333,26	0,0367	0,00031	0,14	0,11
TA 06	48,8	1,2	3,60	329,30	0,0343	0,00030	0,14	0,11

Fonte: Autora (2024).

Com os resultados da resistência à tração média experimental, tem-se ainda a

Tabela 4.7 que dispõe os resultados para $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$ para as peças.

Tabela 4.7: Valores de $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$ das terças alveolares.

Terça	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	$f_{ctk,sup}$ (MPa)
TA 01	3,85	2,70	5,01
TA 02	3,85	2,69	5,00
TA 03	2,87	2,01	3,73
TA 04	2,45	1,71	3,18
TA 05	1,98	1,39	2,58
TA 06	3,60	2,52	4,69

Fonte: Autora (2024).

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE

Para o ensaio de resistência à força cortante das peças de terças alveolares, cada uma das seis amostras foi posicionada para ensaio em ambas as extremidades. Na extremidade "Lado A", onde estava presente o furo característico de montagem do elemento, e na extremidade "Lado B", que representa o seccionamento do elemento estrutural após sua saída da pista e não possui abertura furo ou detalhe para fixação do elemento.

4.3.1 Relação entre força versus deslocamento e fissuração das peças

A Figura 4.33 proporciona uma visualização detalhada da Terça Alveolar 01 no lado designado como "lado A", destacando a presença de um furo na peça e sua posição durante o ensaio de resistência à força cortante.

Figura 4.33: TA 01 Lado A posicionada para ensaio de resistência a força cortante.

a) Furo TA01 – lado A



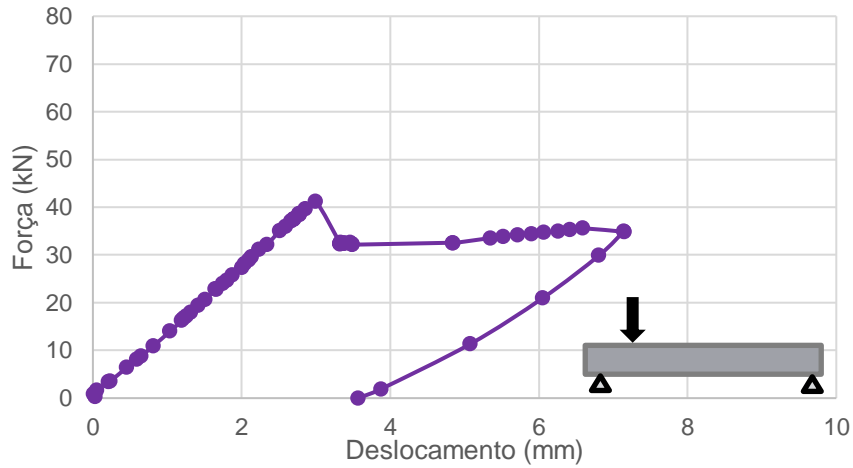
b) TA01 - lado A em posição para o ensaio de cisalhamento



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.34 exibe a relação entre a força aplicada no atuador e o deslocamento obtido pelo LVDT durante o ensaio da Terça Alveolar 01 no lado denominado como "Lado A".

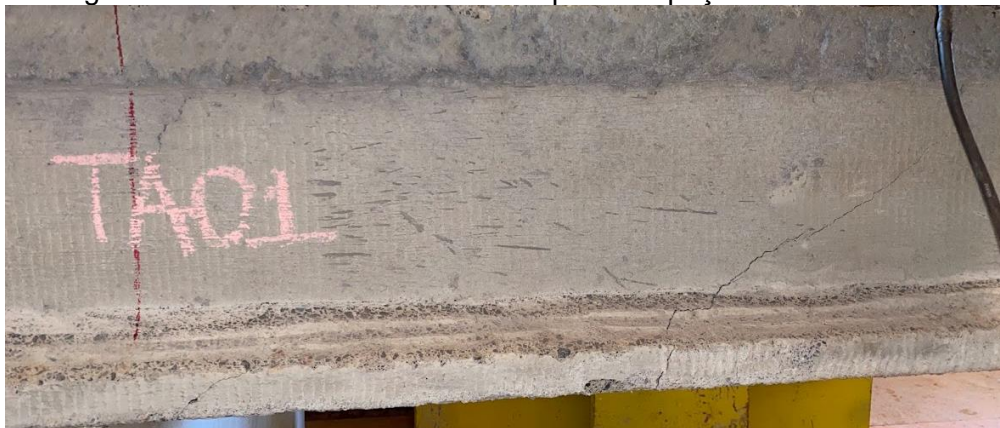
Figura 4.34: Relação entre Força \times Deslocamento TA 01 LADO A.



Fonte: Autora (2024).

Enquanto a Figura 4.35 evidencia a fissura que marcou o processo de ruptura da TA 01 – Lado A.

Figura 4.35: Fissura identificada na ruptura da peça TA 01 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

A fissura identificada começa como resultado de flexão na borda inferior da peça, avançando posteriormente devido ao cisalhamento na nervura e continuando por esmagamento do concreto na borda superior.

É possível perceber outras fissuras na borda inferior, próximas ao apoio e também uma fissura na nervura, mas sem conexão com fissura da borda inferior.

A Figura 4.36 mostra a TA 01 - Lado B, a extremidade onde a peça não possui furo, posicionada para o ensaio.

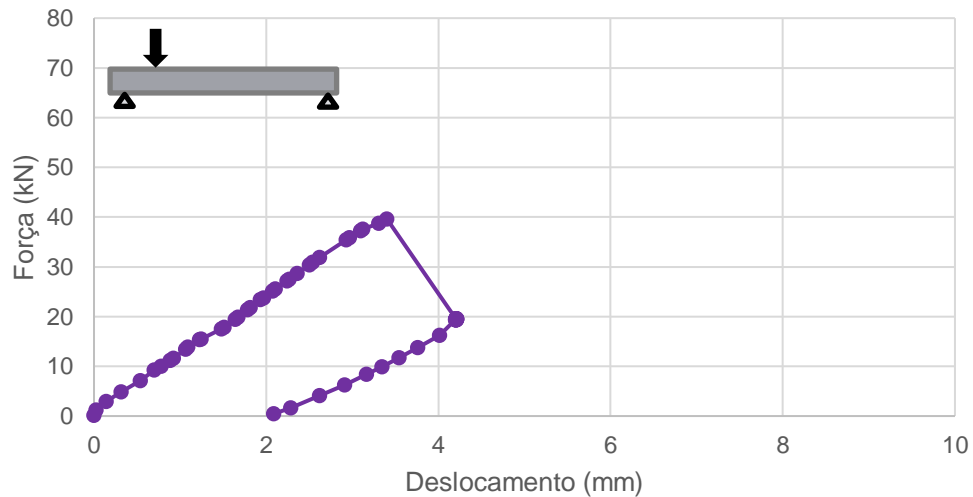
Figura 4.36: TA 01– Lado B, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.37 representa a relação força x deslocamento obtida com o ensaio de resistência à força cortante na peça TA 01 – Lado B.

Figura 4.37: Relação Força x Deslocamento TA 01 LADO B.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento gráfico revela diferenças entre as duas extremidades da mesma peça, especificamente entre o "Lado B" e o "Lado A", apesar de ambas terem falhado devido ao cisalhamento. A Figura 4.38 ilustra a fissura de ruptura na

extremidade "Lado B" da peça TA 01.

Figura 4.38: Fissura identificada na ruptura da peça TA 01 – Lado B.



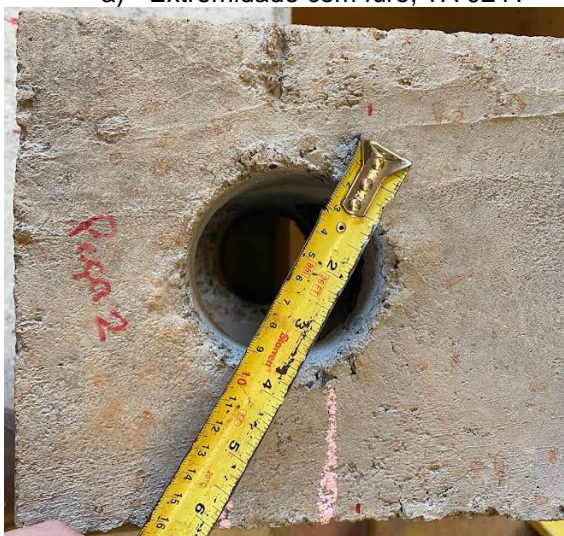
Fonte: Autora (2024).

A fissura se propagou de maneira semelhante em ambas as extremidades, iniciando-se pelo cisalhamento na borda inferior, passando pela nervura e culminando em uma falha por esmagamento do concreto na borda superior, também devido ao cisalhamento. Porém, na extremidade "lado B" a fissura se propagou com uma abertura maior.

A Figura 4.39 mostra a TA 02 - Lado A, a extremidade da peça com um furo, preparada para o ensaio de resistência à força cortante.

Figura 4.39: TA 02 – Lado A, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) Extremidade com furo, TA 02 A



b) Peça posicionada para ensaio

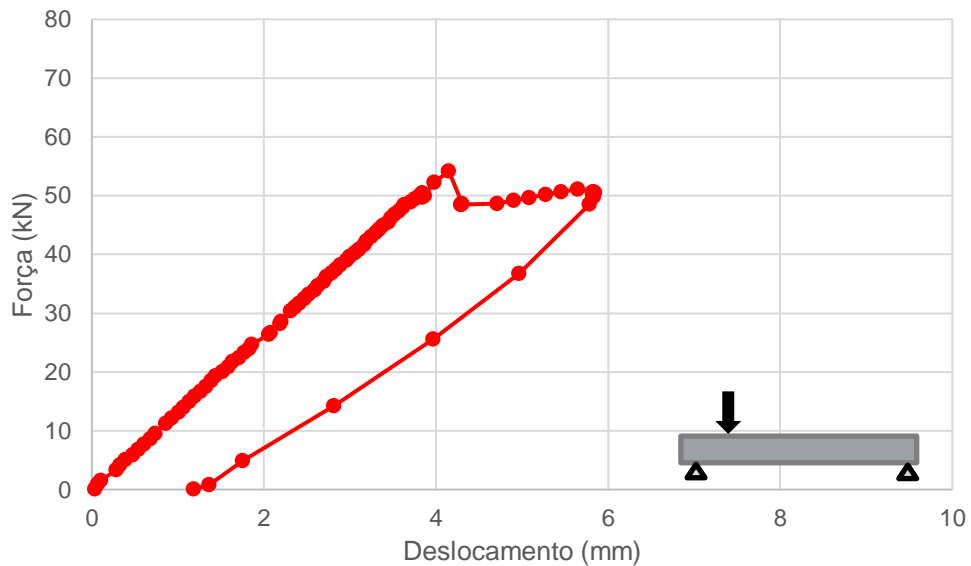


Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.40 ilustra a relação entre a força aplicada e o deslocamento obtido

durante o ensaio de resistência à força cortante na peça TA 02 - Lado A.

Figura 4.40: Relação Força \times Deslocamento TA 02 LADO A.



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 4.41, está representada a fissura de ruptura observada na peça TA 02 - Lado A.

Figura 4.41: Fissura identificada na ruptura da peça TA 02 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Pela imagem, é observado que ocorreu fissuração por flexão na borda inferior, seguida de fissuração por cisalhamento na nervura e falha por esmagamento do concreto na borda superior devido ao cisalhamento.

A Figura 4.42 mostra a peça TA 02 - Lado B, a extremidade que não possui

furo.

Figura 4.42: TA 02 – Lado B, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) TA 02 – Lado B extremidade



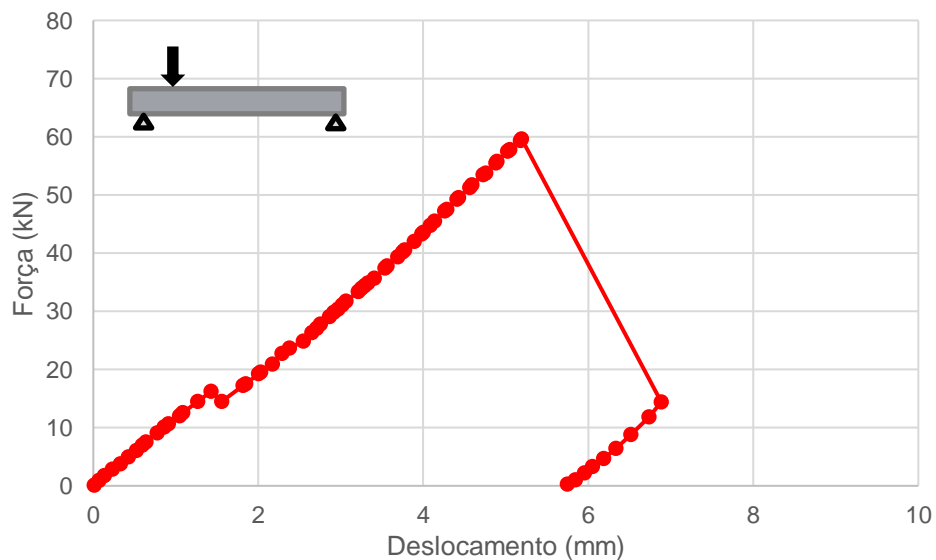
b) TA 02 – Lado B vista lateral



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.43 apresenta a relação entre força x deslocamento obtido durante o ensaio da peça TA 02 – Lado B.

Figura 4.43: Relação Força x Deslocamento TA 02 – LADO B.



Fonte: Autora (2024).

Na análise gráfica, é possível identificar diferenças entre o comportamento de uma só peça em ambas as extremidades. No Lado B, foi identificado o mecanismo de ruptura por tração diagonal, onde há maior influência do cisalhamento e a peça se rompe de forma brusca. A fissura identificada nessa ruptura é diferente das que

ocorrem por cisalhamento, sendo possível observar por meio a Figura 4.44.

Figura 4.44: Fissura identificada na ruptura da peça TA 02 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

A ruptura para a extremidade “lado B” da TA 02, ocorreu por tração diagonal, que provoca aberturas significativas, em alguns casos, são capazes de separar o elemento estudado. Na TA 02 - Lado B, além de uma combinação de fissuras, observam-se duas fissuras próximas uma da outra no momento do rompimento, que ocorreu de forma brusca.

A Figura 4.45 apresenta a TA 03 – Lado A, extremidade da terça com furo.

Figura 4.45: TA 03 – Lado A, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) Furo TA 03



b) Peça posicionada para o ensaio

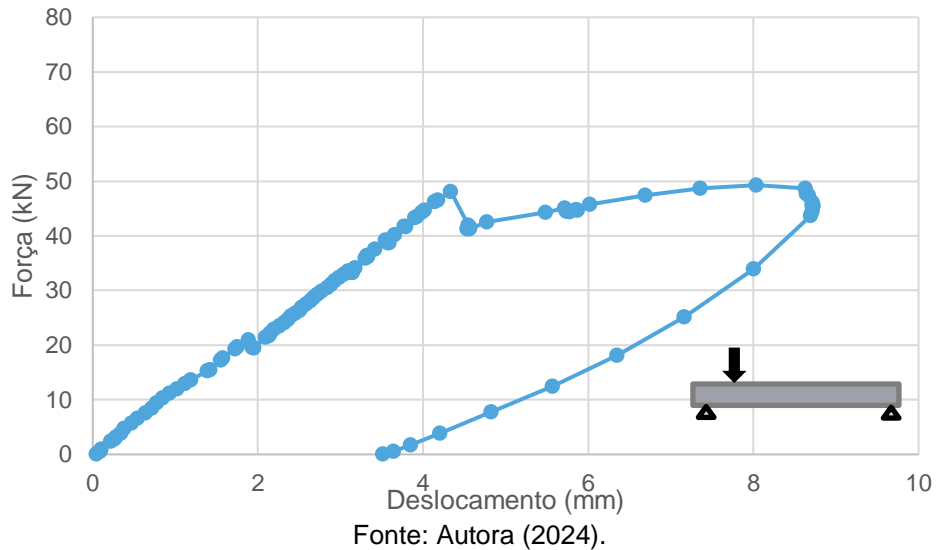


Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.46 apresenta a relação entre força e deslocamento obtida com o

ensaio de resistência à força cortante na peça TA 03 – Lado A.

Figura 4.46: Relação Força x Deslocamento TA 03 – LADO A.



É possível notar que o comportamento gráfico da peça se assemelha ao das demais que apresentaram ruptura por flexo-cortante. A Figura 4-47 mostra a fissura de ruptura da peça TA 03 - Lado A.

Figura 4.47: Fissura identificada na ruptura da peça TA 03 – Lado A.

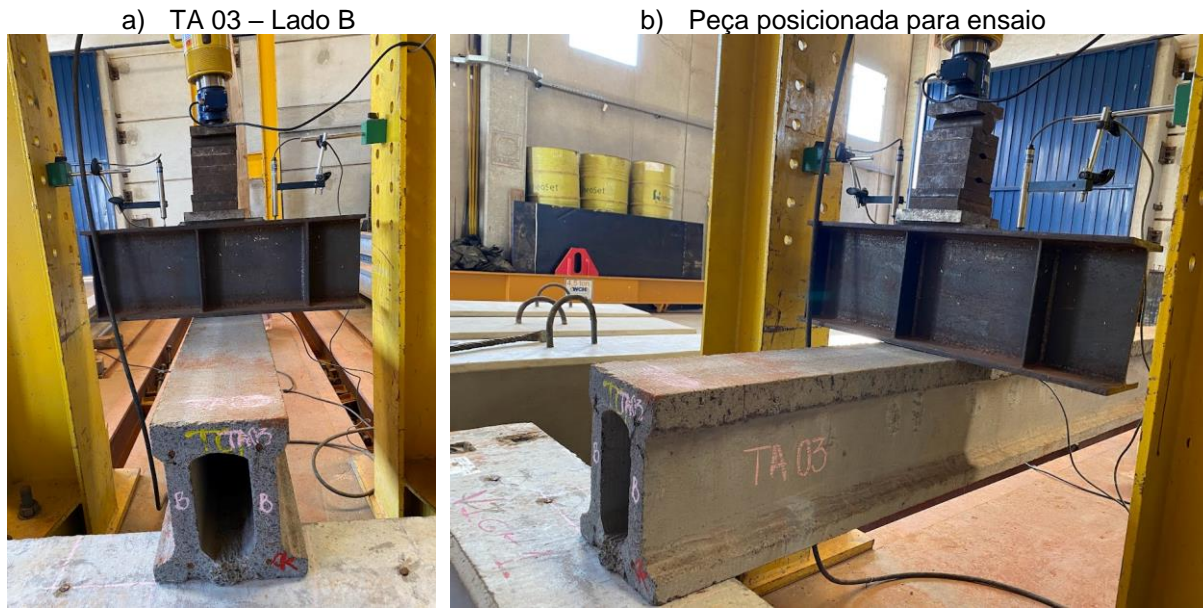


Fonte: Autora (2024).

A fissuração se inicia por flexão na borda inferior da terça, elevando-se ao longo da nervura devido ao cisalhamento, até ocorrer a falha por esmagamento do concreto na borda superior. Observa-se uma abertura discreta, indicativa do início da fissuração no nível das cordoalhas devido ao escorregamento das armaduras.

A Figura 4.48 apresenta a TA 03 – Lado B, extremidade da peça íntegra.

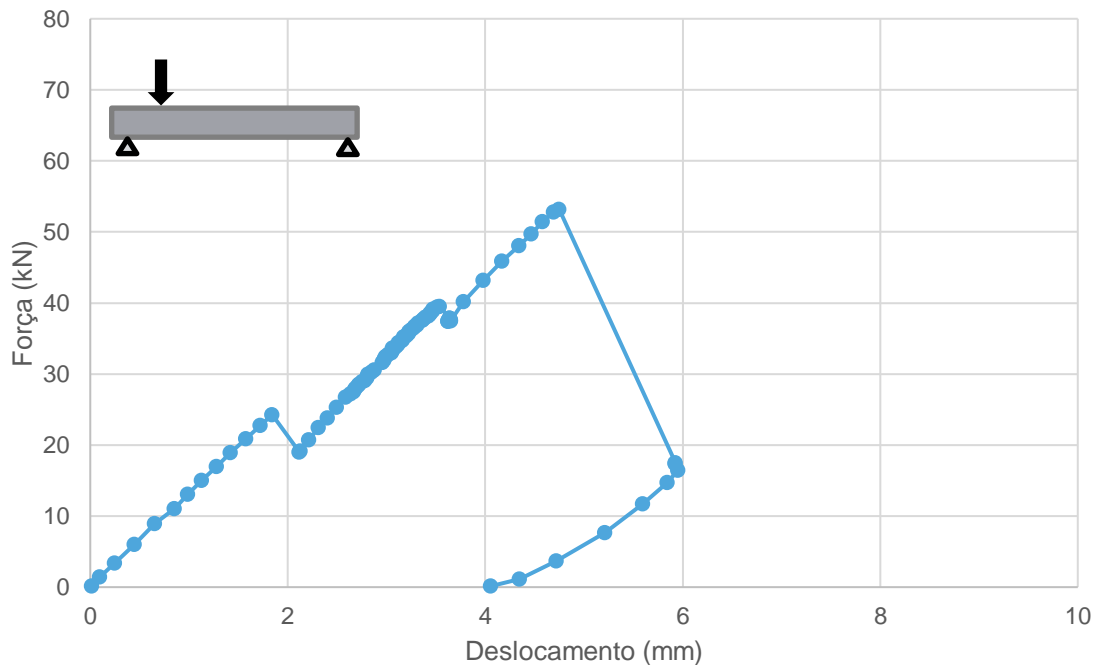
Figura 4.48: TA 03 – Lado B, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.49 apresenta a relação de entre força e deslocamento obtida no ensaio de resistência ao cisalhamento da TA 03 – Lado B.

Figura 4.49: Relação Força x Deslocamento TA 03 – LADO B.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento da peça, ao ser interpretado pelo gráfico, demonstrou oscilações durante a aplicação da força, com algumas quedas e variações em relação à ruptura. A Figura 4.50 evidencia a fissura de ruptura da peça TA 03 – Lado B.

Figura 4.50: Fissura identificada na ruptura da peça TA 03 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

A ruptura da peça ocorreu por tração diagonal, onde o esforço ocasionou ruptura brusca da peça.

A Figura 4.51 apresenta a TA 04 – Lado A, extremidade da peça que possui furo e o posicionamento dela para o ensaio de resistência ao cisalhamento.

Figura 4.51: TA 04 – Lado A, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

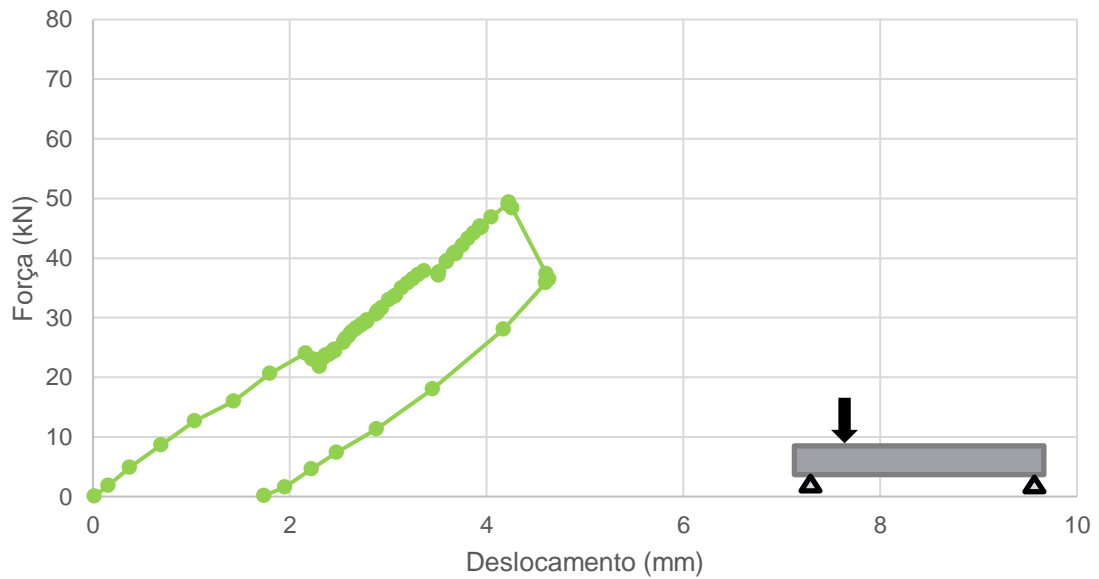
a) TA04 – Lado A, com furo

b) Peça posicionada para ensaio



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.52 apresenta a relação de força e deslocamento obtida.

Figura 4.52: Relação Força \times Deslocamento TA 04 – LADO A.

Fonte: Autora (2024).

Com base no gráfico, é possível identificar a ruptura por cisalhamento, o que é corroborado pela Figura 4.53, que mostra o registro da ruptura da TA 04 – Lado A, apresentando-se de forma discreta.

Figura 4.53: Fissura identificada na ruptura da peça TA 04 – Lado A.

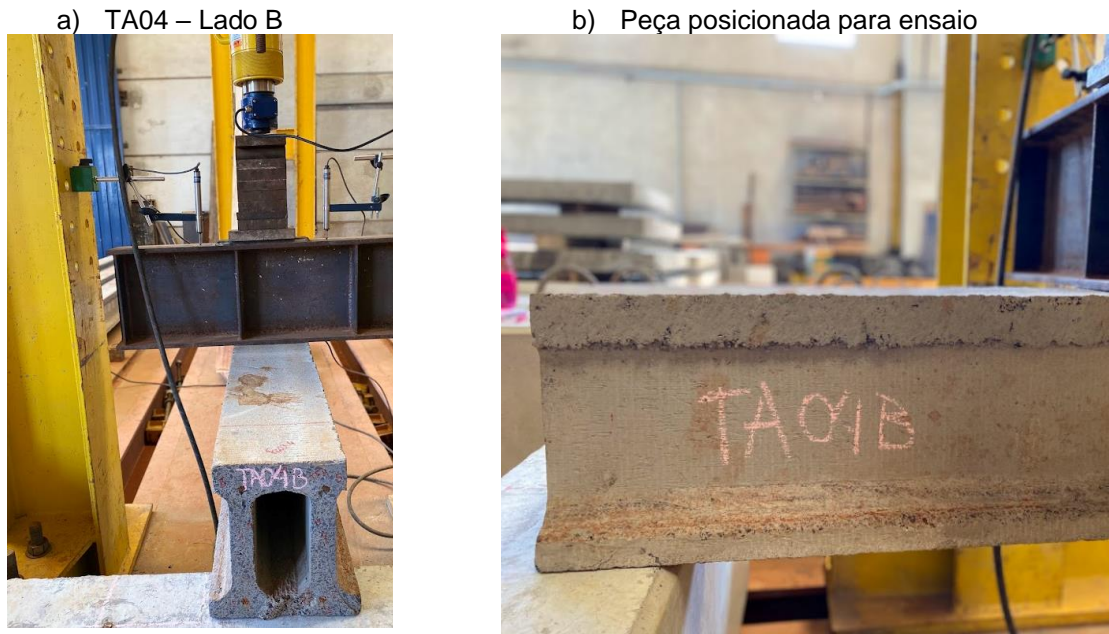


Fonte: Autora (2024).

A fissuração diagonal observada é indicativa de fissuração por cisalhamento, ocorrendo desde a borda inferior até a borda superior da peça.

A outra extremidade da TA 04, denominada Lado B, é apresentada na Figura 4.54.

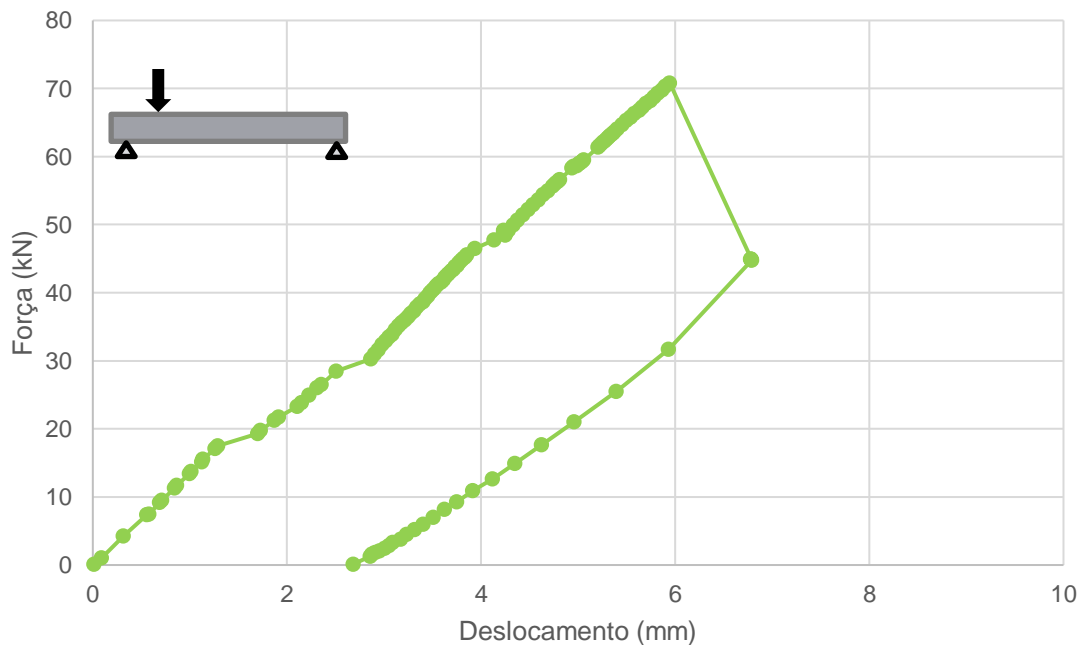
Figura 4.54: TA 04 – Lado B, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento da peça durante o ensaio é ilustrado pela Figura 4.55, que mostra a relação entre força aplicada e deslocamento.

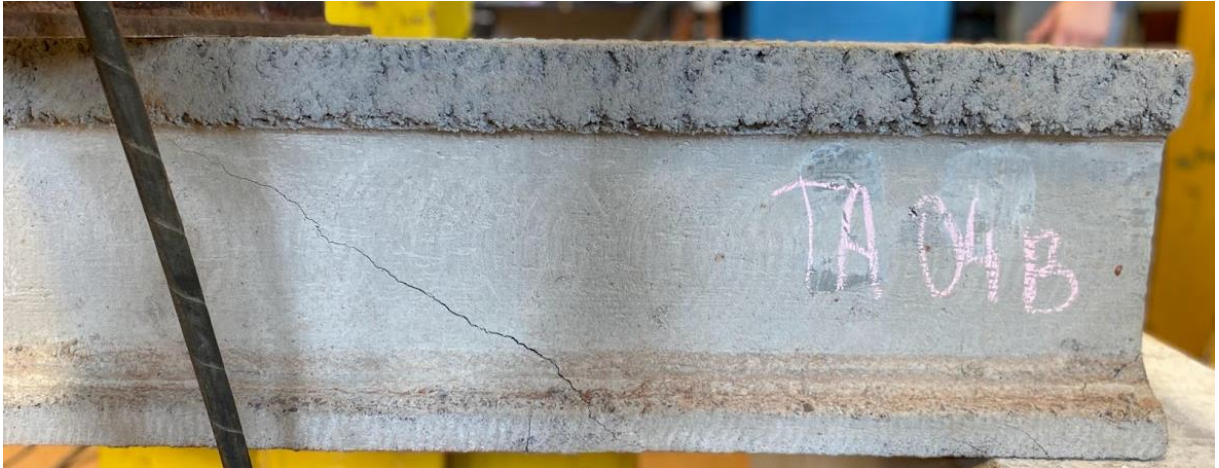
Figura 4.55: Relação Força \times Deslocamento TA 04 – LADO B.



Fonte: Autora (2024).

Para complementar a análise gráfica, a Figura 4.56 apresenta a fissura após a ruptura da peça, auxiliando na identificação do mecanismo de ruptura.

Figura 4.56: Fissura identificada na ruptura da peça TA 04 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento da fissura permaneceu na diagonal, indicando fissuração por cisalhamento na borda inferior, que se estende pela nervura e o esmagamento do concreto na borda superior, também devido ao cisalhamento. No entanto, observa-se na borda inferior apoiada fissuração indicativa de ruptura por esforços de compressão concentrados.

A peça TA 05 – Lado A, posicionada para o ensaio está apresentada na Figura 4.57.

Figura 4.57: TA 05 – Lado A, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) TA05 – Lado A

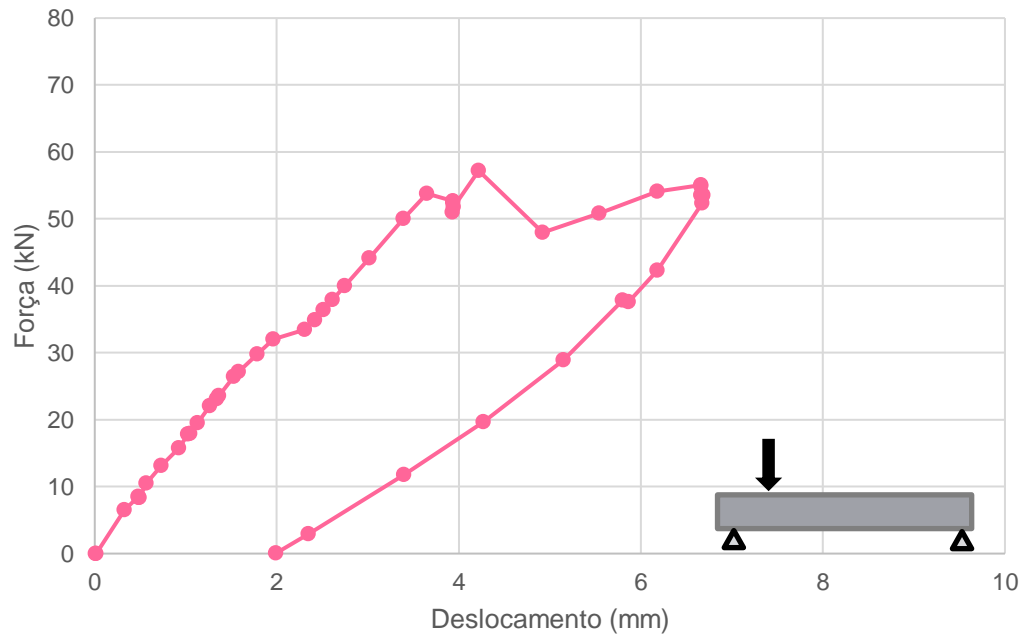


b) Peça posicionada para ensaio



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.58 ilustra a relação entre a força aplicada no atuador e o deslocamento medido pelos transdutores para a terça alveolar TA 05 – Lado A.

Figura 4.58: Relação força \times deslocamento da TA 05 – Lado A.

Fonte: Autora (2024).

Para auxiliar na compreensão do comportamento gráfico, a Figura 4.59 apresenta as fissuras identificadas após ruptura da peça.

Figura 4.59: Fissura identificada na ruptura da peça TA 05 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

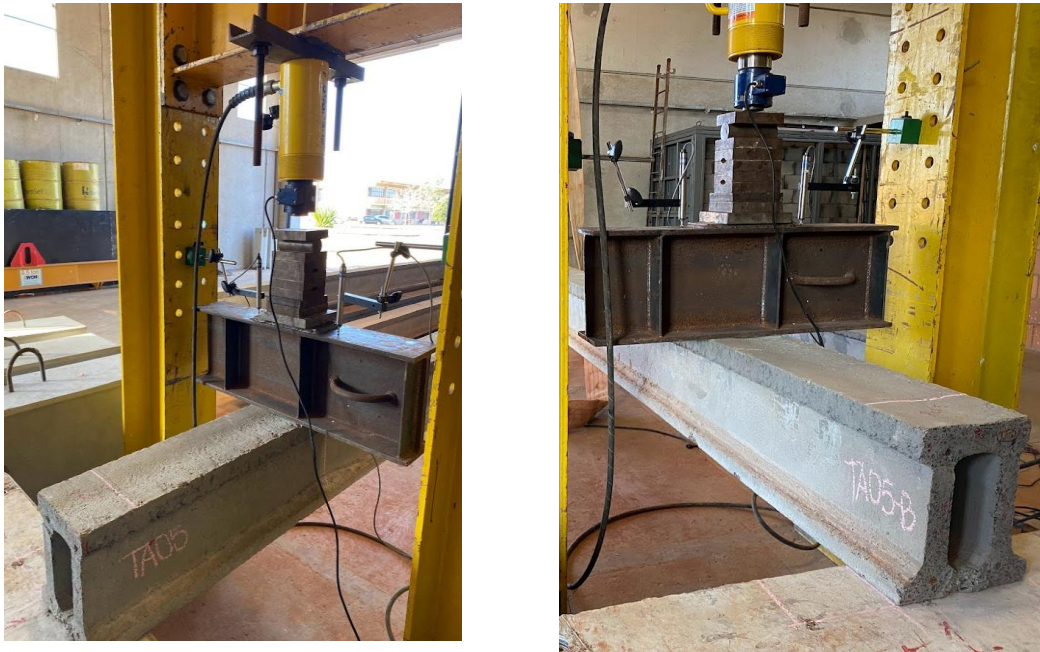
A fissuração na terça se manifesta inicialmente por flexão na borda inferior, seguida por cisalhamento na nervura e estende-se como falha por esmagamento do concreto na borda superior devido ao cisalhamento. Além disso, são observadas fissurações por cisalhamento na borda inferior apoiada, indicativas de “bursting”.

A Figura 4.60 apresenta a outra extremidade da TA 05, o Lado B, onde não há furo executado no processo produtivo.

Figura 4.60: TA 05 – Lado B, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) TA 05 – Lado B.

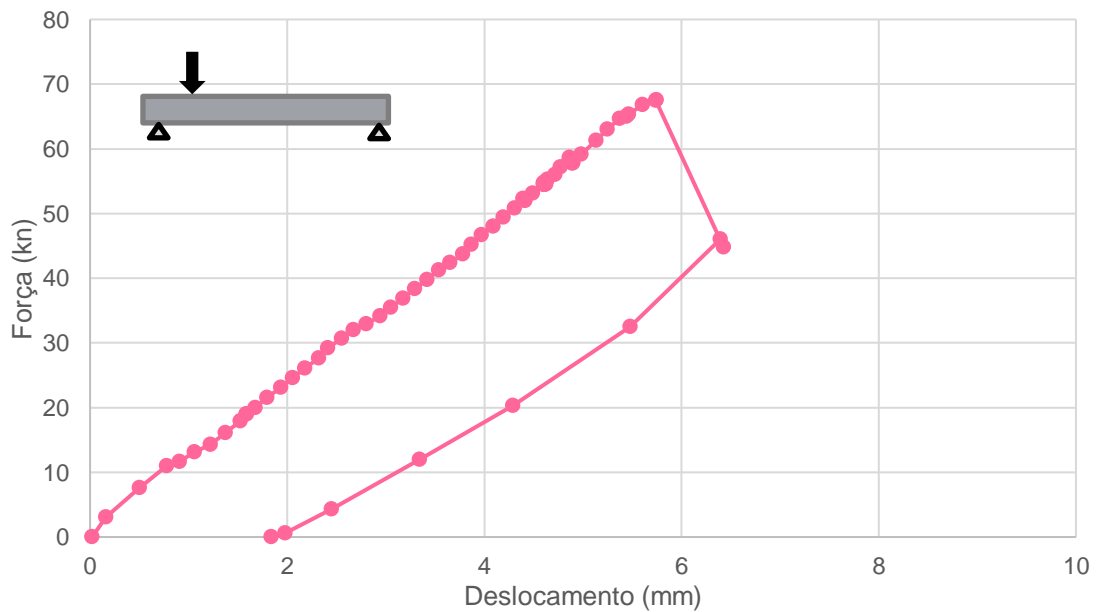
b) Peça posicionada para ensaio.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.61 apresenta a relação entre a força aplicada no atuador e o deslocamento obtido nos transdutores da terça alveolar TA 05 – Lado B.

Figura 4.61: Relação força \times deslocamento da TA 05 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Para proporcionar uma compreensão mais clara do comportamento da peça, a fissura característica após a ruptura da TA 05 – Lado B está ilustrada na Figura 4.62.

Figura 4.62: Fissura identificada na ruptura da peça TA 05 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Apesar de ser uma fotografia bem iluminada, a Figura 4.62 apresenta a fissura de ruptura de forma sutil, quase imperceptível. No entanto, é possível observar que a ruptura ocorreu por flexão na borda inferior, cisalhamento na nervura e uma fissura na borda inferior, que ficou no apoio, característica de “bursting”.

A peça TA 06– Lado A, está apresentada na Figura 4.63.

Figura 4.63: TA 06 – Lado A, posicionada para o ensaio de resistência a força cortante.

a) TA 06 – Lado A.

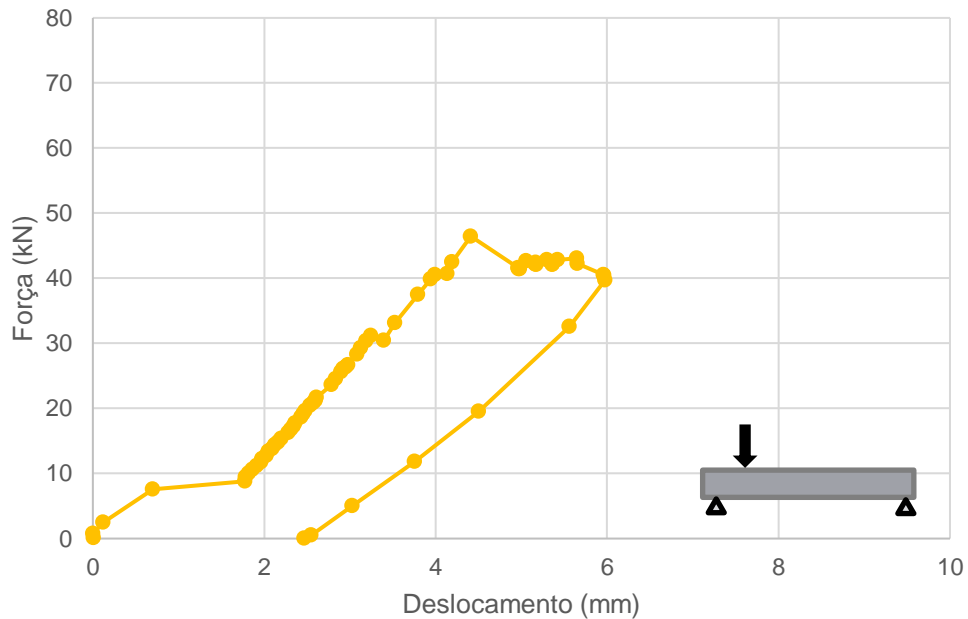


b) Peça posicionada para ensaio.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.64 representa o comportamento da peça TA 06 – Lado A, durante a realização do ensaio.

Figura 4.64: Relação força \times deslocamento da TA 06 – Lado A.

Fonte: Autora (2024).

A fissuração na peça ocorreu por flexão na borda inferior, cisalhamento na nervura e se estendeu a borda superior devido ao cisalhamento, conforme observado pela Figura 4.65.

Figura 4.65: Fissura identificada na ruptura da peça TA 06 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

A outra extremidade da peça TA 06 – Lado B, tem o posicionamento para ensaio ilustrado na Figura 4.66.

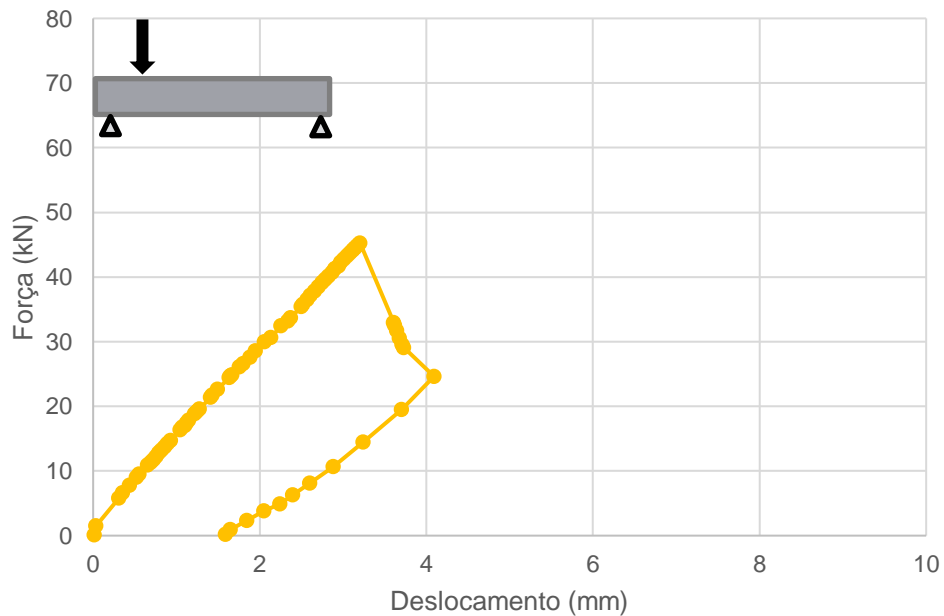
Figura 4.66: TA 06 – Lado B, posicionada para ensaio de resistência a força cortante.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos pelo comportamento da peça submetida ao ensaio de resistência ao cisalhamento estão expressos graficamente na Figura 4.67.

Figura 4.67: Relação força x deslocamento da TA 06 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

O comportamento das fissuras, além de graficamente expresso também está evidenciado na Figura 4.68.

Figura 4.68: Fissura identificada na ruptura da peça TA 06 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

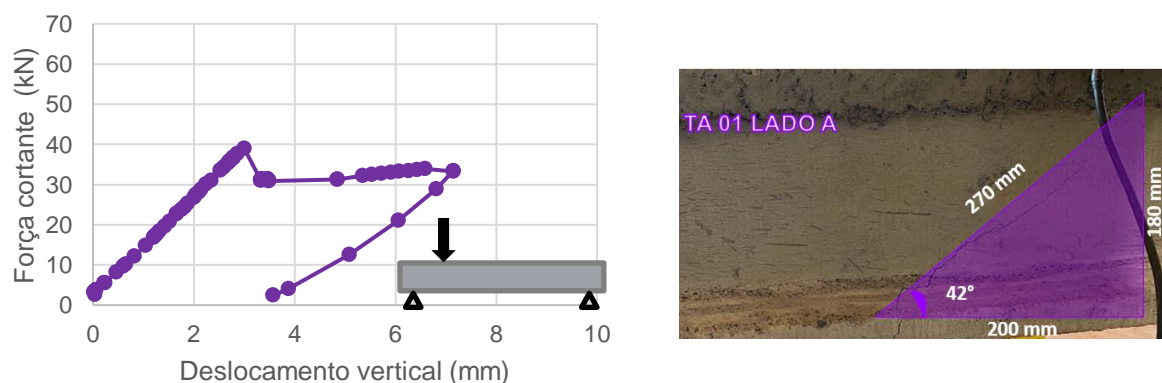
Analisando a fissuração, há fissura por flexão na borda inferior, cisalhamento na nervura e cisalhamento na borda superior. Característica da ruptura por flexo cortante.

4.3.2 Relação entre força cortante e deslocamento vertical e angulação das fissuras

Foi estabelecida uma relação entre a força cortante obtida conforme a aplicação de carga pelo atuador e o deslocamento vertical medido pelos LVDTs. Essa relação foi explicitada para cada uma das terças por meio de gráficos.

Ainda, foram medidos os comprimentos de cada lado das fissuras para determinar a angulação de fissuração de cada terça alveolar. Os resultados obtidos com o ensaio da TA 01 – Lado A está expressa na Figura 4.69.

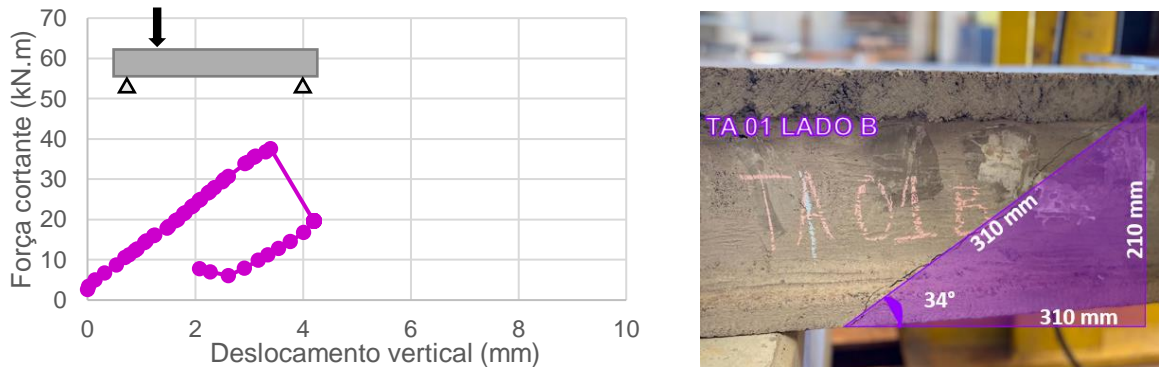
Figura 4.69: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 01 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Em sua outra extremidade, a TA 01 – Lado B está graficamente representada na Figura 4.70.

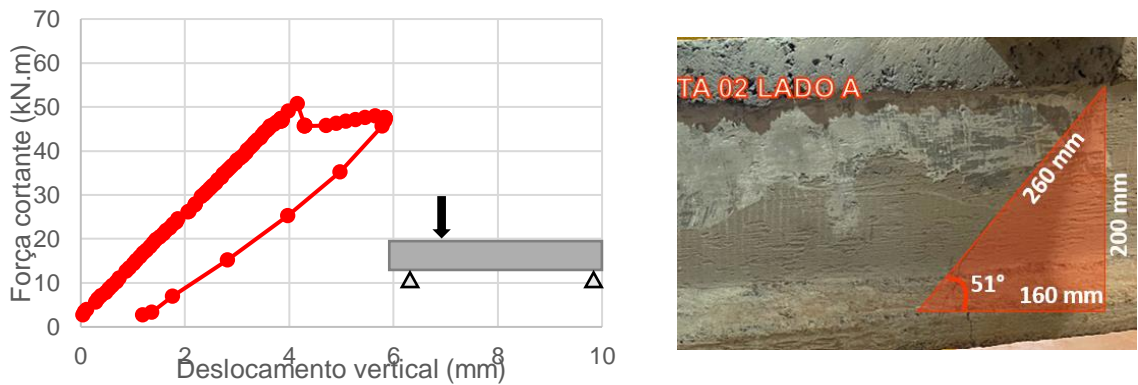
Figura 4.70: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 01 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos para a TA 02 – Lado A, estão dispostos por meio da Figura 4.71.

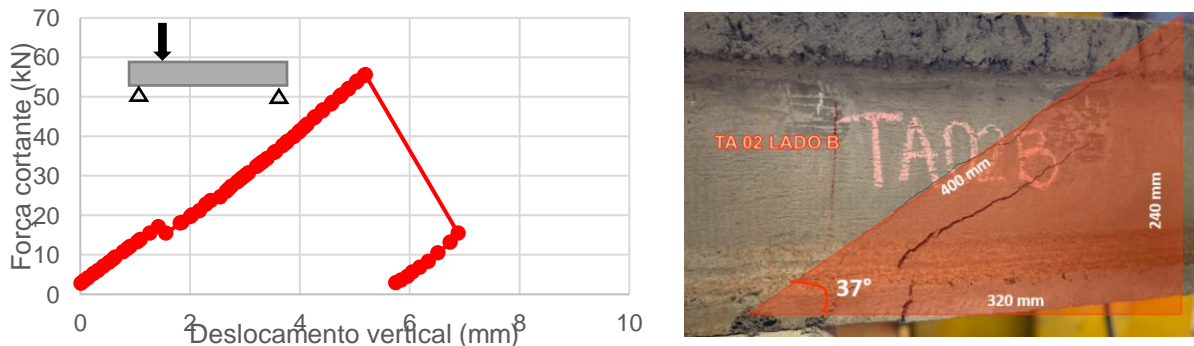
Figura 4.71: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 02 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

As relações oriundas dos resultados experimentais obtidos para a segunda extremidade da peça TA 02, denominado Lado B, está apresentado na Figura 4.72.

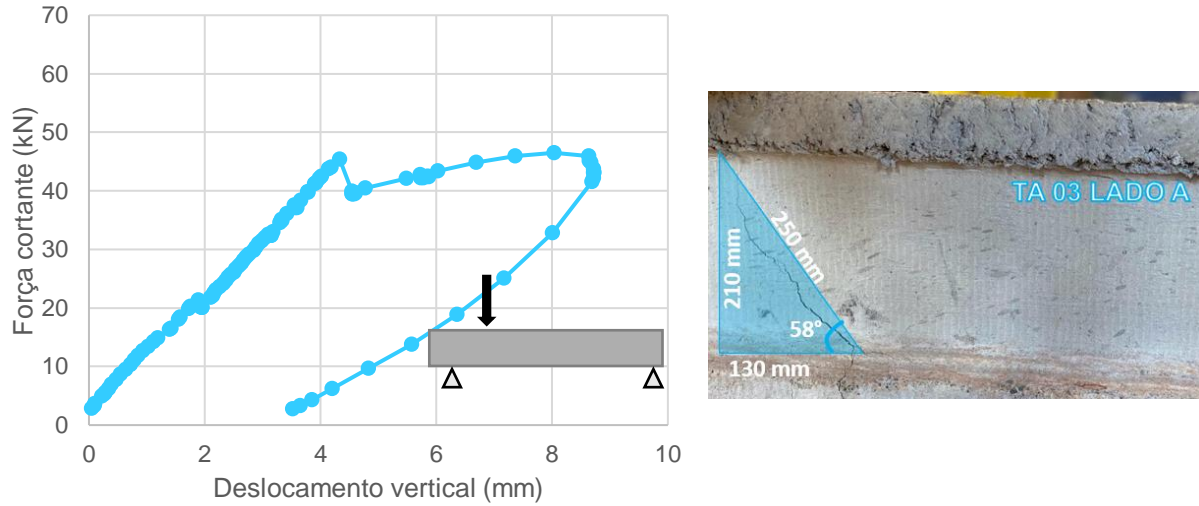
Figura 4.72: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 02 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.73 apresenta os resultados obtidos para a TA 03 – Lado A.

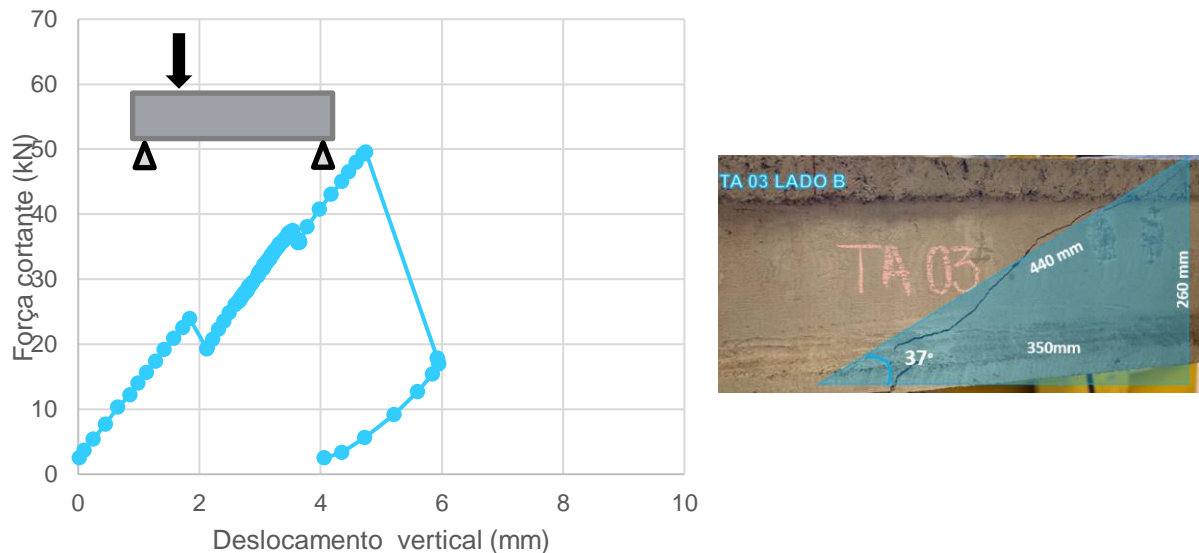
Figura 4.73: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 03 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.74 retrata os resultados para a segunda extremidade da terça alveolar 03, Lado B.

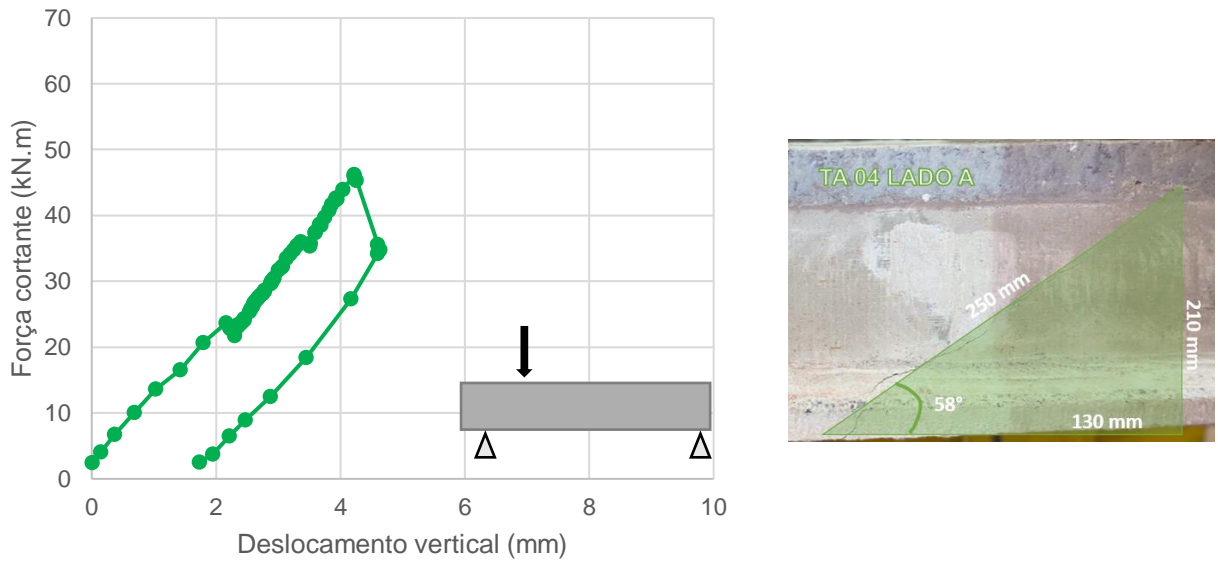
Figura 4.74: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 03 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 4.75 apresenta graficamente a relação entre a força cortante aplicada e o deslocamento vertical medido durante o ensaio da terça alveolar 04 na extremidade "Lado A" e o resultado obtido com a triangulação da fissura, que encontrou o ângulo de fissuração para a peça.

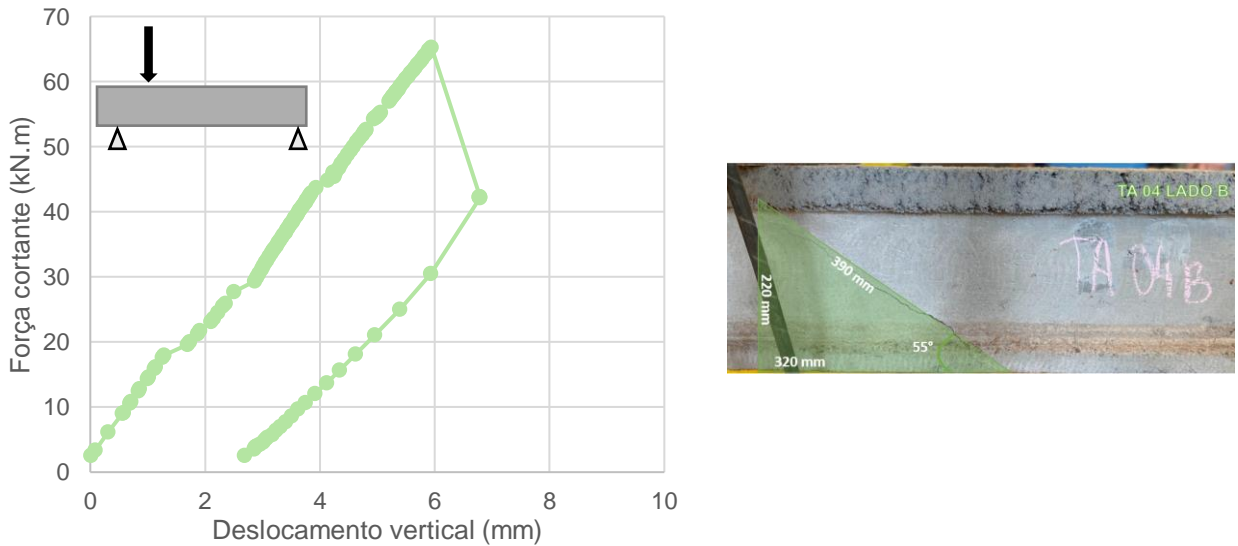
Figura 4.75: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 04 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Em sua segunda extremidade, sem a presença de furo, a relação identificada de força cortante e deslocamento vertical referente a TA 04 – Lado B, está representada graficamente por meio da Figura 4.76.

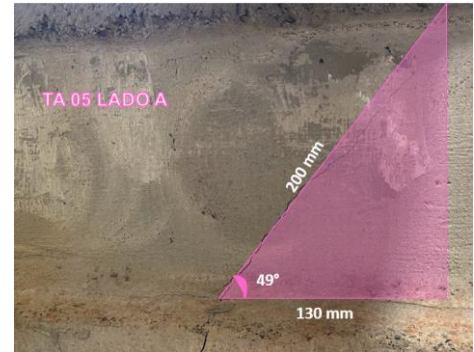
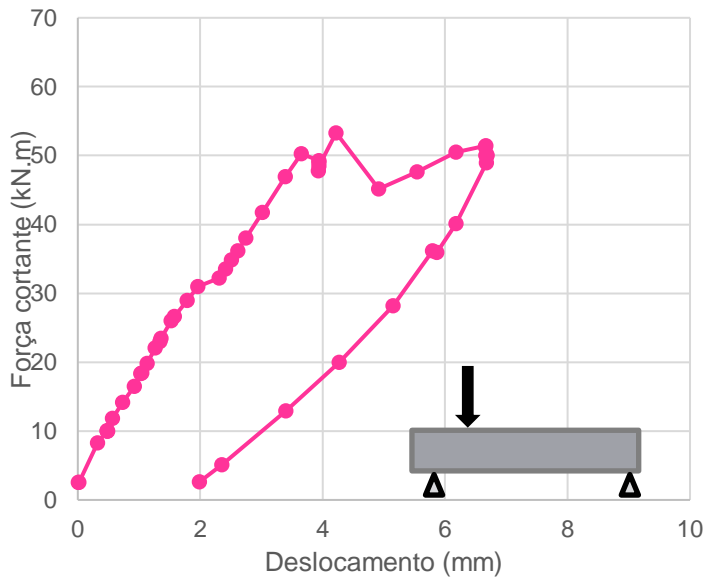
Figura 4.76: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 04 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Para a TA 05 – Lado A, a relação obtida para força cortante e deslocamento, assim como a triangulação para encontrar o ângulo da fissura de ruptura está apresentada na Figura 4.77.

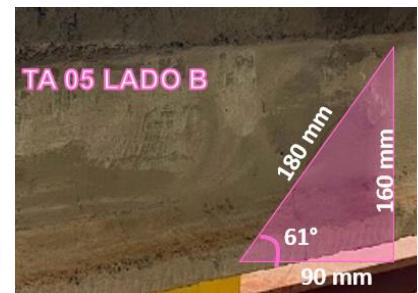
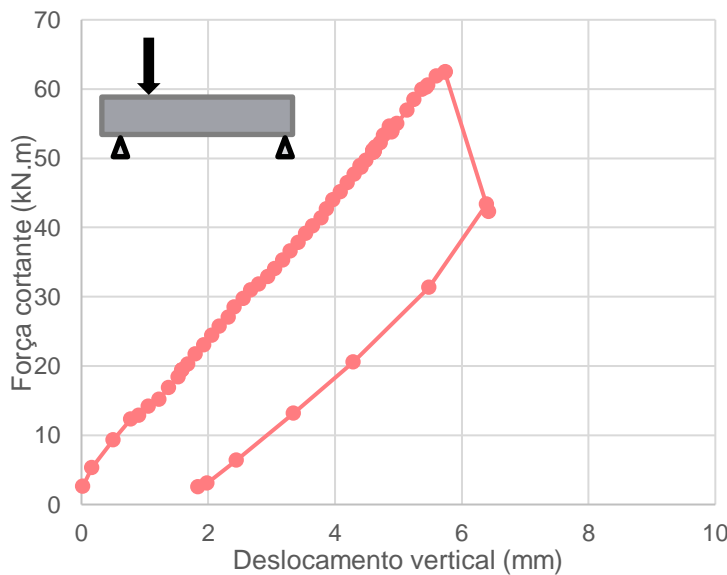
Figura 4.77: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 05 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Em sua segunda extremidade ensaiada, o Lado B da TA 05, a relação entre força cortante e deslocamento vertical obtido no ensaio e a triangulação para angulação da fissura está graficamente apresentado pela Figura 4.78.

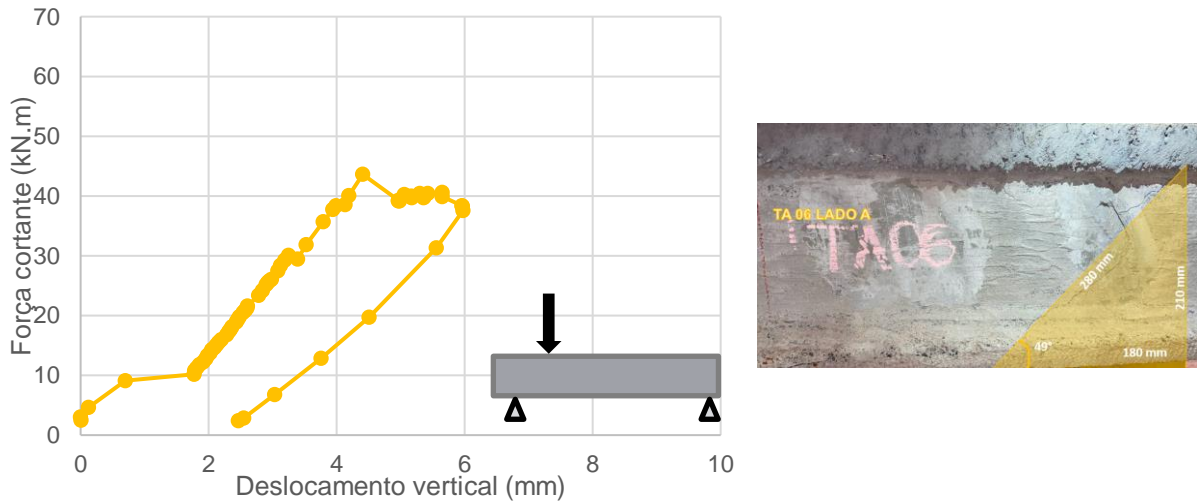
Figura 4.78: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 05 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Por fim, a relação estabelecida para a última terça alveolar. A relação para a TA 06 – Lado A está apresentada na Figura 4.79.

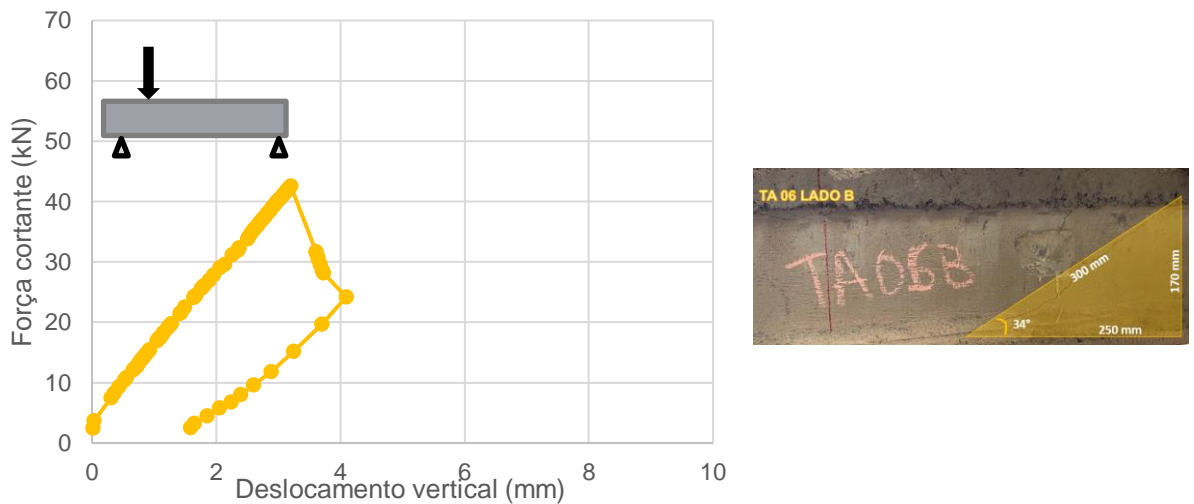
Figura 4.79: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 06 – Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Para sua segunda extremidade, a TA 06 – Lado B está apresentada na Figura 4.80.

Figura 4.80: Relação entre força e deslocamento e angulação da fissura TA 06 – Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Após estabelecer a relação entre a força cortante aplicada e o deslocamento resultante em cada uma das peças, torna-se relevante comparar todas as amostras. A relação entre as extremidades denominadas como “Lado A” está apresentada na Figura 4.81.

4.3.3 Mecanismos de ruptura das peças

Com o ensaio de resistência à força cortante, foram identificadas fissuras de ruptura por diferentes mecanismos. Para agrupar os mecanismos observados, tem-se a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Mecanismo de ruptura identificado para as terças alveolares.

TERÇA	LADO	Fissura identificada na ruptura
TA01	A	Flexo-cortante
TA01	B	Força cortante
TA02	A	Flexo-cortante
TA02	B	Tração diagonal
TA03	A	Flexo-cortante
TA03	B	Tração diagonal
TA04	A	Força cortante
TA04	B	Força cortante
TA05	A	Flexo-cortante
TA05	B	Flexo-cortante
TA06	A	Flexo-cortante
TA06	B	Flexo-cortante

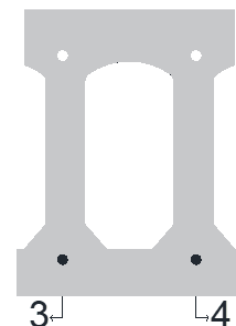
Fonte: Autora (2024).

4.3.4 Escorregamento das cordoalhas

O afundamento das cordoalhas foi medido antes e depois do ensaio de cisalhamento, com auxílio de um paquímetro e está disposto na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Escorregamento das cordoalhas.

TERÇA	LADO	antes do ensaio		depois do ensaio	
		3 (mm)	4 (mm)	3 (mm)	4 (mm)
TA01	A	2,40	1,70	2,90	1,90
TA01	B	1,90	2,22	2,40	3,10
TA02	A	1,70	1,70	2,10	2,10
TA02	B	1,60	2,40	4,60	4,40
TA03	A	1,40	1,70	3,70	3,40
TA03	B	2,00	2,00	3,30	3,20
TA04	A	0,50	2,00	1,00	2,50
TA04	B	2,50	0,00	3,00	1,40
TA05	B	1,40	2,40	2,30	3,90
TA06	A	1,60	2,80	2,40	2,90
TA06	B	2,40	1,40	3,10	2,30



Fonte: Autora (2024).

4.4 VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DAS TERÇAS ALVEOLARES PARA O MECANISMO FLEXO-CORTANTE

A Tabela 4.10 dispõe dos resultados obtidos ao calcular a força resistente de cálculo $V_{Rk,fl}$ das Terças Alveolares, em conformidade com o item 7.4.2 da NBR 14861 (2022), considerando o valor de $f_{ctk,inf}$ calculado a partir dos ensaios.

Tabela 4.10: Valores de $V_{Rk,fl}$ considerando $f_{ctk,inf}$ experimental.

Terça	V_{Rk} (kN)*	$V_{c,1}$	$V_{p,1}$	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	k	ρ_1	$\sum bw$ (m)	A_s (m ²)	N_p (kN)	d (m)	σ_{cp1} (MPa)	A_c (m ²)
TA 01	55	0,03	0,03	2,70	1,35	0,01	0,08	0,000202	318,28	0,25	9,46	0,03
TA 02	59	0,03	0,03	2,69	1,36	0,01	0,09	0,000202	323,34	0,24	8,65	0,04
TA 03	49	0,02	0,03	2,01	1,36	0,01	0,08	0,000202	319,17	0,24	9,71	0,03
TA 04	45	0,02	0,03	1,71	1,36	0,01	0,08	0,000202	320,05	0,24	9,37	0,03
TA 05	43	0,02	0,03	1,39	1,36	0,01	0,09	0,000202	320,78	0,24	8,93	0,04
TA 06	56	0,03	0,03	2,52	1,35	0,01	0,08	0,000202	319,19	0,25	9,52	0,03

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Para uma análise detalhada dos valores teóricos obtidos, é possível consultar o Apêndice C deste trabalho.

4.5 VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DAS TERÇAS ALVEOLARES PARA O MECANISMO DE TRAÇÃO-DIAGONAL

A Tabela 4.11 dispõe dos resultados obtidos ao calcular a força resistente de cálculo $V_{Rk,c}$ das Terças Alveolares – Lado A, em conformidade com o item 7.4.3 da NBR 14861 (2022), considerando o valor de $f_{ctk,inf}$ calculado a partir dos ensaios.

Tabela 4.11: Valores de $V_{Rk,c}$ considerando $f_{ctk,inf}$ experimental para extremidade lado A.

Terça	$V_{Rk,c}$ (kN)*	I (m ⁴)	bw (m)	S (m ³)	h_{pc}	h	α_{pc}	l_{bpt} (m)	σ_{cp} (MPa)	$f_{ctk,inf}$ (MPa)
TA 01	34	0,000289	0,077	0,002258	0,062	0,27	0,21	0,83	9,46	2,70
TA 02	44	0,000327	0,089	0,002258	0,065	0,27	0,21	0,83	8,65	2,69
TA 03	27	0,000281	0,079	0,002258	0,051	0,27	0,21	0,78	9,71	2,01
TA 04	24	0,000281	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,21	0,78	9,37	1,71
TA 05	22	0,000281	0,085	0,002258	0,061	0,27	0,22	0,78	8,93	1,39
TA 06	32	0,000281	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,19	0,83	9,52	2,52

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Para a extremidade “lado B” os resultados obtidos foram agrupados na Tabela

4.12 em conformidade com o item 7.4.3 da NBR 14861 (2022), considerando o valor de $f_{ctk,inf}$ calculado a partir dos ensaios.

Tabela 4.12: Valores de $V_{Rk,c}$ considerando $f_{ctk,inf}$ experimental para extremidade lado B.

Terça	VRk,c (kN)*	I (m ⁴)	bw (m)	S (m ³)	h _{pc}	h	α _{pc}	l _{bpt} (m)	σ _{cp} (MPa)	f _{ctk,inf} (MPa)
TA 01	39	0,000289	0,077	0,002258	0,062	0,27	0,37	0,48	9,46	2,70
TA 02	50	0,000327	0,089	0,002258	0,065	0,27	0,37	0,48	8,65	2,69
TA 03	31	0,000281	0,079	0,002258	0,051	0,27	0,34	0,47	9,71	2,01
TA 04	29	0,000291	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,34	0,48	9,37	1,71
TA 05	28	0,000301	0,085	0,002258	0,061	0,27	0,36	0,48	8,93	1,39
TA 06	37	0,000285	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,34	0,48	9,52	2,52

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Para uma análise detalhada dos valores teóricos obtidos, é possível consultar o Apêndice C deste trabalho.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão agrupadas as análises pertinentes aos resultados obtidos com o programa experimental. A sequência foi ordenada em conformidade a apresentação dos resultados.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POSITIVA

Com o ensaio de resistência à flexão positiva não destrutivo realizado em cada uma das peças, foram obtidos dados essenciais para a avaliação do comportamento estrutural das terças alveolares. Cabe a análise dos resultados para verificação de seu desempenho estrutural.

5.1.1 Análise do panorama de fissuração e relação entre força e deslocamento

O panorama de fissuração das peças apresentou similaridade no comportamento entre as seis amostras de terças alveolares quando submetidas ao ensaio de resistência a flexão positiva não destrutivo.

Com a aplicação de carga concentrada em dois pontos, as peças apresentaram aparição de fissuras de flexão na borda inferior que se expandiram pela nervura demonstrando a interação do mecanismo de flexo-cortante. Esse comportamento foi observado em 100% dos elementos ensaiados.

Ao avaliar a região de fissuração, nota-se que ficaram concentradas na região onde a carga foi aplicada e não houve comprometimento das peças próximo ao apoio. Nesse instante, as peças não demonstraram fissuras por escorregamento das cordoalhas.

Nas fissuras verticais, que sinalizam a perda de resistência à flexão, as aberturas não excederam 0,2 mm. Já nas fissuras diagonais, que indicam a redução da resistência à força cortante, a abertura máxima observada foi de 0,4 mm, registrada apenas na TA 01. A Tabela 5.1 agrupa a medida de abertura, em milímetros, encontrada nas fissuras de cada terça.

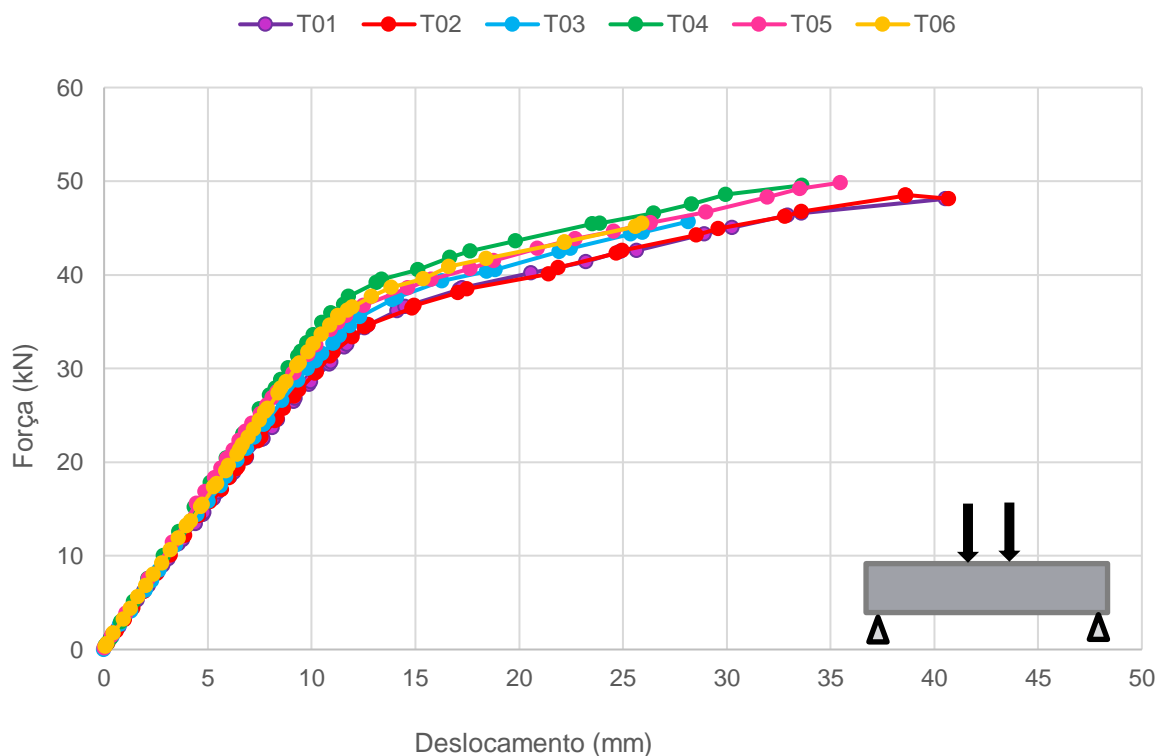
Tabela 5.1: Abertura das fissuras.

Terça	Abertura inicial (mm)	Abertura média (mm)	Abertura final (mm)
TA 01	0,10	0,20	0,40
TA 02	0,10	0,20	0,20
TA 03	0,10	0,15	0,15
TA 04	0,10	0,20	0,20
TA 05	0,10	0,15	0,25
TA 06	0,10	0,15	0,20

Fonte: Autora (2024).

Com relação ao comportamento gráfico das peças, a relação entre força aplicada pelo atuador e o deslocamento medido pelos transdutores, para ambas as seis terças foi agrupado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Relação entre força e deslocamento para as seis terças alveolares.



Fonte: Autora (2024).

Analisando a Figura 5.1, tem-se que a linearidade gráfica das peças foi alterada conforme a aparição das fissuras. Destaca-se que as peças TA 03 e TA 06 foram a que menor apresentaram resistência à força aplicada, enquanto a TA 01 e TA 02 apresentaram maior deslocamento.

A Tabela 5.2 identifica a força máxima registrada durante os ensaios e o deslocamento medido no instante em que as peças demonstram a fissura diagonal que paralisou o ensaio.

Tabela 5.2: Força e deslocamento identificados na mudança de comportamento gráfico.

Terça	Força (kN)	Deslocamento (mm)
TA01	48	41
TA02	48	41
TA03	46	28
TA04	50	34
TA05	50	35
TA06	46	26

Fonte: Autora (2024).

Ao analisar os resultados, tem-se que a força média suportada foi de 48 kN, encontrando um mínimo de 46 kN e máximo de 50 kN, conferindo uma amplitude de 4 kN, correspondente a um desvio padrão de 3,39%.

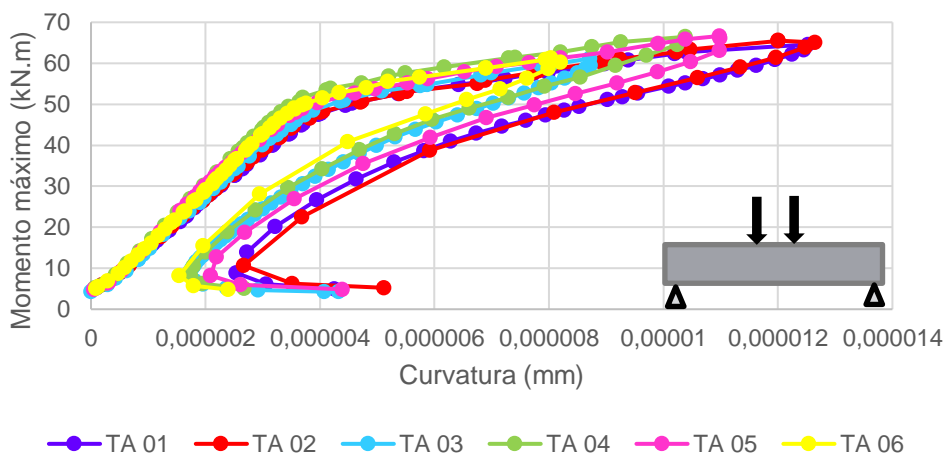
Enquanto o deslocamento médio apresentado foi de 34,17 mm, apresentando o deslocamento máximo de 41 mm e mínimo de 26 mm, representando uma amplitude de 15 mm, que corresponde a um desvio padrão de 16,92%.

Considerando os dados, tem-se que as terças apresentaram comportamento similar no padrão de fissuração e pequenos desvios quanto à resistência a força concentrada aplicada, enquanto apresentou desvios consideráveis entre os deslocamentos medidos.

5.1.2 Análise da relação entre momento fletor e curvatura

Na verificação da relação entre o momento fletor e curvatura calculadas para as peças, tem-se os resultados encontrados disposto na Figura 5.2.

Figura 5.2: Relação entre momento e curvatura encontrado para as terças alveolares.



Fonte: Autora (2024).

Para melhorar o entendimento, os valores encontrados no momento máximo calculado, foram elucidados na Tabela 5.3, que também contempla a flecha medida no instante em que foram calculados o momento máximo e a respectiva curvatura calculada para as seis peças.

Tabela 5.3: Relação entre momento fletor máximo e curvatura calculada para as terças.

Terça	Momento (kN.m)	Flecha (mm)	Curvatura (mm)
TA 01	64,60	40,55	1,25E-05
TA 02	65,54	38,63	1,20E-05
TA 03	61,16	28,15	8,72E-06
TA 04	66,46	33,63	1,04E-05
TA 05	66,66	35,47	1,10E-05
TA 06	61,34	25,93	8,04E-06

Fonte: Autora (2024).

Analisando os dados, tem-se que a variação de momentos varia entre 61,16 kN e 66,66 kN.m, com uma média de 64,21 kN.m. Isso representa um desvio padrão de 2,06 kN.m, sendo em percentual o correspondente a pouco mais que 3%.

O valor encontrado para os momentos está relativamente próximo, sugerindo consistência nas informações, que coincidem com os valores anteriormente apresentados na relação entre força e deslocamento.

A respeito da flecha medida, foi identificada uma variação maior, de 25,93 mm até 40,55 mm, condizente com os valores apresentados de curvatura. Tem-se uma curvatura média de $8,92 \times 10^{-6}$ mm, isso representa um desvio padrão percentual de 19,41% entre as peças.

Em concordância com os resultados analisados na relação entre força aplicada e deslocamento medido, tem-se para a relação entre momento fletor máximo e curvatura que o momento fletor apresentou pequena variação percentual, enquanto os dados de desvio padrão entre a curvatura expressa valores significativos.

5.1.3 Análise do módulo de elasticidade efetivo das peças

Ao analisar a Tabela 4.4 é possível identificar que os valores do momento de inércia (I) variam entre $2,81 \times 10^8$ mm⁴ e $3,27 \times 10^8$ mm⁴, demonstrando uma variação significativa entre as amostras. O momento de inércia das peças sofreu alterações

devido as discrepâncias geométricas identificadas ao desenhar a seção transversal das peças.

A variação da carga aplicada (P) e deformação (f) medida já foram analisadas e são influenciadas pelas propriedades do material assim como pela geometria da seção transversal.

A rigidez à flexão (EI) variou consideravelmente entre as amostras, indo de $1,27 \times 10^{10}$ kN/mm² a $1,41 \times 10^{10}$ kN/mm², essa rigidez à flexão representa a medida da capacidade da terça de resistir à deformação sob carga.

O quociente entre o valor de rigidez à flexão pelo momento de inércia da peça resulta no módulo de elasticidade (E), que variou entre 39 GPa e 49GPa. O módulo de elasticidade (E) das peças apresentou uma diferença percentual de 20,41%, sendo um valor de variação considerável entre as peças.

Essa variação no módulo de elasticidade pode ser atribuída a presença de defeitos e imperfeições das peças. Ao considerar a variação entre o momento de inércia calculado para cada uma das peças, tem-se uma diferença percentual de 14,05% entre as seis amostras.

5.1.4 Análise da resistência à tração média

Quanto a resistência à tração média do concreto, foram encontrados para as terças alveolares valores que variaram entre 1,98 MPa e 3,85 MPa. O valor da média encontrada foi de 3,10 MPa, mediana de 3,235 MPa, desvio padrão correspondente a 0,71 MPa e uma variação percentual de 48,6% entre as seis amostras de terças alveolares.

Considerando que as peças foram fornecidas por um mesmo fabricante, a variação percentual pode ser explicada por variações na mistura e dosagem do concreto, homogeneidade da mistura, condições de cura, armazenamento, transporte ou mesmo fatores ambientais, tais como temperaturas e umidade diferentes, uma vez que é sabido que as peças foram concretadas em dias diferentes.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE

Com o ensaio de resistência à força cortante realizado em cada uma das peças, foram obtidos dados essenciais para a avaliação do comportamento estrutural das terças alveolares. Cabe a análise dos resultados para verificação de seu desempenho estrutural.

5.2.1 Análise da relação entre força e deslocamento e fissuração das peças

Para evidenciar os valores de força máxima aplicada pelo atuador (até o rompimento da peça) e o deslocamento máximo registrado pelos transdutores (no instante em que a peça se rompeu) tem-se a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Relação entre força máxima aplicada e deslocamento máximo registrado.

Terça	Força (kN)	Deslocamento (mm)
TA 01A	41	3
TA 01 B	40	4
TA 02 A	54	4
TA 02 B	60	6
TA 03 A	48	4
TA 03 B	53	5
TA 04 A	49	4
TA 04 B	71	6
TA 05 A	55	6
TA 05 B	68	5
TA 06 A	46	4
TA 06 B	45	3

Fonte: Autora (2024).

As forças aplicadas variaram de 40 kN, na TA 01 B até 71 kN na TA 04 B, essa variação percentual entre a força máxima e mínima representa aproximadamente 77,5%. Este percentual é significativo.

Ao analisar as peças, as menores forças resistidas foram pela TA 01 e TA 06, ambas extremidades. A TA 01 apresentou a menor força resistida de todas, sendo TA 01A: 41 kN, TA 01B: 40 kN. Como essa diferença entre a terça alveolar 01 ficou discrepante, pode-se interpretar um desvio de padrão nessa peça.

As demais terças, TA 02, TA 03, TA 04 e TA 05, apresentaram forças entre 48 kN e 55 kN, resultados relativamente próximos. Enquanto a extremidade lado B da

TA 02, TA 04 e TA 05 resistiram a esforços maiores, entre 60 kN e 71 kN.

Entre extremidades, tem-se uma variação na força resistida para cada peça, essa variação está apresentada na Tabela 5.5.

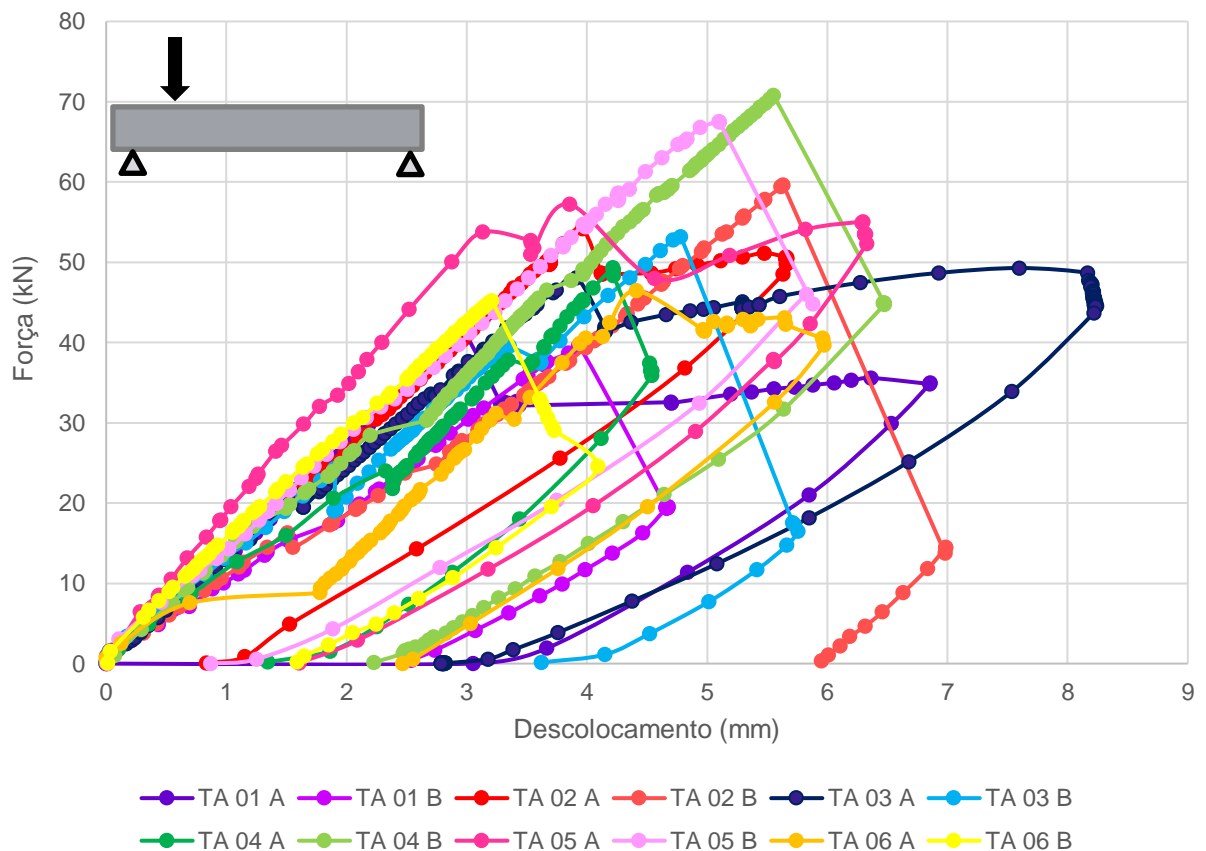
Tabela 5.5: Variação na força resistida entre extremidades.

Terça	Força resistida entre extremidades (kN)	Variação na força resistida entre extremidades (kN)
TA 01	41 – 40	1
TA 02	54 – 60	6
TA 03	48 – 53	5
TA 04	49 – 71	22
TA 05	55 – 68	13
TA 06	46 – 45	1

Fonte: Autora (2024).

A relação gráfica mostrou comportamento diferente entre ambas as extremidades de uma só peça. Ao agrupar os doze resultados obtidos, tem-se o gráfico apresentado na Figura 5.3.

Figura 5.3: Relação entre força e deslocamento para todas as terças em ambas as extremidades.

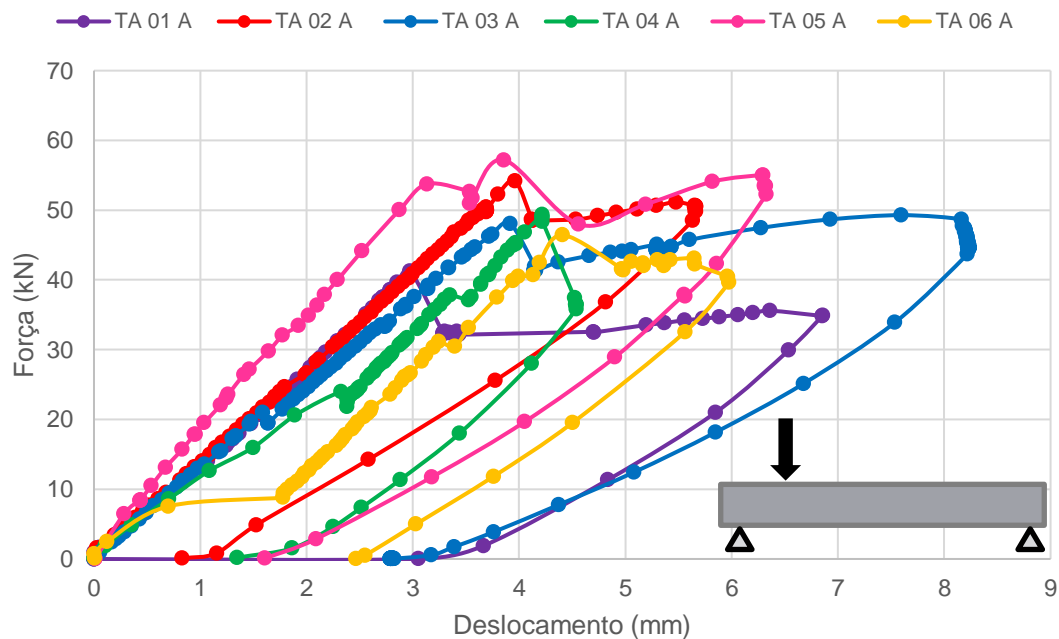


Fonte: Autora (2024).

A interpretação do gráfico é dificultada devido a quantidade de informação disponível, mas é possível interpretar que não houve similaridade no comportamento gráfico das peças e uma grande variação entre força resistida entre elas.

Separando o gráfico por extremidades, tem-se na Figura 5.4 a relação estabelecida para as seis terças alveolares – lado A.

Figura 5.4: Relação entre força e deslocamento das peças extremidade Lado A.



Fonte: Autora (2024).

Quando avaliada apenas a extremidade “lado A” é observada similaridade entre o comportamento gráfico das peças, embora seja identificada uma discrepância nos valores obtidos, os comportamentos gráficos assemelham-se entre si.

Analisando valores estatísticos das forças máximas suportadas pelas terças, tem-se força média de 48,83 kN, mediana de 51,5 kN, variância de 19,95, desvio padrão de 4,47 kN, e quanto ao intervalo, tem-se a diferença entre o maior e menor valor de 14 kN.

O valor máximo de força resistida em extremidade “lado A” foi na TA 05 A, que resistiu a aplicação de 55 kN, enquanto o valor mínimo encontrado foi para a amostra TA 01 A, que resistiu a 41 kN, equivalente a uma variação percentual de 34,15%.

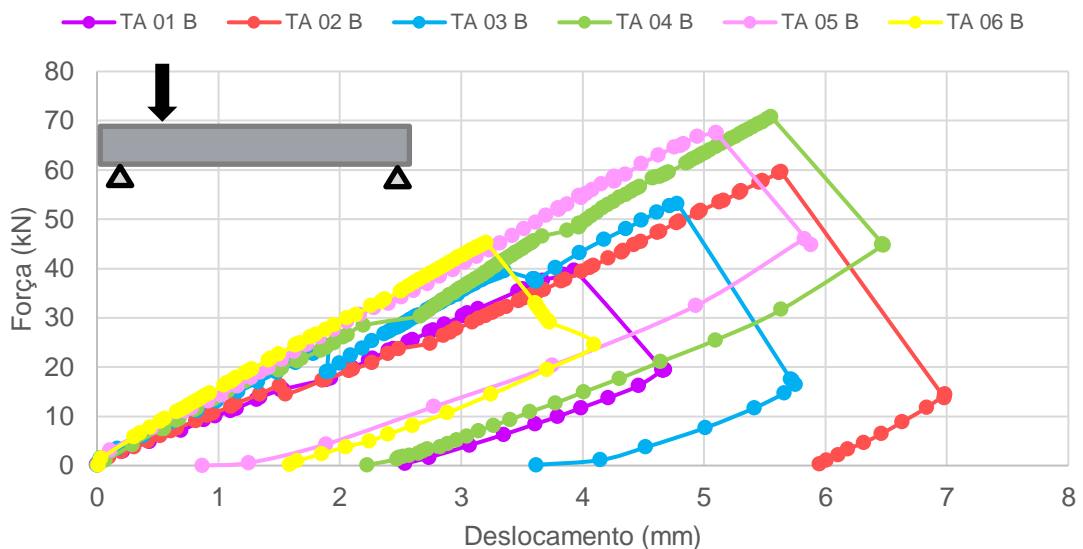
A variação percentual na resistência das peças pode ser justificada pela presença do furo, que pode resultar em um deslocamento maior para uma determinada carga aplicada, o que pode ser observado na variação nos valores de

deslocamento entre as amostras. Ainda, como foram observadas inconsistências no processo de fabricação, uma vez que os furos não foram feitos de maneira precisa e uniforme em todas as peças, resultando em variações na resistência das peças.

Quanto aos deslocamentos observados, o deslocamento máximo foi observado na TA 05 A com 6 mm de deslocamento, enquanto o deslocamento mínimo foi observado em duas peças, TA 01 A e TA 06 A apresentaram deslocamento de 3 mm. Uma variação percentual equivalente a 100%.

Com relação a extremidade íntegra das peças, que não possui furo, o comportamento gráfico está ilustrado na Figura 5.5.

Figura 5.5: Relação entre força e deslocamento das peças extremidade Lado B.



Fonte: Autora (2024).

Analisando o comportamento gráfico das peças na extremidade “lado B” é identificada similaridade no comportamento, apesar de uma discrepância ainda maior nos valores de força resistidos.

Em uma análise estatística, tem-se um valor médio das forças de 59,4 kN, mediana de 60 kN, variância de 140,816 que leva a um desvio padrão de 11,86 kN e o intervalo entre a força máxima encontrada de 71 kN (TA 04 B) para a mínima de 45 kN (TA 06 B), foi de 26 kN, representando uma variação percentual de 57,78%.

Com relação aos deslocamentos, o deslocamento máximo foi observado em duas peças, TA 02 B e TA 04 B que apresentaram 6 mm de deslocamento, enquanto a TA 06 B apresentou 3 mm. Uma variação percentual equivalente a 100%.

5.2.2 Análise da relação entre força cortante calculada, deslocamento vertical e angulação das fissuras

Para analisar a relação entre a força cortante calculada e o deslocamento vertical medido, os valores de força máxima obtida e deslocamento máximo foram agrupados na Tabela 5.6.

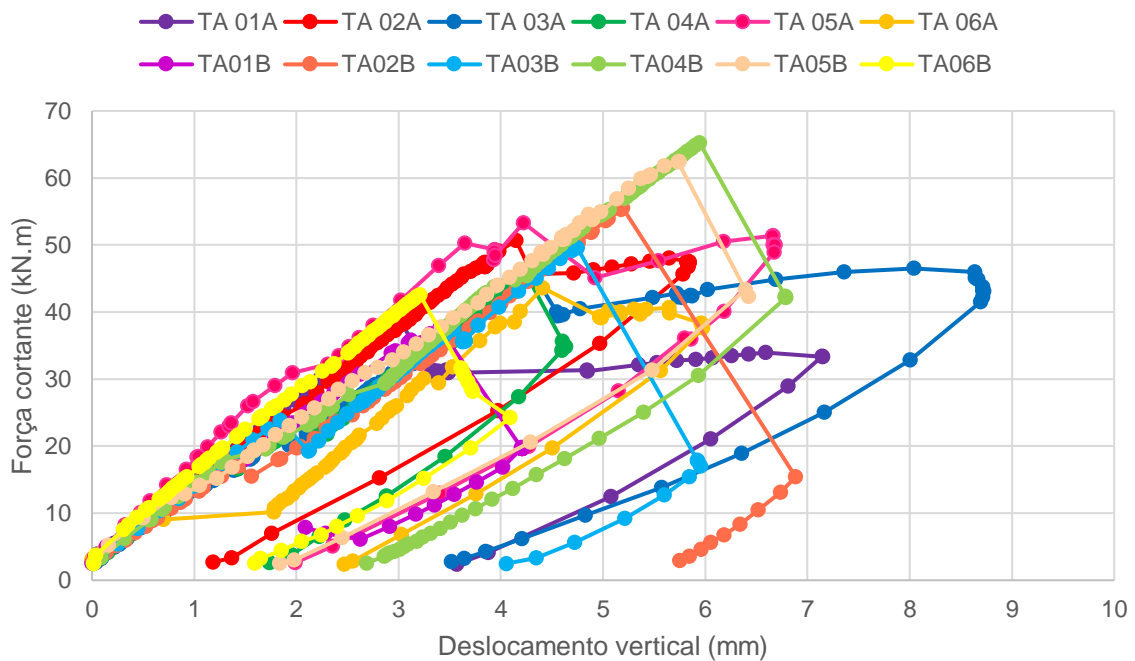
Tabela 5.6: Valor máximo obtido de força cortante e deslocamento vertical para as peças.

Terça	Força cortante (kN)	Deslocamento (mm)
TA01A	39,0	3,0
TA01B	37,6	3,4
TA02A	50,7	4,2
TA02B	55,5	5,2
TA03A	46,5	8,0
TA03B	48,0	4,6
TA04A	46,2	4,2
TA04B	65,3	5,9
TA05A	51,4	6,7
TA05B	62,4	5,7
TA06A	40,6	5,6
TA06B	42,5	3,2

Fonte: Autora (2024).

A relação gráfica do comportamento das peças foi agrupada na Figura 5.6.

Figura 5.6: Relação entre força cortante e deslocamento vertical das peças.



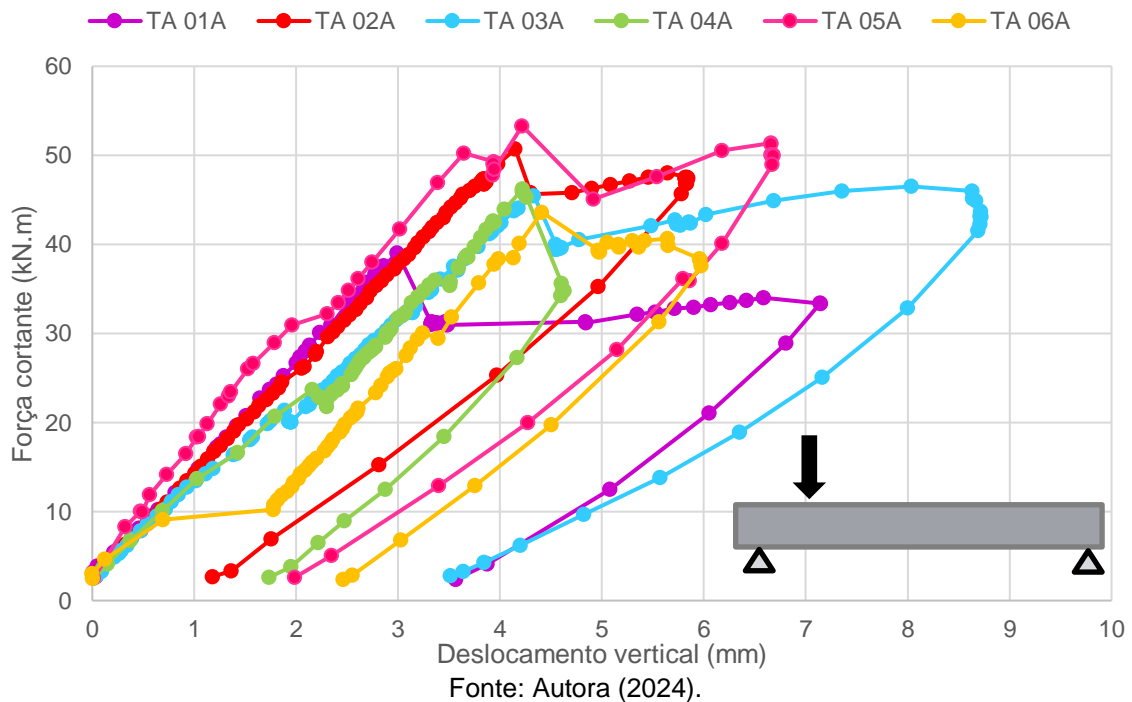
Fonte: Autora (2024).

Em análise estatística dos dados, a menor força cortante obtida foi de 37,6 kN, na TA 01 B, enquanto a maior foi de 65,3 kN, na TA 04 B. A força cortante média encontrada foi de 49,17 kN. Mediana de 47,25 kN. Desvio padrão de 8,87 kN e a variação percentual foi de 73,09%.

Quanto aos deslocamentos, obteve-se uma média de deslocamento vertical de 5 mm, variaram entre 3 mm e 8 mm, que corresponde a uma variação percentual de 166,67%.

Ao analisar cada extremidade separadamente, tem-se a Figura 5.7 que agrupa a relação entre força cortante e deslocamento vertical para todas as peças na extremidade lado A.

Figura 5.7: Relação entre força cortante e deslocamento vertical todas as terças lado A.

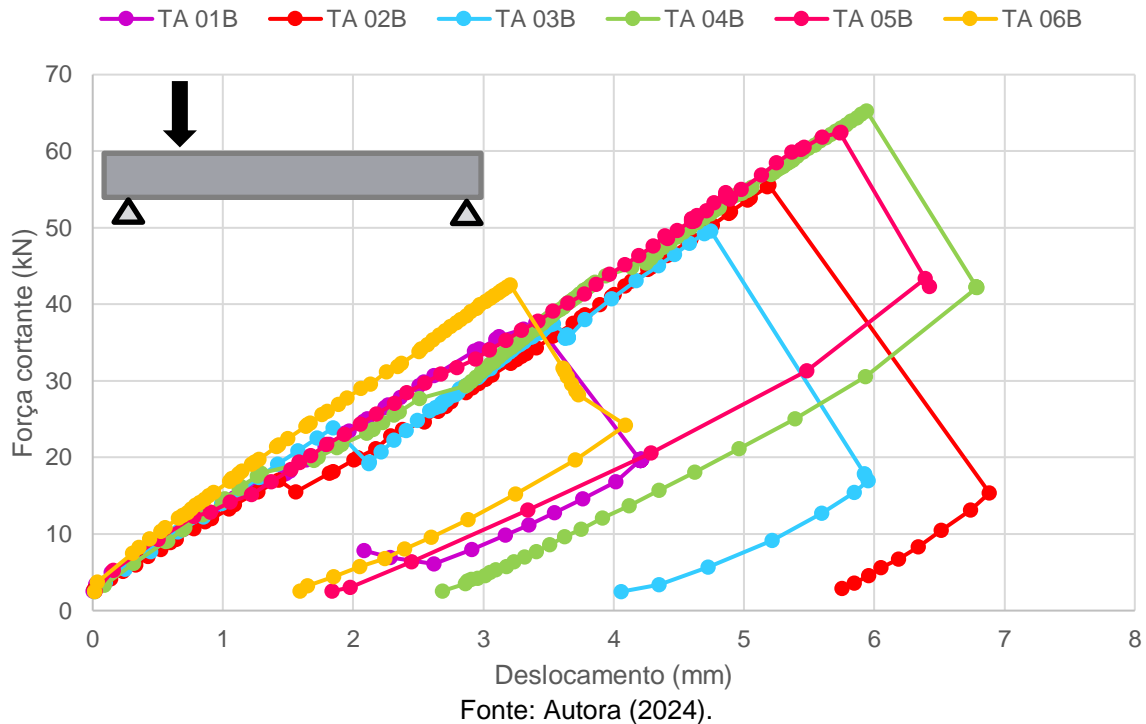


Para o lado A, o maior valor de força cortante obtido foi de 65,3 kN, enquanto o menor valor foi de 37,6 kN, essa diferença representa uma variação percentual de 73,09%.

Para análise dos deslocamentos, o maior valor obtido foi de 8 mm, enquanto o menor foi de 3 mm, a variação percentual de deslocamento representa 166,67%.

As relações correspondentes à extremidade Lado B foram compiladas para permitir uma comparação similar, conforme ilustrado na Figura 5.8.

Figura 5.8: Relação entre força cortante e deslocamento vertical todas as terças lado B.



Para o lado B, o maior valor de força cortante encontrado foi de 62,4 kN e o menor valor de 37,6 kN, uma diferença de 24,8 kN, que representa uma variação percentual de 65,69%. Com relação aos deslocamentos, o maior deslocamento obtido foi de 6,7 mm e o menor de 3,2 mm, onde a variação percentual é de 109,38%.

Com relação a angulação das fissuras identificadas na ruptura, o processo de triangulação e ângulos alfa e beta encontrados estão dispostos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Triangulação e angulação das fissuras identificadas na ruptura das terças.

Terça	Extensão da fissura (cm)			Ângulo Alfa (°)	Ângulo Beta (°)
	Horizontal	Vertical	Hipotenusa		
TA 01 A	20	18	27	42	48
TA 02 A	16	20	26	51	39
TA 03 A	13	21	25	58	32
TA 04 A	30	22	37	36	54
TA 05 A	13	15,2	20	49	41
TA 06 A	18	21	28	49	41
TA 01 B	31	21	31	34	56
TA 02 B	32	24	40	37	53
TA 03 B	35	26	44	37	53
TA 04 B	32	22	39	55	35
TA 05 B	9	16	18	61	29
TA 06 B	25	17	30	34	56

Fonte: Autora (2024).

Observando os valores do ângulo alfa, tem-se que o ângulo alfa variou de 34° a 61° e o valor médio identificado foi de 45°.

5.2.3 Análise do mecanismo de ruptura das peças

Quando analisada a Tabela 4.8, pode-se observar que no lado A, a maioria das rupturas foi identificada como mecanismo de flexo-cortante, com exceção da TA 04 A, que apresentou uma fissura por mecanismo de força cortante.

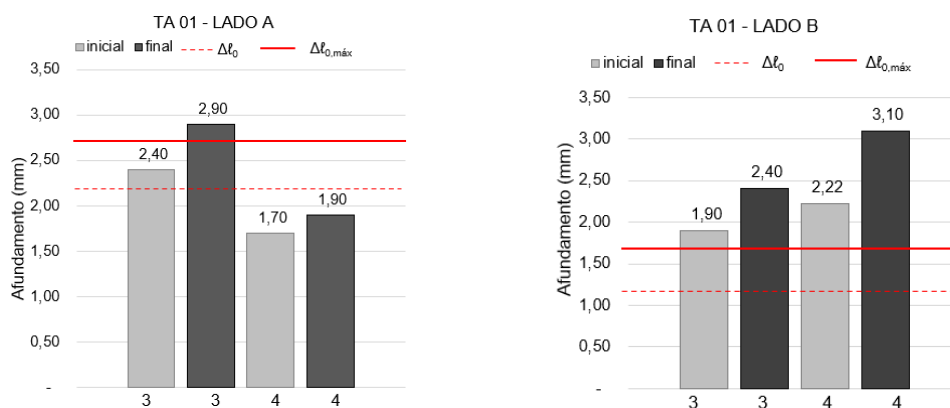
Na extremidade lado B, há mais variação nas identificações das fissuras, onde a cada duas peças foi apresentado um mecanismo de ruptura diferente. TA 01 B e TA 04 B foram identificadas com falha ao mecanismo de força cortante, TA 02 B e TA 03 B com falha por tração diagonal, enquanto TA 05 B e TA 06 B com o mecanismo de flexo-cortante.

Existem algumas possibilidades por trás dessas diferenças, mas é possível descartar a variação nas condições de carregamento, uma vez que todas seguiram o mesmo padrão.

5.2.4 Análise do escorregamento das cordoalhas

Foram estabelecidas relações gráficas para as duas cordoalhas posicionadas na mesa inferior das peças, denominadas como 3 e 4 na Tabela 4.9. Para a TA 01, a representação gráfica do escorregamento das cordoalhas de ambas as extremidades está disposta na Figura 5.9.

Figura 5.9: Afundamento das cordoalhas da TA 01.



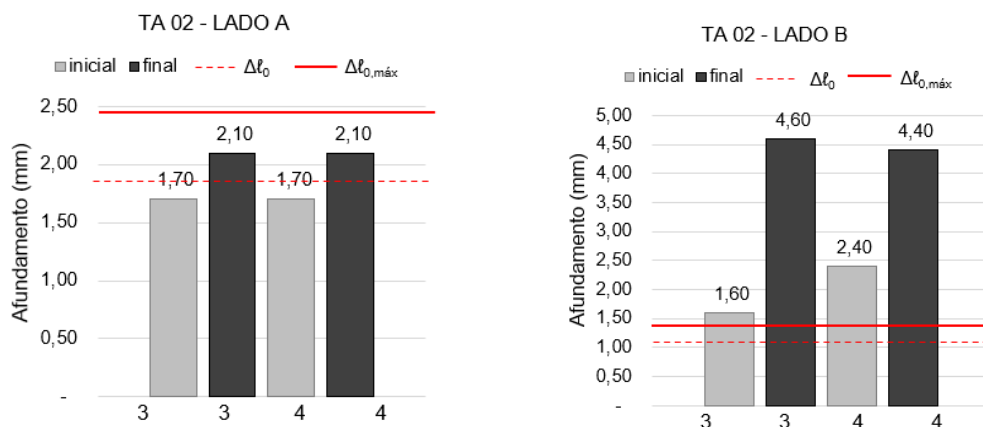
Fonte: Autora (2024).

O afundamento inicial, medido antes do ensaio, está expresso para as duas cordoalhas na cor cinza e o afundamento final está expresso para as duas cordoalhas na cor preta.

A linha tracejada vermelha na horizontal indica o limite inicial de afundamento (Δl_0) calculado e a linha vermelha espessa horizontal indica o limite máximo de afundamento ($\Delta l_{0,m\acute{a}x}$) calculado.

Para a terça alveolar TA 02, ambas as extremidades estão representadas na Figura 5.10.

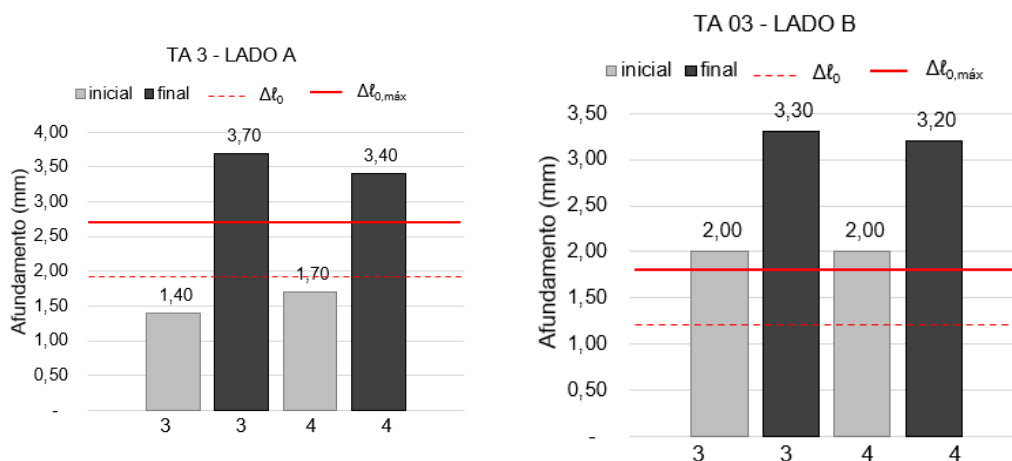
Figura 5.10: Afundamento das cordoalhas da TA 02.



Fonte: Autora (2024).

A mesma relação foi estabelecida para a TA 03 e está expressa na Figura 5.11.

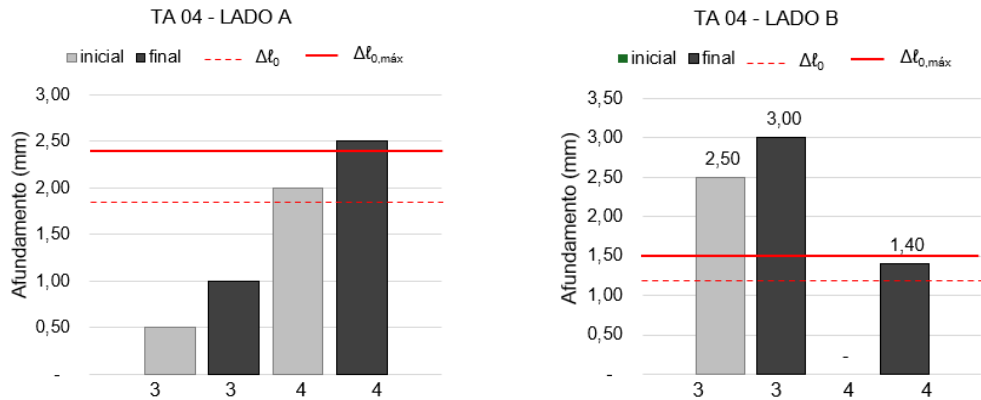
Figura 5.11: Afundamento das cordoalhas da TA 03.



Fonte: Autora (2024).

Para a TA 04, a relação gráfica está estabelecida na Figura 5.12.

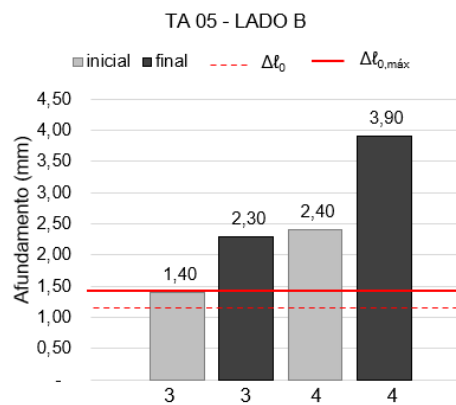
Figura 5.12: Afundamento das cordoalhas da TA 04.



Fonte: Autora (2024).

Para a TA 05 – lado A, não foi possível medir o escorregamento das cordoalhas. Entretanto, para a extremidade lado “B” a relação gráfica foi estabelecida e está disposta na Figura 5.13.

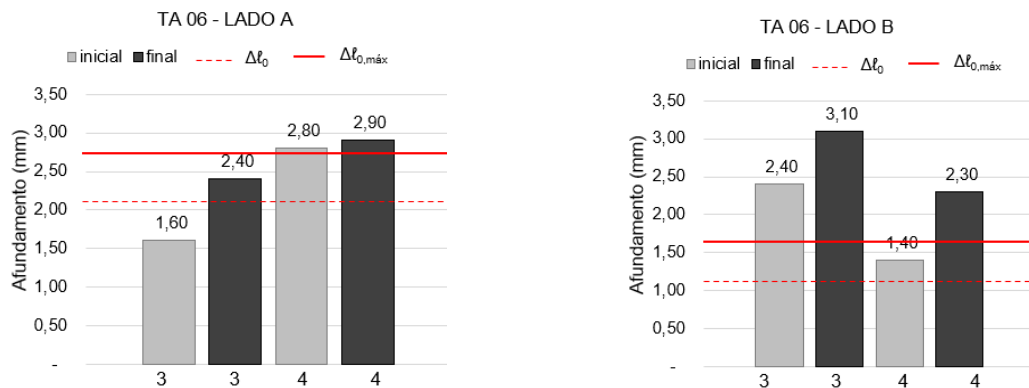
Figura 5.13: Afundamento das cordoalhas da TA 05.



Fonte: Autora (2024).

Para a TA 06, a relação obtida foi expressa na Figura 5.14.

Figura 5.14: Afundamento das cordoalhas da TA 06.



Fonte: Autora (2024).

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Para analisar os resultados experimentais, os valores teóricos para as seis terças alveolares também foram calculados. Os detalhamentos dos procedimentos de cálculo encontram-se no Apêndice A, B e C deste trabalho.

5.3.1 Análise da verificação de cálculo da resistência das terças alveolares para o mecanismo de flexo-cortante

A Tabela 5.8 apresenta a razão entre os valores de força encontrados nos ensaios e o obtido ao utilizar a expressão normativa de verificação de cálculo da resistência para o mecanismo de flexo-cortante, utilizando os valores de $f_{ctk,inf}$ calculados após o ensaio de resistência a flexão positiva das peças.

Tabela 5.8: Razão encontrada para verificação de cálculo de resistência para o mecanismo de flexo-cortante, utilizando V_{exp} e $V_{Rk,fl}$ com os valores de $f_{ctk,inf}$ calculados.

TERÇA	V_{exp} (kN)	$V_{Rk,fl}$ (kN)	$V_{exp}/V_{Rk,fl}$
TA 01 A	39	55	0,71
TA 01 B	38	55	0,68
TA 02 A	51	59	0,86
TA 02 B	56	59	0,94
TA 03 A	47	49	0,96
TA 03 B	50	49	1,02
TA 04 A	46	45	1,02
TA 04 B	65	45	1,44
TA 05 A	51	43	1,20
TA 05 B	62	43	1,45
TA 06 A	44	56	0,79
TA 06 B	43	56	0,77
TERÇAS ALVEOLARES- LADO A (COM FURO)			
TERÇAS ALVEOLARES- LADO B (SEM FURO)			

Fonte: Autora (2024).

Ao examinar a Tabela 5.8, na última coluna, tem-se a relação entre a força experimental e a resistência teórica, onde um valor maior que 1 indica que a peça testada superou a resistência teórica. Observa-se que apenas cinco terças indicam força experimental superando a resistência teórica.

A Tabela 5.9 apresenta a razão entre os valores de força encontrados nos ensaios e os valores obtidos ao utilizar a expressão normativa de verificação de

cálculo da resistência para o mecanismo de flexo-cortante, utilizando o valor de f_{ck} calculado para as peças, utilizando o teste de resistência à compressão do concreto realizado pelo fabricante, considerando o desvio padrão.

Tabela 5.9: Razão encontrada para verificação de cálculo de resistência para o mecanismo de flexo-cortante, utilizando V_{exp} e $V_{Rk,fl}$ com o valor de f_{ck} calculado.

TERÇA	V_{exp} (kN)	$V_{Rk,fl}$ (kN)	$V_{exp}/V_{Rk,fl}$
TA 01 A	39	59	0,66
TA 01 B	38	59	0,63
TA 02 A	51	64	0,80
TA 02 B	56	63	0,88
TA 03 A	47	60	0,78
TA 03 B	50	60	0,83
TA 04 A	46	60	0,77
TA 04 B	65	60	1,08
TA 05 A	51	61	0,84
TA 05 B	62	61	1,02
TA 06 A	44	62	0,70
TA 06 B	43	62	0,69
TERÇAS ALVEOLARES- LADO A (COM FURO)			
TERÇAS ALVEOLARES- LADO B (SEM FURO)			

Fonte: Autora (2024).

Os valores resultantes da relação entre a força experimental e a resistência teórica para as terças do lado A variam de 0,66 a 0,84, enquanto para as terças do lado B variam de 0,63 a 1,08.

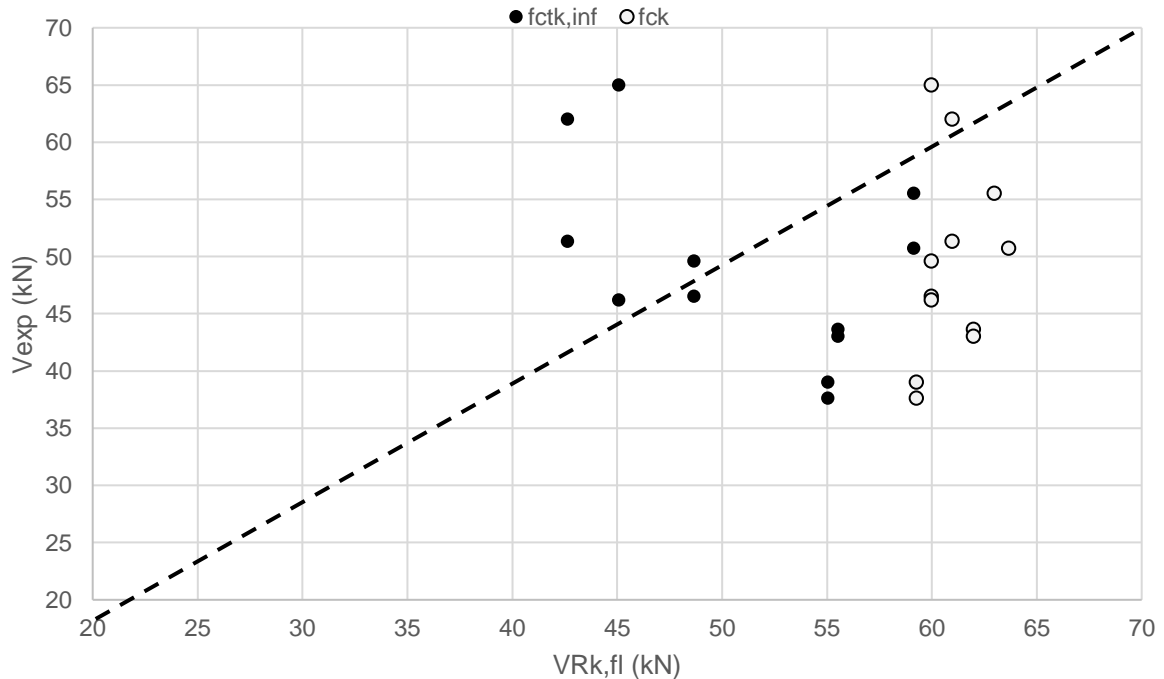
A maioria das terças apresenta um desempenho abaixo da resistência teórica (valores de $V_{exp}/V_{Rk,fl}$ menores que 1), sugerindo que, na maioria dos casos, a força experimental é inferior à resistência teórica. Apenas duas peças apresentaram uma relação maior do que 1.

Ainda, pode-se ressaltar que as peças “lado B” apresentaram desempenho ligeiramente superior em termos de resistência ao cisalhamento, quando comparadas as extremidades que apresentam o furo.

Para uma ilustração dessa análise de resultados, a Figura 5.15 mostra a relação gráfica entre ambas as tabelas apresentadas. Em círculo preto estão representados os valores da Tabela 5.8, referente ao $f_{ctk,inf}$ deduzido após o ensaio de resistência a flexão positiva. Os dados representados por círculos brancos de borda preta são referentes a Tabela 5.9, que correspondem aos valores de $f_{ctk,inf}$ deduzido a partir do f_{ck} obtido a partir do $f_{cm,med}$ dos corpos de prova, referente ao controle de

qualidade das peças.

Figura 5.15: Relação gráfica entre a razão dos valores encontrados de V_{exp} e $V_{Rk,fl}$.



Fonte: Autora (2024).

O gráfico esclarece os resultados de forma visual. A linha tracejada marca o valor "1", indicando o limite de segurança. Os pontos abaixo dessa linha representam resultados que estão abaixo do nível de segurança, enquanto os pontos acima da linha indicam resultados satisfatórios.

A aglomeração de pontos no gráfico abaixo da linha tracejada indica que a maioria dos resultados obtidos está abaixo de 1, sugerindo que os valores experimentais não superaram os valores teóricos de cálculo.

Com a imagem, dos 24 círculos representados, apenas 7 superaram a linha tracejada, representando 29,17% dos resultados de ensaio como situação favorável para dimensionamento e segurança das terças.

5.3.2 Análise da verificação de cálculo da resistência das terças alveolares para o mecanismo de tração diagonal.

A Tabela 5.10 mostra a relação entre os valores de V_{exp} e os valores de $V_{Rk,c}$, considerando o $f_{ctk,inf}$ calculado a partir do ensaio de resistência à flexão positiva das peças.

Tabela 5.10: Razão encontrada para o mecanismo de tração diagonal, com $f_{ctk,inf}$.

TERÇA	V_{exp} (kN)	$V_{Rk,c}$ (kN)	$V_{exp}/V_{Rk,c}$
TA 01 A	39,00	34	1,14
TA 01 B	37,60	39	0,96
TA 02 A	50,70	44	1,15
TA 02 B	55,50	50	1,11
TA 03 A	46,50	27	1,71
TA 03 B	49,60	31	1,60
TA 04 A	46,20	24	1,91
TA 04 B	65,00	29	2,26
TA 05 A	51,30	22	2,32
TA 05 B	62,00	28	2,24
TA 06 A	43,60	32	1,35
TA 06 B	43,00	37	1,15

Fonte: Autora (2024).

Com a análise da tabela, compreende-se que as terças apresentaram um desempenho satisfatório, com a maioria dos valores experimentais superando os valores teóricos. A média encontrada para os valores de $V_{exp}/V_{Rk,c}$ é 1,58 e sugere que, em média, os valores experimentais são 58% maiores que os valores teóricos.

A Tabela 5.11 apresenta a razão encontrada para verificação de cálculo de resistência para o mecanismo de tração diagonal, utilizando V_{exp} e $V_{Rk,c}$ com o valor de f_{ck} calculado.

Tabela 5.11: Razão encontrada para o mecanismo de tração diagonal, com o valor de f_{ck} .

TERÇA	V_{exp} (kN)	$V_{Rk,c}$ (kN)	$V_{exp}/V_{Rk,c}$
TA 01 A	39,00	39	0,99
TA 01 B	37,60	39	0,96
TA 02 A	50,70	50	1,01
TA 02 B	55,50	50	1,11
TA 03 A	46,50	39	1,21
TA 03 B	49,60	39	1,29
TA 04 A	46,20	40	1,15
TA 04 B	65,00	40	1,62
TA 05 A	51,30	44	1,16
TA 05 B	62,00	44	1,40
TA 06 A	43,60	39	1,10
TA 06 B	43,00	40	1,09
TERÇAS ALVEOLARES- LADO A (COM FURO)			
TERÇAS ALVEOLARES- LADO B (SEM FURO)			

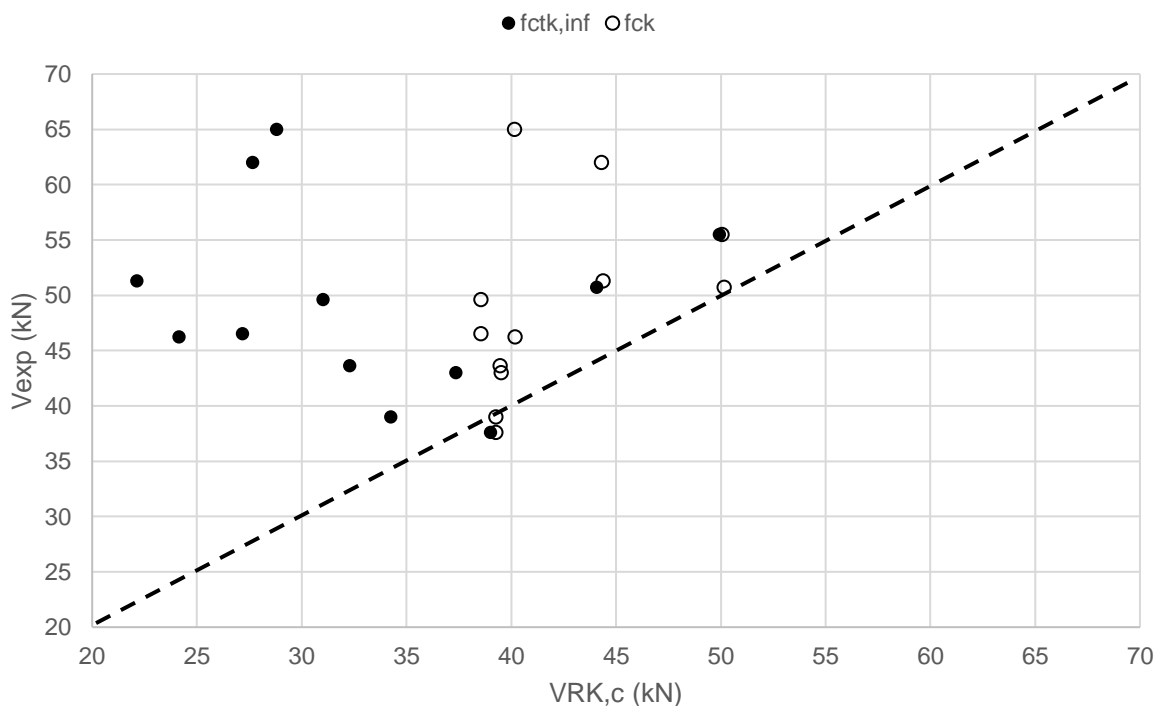
Fonte: Autora (2024).

Analisando a tabela, é possível ressaltar que as terças apresentam um desempenho satisfatório, com a maioria dos valores experimentais superando os

valores teóricos. A média de $V_{exp}/V_{Rk,c}$ de 1,18 sugere que, em média, os valores experimentais são 18% maiores que os valores teóricos. Esses resultados indicam que as terças são mais resistentes do que o esperado teoricamente, o que é um bom indicativo de segurança estrutural.

A relação gráfica entre os valores das Tabelas 5.10 e 5.11 está disposta na Figura 5.16. Onde os valores de círculo preto são atribuídos para a verificação de cálculo de resistência para o mecanismo de tração diagonal, utilizando V_{exp} e $V_{Rk,c}$ com os valores de $f_{ctk,inf}$ calculados. E, os círculos brancos de borda preta são para a verificação de cálculo de resistência para o mecanismo de tração diagonal, utilizando V_{exp} e $V_{Rk,c}$ com o valor de f_{ck} calculado.

Figura 5.16: Relação gráfica entre a razão dos valores encontrados de V_{exp} e $V_{Rk,c}$.



Fonte: Autora (2024).

Com a análise da figura, os resultados indicam que, na maioria dos casos, as terças são mais resistentes do que o esperado teoricamente, o que é um bom indicativo de segurança estrutural.

Apenas uma das peças apresentou resistência aquém do esperado, que foi a TA 01. Todavia, o resultado apresentado pela terça foi próximo de 1.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Este capítulo aborda a conclusão do trabalho, reportando as considerações que levam a destacar que o objetivo principal do estudo foi atingido e as peças possuem viabilidade técnica.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao ensaio de resistência à flexão positivo não destrutivo, este foi realizado visando o reaproveitamento das peças, com base em dados do laboratório NETPre, que contempla estudos anteriores onde não foi identificada deterioração que incapacite a utilização das peças após o ensaio de resistência à flexão.

Ainda, considera-se que a aplicação da carga de forma concentrada, em vez de distribuída, cria uma condição mais severa em comparação com as condições de uso final das peças, pois o momento fletor máximo coincide com a presença de esforço cortante na seção central da peça.

Ao analisar os resultados, as fissuras se espalharam na região de aplicação da carga, mas não houve sinais de que a capacidade resistente da peça foi esgotada. Após o descarregamento da carga aplicada, os elementos retornaram à sua posição inicial e não apresentaram fissuras residuais.

Dessa forma, os resultados obtidos representam uma situação crítica à qual as peças provavelmente não serão submetidas em condições normais. Isso reforça a viabilidade do material, pois as peças demonstraram resistência aos esforços concentrados.

Ao comparar os resultados obtidos com o ensaio de resistência à força cortante, é possível concluir que a presença de furo no “lado A” pode estar introduzindo concentração de tensões ao redor do furo, o que leva a uma redução na capacidade de suportar carga e uma maior deformação nas peças, pois há uma tendência consistente de que as amostras do “lado A” tendem a ter uma força máxima ligeiramente menor quando comparadas com as amostras do “lado B”.

Estima-se que a concentração de tensões ao redor do furo tenha ocorrido devido as inconsistências encontradas no diâmetro e posição do furo. Não é descartada a intenção de se realizar furo em uma idade superior para atingir maior resistência ao concreto.

Com relação as verificações de cálculo da resistência das terças alveolares, ao considerar a Figura 5.15, nota-se que a maioria dos dados se encontra abaixo da linha tracejada, indicando um resultado aquém do esperado, quando analisada a verificação de cálculo da resistência para o mecanismo de flexo-cortante.

Esta tendência é corroborada pela análise das Tabelas 5.8 e 5.9, onde apenas algumas peças demonstraram uma resistência satisfatória em relação aos valores experimentais e calculados. Tal conclusão levanta insegurança quanto a eficácia da metodologia de cálculo para as terças.

Ao examinar as Tabelas 5.10 e 5.11, que se referem a verificação de cálculo da resistência para o mecanismo de tração diagonal, nota-se que em ambas as tabelas, apenas uma terça exibiu relação inferior a 1.

A TA 01 apresentou uma relação de desempenho abaixo da resistência teórica, principalmente em sua extremidade “lado B”, contrariando os demais resultados que indicaram ligeiro aumento na resistência para a extremidade sem furo.

Por ser um valor baixo de dispersão não há necessidade de se investigar problemas com o ensaio, apenas considera-se uma variância produtiva que consequentemente resultou em uma variância nos resultados experimentais obtidos.

Foram identificadas variâncias nos resultados que podem ser justificados pela diferente data de fabricação das peças e distinção da geometria da seção transversal das terças.

A variância encontrada não representa valores capazes de invalidar o programa experimental, são aceitáveis e apontam para uma necessidade de se considerar a geometria das peças de concreto pré-moldado.

Com isso, os resultados apresentados mesmo pelas peças com a presença de furo foram compatíveis a um desempenho estrutural satisfatório quanto aos padrões normativos estabelecidos, levando a conclusão de que as peças possuem viabilidade técnica.

6.2 CONCLUSÃO

As terças alveolares têm viabilidade técnica comprovada. Os testes conduzidos neste estudo demonstraram que essas peças resistem ao esforço cortante, assegurando um desempenho estrutural em conformidade com os padrões normativos estabelecidos.

Para projeto, a aplicação da equação do mecanismo de tração diagonal se destaca como a abordagem de cálculo mais apropriada ao verificar terças alveolares protendidas sem armadura transversal.

Isso se dá, pois, a equação do mecanismo de tração diagonal apresentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 14861 (2022) considera a complexidade geométrica da seção transversal das peças, atribuindo a altura do ponto crítico necessária em conformidade com o formato do alvéolo adotado.

Conforme mencionado, os testes realizados possibilitam o dimensionamento e uso das peças. No entanto, aos projetistas que planejam adotar o produto, ressalta-se a importância de avaliar o material como um todo.

Em uma análise estrutural para dimensionamento das terças, deve-se considerar o nível de protensão, a resistência à compressão e tração do concreto, qualidade e aderência da armadura, momento de inércia e, especialmente, a geometria dos alvéolos.

O formato dos alvéolos é um aspecto considerado como um possível fator comprometedor dos resultados. Portanto, é necessário realizar uma nova avaliação da geometria da seção transversal para terças alveolares que apresentem alvéolos em diferentes formatos, sejam eles circulares ou não.

Sob a perspectiva da indústria de elementos pré-moldados de concreto, as terças alveolares representam uma mudança promissora, combinando eficiência estrutural com maior produtividade, em comparação com o processo de fabricação das terças comerciais em formato "T".

Com os resultados experimentais, que foram obtidos sem a consideração de fatores de minoração, desencoraja-se a aplicação da equação para mecanismo de flexo-cortante ao se verificar projeto de terças alveolares com alvéolos não circulares.

No entanto, é crucial reconhecer as limitações deste estudo e as incertezas associadas aos resultados experimentais. Para o futuro, são necessárias pesquisas

adicionais para abordar questões pendentes e explorar novas oportunidades de aprimoramento das terças alveolares.

6.3 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por ser um elemento de processo produtivo modificado, as terças alveolares possuem muito ainda a ser estudado. Assim, seguem algumas propostas que não foram aprofundadas nesse trabalho, mas podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas estruturais pré-moldados de concreto:

- a) Verificação da capacidade resistente de terças alveolares com seções de altura maior, a exemplo de 32 cm.
- b) Verificação do desempenho e equação adequada para terças alveolares com alvéolos circulares.
- c) Incorporação de compósitos na fabricação de terças alveolares para redução do peso próprio do elemento.
- d) Viabilidade econômica da utilização de terças alveolares.

7 REFERÊNCIAS

- ALVARENGA JUNIOR, Luiz Carlos de. **Contribuição ao Estudo do Comportamento Estrutural de Terças Pré-Fabricadas em Concreto Protendido sem Armadura Transversal**. 2021. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
- ALVES E MORAES PRÉ FABRICADOS (Paranapanema/SP). **TERÇAS PRÉ-MOLDADAS**. 2018. Disponível em: <http://www.alvesemoraes.com.br/page/servicos/multipavimento/tercas-pre-moldadas>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14861: **Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9062: **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS, ASSAP, **The hollow core floor – Design and applications**, Verona, Italy, 2002.
- BAZILIO, Luís Fernando Borzi. **Aplicação em Fábrica de Ensaios Não Destrutivos em Lajes Alveolares Protendidas Para a Verificação da Conformidade de Projeto**. 2021. 226 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2021.
- BAZILIO, Luis Fernando Borzi; ALVARENGA JUNIOR, Luiz Carlos; CATOIA, Bruna; FERREIRA, Marcelo de Araujo. **Mecanismos de ruptura na análise experimental de lajes alveolares protendidas considerando a variação da altura**. Matéria (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, abr. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-46425>.
- CARVALHO, Roberto Chust. **Estruturas em concreto protendido**. Ed. 2. Pini, 2017.

CATOIA, Bruna; FERREIRA, Marcelo de Araújo; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**. São Carlos: Cadernos de Engenharia de Estruturas, 2016. 16 v. (P. 69-84).

CATOIA, Bruna. **Comportamento de vigas protendidas pré-moldadas com ligações semi-rígidas**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CATOIA, Bruna. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. 2011. 325p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011. Disponível em: http://www.netpre.ufscar.br/wp-content/uploads/2016/04/2011DO_BrunaCatoia.pdf.

CENTRAL NORTE MADEIRAS (São Paulo). **Viga de Madeira**. 2023. Disponível em: <https://www.lojacentralnorte.com.br/makeiramento/vigas/viga-cambara-bruta-5x11-central-norte-madeiras>.

COLLINS, M.P.; MITCHELL, D. (1997) – **Prestressed concrete structures**. Response Publications, Canada.

COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION. **EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings**. Brussels: Europaisches Komitee Fur Normung, 2004. 227 p.

COSTA, Olivia Oliveira da. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

DUMÊT, Tatiana Bittencourt. **Aderência de cordoalhas em concreto de alta resistência com e sem fibras de aço**. 2003. 480p. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB (CEB-FIP). **Guide to Good Practice: Special Design Considerations for Precast Prestressed Hollow Core Floors**. Lausanne, 2000.

FUSCO PB. **Estruturas de concreto – Solicitações tangenciais**. 1ª Ed. São Paulo. Pini, 2008.

FUSCO, P.B. (1995). **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: PINI.

INFORSATO, Thiago Bindilatti. **Análise de laje alveolar protendida moldada por fôrma fixa e usando placas de poliestireno expandido – Estudo teórico e experimental**. 2018. 224f. Tese (Doutorado em Estrutura e Construção civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018. Disponível em: http://www.netpre.ufscar.br/wp-content/uploads/2016/04/Doutorado_InforsatoThiago_2018.pdf.

- MACIEL, Andrey Monteiro. **Influência da variação geométrica dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**. 2017. 137f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.
- MARQUESI, Matheus Lorena Gonçalves. **Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em folhas alveolares protegidas**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- MAXIME, Pré-fabricados. (Santana de Parnaíba). **Terças de Concreto**. 2023. Disponível em: <https://www.maximeengenharia.com.br/tercas-de-concreto-2/>. Acesso em: 06 mar. 2023.
- MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (São Paulo). **Manual Munte de Projetos em Pré-fabricados de Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 532 p.
- PETRUCELLI, Natália Savietto. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- PREMART (Brasil). **Terças**. 2024. Disponível em: <http://www.premart.com.br/pre-fabricados/tercas>.
- SAHOO, S.; VEERENDAR, C.; SURIYA PRAKASH, S. Experimental and numerical studies on flexural behaviour of lightweight and sustainable precast fibre reinforced hollow core slabs. **Construction and Building Materials**, v. 377, p. 131072, 9 maio 2023.
- PONDEREVO, George. Ecivil Descomplicando A Engenharia. **Terça**. 2018. Disponível em: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-terca.html>. Acesso em: 07 abr. 2023.
- ROCHA, Arthur Lima. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares contínuas em pavimentos considerando o mecanismo de tração diagonal**. 2023. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.
- SAHOO, Sumit; VEERENDAR, Chetharajupalli; PRAKASH, S. Suriya. **Experimental and numerical studies on flexural behaviour of lightweight and sustainable precast fibre reinforced hollow core slabs**. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 377, n. 1, p. 131072, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131072>.
- SANTOS, A. D. E. P. **Análise estrutural de galpões atirantados de concreto pré-moldado**. [s.l.] 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- WANIFERRO COMÉRCIO DE FERRO E AÇO. **Ferros de serralheria de excelente qualidade**. 06 jun. 2016. Facebook: Waniferro Comércio de Ferro e Aço. Disponível

em:

https://www.facebook.com/waniferromarilia/photos/a.514058755363361/719504801485421/?type=3&locale=pt_BR.

WIGHT JK, MACGREGOR JC. **Reinforced concrete – Mechanics and design**. 6^a Ed. Pearson, 2012.

YANG, L. (1994). Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure. **ASCE Journal of structural engineering**. v.120, n.9, pp.2675-2696.

APÊNDICE A

1. PERDAS DE PROTENSÃO CONSIDERANDO O f_{ck} DO CONCRETO

Serão utilizados neste apêndice exemplos numéricos para determinar as perdas de protensão, considerando o f_{ck} do concreto obtido por meio do controle de qualidade fabril.

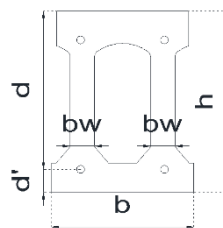
1.1 DADOS GERAIS

Os dados gerais incluem as características geométricas das seções de terças alveolares, características mecânicas do concreto, dados relativos ao aço de protensão como perdas iniciais, perdas diferidas e perda total em relação à tensão inicial, assim como dados complementares relevantes para compreensão do estudo.

1.1.1 Características geométricas

A Tabela A.1 contempla os dados obtidos com a análise da geometria de cada terça alveolar submetida aos ensaios.

Tabela A.1: Características geométricas das terças alveolares.



TA	Área (mm ²)	I (mm ⁴)	h (mm)	d' (mm)	d (mm)	b (mm)	L (mm)	bw (mm)
TA 01	33658	289080000	270	24	246	240	6250	77
TA 02	37384	326560000	270	38	232	245	6250	82
TA 03	32882	280670000	270	30	240	243	6250	79
TA 04	34149	290940000	270	30	240	250	6250	80
TA 05	35934	300980000	270	30	240	245	6250	85
TA 06	33534	285260000	270	28	242	245	6250	80

Fonte: Autora (2024).

1.1.2 Características mecânicas do concreto

O projeto inicial para as “terças alveolares” que foram concretadas fez a previsão de resistência $f_{ck} \geq 40$ MPa aos 28 dias.

As amostras recebidas foram concretadas em diferentes datas. Não foram informadas quais amostras eram de qual lote, apenas recebidas as informações dispostas na Tabela A.2.

Tabela A.2: Resistência a compressão dos corpos de prova referente concretagem das terças alveolares ensaiadas.

Amostras (data da concretagem)	12 horas (f_{cj})	28 dias (f_{cm})
16/02/2023	27,20	60,75
21/02/2023	28,00	62,95
Méd.	27,60	61,85

Fonte: Autora (2024).

Assim, para obtenção do valor de f_{ck} foi realizada a verificação conforme desvio padrão da fábrica.

Sendo:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot 2,5$$

$$f_{ck} = 61,85 - 1,65 \cdot 2,5$$

$$\mathbf{f_{ck} = 57,73 \text{ MPa}}$$

1.1.3 Resistência à tração do concreto

A resistência média à tração direta ($f_{ct,m}$) pode ser avaliada em função da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), por meio das expressões descritas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 6118, item 8.2.5:

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln [1 + 0,1 (f_{ck} + 8)] \text{ para concretos com } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

Considerando o f_{ck} das peças, tem-se que para as terças:

$$\mathbf{f_{ct,m} = 4,29 \text{ MPa}}$$

E, com isso, tem-se os valores de $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$. Sendo:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} \rightarrow \mathbf{f_{ctk,inf} = 3,00 \text{ MPa}}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ctm} \rightarrow \mathbf{f_{ctk,sup} = 5,58 \text{ MPa}}$$

1.1.4 Dados relativos ao aço de protensão

Aço categoria CP190 RB

$$E_p = 200 \text{ GPa (ref. NBR 6118)}$$

2 cordoalhas de 9,5 mm na mesa superior da terça, com área de 0,56 cm² cada.

2 cordoalhas de 12,7 mm na mesa inferior da terço, com área de 1,01 cm² cada.

$A_p = 3,14 \text{ cm}^2$ - área total da armadura de protensão, com quatro cordoalhas em cada terço.

σ_{pi} = tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas, valor obtido pela pressão final no macaco subtraída da pressão inicial, em conformidade com a Tabela A.3.

Tabela A.3: Tensão inicial de protensão das cordoalhas.

Cordoalhas	Pressão inicial	Pressão final	σ_{pi}
CP Ø 9,5 mm	20 kgf/mm ²	60 kgf/mm ²	400 MPa
CP Ø 12,7 mm	20 kgf/mm ²	165 kgf/mm ²	1450 MPa

Fonte: Autora (2024).

1.1.5 Dados complementares

- Temperatura ambiente média 25°C.
- $U_r = 70\%$ - Umidade relativa do ambiente.
- Cimento: CP V-ARI.
- Aditivo redutor de água.
- Abatimento do concreto menor ou igual a 5 cm.

1.2 PERDAS INICIAIS

Conforme a Tabela A.3, considera-se para CP Ø 9,5 mm a pressão de 40 kgf/mm² e para CP Ø 12,7 mm, 145 kgf/mm².

Para aços de classe RB, a tensão do aparelho atende aos limites:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \times f_{ptk} \\ 0,85 \times f_{pyk} \end{cases}$$

$f_{ptk} = 1900 \text{ MPa}$ – Resistência característica da armadura ativa à tração.

$f_{pyk} = 1710 \text{ MPa}$ – Resistência característica de escoamento da armadura ativa.

$$\begin{cases} \sigma_{pi} = 400 \text{ MPa} \\ \sigma_{pi} = 1450 \text{ MPa} \end{cases} \leq 0,77 \times 1900 = 1463$$

Os valores encontrados para σ_{pi} atendem os limites normativos.

1.2.1 Deformação por ancoragem

$$\Delta\sigma = \Delta l \times E_p$$

Sendo $\Delta l = 0,6 \text{ cm}$ e pista de 100 m:

$$\Delta \sigma = 0,6 \times 2 \times 10^5 \therefore \Delta \sigma = 12 \text{ MPa}$$

1.2.2 Relaxação inicial da armadura

A intensidade da relaxação do aço deve ser determinada pelo coeficiente $\psi(t, t_0)$, calculado por:

$$\psi(t, t_0) = \frac{\Delta \sigma p_r(t, t_0)}{\sigma_{pi}}$$

$$\sigma_{pi} = 1450 - 12 = 1438 \text{ MPa p/ } \varnothing 12,7 \text{ mm}$$

$$\sigma_{pi} = 400 - 12 = 388 \text{ MPa p/ } \varnothing 9,5 \text{ mm}$$

Determina-se a seguinte relação:

$$r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}} = \frac{1438}{1900} \cong 0,76 \text{ p/ } \varnothing 12,7 \text{ mm}$$

$$r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}} = \frac{388}{1900} \cong 0,20 \text{ p/ } \varnothing 9,5 \text{ mm}$$

Consultando a Tabela A.4, que é uma adaptação da Tabela 8.3 da NBR 6118, tem-se a situação indicada e valor desejado de k.

Tabela A.4: Valores de ψ_{1000} em porcentagem.

$r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}}$	Cordoalhas	
	RN	RB
0,20		0
0,50	0	0
0,60	3,50	1,30
0,70	7,00	2,50
0,76		3,10
0,80	12,00	3,50

Onde: RN é a relaxação normal e RB é a relaxação baixa
 Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2023).

Por interpolação, o valor de 0,20 é menor que 0,50, então considera-se para relaxação baixa $k=0$, referente às cordoalhas de $\varnothing 9,5 \text{ mm}$.

Quanto as cordoalhas de $\varnothing 12,7 \text{ mm}$ o valor de k está entre 0,70 e 0,80 cordoalhas de RB, ao realizar uma interpolação, tem-se que para $r = 0,76$ o valor para RB será 3,1.

Assim, considerando 1 dia, tem:

$$\psi_{(t-t_0)} = \psi_{1000} \times \left(\frac{t-t_0}{41,67}\right)^{0,15} = 3,10 \times \left(\frac{1-0}{41,67}\right)^{0,15} \therefore \psi_{(t-t_0)} \cong 1,77\%$$

Como $\psi(t, t_0) = \frac{\Delta \sigma p_r(t, t_0)}{\sigma_{pi}}$ tem-se:

$$\Delta \sigma_r = \frac{\psi_1}{100} \times \sigma_i \therefore \Delta \sigma_r = \frac{1,77}{100} \times 1450 \therefore \Delta \sigma_r = 25,66 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pi} - \Delta\sigma_r \therefore 1438 - 25,66 \therefore \sigma_{pi} = 1412,34 \text{ MPa p/ } \emptyset 12,7\text{mm}$$

$$\sigma_{pi} - \Delta\sigma_r \therefore 388 - 0 \therefore \sigma_{pi} = 388 \text{ MPa p/ } \emptyset 9,5 \text{ mm}$$

1.2.3 Deformação imediata do concreto

A perda por deformação imediata do concreto é dada pela expressão:

$$\Delta\sigma_{pd} = \varepsilon_7 \times E_p$$

Onde:

ε_7 é a deformação específica da armadura de protensão, devido à descompressão, dada por:

$$\varepsilon_7 = \varepsilon_{concreto} = \frac{\sigma_{cg,cabos}}{E_c}$$

E_c é o módulo de elasticidade do concreto, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 6118, pode ser obtido por meio de diferentes equações, a depender do f_{ck} do concreto.

Sendo:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}} \text{ para concretos com } f_{ck} > 50 \text{ MPa.}$$

Assim, para as terças alveolares:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{57,73}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\boxed{E_{ci} = 41173 \text{ MPa}}$$

$\sigma_{cg,cabos}$ tensão no concreto no nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente modificada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão

$$\sigma_{cg,cabos} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \times e_p^2}{I} - \frac{M_{g1} \times e_p}{I}$$

Onde:

A é a área da seção transversal da peça;

I é o momento de inércia da seção transversal da peça;

N_p é a força de protensão, descontando as perdas; $N_p = \sigma_{pi} \times A$

$$N_p = \sigma_{pi} \times A \therefore 141,23 \times 2,02 = 285,28 \text{ kN p/ } \emptyset 12,7\text{mm}$$

$$N_p = \sigma_{pi} \times A \therefore 38,8 \times 1,12 = 43,45 \text{ kNp/ } \emptyset 9,5 \text{ mm}$$

$$N_p = 285,28 + 43,45 \cong 328,74 \text{ kN}$$

$$N_p = 328,74 \text{ kN}$$

e_p é a excentricidade da força de protensão, calculada por:

$$e_p = \left(\frac{h}{2} - d'\right).$$

Os valores obtidos para as seis amostras de terça alveolar estão dispostos da Tabela A.5.

Tabela A.5: Excentricidade da força de protensão calculada para as cordoalhas de $\varnothing 12,7\text{mm}$.

TA	h (m)	d' (m)	e_p (m)
TA 01	0,27	0,02	0,11
TA 02	0,27	0,04	0,10
TA 03	0,27	0,03	0,11
TA 04	0,27	0,03	0,11
TA 05	0,27	0,03	0,11
TA 06	0,27	0,03	0,11

Fonte: Autora (2024).

M_{g1} é o momento do peso próprio da peça na sua retirada da pista

$$M_{g1} = \left(\frac{Pp \times L^2}{8}\right)$$

Os valores de M_{g1} estão dispostos na Tabela A.6.

Tabela A.6: Momento do peso próprio das terças alveolares.

TA	M_{g1} (kN.m)
TA 01	4,11
TA 02	4,56
TA 03	4,01
TA 04	4,17
TA 05	4,39
TA 06	4,09

Fonte: Autora (2024).

Os valores obtidos com as equações foram agrupados na Tabela A.7, para especificação da deformação específica da armadura de protensão, devido à descompressão.

Tabela A.7: deformação específica da armadura de protensão, devido à descompressão.

TA	ε_7	$\sigma(\text{cg,cabos})$	N_p (kN)	E_c	A (m ²)	e_p	M_{g1} (kN.m)	I (m ²)
TA 01	0,0012	5,09E+04	724,96	4,12E+07	0,03	0,11	4,11	2,89E-04
TA 02	0,0009	3,89E+04	724,96	4,12E+07	0,04	0,10	4,56	3,27E-04
TA 03	0,0012	4,90E+04	724,96	4,12E+07	0,03	0,11	4,01	2,81E-04
TA 04	0,0011	4,72E+04	724,96	4,12E+07	0,03	0,11	4,17	2,91E-04
TA 05	0,0011	4,52E+04	724,96	4,12E+07	0,04	0,11	4,39	3,01E-04
TA 06	0,0012	4,92E+04	724,96	4,12E+07	0,03	0,11	4,09	2,85E-04

Fonte: Autora (2024).

Obtida a deformação específica da armadura, é possível concluir a deformação imediata do concreto, disposto na Tabela A.8.

Tabela A.8: Deformação imediata do concreto.

TA	Δ_{pd}
TA 01	24,71
TA 02	18,91
TA 03	23,81
TA 04	22,93
TA 05	21,96
TA 06	23,89

Fonte: Autora (2024).

Após a retirada da pista, a protensão está submetida a: $\sigma_p(t = 1)$

Onde:

$$\sigma_p(t = 1) = \sigma_{pi} - \Delta\sigma - \Delta\sigma_r - \Delta_{pd}$$

Os valores foram agrupados na Tabela A.9.

Tabela A.9: Valores obtidos para $\sigma_p(t=1)$.

TA	σ_{pi}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_r$	Δ_{pd}	$\sigma_p(t=1)$
TA 01	185	12,00	25,66	24,71	122,63
TA 02	185	12,00	25,66	18,91	128,43
TA 03	185	12,00	25,66	23,81	123,53
TA 04	185	12,00	25,66	22,93	124,41
TA 05	185	12,00	25,66	21,96	125,38
TA 06	185	12,00	25,66	23,89	123,45

Fonte: Autora (2024).

1.3 PERDAS DIFERIDAS

São consideradas perdas diferidas a retração do concreto, fluência do concreto e relaxação da armadura.

1.3.1 Retração do concreto

Sendo a expressão da perda devida à retração do concreto:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t - t_0) = \varepsilon_{cs\infty} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Onde:

$\varepsilon_{cs\infty}$ é o valor final da retração, obtido por $\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s}$

ε_{1s} é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto, presente na Tabela A1, publicada pela NBR 6118:2023 pág. 216.

$$\varepsilon_{1s} = 5,0 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{para 70\% de umidade e abatimento 5 cm.}$$

ϵ_{2s} é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça, sendo:

$$\epsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}}$$

h_{fic} é a espessura fictícia em centímetros;

$$h_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}}$$

γ coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U%, presente na Tabela A1 da NBR 6118:2023.

$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 01 \times U) \rightarrow \gamma = 1 + \exp(-7,8 + 01 \times 70) = 1,45$$

A_c área da seção transversal da peça

u_{ar} parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar

$$u_{ar} = 2 \times (b + h) + 6 \times (\pi \times \phi)$$

ϕ é o perímetro do alvéolo de cada peça

Os valores encontrados estão dispostos na Tabela A.10.

Tabela A.10: Valores encontrados para o cálculo da retração do concreto das terças alveolares.

TA	$\epsilon_{cs\infty}$	ϵ_{1s}	ϵ_{2s}	h_{fic}	γ	A_c (cm ²)	u_{ar} (cm)	u_{ar} (m)	b (m)	h (m)	ϕ (m)
TA 01	7,34E-04	5,00E-04	1,468	1,03	1,45	336,58	950,23	9,50	0,24	0,27	0,45
TA 02	7,33E-04	5,00E-04	1,467	1,04	1,45	373,84	1045,48	10,45	0,25	0,27	0,50
TA 03	7,40E-04	5,00E-04	1,480	0,91	1,45	328,82	1045,08	10,45	0,24	0,27	0,50
TA 04	7,38E-04	5,00E-04	1,476	0,95	1,45	341,49	1046,48	10,46	0,25	0,27	0,50
TA 05	7,34E-04	5,00E-04	1,467	1,03	1,45	359,34	1007,78	10,08	0,25	0,27	0,48
TA 06	7,39E-04	5,00E-04	1,478	0,93	1,45	335,34	1045,48	10,45	0,25	0,27	0,50

Fonte: Autora (2024).

$\beta_s(t)$ é o coeficiente relativo à retração, no instante (t), presente na Figura A.3 publicada pela NBR 6118:2023 pág. 217, determinado por meio da equação:

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + B \times \left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + D \times \left(\frac{t}{100}\right) + E}$$

Onde:

t é a idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias, equivalente a

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \times \Delta t_{ef,i}$$

$\alpha = 1$ para cimento ARI e retração, que é um coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento, conforme indicações da Tabela A2, publicada pela NBR 6118:2023 pág. 218.

$T_i = 50^\circ\text{C}$ é a temperatura média diária do ambiente, para cura térmica

$\Delta t_{ef,i}$ é o período, em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente poderá ser admitida como constante

t_0 é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, em dias, equivalente a $t = 1 \times \frac{50+10}{30} \times 1 = 2$ dias.

$$t = 1 \times \frac{50+10}{30} \times 10 = 20 \text{ dias.}$$

Ainda, tem-se:

$$A = 40;$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8 ;$$

$$C = 2,5 h^3 - 8,8h + 40,7;$$

$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8;$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584 h^2 - 39h + 0,8;$$

Para h , a espessura fictícia ponderada igual a $\gamma \times h_{fic}$, expresso em metros. Para valores de h fora do intervalo $(0,05 \leq h \leq 1,6)$, adotam-se os valores extremos correspondentes. Assim, $h=0,05$ m e os resultados correspondentes estão dispostos na Tabela A.11.

Tabela A.11: Valores correspondentes para A, B, C, D e E das terças alveolares.

TA	h_{fic} (m)	h_{fic} (m)	A	B	C	D	E
TA 01	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32
TA 02	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32
TA 03	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32
TA 04	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32
TA 05	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32
TA 06	0,01	0,05	40	5,51	40,26	19,45	0,32

Fonte: Autora (2024).

Para $t_0 = 2$ dias e $t = 20$ dias, as equações correspondentes estão respectivamente:

$$\beta_s(t_0 = 2) = \frac{\left(\frac{2}{100}\right)^3 + 40 \times \left(\frac{2}{100}\right)^2 + 5,5095 \times \left(\frac{2}{100}\right)}{\left(\frac{2}{100}\right)^3 + 40,2603 \times \left(\frac{2}{100}\right)^2 + 19,4531 \times \left(\frac{2}{100}\right) + 0,3199} \cong 0,17$$

$$\beta_s(t = 20) = \frac{\left(\frac{20}{100}\right)^3 + 40 \times \left(\frac{20}{100}\right)^2 + 5,5095 \times \left(\frac{20}{100}\right)}{\left(\frac{20}{100}\right)^3 + 40,2603 \times \left(\frac{20}{100}\right)^2 + 19,4531 \times \left(\frac{20}{100}\right) + 0,3199} \cong 0,46$$

Logo:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

$$\Delta\sigma_{ps}(t, t_0) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \times E_p$$

Os resultados estão expressos na Tabela A.12.

Tabela A.12: Retração do concreto das terças alveolares.

TA	$\beta_s (t_0)$	$\beta_s (t)$	$\epsilon_{cs}(t,t_0)$	$\Delta\sigma_{ps}(t-t_0)$
TA 01	0,17	0,46	2,13E-04	4,26E+01
TA 02	0,17	0,46	2,13E-04	4,25E+01
TA 03	0,17	0,46	2,15E-04	4,29E+01
TA 04	0,17	0,46	2,14E-04	4,28E+01
TA 05	0,17	0,46	2,13E-04	4,25E+01
TA 06	0,17	0,46	2,14E-04	4,29E+01

Fonte: Autora (2024).

1.3.2 Fluência do concreto

A perda por fluência pode ser obtida pela expressão:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \times \varphi(t, t_0) \times \alpha_p$$

α_p é a relação entre o módulo de elasticidade do aço protendido e o módulo do concreto $\left(\frac{E_p}{E_c}\right)$

$$E_p = 200 \frac{kN}{mm^2} \quad E_c = 41173 MPa \quad \therefore \alpha_p = \frac{200000}{41173} \quad \therefore \alpha_p = 4,85$$

$\sigma_{cg,cabos}$ é a tensão que ocorre no concreto no nível do centro de gravidade da armadura de protensão e devido à ação das cargas permanentes inclusive a protensão;

$$\sigma_{cg,cabos} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \times e_p^2}{I} - \frac{M_{g1} \times e_p}{I}$$

Onde:

A é a área da seção transversal da peça;

I é o momento de inércia da seção transversal da peça;

N_p é a força de protensão, descontando as perdas,

$$N_p = A_p \times (\sigma_{pi} - \Delta\sigma - \Delta\sigma_r - \Delta\sigma_{pd}), \text{ conforme Tabela A.13.}$$

Tabela A.13: Força de protensão N_p das terças alveolares.

TA	N_p	A_p	σ_{pi}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_r$	$\Delta\sigma_{pd}$
TA 01	561,32	3,14	185,00	1,20	2,57	2,47
TA 02	563,14	3,14	185,00	1,20	2,57	1,89
TA 03	561,60	3,14	185,00	1,20	2,57	2,38
TA 04	561,88	3,14	185,00	1,20	2,57	2,29
TA 05	562,18	3,14	185,00	1,20	2,57	2,20
TA 06	561,57	3,14	185,00	1,20	2,57	2,39

Fonte: Autora (2024).

e_p é a excentricidade da armadura protendida;

M_{g1} é o momento do peso próprio da peça na sua retirada da pista

$$M_{g1} = \left(\frac{Pp \times L^2}{8} \right)$$

Isso trará um resultado para cada terça alveolar, expresso na Tabela A.14.

Tabela A.14: $\sigma_{cg,cabos}$ das terças alveolares.

TA	A (m ²)	I (m ⁴)	Np	Mg1 (kN.m)	ep (m)	h (m)	d' (m)	$\sigma_{cg,cabos}$ (kN/m ²)
TA 01	0,03	2,89E-04	561,32	4,11E+00	0,111	0,27	0,024	39023
TA 02	0,04	3,27E-04	563,14	4,56E+00	0,097	0,27	0,038	29933
TA 03	0,03	2,81E-04	561,60	4,01E+00	0,105	0,27	0,030	37638
TA 04	0,03	2,91E-04	561,88	4,17E+00	0,105	0,27	0,030	36241
TA 05	0,04	3,01E-04	562,18	4,39E+00	0,105	0,27	0,030	34707
TA 06	0,03	2,85E-04	561,57	4,09E+00	0,107	0,27	0,028	37750

Fonte: Autora (2024).

O coeficiente de fluência $\varphi(t, t_0)$ é determinado pela equação:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} \left[\beta_f(t) - \beta_f(t_0) \right] + \varphi_{d\infty} \times \beta_d$$

Onde:

t é a idade fictícia do concreto no instante considerado, expressa em dias; equivalente ao resultado da expressão: $t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \times \Delta t_{ef,i} \therefore t = 3 \times \frac{50 + 10}{30} \times 10 = 60 \text{ dias}$;

$\alpha = 3$ para cimento ARI, que é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento, sendo utilizados valores constantes na Tabela A2 da NBR 6118:2023, pág. 218.

$T_i = 50^\circ\text{C}$ - Temperatura média diária do ambiente

$\Delta t_{ef,i}$ é o período, em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente poderá ser admitida como constante

t_0 é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, em dias, equivalente a $t = 3 \times \frac{50 + 10}{30} \times 1 = 6 \text{ dias}$

t_{0i} é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, expressa em dias;

φ_a é o coeficiente de fluência rápida, determinado pela expressão:

$$\varphi_a = 0,8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \text{ para concretos de classes C20 A C45.}$$

$$\varphi_a = 1,4 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \text{ para concretos de classes C50 A C90.}$$

Onde:

$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t)}$ sendo a função de crescimento da resistência do concreto com a idade, admitida utilizando-se a expressão de β_1 , definida pela NBR 6118:2023, item 12.3, pág. 71, onde é correlacionada a resistência do concreto em um tempo t com o valor de f_{ck} : $\beta_1 = \frac{f_{cj}}{f_{ck}}$.

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$

Onde:

$S = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI;

t é a idade efetiva do concreto, expressa em dias.

$$\beta_1(t_0) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \therefore \exp \left\{ 0,2 \times \left[1 - \left(\frac{28}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} = 0,79$$

$$\beta_1(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \therefore \exp \left\{ 0,2 \times \left[1 - \left(\frac{28}{60} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} = 1,06$$

Com isso,

$$\varphi_a = 1,4 \left[1 - \frac{0,79}{1,06} \right] \therefore \varphi_a = 0,36$$

$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível para concretos de classes C20 A C45;

$\varphi_{f\infty} = 0,45 \times \varphi_{1c} \times \varphi_{2c}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível para os concretos de classes C50 A C90.

φ_{1c} é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U , expresso em porcentagem (%), e da consistência do concreto, dada pela Tabela A.1, da NBR 6118:2023, pág. 216.

$\varphi_{1c} = 0,20$ para umidade $U = 70\%$ e concreto com abatimento de 5 cm.

φ_{2c} é o coeficiente dependente da espessura fictícia h_{fic} da peça.

$$\varphi_{2c} = \frac{42+h}{20+h} \therefore \varphi_{2c} = \frac{42+5}{20+5} \therefore \varphi_{2c} = 1,88$$

Onde:

h é a espessura fictícia ponderada γh_{fic} , expressa em centímetros, sendo γ definido na Tabela A.1 da NBR 6118, na pág. 216. $h_{fic} = 5$ cm.

$\varphi_{f\infty} = 0,45 \times \varphi_{1c} \times \varphi_{2c} \therefore \varphi_{f\infty} = 0,45 \times 0,20 \times 1,88 \therefore \varphi_{f\infty} = 0,17$ [C50 A C90], considerando que o concreto no ensaio ultrapassou a classe de projeto e atingiu $f_{ck} > 50$ MPa.

$\beta_f(t)$ ou $\beta_f(t_0)$ é o coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto.

$\varphi_{d\infty}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4.

$\beta_d(t)$ é o coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo $(t - t_0)$ decorrido após o carregamento.

$$\beta_d(t) = \frac{t-t_0+20}{t-t_0+70}$$

$$\beta_f(t) = \frac{t^2-At+B}{t^2+Ct+D}$$

Onde:

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113 \quad \therefore A = 141,53$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23 \quad \therefore B = 131,15$$

$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183 \quad \therefore C = 237,51$$

$$D = 7579h^3 - 3196h^2 + 35343h + 1931 \quad \therefore D = 3619,31$$

Para h como espessura fictícia ponderada igual a $\gamma \times h_{fic}$, expressa em metros (m), cujo valor de h esteja fora do intervalo de $(0,05 \leq h \leq 1,6)$, adotam-se os valores extremos correspondentes. Assim, $h = 0,05$ m.

t é o tempo, expresso em dias, onde $t \geq 3$.

$$\beta_f(t_{0,fic}) = \frac{6^2 + 141,53 \times 6 + 131,15}{6^2 + 237,51 \times 6 + 3619,31} = 0,200$$

$$\beta_f(t_{f,fic}) = \frac{60^2 + 141,53 \times 60 + 131,15}{60^2 + 237,51 \times 60 + 3619,31} = 0,569$$

$$\beta_d(t) = \frac{60 - 6 + 20}{60 - 6 + 70} = 0,60$$

Resultando em:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \times \beta_d$$

$$\varphi(t, t_0) = 0,36 + 0,17 [0,569 - 0,20] + 0,4 \times 0,60$$

$$\varphi(t, t_0) = 0,463$$

Logo:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \times \varphi(t, t_0) \times \alpha_p$$

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \times 0,463 \times 4,85$$

Os valores obtidos para cada uma das terças alveolares estão dispostos na Tabela A.15.

Tabela A.15: $\Delta\sigma_{p,s}(t,t_0)$ em MPa para cada terça alveolar.

TA	$\Delta\sigma_{p,s}(t,t_0)$	σ_{cgp}	$\Phi(t,t_0)$	α_p
TA 01	87,70	39,02	0,46	4,85
TA 02	67,28	29,93	0,46	4,85
TA 03	84,59	37,64	0,46	4,85
TA 04	81,45	36,24	0,46	4,85
TA 05	78,00	34,71	0,46	4,85
TA 06	84,84	37,75	0,46	4,85

Fonte: Autora (2024).

1.3.3 Relaxação da armadura

A relaxação da armadura pode ser calculada por meio da expressão:

$$\Psi_{(t,t_0)} = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t,t_0)}{\sigma_{pi}}$$

σ_{pi} é a tensão da armadura de protensão no instante de seu estiramento;

Para a tensão na armadura retirando as perdas iniciais, tem-se a Tabela A.16:

Tabela A.16: Tensão da armadura de protensão no instante de seu estiramento, descontando as perdas.

TA	σ_{pi}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_r$	$\Delta\sigma_{pd}$	σ_{pi} (MPa)
TA 01	1850	12	25,66	24,71	1788
TA 02	1850	12	25,66	18,91	1793
TA 03	1850	12	25,66	23,81	1789
TA 04	1850	12	25,66	22,93	1789
TA 05	1850	12	25,66	21,96	1790
TA 06	1850	12	25,66	23,89	1788

Fonte: Autora (2024).

$\Delta\sigma_{pr}(t,t_0)$ perda da tensão por relaxação pura (com comprimento constante) desde o instante t_0 do estiramento da armadura até o instante t considerado.

Assim, determina-se a relação: $r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}}$

Para as terças alveolares, os valores estão expressos na Tabela A.17.

Tabela A.17: Valores de "r" para as terças alveolares.

TA	σ_{pi} (MPa)	f_{ptk}	r
TA 01	1788	1900	0,94
TA 02	1793	1900	0,94
TA 03	1789	1900	0,94
TA 04	1789	1900	0,94
TA 05	1790	1900	0,94
TA 06	1788	1900	0,94

Fonte: Autora (2024).

Para obter os valores de k , tem-se a Tabela A.18:

Tabela A.18: Interpolação para atingir valores de k.

$r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}}$	RB
0,5	0
0,7	2,5
0,8	3,5
0,94	4,9
0,95	5

Fonte: Autora (2024).

Considerando as peças, têm-se $r = 0,94$, com isso: $k = \Psi_{1000} = 4,9\%$.

Os valores correspondentes a tempos diferentes de 1000 horas, a 20°C, podem ser determinados pela expressão:

$$\Psi_{(t,t_0)} = \Psi_{1000} \times \left(\frac{t-t_0}{41,67}\right)^{0,15} \text{ para } (t, t_0) \text{ em dias.}$$

Assim, tem-se:

$$\Psi_{(t,t_0)} = 4,9 \times \left(\frac{28-1}{41,67}\right)^{0,15} = 4,59\% \text{ para a peça, aos 28 dias.}$$

Como $\Psi_{(t,t_0)} = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t-t_0)}{\sigma_{pi}}$, tem-se a relação: $\Delta\sigma_{pr} = \frac{\Psi(t-t_0)}{100} \times \sigma_i$.

Os valores atribuídos estão expressos na Tabela A.19.

Tabela A.19: $\Delta\sigma_{pr}$ para as terças alveolares.

TA	σ_{pi} (MPa)	$\Psi(t,t_0)$	$\Delta\sigma_{pr}$
TA 01	1787,63	4,59	82,05
TA 02	1793,43	4,59	82,32
TA 03	1788,53	4,59	82,09
TA 04	1789,41	4,59	82,13
TA 05	1790,38	4,59	82,18
TA 06	1788,45	4,59	82,09

Fonte: Autora (2024).

1.4 PERDA TOTAL EM RELAÇÃO À TENSÃO INICIAL

Assim, após 28 dias, a tensão na armadura corresponde a:

$$\sigma_p(t = 28) = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) - \Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) - \Delta\sigma_r$$

Os valores encontrados foram disponibilizados na Tabela A.20.

Tabela A.20: Tensão na armadura após 28 dias.

TA	σ_i	$\Delta\sigma_{p,s}(t - t_0)$	$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$	$\Delta\sigma_r$	$\sigma_p(t=28)$ MPa
TA 01	1787,63	4,26E+01	87,70	82,05	1575,28
TA 02	1793,43	4,25E+01	67,28	82,32	1601,33
TA 03	1788,53	4,29E+01	84,59	82,09	1578,95
TA 04	1789,41	4,28E+01	81,45	82,13	1583,03
TA 05	1790,38	4,25E+01	78,00	82,18	1587,70
TA 06	1788,45	4,29E+01	84,84	82,09	1578,62

Fonte: Autora (2024).

Com isso, a perda total em relação a tensão inicial, dá-se pela Tabela A.21:

Tabela A.21: Perda total das terças alveolares em relação a tensão inicial.

TA	σ_p (t=28)	perdas
TA 01	1575,28	15%
TA 02	1601,33	13%
TA 03	1578,95	15%
TA 04	1583,03	14%
TA 05	1587,70	14%
TA 06	1578,62	15%

Fonte: Autora (2024).

2. PERDAS DE PROTENSÃO CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme os resultados obtidos no programa experimental, as perdas de protensão serão calculadas para cada uma das terças alveolares a fim de elucidar dados relativos à força efetiva de protensão para cada peça.

2.1 DADOS GERAIS

Para calcular utilizando resultados obtidos experimentalmente alguns dados não são alterados, como as características geométricas das peças, dados relativos ao aço de protensão, dados complementares, deformação por ancoragem e relaxação inicial da armadura. Tem-se, então:

2.2 PERDAS INICIAIS

As perdas iniciais de deformação por ancoragem e relaxação inicial da armadura se mantêm as mesmas calculadas no item 1.2 do Apêndice A.

2.2.1 Deformação imediata do concreto

A perda por deformação imediata do concreto é dada por: $\Delta\sigma_{pd} = \varepsilon_7 \times E_p$

Onde:

ε_7 é a deformação específica da armadura de protensão, devido à descompressão, dada por: $\varepsilon_7 = \varepsilon_{concreto} = \frac{\sigma_{cg,cabos}}{E_c}$

E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

$\sigma_{cg,cabos}$ tensão no concreto no nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente modificada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão

$$\sigma_{cg,cabos} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \times e_p^2}{I} - \frac{M_{g1} \times e_p}{I}$$

Onde:

A é a área da seção transversal da peça;

I é o momento de inércia da seção transversal da peça;

N_p é a força de protensão, descontando as perdas; $N_p = \sigma_{pi} \times A$

$$N_p = \sigma_{pi} \times A \quad \therefore 141,23 \times 2,02 = 285,28 \text{ kN p/ } \emptyset 12,7\text{mm}$$

$$N_p = \sigma_{pi} \times A \quad \therefore 38,8 \times 1,12 = 43,45 \text{ kNp/ } \emptyset 9,5 \text{ mm}$$

$$N_p = 285,28 + 43,45 \cong 328,74 \text{ kN} \quad \boxed{N_p = 328,74 \text{ kN}}$$

e_p é a excentricidade da força de protensão, os valores obtidos para as seis amostras de terça alveolar estão dispostos da Tabela A.5.

A Tabela A.22 agrupa os resultados obtidos para a deformação específica da armadura de protensão, devido a descompressão, a força de protensão, o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e demais considerações sobre a geometria das peças.

Tabela A.22: Deformação específica da armadura de protensão devida à descompressão.

TA	ϵ_7	$\sigma_{cg,cabos}$	N_p (kN)	E	A (m ²)	e_p	Mg1 (kN.m)	I (m ²)
TA 01	1,22E-03	5,30E+04	724,96	43537401,20	0,03	0,11	4,11	2,89E-04
TA 02	9,81E-04	3,89E+04	724,96	39661071,05	0,04	0,10	4,56	3,27E-04
TA 03	1,13E-03	5,38E+04	724,96	47620724,35	0,03	0,11	4,01	2,81E-04
TA 04	1,07E-03	5,27E+04	724,96	49296583,59	0,03	0,11	4,17	2,91E-04
TA 05	1,08E-03	4,57E+04	724,96	42307663,64	0,04	0,11	4,39	3,01E-04
TA 06	1,11E-03	5,34E+04	724,96	48048722,04	0,03	0,11	4,09	2,85E-04

Fonte: Autora (2024).

Dados os resultados da deformação específica da armadura, para obtenção do valor de perda por deformação imediata este valor é multiplicado ao E_p do aço, conforme a Tabela A.23.

Tabela A.23: Deformação imediata do concreto.

TA	E_p (MPa)	ϵ_7	$\Delta\sigma_{pd}$
TA 01	200000	0,00122	243,2574
TA 02	200000	0,00098	196,1598
TA 03	200000	0,00113	226,0055
TA 04	200000	0,00107	213,9435
TA 05	200000	0,00108	215,8597
TA 06	200000	0,00111	222,1318

Fonte: Autora (2024).

Com isso, logo após a retirada da pista, a armadura de protensão está submetida aos valores dispostos na Tabela A.24.

Tabela A.24: Deformação imediata do concreto.

TA	σ_{pi}	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	$\Delta\sigma_{pd}$ (MPa)	$\sigma_{p(t=1)}$ (MPa)
TA 01	185	12	25,66	24,33	123,01
TA 02	185	12	25,66	19,62	127,72
TA 03	185	12	25,66	22,60	124,74
TA 04	185	12	25,66	21,39	125,95
TA 05	185	12	25,66	21,59	125,75
TA 06	185	12	25,66	22,21	125,13

Fonte: Autora (2024).

2.3 PERDAS DIFERIDAS

Para calcular a retração e fluência do concreto, assim como a relaxação da armadura, tem-se:

2.3.1 Retração do concreto

A expressão para calcular a retração do concreto considera coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e consistência do concreto e coeficiente dependente da espessura fictícia da peça.

Não são alterados esses dados, considera-se o mesmo encontrado em 1.3.1.

2.3.2 Fluência do concreto

Para calcular a fluência, é identificada a força de protensão N_p das terças alveolares, reduzindo as perdas já calculadas. A Tabela A.25 apresenta a relação.

Tabela A.25: Força de protensão N_p das terças alveolares.

TA	N_p	A_p (cm ²)	σ_{pi}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_r$	$\Delta\sigma_{pd}$
TA 01	561,44	3,14	185	1,2	2,57	2,43
TA 02	562,92	3,14	185	1,2	2,57	1,96
TA 03	561,98	3,14	185	1,2	2,57	2,26
TA 04	562,36	3,14	185	1,2	2,57	2,14
TA 05	562,30	3,14	185	1,2	2,57	2,16
TA 06	562,10	3,14	185	1,2	2,57	2,22

Fonte: Autora (2024).

Com a força de protensão, é calculada a tensão que ocorre no concreto no nível do centro de gravidade da armadura de protensão e devido à ação das cargas permanentes inclusive a protensão, sendo a amostragem pela Tabela A.26.

Tabela A.26: $\sigma_{cg,cabos}$ das terças alveolares.

TA	A (m ²)	I (m ⁴)	Np	Mg1 (kN.m)	ep (m)	$\sigma_{cg,cabos}$ (kN/m ²)
TA 01	0,03	2,89E-04	561,44	4,11E+00	0,111	39032
TA 02	0,04	3,27E-04	562,92	4,56E+00	0,097	29921
TA 03	0,03	2,81E-04	561,98	4,01E+00	0,105	37664
TA 04	0,03	2,91E-04	562,36	4,17E+00	0,105	36273
TA 05	0,04	3,01E-04	562,30	4,39E+00	0,105	34715
TA 06	0,03	2,85E-04	562,10	4,09E+00	0,107	37787

Fonte: Autora (2024).

O coeficiente de fluência é dado pela equação:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \times \varphi(t, t_0) \times \alpha_p$$

Onde os valores já são conhecidos, uma vez que $\varphi(t, t_0) \times \alpha_p$ foram calculados em 1.3.2. Assim, tem-se:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \times 0,463 \times 4,85$$

Para representar os valores obtidos para cada uma das terças alveolares, tem-se a Tabela A.27 para os valores experimentais de $\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$.

Tabela A.27: $\Delta\sigma_{p,s}(t,t_0)$ em MPa para cada terça alveolar.

TA	$\Delta\sigma_{p,s}(t,t_0)$	σ_{cgp}	$\Phi(t,t_0)$	α_p
TA 01	87,72	39,03	0,46	4,85
TA 02	67,25	29,92	0,46	4,85
TA 03	84,65	37,66	0,46	4,85
TA 04	81,52	36,27	0,46	4,85
TA 05	78,02	34,71	0,46	4,85
TA 06	84,92	37,79	0,46	4,85

Fonte: Autora (2024).

2.3.3 Relaxação da armadura

A relaxação da armadura pode ser calculada por meio da expressão:

$$\Psi_{(t,t_0)} = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}}$$

Para a tensão na armadura, retira-se as perdas iniciais, conforme disposto na Tabela A.28.

Tabela A.28: Tensão da armadura de protensão no instante de seu estiramento, descontando as perdas.

TA	σ_{pi}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_r$	Δ_{pd}	σ_{pi} (MPa)
TA 01	1850	12	25,66	24,33	1788,01
TA 02	1850	12	25,66	19,62	1792,72
TA 03	1850	12	25,66	22,60	1789,74
TA 04	1850	12	25,66	21,39	1790,95
TA 05	1850	12	25,66	21,59	1790,75
TA 06	1850	12	25,66	22,21	1790,13

Fonte: Autora (2024).

$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$ perda da tensão por relaxação pura (com comprimento constante) desde o instante t_0 do estiramento da armadura até o instante t considerado.

Assim, determina-se a relação: $r = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptk}}$, conforme Tabela A.29.

Tabela A.29: Valores de “r” para as terças alveolares.

TA	σ_{pi} (MPa)	f_{ptk}	r
TA 01	1788,01	1900	0,94
TA 02	1792,72	1900	0,94
TA 03	1789,74	1900	0,94
TA 04	1790,95	1900	0,94
TA 05	1790,75	1900	0,94
TA 06	1790,13	1900	0,94

Fonte: Autora (2024).

Conforme resultado, a interpolação para o valor de “k” foi a mesma do item 1.3.3. Com isso, é possível chegar ao resultado da equação para determinação da relaxação da armadura, expresso pela Tabela A.30.

Tabela A.30: $\Delta\sigma_{pr}$ para as terças alveolares.

TA	σ_{pi} (MPa)	$\Psi(t, t_0)$	$\Delta\sigma_{pr}$ (MPa)
TA 01	1788,01	4,59	82,07
TA 02	1792,72	4,59	82,29
TA 03	1789,74	4,59	82,15
TA 04	1790,95	4,59	82,20
TA 05	1790,75	4,59	82,20
TA 06	1790,13	4,59	82,17

Fonte: Autora (2024).

2.4 PERDA TOTAL EM RELAÇÃO À TENSÃO INICIAL, CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA EXPERIMENTAL

Assim, após 28 dias, a tensão na armadura corresponde a:

$$\sigma_p(t = 28) = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) - \Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) - \Delta\sigma_r .$$

Os valores encontrados foram disponibilizados na Tabela A.31.

Tabela A.31: Tensão na armadura após 28 dias.

TA	σ_i	$\Delta\sigma_{p,s}(t - t_0)$	$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$	$\Delta\sigma_r$	$\sigma_p(t=28)$ MPa
TA 01	1788,01	4,26E+01	87,72	82,07	1575,62
TA 02	1792,72	4,25E+01	67,25	82,29	1600,69
TA 03	1789,74	4,29E+01	84,65	82,15	1580,04
TA 04	1790,95	4,28E+01	81,52	82,20	1584,42
TA 05	1790,75	4,25E+01	78,02	82,20	1588,04
TA 06	1790,13	4,29E+01	84,92	82,17	1580,14

Fonte: Autora (2024).

Com isso, a perda total em relação a tensão inicial, dá-se pela Tabela A.32:

Tabela A.32: Perda total das terças alveolares em relação a tensão inicial.

TA	σ_p (t=28) MPa	perdas
TA 01	1575,62	15%
TA 02	1600,69	13%
TA 03	1580,04	15%
TA 04	1584,42	14%
TA 05	1588,04	14%
TA 06	1580,14	15%

Fonte: Autora (2024)

APÊNDICE B

1 MOMENTO DE FISSURAÇÃO

A tensão na borda tracionada é dada por:

$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \frac{M_p \times y_t}{I} - \frac{M_r \times y_t}{I}$$

Igualando ao valor de tensão de tração que provoca a primeira fissura, tem-se:

$$-\alpha \times f_{ctm} = \frac{N}{A} + \frac{M_p \times y_t}{I} - \frac{M_r \times y_t}{I}$$

Então, isolando o valor do momento de fissuração (M_r) e considerando a homogeneização da seção, chega-se a:

$$M_r = \left(\alpha \times f_{ctm} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \times \frac{I_{hom}}{y_{t,hom}} + N_p \times e_p$$

Onde:

N_p é a força normal de protensão na seção considerada, dada por $N_p = \sigma_p \times A_p$, calculado no Apêndice A.

e_p é a excentricidade da armadura protendida, dada por $e_p = \frac{h}{2} - d'$

α é 1,2 para seções em forma de "T" ou duplo "T" e 1,5 para seções retangulares, conforme a NBR 6118:2023.

Assim, $\alpha = 1,2$

f_{ctm} é a resistência média do concreto à tração;

Y_{hom} é a distância do centro de gravidade à fibra superior da seção homogeneizada, dada por: $Y_{hom} = \frac{A \times Y_{cg} + A_p \times (\alpha_p - 1) \times d}{A_{hom}}$

Y_{cg} é a distância do centro de gravidade à fibra superior da seção;

A é a área da seção transversal, em m^2 .

A_{hom} é a área da seção transversal homogeneizada, dada por:

$$A_{hom} = A + A_p(\alpha_p - 1)$$

α_p é a relação entre os módulos de deformação longitudinal do aço E_p e do concreto E_{cs} , dada por: $\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cs}}$.

I_{hom} é o momento de inércia da seção homogeneizada

Será empregado o momento de inércia da seção homogeneizada, que deve ser calculado por meio de: $I_{hom} = I + A(Y_{cg} - Y_{hom})^2 + A_p(\alpha_p - 1) \times (d - Y_{hom})^2$

$$y_{t,hom} = h - y_{hom}$$

Resultando em:

$$M_r = \left(\alpha \times f_{ctm} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \times \frac{I_{hom}}{y_{t,hom}} + N_p \times e_p$$

1.1 CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL

Os valores obtidos considerando o valor de f_{ck} do concreto, mediante controle de qualidade fabril, estão expressos na Tabela B.1.

Tabela B.1: Momento de fissuração das terças alveolares.

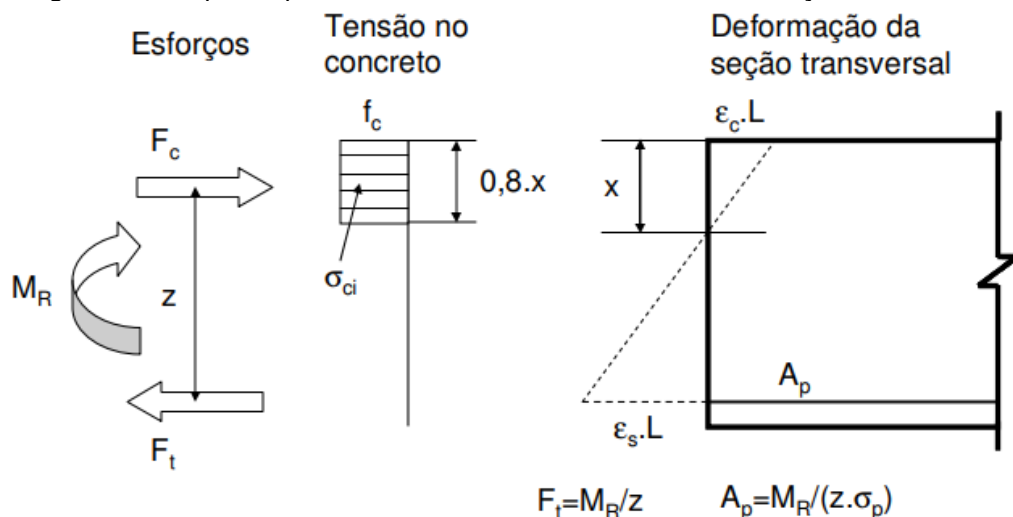
Terças	M_r (kN.m)	α	f_{ctm}	N_p (kN)	A_{hom}	I_{hom}	$Y_{t,hom}$	e_p
TA 01	56	1,2	4,29	318,21	0,034	0,00030	0,135	0,111
TA 02	56	1,2	4,29	323,47	0,038	0,00034	0,135	0,108
TA 03	54	1,2	4,29	318,95	0,034	0,00029	0,135	0,105
TA 04	54	1,2	4,29	319,77	0,035	0,00030	0,135	0,105
TA 05	54	1,2	4,29	320,72	0,037	0,00031	0,135	0,105
TA 06	56	1,2	4,29	318,88	0,034	0,00030	0,135	0,113

Fonte: Autora (2024).

1.1.1 MOMENTO RESISTENTE NA SEÇÃO CENTRAL, CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL

O momento resistente da seção, sem coeficientes de majoração de ações e de minoração da resistência dos materiais, é calculado conforme a Figura B.1.

Figura B.1: Esquema para o cálculo do momento resistente da seção transversal.



Fonte: Catoia (2011)

Considera-se a peça no estágio II de deformação no ELU, sendo posteriormente feita a verificação. A verificação é realizada variando os valores de deformação ou da posição da linha neutra até que seja garantido o equilíbrio entre as forças na armadura e no concreto, F_s e F_c , respectivamente. Com isso, para o domínio 2, tem-se: $\varepsilon_s = 1\%$.

O valor do pré-alongamento (ε_p) fica definido pela tensão na armadura de protensão na data do ensaio. Pela lei de Hooke, é possível calcular:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

Considerando o valor da deformação correspondente à descompressão (ε_7), tem-se:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_7 + \varepsilon_s$$

Os valores obtidos com as equações estão expressos na Tabela B.2.

Tabela B.2: Valores de ε_t para as terças alveolares.

Terças	ε_p (%)	σ_p (MPa)	E_p (MPa)	ε_7	ε_s	ε_t	$\varepsilon_t\%$
TA 01	0,79	1575,28	200000	0,0012	1	1,79	17,89
TA 02	0,80	1601,33	200000	0,0009	1	1,80	18,02
TA 03	0,79	1578,95	200000	0,0012	1	1,79	17,91
TA 04	0,79	1583,03	200000	0,0011	1	1,79	17,93
TA 05	0,79	1587,7	200000	0,0011	1	1,79	17,95
TA 06	0,79	1578,62	200000	0,0012	1	1,79	17,91

Fonte: Autora (2024).

Com o valor da deformação total é possível determinar a tensão no aço de protensão, conforme a Figura B.2.

Figura B.2: Tensão no aço σ_{pd} (MPa)

ε(‰)	5,25	6,794	7,438	8,167	9,000	9,962	10,00	12,50	15,00	17,5
CP175	1025	1264	1316	1344	1365	1368	1368	1378	1388	1397
CP190	1025	1314	1411	1459	1482	1486	1486	1496	1507	1517
ε(‰)	20,00	22,50	25,00	27,5	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00	
CP175	1407	1416	1426	1436	1445	1455	1464	1474	1484	
CP190	1527	1538	1548	1559	1569	1579	1590	1600	1611	

Fonte: VASCONCELOS (1980, apud Catoia, 2011).

O valor da tensão de projeto (σ_{pd}) será determinado por interpolação linear dos valores, conforme a Tabela B.3.

Tabela B.3: Interpolação para obtenção do valor da tensão de projeto.

Terças	εt%	CP190
TA 01	17,89	1519
TA 02	18,02	1519
TA 03	17,91	1519
TA 04	17,93	1519
TA 05	17,95	1519
TA 06	17,91	1519

Fonte: Autora (2024).

O valor característico da tensão no aço (σ_{pk}), corresponde a:

$$\sigma_{pk} = \sigma_{pd} \times 1,15 \therefore \sigma_{pk} = 1519 \times 1,15$$

$$\sigma_{pk} = 1746,85 \text{ MPa}$$

Assim, a força resultante na armadura pode ser determinada da seguinte forma:

$$F_p = A_p \times \sigma_{pk} \therefore F_p = 3,14 \times 174,685$$

$$F_p = 548,51 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Ao igualar as expressões da força de tração e compressão, considerando o diagrama retangular simplificado, determina-se o valor da linha neutra x , dada pela expressão:

$$x = \frac{F_p}{0,8 \times b \times f_{cj}}$$

Por meio da determinação de posição de uma linha neutra (x), é verificada se a peça se encontra no domínio 2. Isto é, no final do domínio 2, a posição da linha neutra corresponde a: $x_2 = 0,259 \times d$

Assim, se $x < x_2$, a peça está no domínio 2. Os valores encontrados foram agrupados na Tabela B.4.

Tabela B.4: Determinação do valor da linha neutra x e verificação de domínio das terças alveolares.

Terças	b	f_{cj} (kN)	F_p	x (m)	x_2	d
TA 01	0,240	57730	548,51	0,049	0,064	0,246
TA 02	0,244	57730	548,51	0,049	0,061	0,234
TA 03	0,243	57730	548,51	0,049	0,064	0,246
TA 04	0,250	57730	548,51	0,048	0,062	0,240
TA 05	0,245	57730	548,51	0,048	0,062	0,240
TA 06	0,245	57730	548,51	0,048	0,064	0,248

Fonte: Autora (2024).

Desta forma, como $x < x_2$ a peça encontra-se no domínio 2.

Para encontrar o momento resistente, utiliza-se da fórmula: $M_R = F_p \times (d - 0,4 \times x)$. Para as terças, os valores encontrados foram agrupados na Tabela B.5.

Tabela B.5: Momento resistente das terças alveolares.

Terças	M_r (kN.m)	F_p	d	x
TA 01	124,08	548,51	0,25	0,049
TA 02	117,67	548,51	0,23	0,049
TA 03	124,21	548,51	0,25	0,049
TA 04	121,22	548,51	0,24	0,048
TA 05	121,01	548,51	0,24	0,048
TA 06	125,39	548,51	0,25	0,048

Fonte: Autora (2024).

1.1.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO A 2,5 h DO APOIO, CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL

Considera-se a seção a 2,5 h do apoio, para o cálculo do momento de fissuração, onde é necessário verificar o comprimento de transferência da força de protensão, determinado por recomendações normativas da NBR 6118:2023.

Comprimento de transferência:

Para verificar a distância da extremidade da peça a partir da qual é possível considerar o esforço de protensão atuando em toda a seção transversal, é preciso verificar o comprimento de transferência, dado por l_t .

Para elementos pré-tracionados, o cálculo do comprimento de transferência é realizado considerando variação linear ao longo do comprimento, pela equação:

$$l_{bpt} = \frac{0,625 \times l_{bp} \times \sigma_p}{f_{pyd}}$$

l_{bpt} é o comprimento de transferência, dado pela NBR 6118, no item 9.4.5.2

l_{bp} é o comprimento de ancoragem básico, calculado por $l_{bp} = \frac{7 \times \phi \times f_{pyd}}{36 \times f_{bpd}}$

Substituindo l_{bp} em l_{bpt} :

$$l_{bpt} = \frac{0,625 \times l_{bp} \times \sigma_p}{f_{pyd}} = \frac{0,625 \times 7 \times \phi \times f_{pyd} \times \sigma_p}{36 \times f_{bpd} \times f_{pyd}} \rightarrow l_{bpt} = \frac{0,625 \times 7 \times \phi \times \sigma_p}{36 \times f_{bpd}}$$

Onde:

ϕ é o diâmetro da barra

σ_p calculado no apêndice A

f_{bpd} é a resistência de aderência de cálculo

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \times \eta_{p2} \times f_{ctd}$$

η_{p1} é igual a 1,2 para cordoalhas de três e sete fios;

η_{p2} é igual a 1 para situações de boa aderência;

f_{ctd} é a resistência de cálculo do concreto à tração, dado por: $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$.

Cujo:

$f_{ctk,inf}$ é a resistência característica inferior do concreto à tração, dada por $f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$. Para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$: $f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}}$ e para concretos com $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$: $f_{ct,m} = 2,12 \ln [1 + 0,1(f_{ck} + 8)]$, expresso em MPa.

γ_c é o coeficiente de minoração da resistência do concreto, considerado igual a 1,0.

Com isso, pode-se determinar o comprimento de transferência l_{bpt} como sendo:

$$l_{bpt} = \frac{0,625 \times 7 \times \phi \times \sigma_p}{36 \times f_{bpd}}$$

A Tabela B.6 agrupa os valores encontrados para as terças alveolares.

Tabela B.6: Comprimento de transferência das terças alveolares.

Terça	ϕ (m)	σ_p (MPa)	f_{bpd} (MPa)	η_{p1}	η_{p2}	f_{ctd} (MPa)	l_{bpt} (m)
TA 01	0,0127	1575,28	3,60	1,2	1	3,00	0,67
TA 02	0,0127	1601,33	3,60	1,2	1	3,00	0,69
TA 03	0,0127	1578,95	3,60	1,2	1	3,00	0,68
TA 04	0,0127	1583,03	3,60	1,2	1	3,00	0,68
TA 05	0,0127	1587,70	3,60	1,2	1	3,00	0,68
TA 06	0,0127	1578,62	3,60	1,2	1	3,00	0,68

Fonte: Autora (2024)

A seção considerada está a 2,5 h do apoio, isto significa que está a 0,675 m e a 0,795 m da extremidade, considerando 12 cm entre o eixo do apoio e a extremidade da laje.

O momento de fissuração, considerando a homogeneização da seção, corresponde a:

$$M_r = \left(\alpha \times f_{ctm} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \times \frac{I_{hom}}{y_{t,hom}} + N_p \times e_p$$

Os resultados obtidos foram agrupados na Tabela B.7.

Tabela B.7: Momento de fissuração das terças alveolares a 2,5 h do apoio.

Terças	Mr (kN.m)	α	f_{ctm}	N_p (kN)	A_{hom}	I_{hom}	$Y_{t,hom}$	e_p
TA 01	56	1,2	4,29	318,21	0,034	0,00030	0,135	0,111
TA 02	56	1,2	4,29	323,47	0,038	0,00034	0,135	0,108
TA 03	54	1,2	4,29	318,95	0,034	0,00029	0,135	0,105
TA 04	54	1,2	4,29	319,77	0,035	0,00030	0,135	0,105
TA 05	54	1,2	4,29	320,72	0,037	0,00031	0,135	0,105
TA 06	56	1,2	4,29	318,88	0,034	0,00030	0,135	0,113

Fonte: Autora (2024).

Momento resistente a 2,5 h do apoio:

Considerando a peça no domínio 2, tem-se $\varepsilon_s = 1\%$.

O valor do pré-alongamento (ε_p) fica definido a partir da tensão na armadura de protensão na data do ensaio. Assim, pela lei de Hooke, obtém:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

Considerando o valor da deformação correspondente à descompressão já calculado nas perdas iniciais, então tem-se: $\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_7 + \varepsilon_s$. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela B.8.

Tabela B.8: Valores encontrados de pré-alongamento para terças alveolares a 2,5h do apoio.

Terças	ε_p (%)	σ_p (MPa)	E_p (MPa)	ε_7	ε_s	ε_t	$\varepsilon_t\%$
TA 01	0,79	1575,28	200000	0,0012	1	1,79	17,89
TA 02	0,80	1601,33	200000	0,0009	1	1,80	18,02
TA 03	0,79	1578,95	200000	0,0012	1	1,79	17,91
TA 04	0,79	1583,03	200000	0,0011	1	1,79	17,93
TA 05	0,79	1587,70	200000	0,0011	1	1,79	17,95
TA 06	0,79	1578,62	200000	0,0012	1	1,79	17,91

Fonte: Autora (2024).

Com o valor da deformação total determina-se a tensão no aço de protensão, considerando a Figura B.2.

Com interpolação, tem-se o valor da tensão de projeto (σ_{pd}), expressa pela Tabela B.9.

Tabela B.9: Tensão de projeto a 2,5 h do apoio.

Terças	$\varepsilon_t\%$	σ_{pd}
TA 01	17,89	1519
TA 02	18,02	1519
TA 03	17,91	1519
TA 04	17,93	1519
TA 05	17,95	1519
TA 06	17,91	1519

Fonte: Autora (2024).

O valor característico da tensão no aço (σ_{pk}), corresponde a:

$$\sigma_{pk} = \sigma_{pd} \times 1,15 \rightarrow \sigma_{pk} = 1519 \times 1,15$$

$$\sigma_{pk} = 1746,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pk} = 174,685 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Assim, a força resultante na armadura pode ser determinada da seguinte forma:

$$F_p = A_p \times \sigma_p \rightarrow F_p = 3,14 \times 174,685$$

$$F_p = 548,51 \text{ kN}$$

Ao igualar as expressões da força de tração e compressão, considerando o diagrama retangular simplificado, determina-se o valor da linha neutra x , dada pela expressão:

$$x = \frac{F_p}{0,8 \times b \times f_{cj}}$$

Por meio da determinação de posição de uma linha neutra (x), é verificada se a peça se encontra no domínio 2. Isto é, no final do domínio 2, a posição da linha neutra corresponde a: $x_2 = 0,259 \times d$.

Os resultados foram agrupados e estão disponíveis na Tabela B.10.

Tabela B.10: Valores para x a 2,5 h do apoio.

Terças	b	f_{cj} (kN)	F_p	x (m)	x_2	d
TA 01	0,240	57730	548,51	0,049	0,064	0,246
TA 02	0,244	57730	548,51	0,049	0,061	0,234
TA 03	0,243	57730	548,51	0,049	0,064	0,246
TA 04	0,250	57730	548,51	0,048	0,062	0,240
TA 05	0,245	57730	548,51	0,048	0,062	0,240
TA 06	0,245	57730	548,51	0,048	0,064	0,248

Fonte: Autora (2024).

Assim, se $x < x_2$, a peça está no domínio 2.

Para o cálculo de momento resistente, utiliza-se a fórmula: $M_R = F_p \times (d - 0,4 \times x)$. Os resultados para as terças alveolares posicionadas a 2,5 h do apoio foram agrupados na Tabela B.11.

Tabela B.11: Momento resistente para seção a 2,5 h do apoio.

Terças	M_r (kN.m)
TA 01	124,08
TA 02	117,67
TA 03	124,21
TA 04	121,22
TA 05	121,01
TA 06	125,39

Fonte: Autora (2024).

1.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO, CONSIDERANDO O VALOR DE f_{ctm} CONFORME PROGRAMA EXPERIMENTAL

Serão utilizados os valores de f_{ctm} e E_c conforme resultados do programa experimental, resultando no momento de fissuração disposto na Tabela B.12.

Tabela B.12: Momento de fissuração das terças alveolares, considerando valores experimentais.

Terças	M_r (kN.m)	α	f_{ctm}	N_p (kN)	A_{hom}	I_{hom}	$Y_{t,hom}$	e_p
TA 01	56	1,2	4,29	318,21	0,034	0,00030	0,135	0,111
TA 02	56	1,2	4,29	323,47	0,038	0,00034	0,135	0,108
TA 03	54	1,2	4,29	318,95	0,034	0,00029	0,135	0,105
TA 04	54	1,2	4,29	319,77	0,035	0,00030	0,135	0,105
TA 05	54	1,2	4,29	320,72	0,037	0,00031	0,135	0,105
TA 06	56	1,2	4,29	318,88	0,034	0,00030	0,135	0,113

Fonte: Autora (2024).

1.2.1 MOMENTO RESISTENTE NA SEÇÃO CENTRAL, CONSIDERANDO VALORES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para conferir valores de deformação total, tem-se a Tabela B.13.

Tabela B.13: Valores de ϵ_t para as terças alveolares, considerando valores experimentais.

Terças	ϵ_p (%)	σ_p (MPa)	E_p (MPa)	ϵ_7	ϵ_s	ϵ_t	$\epsilon_t\%$
TA 01	0,79	1575,62	200000	0,000473	1	1,79	17,88
TA 02	0,80	1600,69	200000	0,000333	1	1,80	18,01
TA 03	0,79	1580,04	200000	0,000460	1	1,79	17,90
TA 04	0,79	1584,42	200000	0,000431	1	1,79	17,93
TA 05	0,79	1588,04	200000	0,000395	1	1,79	17,94
TA 06	0,79	1580,14	200000	0,000455	1	1,79	17,91

Fonte: Autora (2024).

Realizando a interpolação, com referência na Figura B.2, tem-se os valores apresentados na Tabela B.14.

Tabela B.14: Interpolação para obtenção do valor da tensão de projeto.

Terças	$\epsilon_t\%$	CP190
TA 01	17,88	1518,53
TA 02	18,01	1519,03
TA 03	17,90	1518,62
TA 04	17,93	1518,71
TA 05	17,94	1518,78
TA 06	17,91	1518,62

Fonte: Autora (2024).

O valor característico da tensão no aço (σ_{pk}), corresponde a: $\sigma_{pk} = \sigma_{pd} \times 1,15$.

Os valores para as seis peças de terças foram agrupados na Tabela B.15.

Tabela B.15: Valores de σ_{pk} encontrados.

Terças	σ_{pd}	σ_{pk}
TA 01	1518,53	1746,31
TA 02	1519,03	1746,88
TA 03	1518,62	1746,41
TA 04	1518,71	1746,51
TA 05	1518,78	1746,59
TA 06	1518,62	1746,41

Fonte: Autora (2024).

Assim, a força resultante na armadura pode ser determinada da seguinte forma:

$F_p = A_p \times \sigma_{pk}$. Atribuindo valores, tem-se a Tabela B.16.

Tabela B.16: Força resultante na armadura.

Terças	A_p	σ_{pk}	F_p (kN/cm ²)
TA 01	3,14	174,63	548,34
TA 02	3,14	174,69	548,52
TA 03	3,14	174,64	548,37
TA 04	3,14	174,65	548,40
TA 05	3,14	174,66	548,43
TA 06	3,14	174,64	548,37

Fonte: Autora (2024).

Ao igualar as expressões da força de tração e compressão, considerando o diagrama retangular simplificado, determina-se o valor da linha neutra x , dada pela expressão:

$$x = \frac{F_p}{0,8 \times b \times f_{cj}}$$

Por meio da determinação de posição de uma linha neutra (x), é verificada se a peça se encontra no domínio 2. Isto é, no final do domínio 2, a posição da linha neutra corresponde a: $x_2 = 0,259 \times d$

Assim, se $x < x_2$, a peça está no domínio 2. Os valores encontrados foram agrupados na Tabela B.17.

Tabela B.17: Determinação do valor da linha neutra x e verificação de domínio das terças alveolares.

Terças	b	f_{cj} (kN)	F_p	x (m)	x_2	d
TA 01	0,240	57730	548,34	0,049471	0,064	0,25
TA 02	0,244	57730	548,52	0,048676	0,063	0,24
TA 03	0,243	57730	548,37	0,048863	0,062	0,24
TA 04	0,250	57730	548,40	0,047497	0,062	0,24
TA 05	0,245	57730	548,43	0,048469	0,062	0,24
TA 06	0,245	57730	548,37	0,048464	0,064	0,25

Fonte: Autora (2024).

Desta forma, como $x < x_2$ a peça encontra-se no domínio 2.

Para encontrar o momento resistente, utiliza-se da fórmula: $M_R = F_p \times (d - 0,4 \times x)$. Para as terças, os valores encontrados foram agrupados na Tabela B.18.

Tabela B.18: Momento resistente das terças alveolares.

Terças	M_r (kN.m)	F_p	d	x
TA 01	124,26	548,34	0,25	0,0495
TA 02	122,61	548,52	0,24	0,0487
TA 03	120,89	548,37	0,24	0,0489
TA 04	121,20	548,40	0,24	0,0475
TA 05	120,99	548,43	0,24	0,0485
TA 06	125,42	548,37	0,25	0,0485

Fonte: Autora (2024).

1.2.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO A 2,5 H DO APOIO, CONSIDERANDO VALORES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Considera-se a seção a 2,5 h do apoio, para o cálculo do momento de fissuração, onde é necessário verificar o comprimento de transferência da força de protensão, determinado por recomendações normativas da NBR 6118:2023.

Pode-se determinar o comprimento de transferência l_{bpt} como sendo:

$$l_{bpt} = \frac{0,625 \times 7 \times \phi \times \sigma_p}{36 \times f_{bpd}}$$

A Tabela B.19 agrupa os valores encontrados para as terças alveolares.

Tabela B.19: Comprimento de transferência das terças alveolares.

Terça	ϕ (m)	σ_p (MPa)	f_{bpd} (MPa)	η_{p1}	η_{p2}	f_{ctd} (MPa)	l_{bpt} (m)
TA 01	0,0127	1575,62	3,23604	1,2	1	2,70	0,75
TA 02	0,0127	1600,69	3,23139	1,2	1	2,69	0,76
TA 03	0,0127	1580,04	2,41182	1,2	1	2,01	1,01
TA 04	0,0127	1584,42	2,05413	1,2	1	1,71	1,19
TA 05	0,0127	1588,04	1,6641	1,2	1	1,39	1,47
TA 06	0,0127	1580,14	3,0279	1,2	1	2,52	0,81

Fonte: Autora (2024).

A seção considerada está a 2,5 h do apoio, isto significa que está a 0,675 m e a 0,795 m da extremidade, considerando 12 cm entre o eixo do apoio e a extremidade da laje.

O momento de fissuração, considerando a homogeneização da seção, corresponde a:

$$M_r = \left(\alpha \times f_{ctm} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \times \frac{I_{hom}}{y_{t,hom}} + N_p \times e_p$$

Os resultados obtidos foram agrupados na Tabela B.20.

Tabela B.20: Momento de fissuração das terças alveolares a 2,5 h do apoio.

Terças	Mr (kN.m)	α	f_{ctm}	N_p (kN)	A_{hom}	I_{hom}	$Y_{t,hom}$	e_p
TA 01	56,14	1,2	3,85	318,28	0,034	0,0003	0,135	0,111
TA 02	56,36	1,2	3,85	323,34	0,038	0,00034	0,135	0,108
TA 03	53,69	1,2	2,87	319,17	0,034	0,00029	0,135	0,105
TA 04	53,93	1,2	2,45	320,05	0,035	0,0003	0,135	0,105
TA 05	53,60	1,2	1,98	320,78	0,037	0,00031	0,135	0,105
TA 06	56,94	1,2	3,60	319,19	0,034	0,0003	0,135	0,113

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE C

1 MECANISMO DE FLEXO-CORTANTE

A força cortante resistente de cálculo $V_{Rd,fl}$, utilizada para as lajes alveolares, deve ser calculada segundo a seguinte equação:

$$V_{Rd,fl} = V_{c,1} + V_{p,1}$$

Onde:

$$V_{c,1} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40 \rho_1) \Sigma b_{w,1} d$$

$$V_{p,1} = 0,15 \sigma_{cp,1} \Sigma b_{w,1} d$$

$$\Sigma b_{w,1} = \Sigma b_{w,ext} + \Sigma b_{w,int}$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\Sigma b_{w,1} d}$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c}$$

$k = 1,6 - d \geq 1$ com d expresso em metros (m).

Onde:

$V_{Rd,fl}$ é a força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo na seção, expressa em quilonewtons (kN);

f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto pré-moldado, expressa em megapascals (MPa);

$\Sigma b_{w,1}$ é o somatório das larguras das nervuras (internas e externas), expresso em metros (m);

A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal inferior tracionada, expressa em metros quadrados (m²);

ρ_1 é a taxa de armadura A_s em relação à seção;

d é a altura útil total da seção transversal, expressa em metros (m);

$\sigma_{cp,1}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso de alvéolos não preenchidos, expressa em megapascal (MPa);

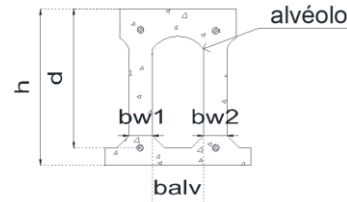
N_p é a força de protensão final, depois de todas as perdas, expressa em quilonewtons (kN);

A_c é a área da seção transversal de concreto, expressa em metros quadrados (m²);

1.1 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO, CONSIDERANDO O f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL (NBR 14861:2022)

É importante considerar a geometria para o cálculo efetivo. Com isso, apresenta-se a Figura C.1 para análise das informações e referência de cálculo com base na geometria das peças.

Figura C.1: Identificação das partes de uma terça alveolar.



Fonte: Autora (2024).

A partir da geometria de cada terça alveolar, a Tabela C.1 dispõe dos valores apropriados da somatória das nervuras, apresentado como b_w .

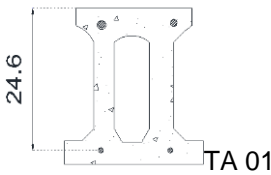
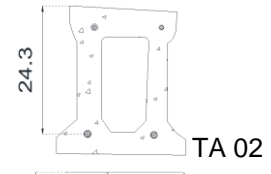
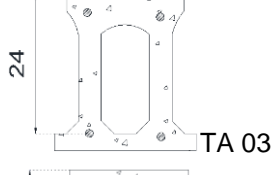
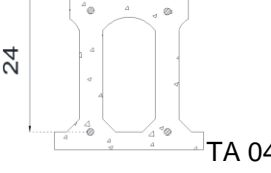
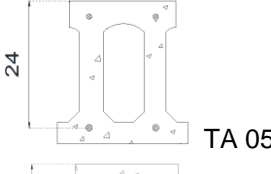
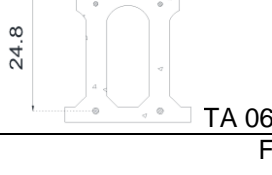
Tabela C.1: Somatória das nervuras das terças alveolares.

Terça	b_w (m)
<p>TA 01</p>	$0,035 + 0,042 = 0,077$
<p>TA 02</p>	$0,047 + 0,042 = 0,089$
<p>TA 03</p>	$0,039 + 0,04 = 0,079$
<p>TA 04</p>	$0,04 + 0,04 = 0,080$
<p>TA 05</p>	$0,045 + 0,04 = 0,085$
<p>TA 06</p>	$0,04 + 0,04 = 0,080$

Fonte: Autora (2024).

Para apresentar os valores atribuídos a d e k , tem-se a tabela C.2.

Tabela C.2: Valores de d e k para as terças alveolares.

Terça	d (m)	k (m)
 TA 01	0,246	1,6 – 0,24 $k = 1,354$
 TA 02	0,243	1,6 – 0,243 $k = 1,357$
 TA 03	0,240	1,6 – 0,240 $k = 1,360$
 TA 04	0,240	1,6 – 0,240 $k = 1,360$
 TA 05	0,240	1,6 – 0,240 $k = 1,360$
 TA 06	0,248	1,6 – 0,248 $k = 1,352$

Fonte: Autora (2024).

Todas as informações, com os valores obtidos por meio da atribuição de valores de f_{ck} do concreto baseado no controle de qualidade fabril, sem considerar o coeficiente de segurança “ f_{ctd} ”, considerando então o valor atribuído a $f_{ctk,inf}$, estão agrupadas na Tabela C.3.

Tabela C.3: Força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo na seção.

Terça	$V_{Rd,fl}$ (kN)	$V_{c,1}$	$V_{p,1}$	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	k	ρ_1	$\sum bw$	A_s (m ²)	N_p (MPa)	d (m)	σ_{cp1} (MPa)	A_c (m ²)
TA 01	59	0,03	0,03	3,00	1,35	0,01	0,08	0,000202	330,21	0,25	9,81	0,03
TA 02	64	0,03	0,03	3,00	1,36	0,01	0,09	0,000202	334,02	0,24	8,93	0,04
TA 03	60	0,03	0,03	3,00	1,36	0,01	0,08	0,000202	331,13	0,24	10,07	0,03
TA 04	60	0,03	0,03	3,00	1,36	0,01	0,08	0,000202	332,13	0,24	9,73	0,03
TA 05	62	0,03	0,03	3,00	1,36	0,01	0,09	0,000202	333,26	0,24	9,27	0,04
TA 06	62	0,03	0,03	3,00	1,35	0,01	0,08	0,000202	329,30	0,25	9,82	0,03

Fonte: Autora (2024).

A seguir a padronização para projetos, utilizando o valor de “ f_{ctd} ”, onde fora considerado:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

Onde:

$\gamma_c = 1,68$, conforme NBR 6118 (2023), item 24.5.2.1.

Atribuindo o valor de f_{ck} do concreto, conforme controle de qualidade fabril, tem-se a Tabela C.4.

Tabela C.4: Força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo para projeto de terça alveolar.

Terça	$V_{Rd,fl}$ (kN)	$V_{c,1}$	$V_{p,1}$	f_{ctd} (MPa)	k	ρ_1	Σbw	A_s (m ²)	N_p (MPa)	d (m)	σ_{cp1} (MPa)	A_c (m ²)
TA 01	47	0,03	0,03	1,79	1,35	0,01	0,08	0,000202	330,21	0,25	9,81	0,03
TA 02	50	0,03	0,03	1,79	1,36	0,01	0,09	0,000202	334,02	0,24	8,93	0,04
TA 03	47	0,03	0,03	1,79	1,36	0,01	0,08	0,000202	331,13	0,24	10,07	0,03
TA 04	47	0,03	0,03	1,79	1,36	0,01	0,08	0,000202	332,13	0,24	9,73	0,03
TA 05	48	0,03	0,03	1,79	1,36	0,01	0,09	0,000202	333,26	0,24	9,27	0,04
TA 06	49	0,03	0,03	1,79	1,35	0,01	0,08	0,000202	329,30	0,25	9,82	0,03

Fonte: Autora (2024).

1.2 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO, CONSIDERANDO $f_{ctm,exp}$ E OS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE (NBR 14861:2022)

A partir dos resultados obtidos com o ensaio de resistência à flexão é possível determinar um cálculo de força cortante resistente a flexo-cortante efetivo das peças. Os valores encontrados para equação da força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo, sem considerar coeficiente de segurança, estão dispostos na Tabela C.5.

Tabela C.5: Força cortante resistente a flexo-cortante, sem coeficiente de segurança.

Terça	$V_{Rd,fl}$ (kN)	$V_{c,1}$	$V_{p,1}$	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	k	ρ_1	Σbw	A_s (m ²)	N_p (MPa)	d (m)	σ_{cp1} (MPa)	A_c (m ²)
TA 01	55	0,03	0,03	2,70	1,35	0,01	0,08	0,000202	318,28	0,25	9,46	0,03
TA 02	59	0,03	0,03	2,69	1,36	0,01	0,09	0,000202	323,34	0,24	8,65	0,04
TA 03	49	0,02	0,03	2,01	1,36	0,01	0,08	0,000202	319,17	0,24	9,71	0,03
TA 04	45	0,02	0,03	1,71	1,36	0,01	0,08	0,000202	320,05	0,24	9,37	0,03
TA 05	43	0,02	0,03	1,39	1,36	0,01	0,09	0,000202	320,78	0,24	8,93	0,04
TA 06	56	0,03	0,03	2,52	1,35	0,01	0,08	0,000202	319,19	0,25	9,52	0,03

Fonte: Autora (2024).

Considerando projeto e a necessidade de um coeficiente de segurança, o cálculo da força cortante resistente a flexo-cortante também foi realizado utilizando o valor de f_{ctd} , que considera uma minoração a favor da segurança, sobre o valor de $f_{ctk,inf}$. A padronização para projetos, utilizando o valor de “ f_{ctd} ”, foi considerado:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

Onde:

$\gamma_c = 1,68$, conforme NBR 6118 (2023), item 24.5.2.1.

Com isso, os valores foram agrupados na Tabela C.6.

Tabela C.6: Força cortante resistente a flexo-cortante para projeto de terça alveolar.

Terça	$V_{Rd,fl}$ (kN)	$V_{c,1}$	$V_{p,1}$	f_{ctd} (MPa)	k	ρ_1	Σbw	A_s (m ²)	N_p (MPa)	d (m)	σ_{cp1} (MPa)	A_c (m ²)
TA 01	44	0,02	0,03	1,61	1,35	0,01	0,08	0,000202	318,28	0,25	9,46	0,03
TA 02	47	0,02	0,03	1,60	1,36	0,01	0,09	0,000202	323,34	0,24	8,65	0,04
TA 03	40	0,01	0,03	1,20	1,36	0,01	0,08	0,000202	319,17	0,24	9,71	0,03
TA 04	38	0,01	0,03	1,02	1,36	0,01	0,08	0,000202	320,05	0,24	9,37	0,03
TA 05	36	0,01	0,03	0,83	1,36	0,01	0,09	0,000202	320,78	0,24	8,93	0,04
TA 06	45	0,02	0,03	1,50	1,35	0,01	0,08	0,000202	319,19	0,25	9,52	0,03

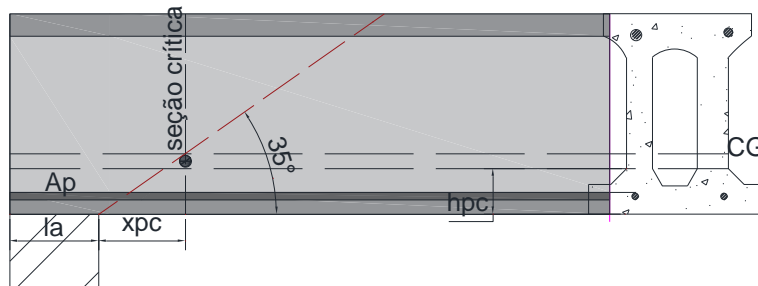
Fonte: Autora (2024).

2 MECANISMO DE TRAÇÃO DIAGONAL

A verificação à força cortante da seção transversal na região do comprimento de transferência deve ser feita para a seção crítica definida pelo comprimento l_x , a partir da extremidade da laje sobre seu apoio, sendo $l_x = l_a + x_{pc}$ cujo x_{pc} é a posição do ponto crítico em uma linha de ruptura com 35°.

A Figura C.2 exemplifica a verificação.

Figura C.2: Seção crítica ao longo da linha de ruptura de terças alveolares com alvéolos não circulares.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14861 (2022).

Para casos com alvéolos não circulares, em altura nominal de $250 \leq h \leq 400$:

$$V_{Rd,c} = \beta_{pc} \times \frac{I b_w}{S} \times \sqrt{f_{ctd}^2 + 0,9 \times \alpha_{pc} \times \sigma_{pc} \times f_{ctd}}$$

Sendo que:

I é o momento de inércia da seção bruta de concreto, expresso em metros elevado à quarta potência (m^4);

b_w é o somatório das nervuras;

S é o momento estático com base no centróide, expresso em metros cúbicos (m^3);

f_{ctd} é o valor de projeto da resistência à tração do concreto, expresso em MPa.

σ_{cp} é a tensão de compressão do concreto devida à força de protensão; expressa em MPa.

α_{pc} é o fator de redução da tensão de protensão na posição longitudinal do ponto crítico;

β_{pc} é o coeficiente de ajuste que considera os efeitos da geometria dos alvéolos e da posição da altura do ponto crítico na nervura para a resistência à força cortante por tração diagonal.

Sendo:

$$\beta_{pc} = 0,5 + \frac{h_{pc}}{h} \leq 1,0$$

$$\alpha_{pc} = \frac{l_x}{l_{pt2}}$$

$$l_x = l_a + \frac{h_{pc}}{0,7}$$

$$l_{pt2} = 1,2 l_{bpt}$$

2.1 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE POR TRAÇÃO DIAGONAL EM REGIÃO NÃO FISSURADA POR FLEXÃO, CONSIDERANDO O f_{ck} DO CONCRETO, CONFORME CONTROLE DE QUALIDADE FABRIL (NBR 14861: 2022)

Os valores encontrados para verificação ao mecanismo de tração diagonal nas peças estão dispostos na Tabela C.7.

Tabela C.7: Valores encontrados de $VR_{d,c}$ para as terças alveolares, considerando β_{pc} .

Terça	$V_{Rd,c}$ (kN)*	I (m^4)	bw (m)	S (m^3)	β_{pc}	h_{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f_{ctd} (MPa)
TA 01	22	0,000289	0,077	0,002258	0,73	0,062	0,27	0,37	9,81	1,79
TA 02	28	0,000327	0,089	0,002258	0,74	0,065	0,27	0,37	8,93	1,79
TA 03	20	0,000281	0,079	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	10,07	1,79
TA 04	21	0,000291	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	9,73	1,79
TA 05	24	0,000301	0,085	0,002258	0,73	0,061	0,27	0,36	9,27	1,79
TA 06	20	0,000285	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	9,82	1,79

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Como mencionado, os valores de β_{pc} são um coeficiente de ajuste utilizado para prover segurança a projetos. Assim como o valor de f_{ctd} também representa uma minoração dos valores reais das peças.

A fim de elucidar resultados reais, que sejam compatíveis com o programa experimental, sem fatores de minoração para o cálculo, são desconsiderados o coeficiente β_{pc} e f_{ctd} , considerando o valor de $f_{ctk,inf}$ para as peças, no lugar do último coeficiente mencionado.

Tabela C.8: Valores encontrados de VRd,c sem coeficientes de segurança.

Terça	VRk,c (kN)*	I (m ⁴)	b _w (m)	S (m ³)	h _{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f _{ctk,inf} (MPa)
TA 01	39	0,000289	0,077	0,002258	0,062	0,27	0,26	9,81	3,00
TA 02	50	0,000327	0,089	0,002258	0,065	0,27	0,26	8,93	3,00
TA 03	39	0,000281	0,079	0,002258	0,051	0,27	0,24	10,07	3,00
TA 04	40	0,000291	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,24	9,73	3,00
TA 05	44	0,000301	0,085	0,002258	0,061	0,27	0,25	9,27	3,00
TA 06	39	0,000285	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,24	9,82	3,00

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

2.2 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE POR TRAÇÃO DIAGONAL EM REGIÃO NÃO FISSURADA POR FLEXÃO, CONSIDERANDO $f_{ctm,exp}$ E OS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE (NBR 14861:2022)

Para calcular $V_{Rd,c}$ com base nos resultados do programa experimental, o valor de “ f_{ctd} ” é considerado: $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$

Onde:

$\gamma_c = 1,68$, conforme NBR 6118 (2023), item 24.5.2.1.

Os valores obtidos, considerando f_{ctd} e o coeficiente de ajuste β_{pc} para todas as terças alveolares – lado A está representado na Tabela C.9.

Tabela C.9: Valores encontrados de VRd,c exp para as terças alveolares – lado A, considerando β_{pc} e f_{ctd} .

Terça	V _{Rd,c} (kN)*	I (m ⁴)	b _w (m)	S (m ³)	β_{pc}	h _{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f _{ctd} (MPa)
TA 01	17	0,000289	0,077	0,002258	0,73	0,062	0,27	0,21	9,46	1,61
TA 02	22	0,000327	0,089	0,002258	0,74	0,065	0,27	0,21	8,65	1,60
TA 03	13	0,000281	0,079	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,21	9,71	1,20
TA 04	12	0,000291	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,21	9,37	1,02
TA 05	12	0,000301	0,085	0,002258	0,73	0,061	0,27	0,22	8,93	0,83
TA 06	15	0,000285	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,19	9,52	1,50

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Para a extremidade “lado B”, os resultados estão agrupados na Tabela C.10.

Tabela C.10: Valores encontrados de VRd,c exp para as terças alveolares – lado B, considerando β_{pc} e f_{ctd} .

Terça	VRd,c (kN)*	I (m ⁴)	bw (m)	S (m ³)	β_{pc}	h _{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f _{ctd} (MPa)
TA 01	20	0,000289	0,077	0,002258	0,73	0,062	0,27	0,37	9,46	1,61
TA 02	26	0,000327	0,089	0,002258	0,74	0,065	0,27	0,37	8,65	1,60
TA 03	15	0,000281	0,079	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	9,71	1,20
TA 04	14	0,000291	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	9,37	1,02
TA 05	14	0,000301	0,085	0,002258	0,73	0,061	0,27	0,36	8,93	0,83
TA 06	18	0,000285	0,080	0,002258	0,69	0,051	0,27	0,34	9,52	1,50

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Para expressão de resultados próximos ao efetivo, desconsidera-se coeficientes de ajuste e de segurança utilizados em projeto. Com isso, exclui da equação o β_{pc} e utiliza-se o valor de $f_{ctk,inf}$ onde antes utilizou o f_{ctd} . A equação, torna-se:

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w}{S} \times \sqrt{f_{ctk,inf}^2 + 0,9 \times \alpha_{pc} \times \sigma_{pc} \times f_{ctk,inf}}$$

Tem-se valores para $V_{Rd,c}$ efetivos – lado A, conforme Tabela C.11.

Tabela C.11: Valores encontrados de VRd,c efetivo para as terças alveolares – lado A.

Terça	VRk,c (kN)*	I (m ⁴)	b _w (m)	S (m ³)	h _{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f _{ctk,inf} (MPa)
TA 01 A	34	0,000289	0,077	0,002258	0,062	0,27	0,21	9,46	2,70
TA 02 A	44	0,000327	0,089	0,002258	0,065	0,27	0,21	8,65	2,69
TA 03 A	27	0,000281	0,079	0,002258	0,051	0,27	0,21	9,71	2,01
TA 04 A	24	0,000291	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,21	9,37	1,71
TA 05 A	22	0,000301	0,085	0,002258	0,061	0,27	0,22	8,93	1,39
TA 06 A	32	0,000285	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,19	9,52	2,52

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).

Os valores efetivos encontrados para a extremidade lado B estão na Tabela C.12.

Tabela C.12: Valores encontrados de VRd,c efetivo para as terças alveolares – lado B.

Terça	VRk,c (kN)*	I (m ⁴)	b _w (m)	S (m ³)	h _{pc}	h	α_{pc}	σ_{cp} (MPa)	f _{ctk,inf} (MPa)
TA 01 B	39	0,000289	0,077	0,002258	0,062	0,27	0,37	9,46	2,70
TA 02 B	50	0,000327	0,089	0,002258	0,065	0,27	0,37	8,65	2,69
TA 03 B	31	0,000281	0,079	0,002258	0,051	0,27	0,34	9,71	2,01
TA 04 B	29	0,000291	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,34	9,37	1,71
TA 05 B	28	0,000301	0,085	0,002258	0,061	0,27	0,36	8,93	1,39
TA 06 B	37	0,000285	0,080	0,002258	0,051	0,27	0,34	9,52	2,52

*Os valores foram ajustados para um resultado em kN.

Fonte: Autora (2024).