

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FERNANDO ELICIO HÜBNER**

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAPA DE CONCRETO  
ARMADO COMPLEMENTAR NA DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS  
LINEARES APLICADAS LONGITUDINALMENTE ÀS NERVURAS EM LAJES  
PRÉ-FABRICADAS UNIDIRECIONAIS DE VIGOTAS PROTENDIDAS**

**São Leopoldo**

**2023**

FERNANDO ELICIO HÜBNER

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAPA DE CONCRETO  
ARMADO COMPLEMENTAR NA DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS  
LINEARES APLICADAS LONGITUDINALMENTE ÀS NERVURAS EM LAJES  
PRÉ-FABRICADAS UNIDIRECIONAIS DE VIGOTAS PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, pelo Curso de  
Engenharia Civil da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Me. Diego Schneider

São Leopoldo

2023

Aos meus pais Marlene e Valmir.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade de crescimento profissional e de desenvolvimento pessoal e pelo apoio que permitiu a superação de todos os obstáculos e dificuldades presentes durante essa jornada.

Aos meus pais Marlene e Valmir, e à minha namorada Eduarda, pelo incentivo, pelo suporte emocional, pela compreensão e pela paciência fornecidos sem hesitação perante os momentos turbulentos.

Aos meus colegas Caio, Lucas, Nicole e Pedro pelo companheirismo e pelo compartilhamento de inúmeros momentos, alguns marcados pela aflição, mas a maioria marcado pela felicidade.

Ao orientador Prof. Me. Diego Schneider, pela inspiração profissional, pelo aceite da orientação e pela contribuição e direcionamento técnico necessário ao desenvolvimento desta monografia.

À Construrohr, especialmente do diretor senhor José Plínio Rohr pelo reconhecimento da relevância deste trabalho e pelo fornecimento de todos os materiais e mão de obra necessária.

Aos colegas de trabalho engenheiros Cristian, Felipe e Isael, ao mestre Ariel e aos demais integrantes da equipe de obras, ao supervisor de produção Adriano e aos demais colaboradores da Construrohr pela disponibilidade e contribuição na execução das etapas necessárias ao trabalho.

“Melhorando a qualidade, automaticamente você estará melhorando a produtividade” (William Edwards Deming).

## RESUMO

Com a construção civil sendo marcada pelo aumento da exigência da arquitetura frente às estruturas, e pela crescente necessidade de racionalização das construções, pelo desenvolvimento de novos métodos construtivos ou pelo aprimoramento dos métodos consagrados, um sistema de laje que merece destaque é a laje pré-fabricada de vigotas protendidas que alia os benefícios das lajes pré-fabricadas gerando redução no consumo de materiais e na mão de obra de execução com as vantagens da utilização do concreto protendido, que reduz a fissuração do concreto, as deformações e contribui no estado limite último. Porém, esse sistema ainda possui alguns aspectos a serem estudados de modo a ter seu comportamento compreendido, a fim de utilizá-lo com o máximo de eficiência. Um desses aspectos é a distribuição transversal de cargas lineares aplicadas sobre uma laje na direção longitudinal às nervuras, ou seja, quanto de carga é direcionado à nervura principal, localizada imediatamente sob o local de aplicação da carga, e quanto é direcionado às nervuras seguintes, e quais características da laje influenciam nessa distribuição. Então, através da realização de ensaios de deformação em lajes executadas esse estudo objetivou principalmente a compressão da influência da espessura da capa de concreto armado complementar nessa distribuição, mas também procurou observar a influência da grandeza das cargas aplicadas, e a partir de simulações computacionais calibradas com o comportamento estrutural das lajes executadas foi analisada a influência da quantidade de nervuras consideradas e a influência do vão longitudinal da laje. Desse modo, foi observado que comparando uma laje com 5,5 centímetros de capa e uma laje com 7,5 centímetros tem-se como resultado que o percentual da carga que é direcionada para a nervura principal chega a ser apenas 3% menor na segunda laje, enquanto a grandeza da carga aplicada interfere no máximo até aproximadamente 2% na parcela do carregamento que é direcionada à cada nervura, levando-se a concluir que essas duas características são desprezíveis na determinação da distribuição de carga nesse sistema de laje. Além disso, com a análise dos modelos computacionais concluiu-se que a principal característica que influencia a distribuição de carga é o vão longitudinal da laje.

**Palavras-chave:** laje; nervurada; pré-fabricada; unidirecional; vigotas protendidas; capa de concreto armado; influência da espessura; distribuição transversal de carga.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Laje maciça .....	26
Figura 2 – Laje nervurada .....	26
Figura 3 – Laje de painel treliçado .....	27
Figura 4 – Laje Bubbledeck.....	28
Figura 5 – Laje de vigota treliçada .....	28
Figura 6 – Laje de vigota comum .....	29
Figura 7 – Laje alveolar .....	30
Figura 8 – Laje de vigota protendida .....	30
Figura 9 – Laje duplo "T" .....	31
Figura 10 – Componentes de lajes pré-fabricadas .....	32
Figura 11 – Seção transversal de lajes pré-fabricadas .....	33
Figura 12 – Sistema de piso com cobertura estrutural moldada no local .....	33
Figura 13 – Sistema de piso com cobertura composta .....	34
Figura 14 – Sistema de piso com cobertura parcial .....	34
Figura 15 – Piso com vigas autoportantes .....	34
Figura 16 – Tipos de vigotas e elementos de enchimento utilizados no Brasil.....	35
Figura 17 – Vigotas conforme EN 15037-1 .....	37
Figura 18 – Vigota com armadura simples ou comum .....	38
Figura 19 – Vigota com armadura protendida .....	39
Figura 20 – Vigota com armadura treliçada.....	40
Figura 21 – Lajota cerâmica .....	42
Figura 22 – Lajota de EPS .....	42
Figura 23 – Elemento de enchimento misto .....	43
Figura 24 – Seção transversal resistente antes e após a cura do concreto .....	46
Figura 25 – Nervura principal e secundárias em cargas pontuais pela EF-96 .....	48
Figura 26 – Nervura principal e secundárias em cargas pontuais pela FIP.....	49
Figura 27 – Painéis do tipo pré-laje nervurados .....	50
Figura 28 – Ábaco de distribuição de carga para 11 nervuras .....	51
Figura 29 – Tabela de distribuição de carga para 9 nervuras .....	51
Figura 30 – Distribuição de carga por nervura .....	52
Figura 31 – Situação 1 de lajes analisadas .....	53
Figura 32 – Situação 2 de lajes analisadas .....	53

Figura 33 – Situação 3 de lajes analisadas .....	54
Figura 34 – Carregamento atuante nas vigas perimetrais .....	54
Figura 35 – Etapas do processo.....	61
Figura 36 – Lajota cerâmica Hc 8/37/20.....	68
Figura 37 - Bloco utilizado para simular a carga da alvenaria .....	69
Figura 38 – Identificação das nervuras da laje .....	70
Figura 39 – Configuração das lajes .....	71
Figura 40 – Estimativa inicial de distribuição de carga .....	72
Figura 41 – Verificação do estado limite último da primeira laje.....	77
Figura 42 – Verificação do estado limite último da segunda laje .....	77
Figura 43 – Seção de concreto da nervura .....	80
Figura 44 – Seção de aço da nervura .....	81
Figura 45 – Lajes modeladas no SCIA ENGINEER .....	83
Figura 46 – Deformações apresentadas pelo SCIA devido ao peso próprio .....	84
Figura 47 – Deformações apresentadas pelo SCIA devido a carga da alvenaria .....	85
Figura 48 – Nervuras consideradas .....	122



**LISTA DE FOTOGRAFIAS**

Fotografia 1 – Cavaletes de apoio das lajes.....	86
Fotografia 2 – Escoramento, fôrmas e vigotas e tabelas cerâmicas montadas.....	87
Fotografia 3 – Armadura de distribuição e conectores de cisalhamento posicionados na capa da laje.....	88
Fotografia 4 – Concretagem da primeira camada da capa de concreto.....	89
Fotografia 5 – Conclusão da concretagem da primeira camada da capa de concreto.....	90
Fotografia 6 – Posicionamento dos relógios comparadores.....	91
Fotografia 7 – Alvenaria de blocos concluída.....	92

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Resistência à compressão do concreto da primeira capa.....	96
Gráfico 2 – Módulo de elasticidade secante do concreto da primeira capa.....	97
Gráfico 3 – Resistência à compressão do concreto da segunda capa.....	98
Gráfico 4 – Flechas medidas na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria .....	105
Gráfico 5 – Flechas médias na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria .....	106
Gráfico 6 – Flechas percentuais na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria.....	107
Gráfico 7 – Flechas medidas na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria .....	109
Gráfico 8 – Flechas médias na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria .....	110
Gráfico 9 – Flechas percentuais na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria.....	111
Gráfico 10 – Percentual de carga de acordo com o vão longitudinal por nervura ...	123

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura simples ou comum .....	39
Quadro 2 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura protendida .....	40
Quadro 3 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura treliçada .....	41
Quadro 4 – Coeficientes de determinação de cargas por nervura pela EF-96.....	48
Quadro 5 – Coeficientes de determinação de cargas por nervura pela FIP .....	49
Quadro 6 – Casos analisados e percentual de carga absorvido pelas vigas paralelas às vigotas .....	55
Quadro 7 – Datas dos eventos de execução e controle das lajes .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência a compressão do concreto das vigotas.....	95
Tabela 2 – Determinação da resistência à tração na flexão do concreto das vigotas .....	95
Tabela 3 – Resistência à compressão do concreto da primeira capa .....	96
Tabela 4 – Determinação do módulo de elasticidade do concreto da primeira capa	97
Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto da segunda capa .....	98
Tabela 6 – Determinação do módulo de elasticidade do concreto da segunda capa	98
Tabela 7 – Deformações de cálculo revisadas da primeira laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m .....	100
Tabela 8 – Deformações de cálculo revisadas da segunda laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m .....	100
Tabela 9 – Deformações de cálculo revisadas da primeira laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m .....	101
Tabela 10 – Deformações de cálculo revisadas da segunda laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m .....	101
Tabela 11 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da primeira laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m.....	102
Tabela 12 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da segunda laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m.....	102
Tabela 13 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da primeira laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m.....	102
Tabela 14 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da segunda laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m.....	103
Tabela 15 – Flechas medidas na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria .....	104
Tabela 16 – Flechas médias na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria .....	106
Tabela 17 – Flechas percentuais na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria.....	107
Tabela 18 – Flechas medidas na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria .....	108

Tabela 19 – Flechas médias na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria .....	110
Tabela 20 – Flechas percentuais na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria.....	111
Tabela 21 – Comparação das deformações devido ao peso próprio da primeira laje .....	112
Tabela 22 – Comparação das deformações devido ao peso próprio da segunda laje .....	112
Tabela 23 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e de cálculo para carga de 1,65 kN/m .....	113
Tabela 24 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 1,65 kN/m.....	113
Tabela 25 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da segunda laje entre real e de cálculo para carga de 1,65 kN/m .....	114
Tabela 26 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 1,65 kN/m.....	114
Tabela 27 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e de cálculo para carga de 3,04 kN/m .....	114
Tabela 28 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 3,04 kN/m.....	115
Tabela 29 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da segunda laje entre real e de cálculo para carga de 3,04 kN/m .....	115
Tabela 30 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 3,04 kN/m.....	115
Tabela 31 – Diferença de distribuição de carga entre a primeira e a segunda laje .	117
Tabela 32 – Deformações das lajes com mais nervuras com carga de 3,04 kN/m .	118
Tabela 33 – Deformações percentuais das lajes com mais nervuras com carga de 3,04 kN/m.....	119
Tabela 34 – Deformações das lajes com mais nervuras com carga de 5,04 kN/m .	119
Tabela 35 – Deformações percentuais das lajes com mais nervuras com carga de 5,04 kN/m.....	119
Tabela 36 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 3,04 kN/m .....	120

Tabela 37 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 3,04 kN/m .....	121
Tabela 38 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 5,04 kN/m .....	121
Tabela 39 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 5,04 kN/m .....	121
Tabela 40 – Percentual de carga de acordo com o vão longitudinal por nervura....	122

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Armado
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CP	Concreto Protendido
EN	European Norm
EPS	Expanded Polystyrene
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PIB	Produto Interno Bruto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 TEMA .....	20
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
1.3 PROBLEMA .....	20
1.4 OBJETIVOS .....	21
<b>1.4.1 Objetivo geral</b> .....	<b>21</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>21</b>
1.5 JUSTIFICATIVA .....	22
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	<b>24</b>
2.1 LAJES PRÉ-FABRICADAS NERVURADAS UNIDIRECIONAIS .....	31
<b>2.1.1 Conceito</b> .....	<b>33</b>
2.1.1.1 Elementos pré-fabricados estruturais .....	37
2.1.1.1.1 <i>Vigota com armadura simples ou comum</i> .....	38
2.1.1.1.2 <i>Vigota com armadura protendida</i> .....	39
2.1.1.1.3 <i>Vigota com armadura treliçada</i> .....	40
2.1.1.2 Elementos pré-fabricados não estruturais de enchimento.....	41
2.1.1.2.1 <i>Lajota cerâmica</i> .....	41
2.1.1.2.2 <i>Lajota de EPS</i> .....	42
2.1.1.2.3 <i>Elemento de enchimento misto</i> .....	42
2.1.1.2.4 <i>Outros elementos</i> .....	43
2.1.1.2.5 <i>Características adicionais</i> .....	43
2.1.1.3 Capa de concreto armado complementar .....	44
<b>2.1.2 Comportamento</b> .....	<b>46</b>
2.1.2.1 Distribuição transversal de cargas.....	47
2.1.2.1.1 <i>Procedimento da norma espanhola EF-96</i> .....	47
2.1.2.1.2 <i>Procedimento da Federação Internacional de Protensão (FIP)</i> .....	48
2.1.2.1.3 <i>Análises e conclusões de Cabral</i> .....	49
2.1.2.2 Distribuição de cargas nas estruturas de apoio.....	52
2.2 VANTAGENS E PARTICULARIDADES DO CONCRETO PROTENDIDO .....	56
<b>2.2.1 Classificação do concreto protendido</b> .....	<b>57</b>
<b>2.2.2 Perdas de protensão</b> .....	<b>58</b>
2.2.2.1 Perdas imediatas.....	58



2.2.2.2 Perdas ao longo do tempo .....	58
<b>2.2.3 Contribuição no controle da fissuração .....</b>	<b>59</b>
<b>2.2.4 Contribuição na redução da deformação .....</b>	<b>59</b>
<b>2.2.5 Contribuição no dimensionamento à ruptura .....</b>	<b>60</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>61</b>
3.1 DEFINIÇÕES INICIAIS.....	63
<b>3.1.1 Aço utilizado para produção das vigotas protendidas .....</b>	<b>63</b>
<b>3.1.2 Aço utilizado na armadura de distribuição e conectores de cisalhamento da capa de concreto .....</b>	<b>64</b>
<b>3.1.3 Concreto utilizado para a produção das vigotas e seu respectivo controle tecnológico .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.4 Concreto utilizado para a concretagem da primeira e da segunda camada da capa e seus respectivos controles tecnológicos .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.5 Elementos de enchimento cerâmicos .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1.6 Carga da alvenaria a ser aplicada sobre a nervura central .....</b>	<b>68</b>
3.2 CÁLCULOS PARA DEFINIÇÃO DAS LAJES.....	69
<b>3.2.1 Estimativa inicial de distribuição de cargas .....</b>	<b>72</b>
<b>3.2.2 Dimensionamento da armadura de distribuição.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2.3 Dimensionamento dos conectores de cisalhamento .....</b>	<b>73</b>
<b>3.2.4 Verificação das perdas de protensão .....</b>	<b>73</b>
3.2.4.1 Força inicialmente aplicada .....	74
3.2.4.2 Perda por acomodação das ancoragens.....	74
3.2.4.3 Perda por relaxação inicial da armadura .....	75
3.2.4.4 Perda por retração inicial do concreto .....	75
3.2.4.5 Perda por encurtamento imediato do concreto.....	75
3.2.4.6 Perda por relaxação posterior da armadura .....	75
3.2.4.7 Perda por retração posterior do concreto .....	76
3.2.4.8 Perda por fluência do concreto.....	76
3.2.4.9 Perda de protensão total .....	76
<b>3.2.4 Verificação do estado limite último .....</b>	<b>76</b>
<b>3.2.5 Verificação das tensões na seção .....</b>	<b>78</b>
<b>3.2.6 Verificação das deformações .....</b>	<b>79</b>
3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS .....	83
<b>3.3.1 Verificação das deformações .....</b>	<b>84</b>

3.4 EXECUÇÃO DAS LAJES .....	85
<b>3.4.1 Realização da escolha do local .....</b>	<b>85</b>
<b>3.4.2 Realização da montagem dos apoios .....</b>	<b>85</b>
<b>3.4.3 Realização da montagem do cimbramento e da laje .....</b>	<b>86</b>
<b>3.4.4 Realização da montagem das armaduras .....</b>	<b>87</b>
<b>3.4.5 Realização da concretagem .....</b>	<b>88</b>
<b>3.4.6 Realização da moldagem de corpos de prova e cura .....</b>	<b>89</b>
<b>3.4.7 Realização da desforma e retirada do escoramento .....</b>	<b>90</b>
<b>3.4.8 Realização da execução da segunda laje .....</b>	<b>92</b>
<b>3.4.9 Realização cronológica das etapas .....</b>	<b>93</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS .....	94
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	94
<b>4.2.1 Ensaio do concreto das vigotas .....</b>	<b>94</b>
4.2.1.1 Ensaio de resistência à compressão .....	95
4.2.1.2 Ensaio de resistência à tração na flexão .....	95
<b>4.2.2 Ensaio do concreto da primeira camada da capa .....</b>	<b>95</b>
4.2.2.1 Ensaio de resistência à compressão .....	96
4.2.2.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante .....	97
<b>4.2.3 Ensaio do concreto da segunda capa .....</b>	<b>97</b>
4.2.3.1 Ensaio de resistência à compressão .....	98
4.2.3.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante .....	98
<b>4.2.4 Resumo das propriedades mecânicas .....</b>	<b>99</b>
4.3 RESULTADOS DOS CÁLCULOS .....	99
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....	101
4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	103
<b>4.5.1 Ensaio de deformação da primeira laje .....</b>	<b>103</b>
<b>4.5.2 Ensaio de deformação da segunda laje .....</b>	<b>108</b>
4.6 OBSERVAÇÃO DOS RESULTADOS .....	112
<b>4.6.1 Verificação da validade dos cálculos e das simulações .....</b>	<b>112</b>
<b>4.6.2 Verificação da influência da espessura da capa .....</b>	<b>116</b>
<b>4.6.3 Verificação da influência do valor da carga aplicada .....</b>	<b>117</b>
4.7 EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS .....	118
4.7.1 Influência da quantidade de nervuras .....	118

4.7.2 Influência do vão longitudinal .....	120
4.8 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS .....	122
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>124</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>125</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os últimos séculos, desde a revolução industrial do século XVIII e principalmente no período posterior a segunda guerra mundial, do século XX, foram marcados pelo grande desenvolvimento industrial, tecnológico e econômico da sociedade. Segundo Pola (2017) essa evolução contribuiu para o surgimento de grandes metrópoles. Nesse contexto e juntamente com aumento da população, que quadruplicou entre 1950 e 2022 (POPULATION MATTERS, 2022) a demanda por moradia aumentou exponencialmente.

Além disso, esse cenário foi acompanhado pela evolução da arquitetura e pelo aumento do nível de exigência frente as estruturas (FIGUEIREDO FILHO; SHIRAMIZU, 2011) que passou a ter sua concepção com grandes vãos livres, e que por sua vez, com a utilização tradicional de lajes maciças, tornava a estrutura antieconômica devido ao peso próprio (DROPPA JÚNIOR, 1999). Paralelamente, cresceu também a necessidade de racionalização nas construções, o que levou a engenharia civil a buscar sistemas construtivos que atendessem a essas necessidades, e garantissem segurança e durabilidade das estruturas (FIGUEIREDO FILHO; SHIRAMIZU, 2011).

Então, surgiram as lajes pré-fabricadas nervuradas que se tornaram uma alternativa atrativa economicamente, apresentando redução no consumo de materiais, principalmente concreto, mas também em fôrmas e escoramento, além de rapidez e praticidade na execução e na redução do peso da estrutura (FIGUEIREDO FILHO; SHIRAMIZU, 2011). No Brasil essas lajes são executadas com vigotas de seção “T” invertido, podendo ser de concreto armado, protendido ou com armação treliçada (EL DEBS, 2017) ou ainda com painéis treliçados.

Com as lajes pré-fabricadas nervuradas sendo utilizadas largamente em edificações, e sendo responsáveis por uma parcela significativa da estrutura e do orçamento de uma obra, além de muitas vezes além de cargas tradicionais como acidentais e de revestimento, necessitarem suportar cargas de alvenarias, surgiu a necessidade de estudos sobre seu desempenho, objetivando sua utilização de forma segura e adequada de forma a garantir sua durabilidade (DROPPA JÚNIOR, 1999).

Então, neste trabalho de conclusão de curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia civil, pelo curso de graduação da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS – que foi dividido

em 5 capítulos, sendo no capítulo 1 apresentado o tema, os objetivos e a justificativa do trabalho, no capítulo 2 fundamentado teoricamente com base em bibliografias técnicas e científicas o assunto abordado, no capítulo 3 apresentada a metodologia empregada para desenvolvimento nas análises realizadas, no capítulo 4 analisado os resultados obtidos e no capítulo 5 apresentado as conclusões, busca-se a compreensão do comportamento da distribuição de cargas em uma laje no sistema citado em condições em que esta deve suportar uma alvenaria, bem como o entendimento das características da laje que influenciam essa distribuição.

### 1.1 TEMA

Esta monografia aborda a determinação, em função da espessura da capa de concreto complementar, da distribuição transversal de cargas lineares em lajes pré-fabricadas nervuradas unidirecionais de vigotas protendidas nos casos de alvenarias ou outros carregamentos lineares aplicados sobre as lajes na direção das vigotas, sendo analisado o comportamento estrutural, principalmente no que se refere ao estado limite de serviço de deformação excessiva, além de observar a influência de outras características como o valor da carga aplicada e a dimensão do vão da laje na distribuição de carga.

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A laje estudada é em sistema pré-fabricado nervurado unidirecional composto por vigotas protendidas, elementos de enchimento cerâmicos, e capa de concreto complementar com armadura de distribuição executada *in loco*, sendo esta analisada com diferentes espessuras e as cargas lineares aplicadas para as análises são na direção das vigotas da laje. Esse estudo é limitado à análise de deformações sem que os elementos tenham ultrapassado o limite de formação de fissuras, e portando mantendo-se em comportamento elástico linear.

### 1.3 PROBLEMA

Em situações nas quais a arquitetura e a concepção estrutural de uma edificação tornam necessária a execução de alvenarias sobre lajes pré-fabricadas

nervuradas unidirecionais na direção perpendicular às vigotas a determinação da carga a ser resistida por cada nervura em um sistema estrutural simplificado é igual a carga linear proveniente da alvenaria multiplicada pelo intereixo das vigotas da laje.

Já em circunstâncias em que a alvenaria deverá ser edificada na direção das vigotas o efeito é diferente, ocorrendo a solicitação da nervura localizada imediatamente sob a carga (principal) e, em menor intensidade, as nervuras laterais (secundárias). Porém, a determinação dessa distribuição de carga (quantas vigotas secundárias serão solicitadas e a qual carga devem resistir) possui um grau de complexidade maior e depende das condições de contorno da laje. Com essa problemática, surge a oportunidade de analisar o comportamento de lajes submetidas e essa condição objetivando a determinação da distribuição de carga que de fato acontece e a influência da espessura da capa de concreto armado complementar.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral é a determinação a influência da espessura da capa de concreto armado complementar e de outras características das lajes na distribuição transversal de cargas que ocorre com a edificação de alvenarias ou aplicação de outras cargas lineares na direção das vigotas em lajes pré-fabricadas nervuradas unidirecionais de vigotas protendidas.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta monografia são os apresentados e particularizados na sequência:

a) Comparar deformações de lajes calculadas manualmente através de recomendações normativas e bibliografia técnica com deformações verificadas em modelos computacionais e com deformações de lajes executadas submetidas a ensaios de deformação a fim de validar ou não os cálculos e as simulações.

b) Comparar as deformações de cada nervura de duas lajes executadas com espessura de capas diferentes para verificar o impacto da espessura da capa na

distribuição transversal de cargas, ou seja, quanto de carga a menos ou a mais é direcionado à cada nervura comparado a sua correspondente da outra laje.

c) Comparar as deformações de cada nervura em uma laje, submetida a ensaio com aplicação de cargas diferentes buscando determinar a influência do valor da carga aplicada em sua distribuição para as nervuras seguintes.

d) Avaliar em modelos computacionais elaborados através do método dos elementos finitos, e calibrados a partir do comportamento de lajes submetidas a ensaios de deformação, o impacto da quantidade de nervuras disponíveis para distribuição transversal de cargas, verificando a partir de quantas nervuras de distância não se tem mais influência da carga aplicada.

e) Comparar em modelos computacionais elaborados através do método dos elementos finitos, e calibrados a partir do comportamento de lajes submetidas a ensaios de deformação, a influência do vão longitudinal da laje na distribuição de carga.

f) Verificar qual ou quais característica da laje tem a maior influência sobre a distribuição transversal de cargas lineares aplicadas longitudinalmente às nervuras e definir um método simplificado a ser utilizado em cálculos manuais para consideração da carga adequada em cada nervura analisada.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Os últimos dez anos marcaram positivamente a construção civil no Brasil, aumentando, por exemplo, 61,4% a quantidade de empresas no ramo de 2010 a 2019 (CREA-PE, 2021). Mas o destaque cabe sobretudo ao ano de 2021, no qual o PIB da construção civil teve o maior crescimento desde 2010, ficando na casa dos 9,7% (ABRAIN, 2022). Contudo, o ano de 2021 também foi marcado pelo forte aumento no preço dos insumos da construção civil, como o do aço que cresceu mais de 90% (VASCONCELOS, 2022 apud CBIC, 2022). Esse cenário levou as empresas a criar uma gestão pensada para redução de custos e aprimoramento dos processos (FECOMERIO SP, 2020).

Uma grande parcela das obras no Brasil é executada utilizando lajes pré-fabricadas. Para se ter uma ideia, somente de lajes com vigotas protendidas são produzidas mensalmente cerca de 900.000 m<sup>2</sup> (SINAPROCIM, 2020).

A arquitetura atual é caracterizada por grandes vãos e em muitos casos existe a necessidade do apoio de alvenarias sobre as lajes (DROPPA JÚNIOR, 1999).

As alvenarias de vedação inseridas em uma estrutura reticulada de concreto armado são submetidas a variados tipos de solicitações (MASSETO; SABBATINI, 1998 apud CARDOSO, 2007), e alvenarias são caracterizadas por comportamento frágil, não admitindo grandes deformações sem apresentarem patologias, principalmente fissuração (COIMBRA, 2010). Por isso, é crucial que a estrutura de apoio possua capacidade de carga e deformação compatível com o desempenho das alvenarias (MASSETO; SABBATINI, 1998 apud CARDOSO, 2007).

Nesse contexto é perceptível a necessidade de análise e compreensão do comportamento de lajes, principalmente no que se refere às deformações. De modo a utilizar o sistema de maneira eficiente economicamente e atendendo as necessidades estruturais e de durabilidade das edificações.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO

O concreto armado é o resultado da união da resistência à compressão oriunda do concreto com a resistência a tração proveniente das armaduras de aço (AECWEB, 2022) e o concreto protendido segue o mesmo conceito, mas com o adicional de que o aço é distendido e com isso contribui também com uma carga ativa no comportamento estrutural (CARVALHO, 2017).

Historicamente o concreto armado moderno surgiu a partir da criação do cimento Portland, em 1824 por Joseph Aspdin, (ABCP, 2018), seguido de Joseph Lambot que em 1855 fabricou uma embarcação utilizando concreto reforçado com malhas de aço e Joseph Monier que a partir de 1867 começou a fabricar casas, tubos, lajes e pontes utilizando concreto com armaduras (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

O concreto protendido não surgiu muito tempo depois, sendo que “a primeira proposição de pré-tensionar o concreto foi anunciada em 1886, por P. H. Jackson, de São Francisco (EUA)” (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998, p. 3).

A partir de então, o desenvolvimento de teorias e métodos matemáticos e a realização de ensaios laboratoriais e em campo, por diferentes pesquisadores e intelectuais, em vários locais do mundo, contribuíram para desenvolvimento de processos tanto para elaboração de projetos quanto para execução de estruturas de concreto armado e protendido que são adotados atualmente.

A utilização do concreto armado é amplamente difundida e sua popularização na construção de estruturas é atribuída a sua grande quantidade de vantagens, se comparada a outros métodos construtivos, podendo ser destacada a sua flexibilidade de formas, monoliticidade, simplicidade executiva, economia, incombustibilidade e resistência a choques e vibrações (ALMINHANA, 2020).

O concreto armado pode ser executado no local final de utilização ou pode ser executado em indústrias e posteriormente transportado e montado no local de utilização (EL DEBS, 2017). É aplicado nas mais diversas estruturas da construção civil, como obras de saneamento, prédios, infraestrutura, usinas hidrelétricas, entre outros (AECWEB, 2022).

Já o concreto protendido, pode ser considerado uma extensão ou uma utilização mais avançada do concreto armado, na qual os elementos são otimizados com a utilização de aços e concretos de alto desempenho aliados do pré-

tensionamento das armaduras. As principais vantagens são a eliminação ou diminuição da fissuração nas seções das peças ocasionadas pela tensão de compressão oriundas do tensionamento das armaduras e sua consequente contribuição para durabilidade das estruturas, pois sem fissuras a entrada de agentes agressivos ao aço é minimizada, e também na redução das deformações, pois além do tensionamento gerar uma carga contrária as de utilização da estrutura, com a eliminação da fissuração a seção transversal contribui integralmente na inércia na verificação das deformações (CARVALHO, 2017).

O concreto protendido pode ser executado no local de utilização, nesse caso sendo aplicados o método de protensão com aderência posterior ou sem aderência ou pode ser executado em indústrias, nesse caso o usual é a utilização do método de protensão com aderência inicial. O concreto protendido pode ser utilizado em lajes, vigas, fundações, cortinas de contenção, pisos industriais, entre outros (IPOG, 2019).

Em se tratando de estruturas, um tipo elemento de grande importância são as lajes. São elas que efetivamente recebem as cargas de utilização, como pessoas, móveis, entre outros, cargas de revestimento de piso do ambiente, e em alguns casos cargas de alvenarias ou divisórias e sua função é principalmente resistir à flexão gerada pela carga aplicada e distribuir estas cargas às vigas ou aos pilares.

A norma NBR 6118, define lajes como sendo elementos cuja largura é maior ou igual à cinco vezes a altura útil da seção (ABNT, 2014).

Em concreto armado e protendido existem diversos tipos de lajes e os principais e mais utilizados em estruturas de concreto armado são descritos por Bittencourt (2015):

- a) Laje maciça – pode ser armada ou protendida, é executada totalmente no local através da utilização de escoramento e fôrmas e sua seção é plana, pode transferir as cargas para a estrutura de maneira unidirecional ou bidirecional para vigas ou diretamente para os pilares através de capitéis;

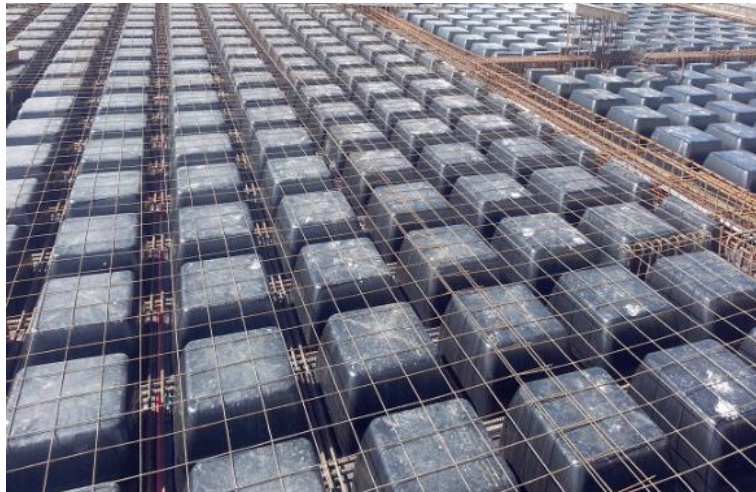
Figura 1 – Laje maciça



Fonte: GALVAMINAS (2022)

- b) Laje nervurada – também conhecida como laje cogumelo, pode ser armada ou protendida, é executada totalmente no local através da utilização de escoramento e fôrmas que formam nervuras nas duas direções, pode transferir as cargas para estrutura de maneira unidirecional ou bidirecional para vigas ou diretamente para os pilares através de capitéis;

Figura 2 – Laje nervurada



Fonte: VERSÁTIL ANDAIMES (2020)

- c) Laje de painel treliçado – pode ser armada ou protendida, os painéis são produzidos industrialmente e no local é executada uma capa de concreto complementar, necessita de escoramento, mas dispensa a utilização de fôrmas, a sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente pode ser plana ou vazada (com utilização nesse caso de elementos de

enchimento, que podem ser de diferentes materiais, dispostos entre as armações treliçadas aparentes dos painéis), pode transferir as cargas para as vigas de maneira unidirecional ou bidirecional;

Figura 3 – Laje de painel treliçado



Fonte: FACIBRAS (2022)

- d) Laje bubbledeck – pode ser armada ou protendida, pode ser produzida industrialmente somente a armação com os enchimentos esféricos poliméricos ou também com uma base concretada, no local é concretada completamente ou parcialmente, respectivamente, em ambos os casos necessita de escoramento, mas no caso com a base concretada dispensa a utilização de fôrmas, sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente é vazada. Pode transferir as cargas para a estrutura de maneira unidirecional ou bidirecional para vigas ou diretamente para os pilares através de capitéis;

Figura 4 – Laje Bubbledeck



Fonte: SÉRGIO EL BECK (2022)

- e) Laje de vigota treliçada – pode ser armada ou protendida, as vigotas são produzidas industrialmente e no local é executada uma capa de concreto complementar, necessita de escoramento, mas dispensa a utilização de fôrmas já que possui elementos de enchimento (que podem ser de diferentes materiais) que fazem a função de uma fôrma, a sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente é nervurada, pode transferir as cargas para as vigas de maneira unidirecional ou bidirecional. Este é um exemplo de laje pré-fabricada nervurada unidirecional que será abordado a seguir;

Figura 5 – Laje de vigota treliçada



Fonte: GRUPO FUTURA (2022)

- f) Laje de vigota comum - é uma laje de concreto armado, as vigotas são produzidas industrialmente e no local é executada uma capa de concreto complementar, necessita de escoramento, mas dispensa a utilização de fôrmas já que possui elementos de enchimento (que podem ser de diferentes materiais) que fazem a função de uma fôrma, a sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente é nervurada, transfere as cargas para as vigas de maneira unidirecional. Este é outro exemplo de laje pré-fabricada nervurada unidirecional que será abordado a seguir;

Figura 6 – Laje de vigota comum



Fonte: CDDCARQFEEVALE (2012)

- g) Laje de painel alveolar – é uma laje de concreto protendido, os painéis são produzidos em indústrias, e no local é executada uma capa de concreto complementar, não necessita de escoramento e nem da utilização de fôrmas, sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente é vazada, transfere as cargas para as vigas de maneira unidirecional;

Figura 7 – Laje alveolar



Fonte: UFSC (2022)

- h) Laje de vigotas protendidas – é uma laje de concreto protendido, as vigotas são industrialmente e no local é executada uma capa de concreto complementar, necessita de escoramento, mas dispensa a utilização de fôrmas já que possui elementos de enchimento (que podem ser de diferentes materiais) que fazem a função de uma fôrma, a sua seção vista externamente é plana, mas sua seção resistente é nervurada, transfere as cargas para as vigas de maneira unidirecional. Este é mais um exemplo de laje pré-fabricada nervurada unidirecional que será abordada a seguir, e particularmente esse tipo de laje é o foco deste trabalho;

Figura 8 – Laje de vigota protendida



Fonte: CONSTRUROHR (2022)

- i) Laje duplo "T" – é uma laje de concreto protendido, os painéis são produzidos em indústrias, e no local é executada uma capa de concreto complementar, não necessita de escoramento e nem da utilização de fôrmas, sua seção é nervurada, transfere as cargas para as vigas de maneira unidirecional;

Figura 9 – Laje duplo "T"



Fonte: LAJES PATAGONIA (2022)

## 2.1 LAJES PRÉ-FABRICADAS NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

Conforme já abordado segundo a NBR 6118, lajes são elementos cuja largura é maior ou igual à cinco vezes a altura útil da seção (ABNT, 2014) e tem a função de receber cargas e direcioná-las aos próximos elementos da estrutura.

A denominação “pré-fabricada”, como é conhecida, faz na verdade, referência aos primeiros elementos que à compõe (e que serão abordados na sequência), não a sua totalidade, já que também existe uma parcela da laje que é executada no local (CARVALHO, 2021).

“Frequentemente os termos pré-moldado e pré-fabricado são usados como sinônimos” (NAKAMURA, 2019), no entanto a NBR 9062 define elemento pré-moldado como sendo “[...] executado previamente e fora do local de utilização definitiva na estrutura [...]” e elemento pré-fabricado como “elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim [...]” (ABNT, 2017).

O termo “nervurada” refere-se ao formato da seção transversal resistente da laje, que possui espessura diferente ao longo da seção, formando nervuras. E como



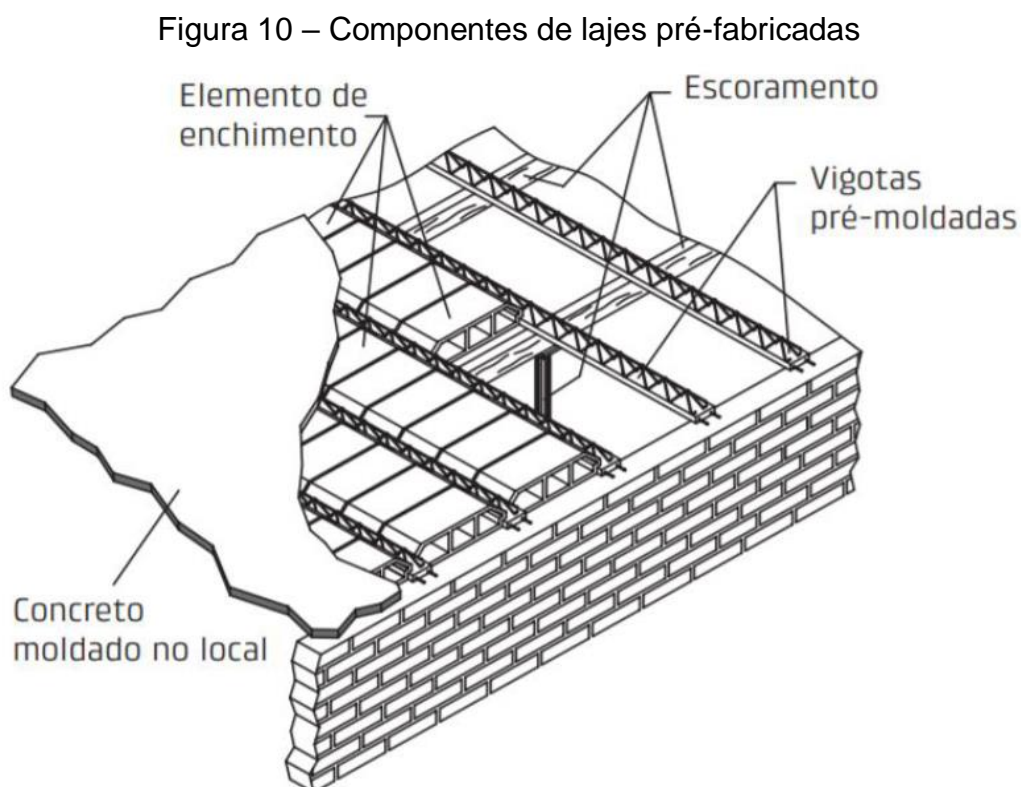
“unidirecional” é definido o formato de direcionamento das cargas, sendo em apenas uma direção.

A NBR 14859-1 define laje pré-fabricada como um elemento estrutural plano composto por elementos pré-fabricados estruturais e de enchimento e por armaduras e concreto estrutural complementar de obra capaz de resistir a cargas e vencer vãos conforme previamente projetada (ABNT, 2016).

Já El Debs (2017) aumenta o nível de detalhe especificando que os elementos estruturais formam nervuras lineares em uma direção e são espaçadas regularmente uma em relação a outra e os elementos de enchimento são apoiados sobre os elementos estruturais e cobrem os espaços entre as nervuras.

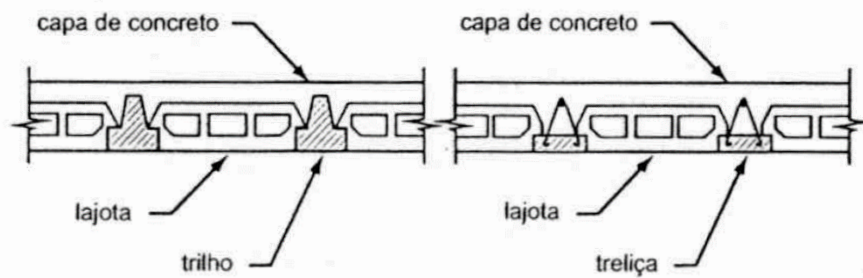
Adicionalmente, a NBR 6118 complementa especificando que a zona tracionada da laje, quando submetida a momento fletor positivo, está localizada nas nervuras (ABNT, 2014).

Popularmente os elementos estruturais que formam as nervuras nas lajes pré-fabricadas e que portando englobam as armaduras positivas das mesmas, são chamados de “vigota” ou de “trilho” e os elementos de enchimento de “lajota” ou “tabela”. Existe ainda a denominação de “pré-laje” ao conjunto formado pelas vigotas e enchimentos.



Fonte: EL DEBS (2017, p. 239)

Figura 11 – Seção transversal de lajes pré-fabricadas



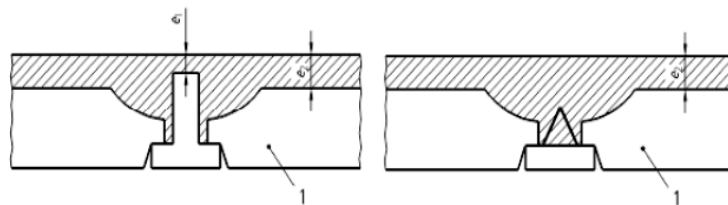
Fonte: CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO (2021, p. 74)

### 2.1.1 Conceito

Internacionalmente, a European Standard (2008) na norma europeia EN 15037-1 define e permite a execução dos seguintes sistemas de lajes pré-fabricadas:

a) Sistema de piso com cobertura estrutural moldada no local – que possui a seção resistente sendo composta pela vigota, pela área de concreto complementar localizada entre as vigotas e os elementos de enchimento e a capa de concreto complementar localizada acima das vigotas e dos elementos de enchimento e com os elementos de enchimento desempenhando somente a função de fôrma, sem contribuição estrutural;

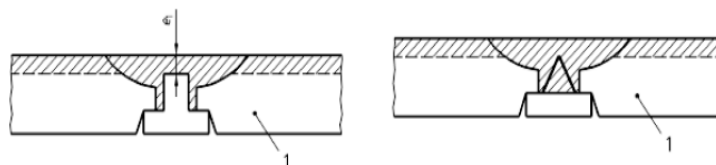
Figura 12 – Sistema de piso com cobertura estrutural moldada no local



Fonte: EN 13057-1 (2008, p. 30)

b) Sistema de piso com cobertura composta – que possui a seção resistente sendo composta além da vigota, e da área de concreto complementar localizada entre as vigotas e os elementos de enchimento, o topo do elemento e enchimento. Para tanto é necessário que o elemento de enchimento seja resistente ou semi-resistente;

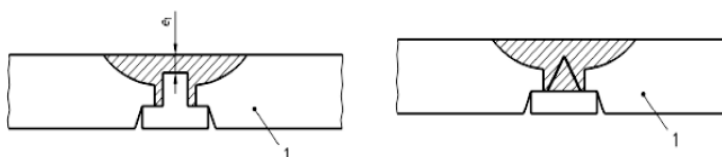
Figura 13 – Sistema de piso com cobertura composta



Fonte: EN 13057-1 (2008, p. 32)

c) Sistema de piso com cobertura parcial – que possui a seção resistente sendo composta pela vigota, e pela área de concreto complementar localizada entre as vigotas e os elementos de enchimento;

Figura 14 – Sistema de piso com cobertura parcial



Fonte: EN 13057-1 (2008, p. 33)

d) Pisos com vigas autoportantes – que possui a seção resistente sendo composta somente pela vigota e não possui concretagem complementar. É utilizado em casos que existirá por exemplo, um piso de madeira executado posteriormente, como uma mesa flutuante.

Figura 15 – Piso com vigas autoportantes



Fonte: EN 13057-1 (2008, p. 33)

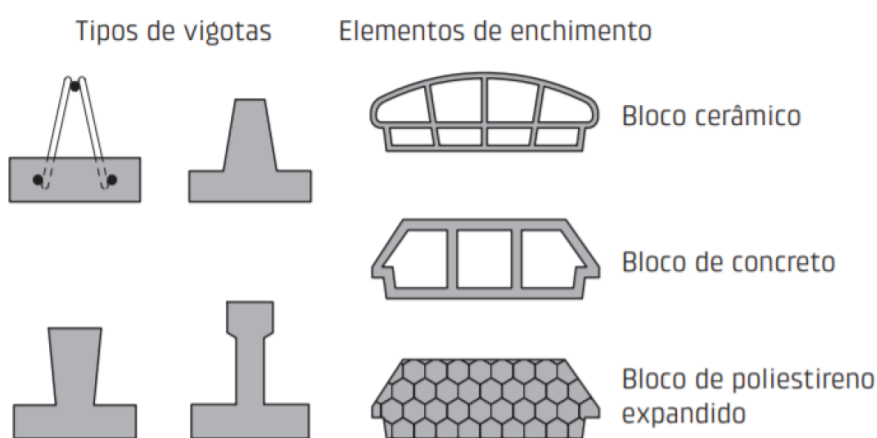
No Brasil as lajes pré-fabricadas são normatizadas somente no sistema com cobertura estrutural moldada no local, sem contribuição dos elementos de enchimento.

Os elementos pré-fabricados estruturais que fazem parte da composição das lajes são vigotas com seção “T” invertido, podendo ser de concreto armado ou protendido ou ainda a vigota pode ter seção retangular com armadura em forma de

treliça exposta acima da seção de concreto, formando a vigota treliçada (EL DEBS, 2017).

Os elementos de enchimento podem ser de variados materiais. Segundo Ávila (2009) em pesquisa realizada sobre lajes treliçadas, com engenheiros de diversos locais do Brasil, o material mais utilizado é o bloco de poliestireno expandido (EPS), utilizado por 85% dos engenheiros consultados, seguido da lajota cerâmica (55%) e bloco de concreto (5%). O somatório das porcentagens é superior a 100% em função da utilização de mais de uma solução, por alguns engenheiros consultados.

Figura 16 – Tipos de vigotas e elementos de enchimento utilizados no Brasil



Fonte: EL DEBS (2017, p. 239)

A capa de concreto complementar, conforme ABNT (2014) na norma NBR 6118, referida como mesa em lajes nervuradas, deve ser executada com no mínimo 4 centímetros de espessura em qualquer caso, com no mínimo 5 centímetros de espessura quando existirem tubulações embutidas com diâmetro até 10 milímetros e com tubulações de diâmetros maiores a espessura deve ser de 4 centímetros somado o diâmetro das tubulações ou 4 centímetros somado o diâmetro de duas tubulações no caso de cruzamentos. Além disso, a capa de concreto complementar deve ser executada com uma armadura de distribuição em forma de malha. A NBR 14859 (ABNT, 2016) substituiu as antigas normas relacionadas às lajes pré-fabricadas, porém, sua parte 4, que contará com indicações relativas a informações complementares de projeto, dimensionamento e detalhamento, e substituirá a antiga NBR 14860-1 (ABNT, 2002), ainda não foi lançada. Então, ainda de acordo com a NBR 14860-1 (ABNT, 2002, p. 8) a armadura de distribuição deve ter “[...] seção de no mínimo 0,9 cm<sup>2</sup>/m para aços CA 25 e de 0,6 cm<sup>2</sup>/m para aços CA 50 e CA 60,

contendo pelo menos três barras por metro”. E ainda, conforme necessidade de projeto, a capa de concreto complementar poderá contar ainda com armaduras negativas.

O processo de execução das lajes pré-fabricadas consiste,

[...] na montagem do escoramento (quando necessário), colocação das vigotas e lajotas sobre a estrutura, montagem das armaduras complementares (armadura de distribuição e armadura negativa, se necessário) e concretagem da capa de concreto [...] (DE LIMA, 2021, p.34)

Deve ser ressaltado ainda que antes da montagem das armaduras complementares e da concretagem devem ser dispostas as tubulações elétricas, caixas de passagem, entre outros (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO (2021) e então, após a cura do concreto até resistência de projeto, o escoramento pode ser removido e a execução da laje estará concluída.

As lajes pré-fabricadas devem atender as seguintes normativas:

- a) ABNT NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado - Procedimento
- b) ABNT NBR 7480 – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado – Especificação
- c) ABNT NBR 7481 – Tela de aço soldada – Armadura para concreto – Especificação
- d) ABNT NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência
- e) ABNT NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – Procedimento
- f) ABNT NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento
- g) ABNT NBR 14859-1 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis – Requisitos
- h) ABNT NBR 14859-2 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma – Requisitos
- i) ABNT NBR 14859-3 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armaduras treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas – Requisitos
- j) ABNT NBR 15522 – Laje pré-fabricadas – Avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho

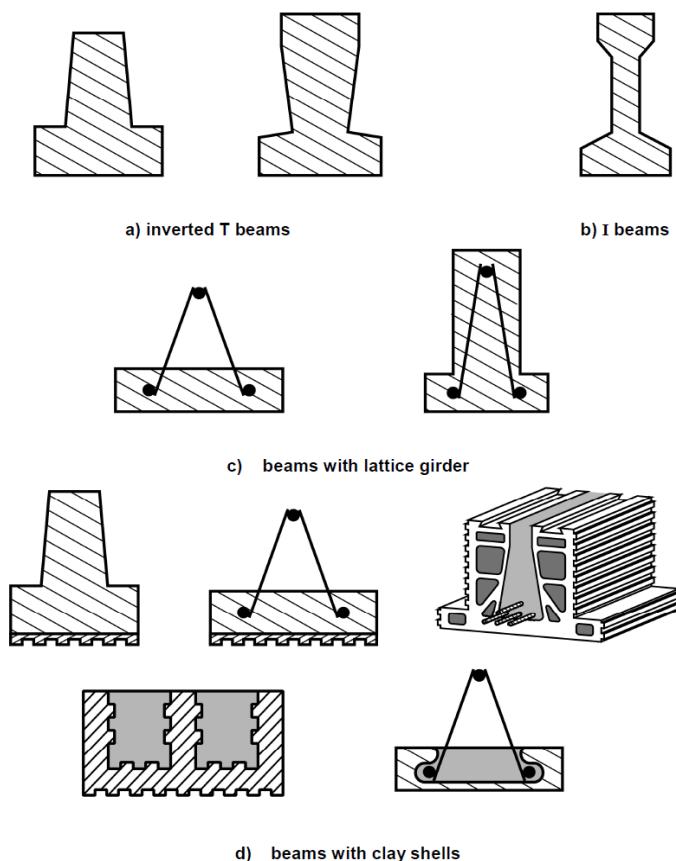
### 2.1.1.1 Elementos pré-fabricados estruturais

Conforme já abordado, os elementos pré-fabricadas estruturais das lajes pré-fabricadas são popularmente chamados de “vigotas”, são o primeiro elemento com contribuição estrutural da laje e devem ser dimensionados de acordo com os procedimentos de cálculo de concreto armado e protendido respectivos.

A norma diretriz dos requisitos dos elementos pré-fabricados estruturais é a NBR 14859-1 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis – Requisitos (ABNT, 2016) e segundo a própria norma, além dela os elementos pré-fabricadas estruturais “[...] devem atender, quanto à fabricação, recebimento e utilização” as normas NBR 6118 e NBR 9062 e o concreto utilizado é exigido como sendo de no mínimo classe C20.

A European Standard (2008) na norma europeia EN 15037-1 cita as vigotas de concreto armado ou protendido, nos formatos “T” invertido, formato “I”, vigotas com treliças e vigotas com conchas cerâmicas, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Vigotas conforme EN 15037-1



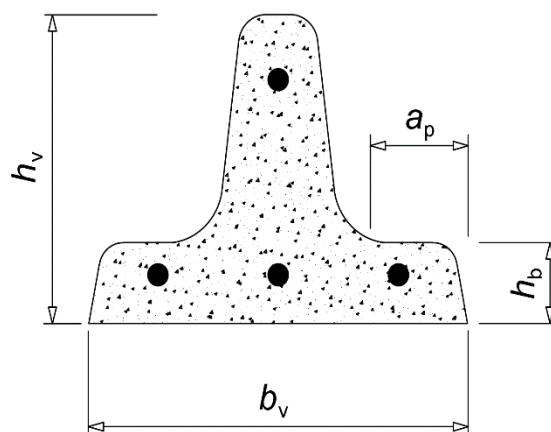
Fonte: EN 13057-1 (2008, p. 8)

No Brasil, a ABNT (2016) na norma NBR 14859-1 define cinco tipos de elementos pré-fabricados estruturais, sendo o minipainel treliçado (MPT) e o painel treliçado (PT) que não serão abordados nesse trabalho e três tipos de vigotas sendo a vigota com armadura simples ou comum (VC), a vigota com armadura protendida (VP) e a vigota com armadura treliçada (VT).

#### 2.1.1.1.1 Vigota com armadura simples ou comum

A vigota com armadura simples ou comum (VC) é um elemento pré-fabricado estrutural constituído de concreto de acordo com as especificações das normas NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014), NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência (ABNT, 2015) e NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento (ABNT, 2022) e por armaduras passivas (sem pré-alongamento), de aço CA 50 ou CA 60, com diâmetro mínimo de 6,3 e 4,2 milímetros, respectivamente, conforme especificações da norma NBR 7480 – Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos (ABNT, 2022). As vigotas são produzidas no formato “T” invertido conforme apresentado na Figura 18 e as dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais definidas pela norma são indicados no Quadro 1.

Figura 18 – Vigota com armadura simples ou comum



Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 3)

Quadro 1 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura simples ou comum

Largura mínima ( $b_v$ )	Altura mínima ( $h_v$ )	Largura mínima do apoio ( $a_p$ )	Altura mínima do apoio ( $h_b$ )
$80 \pm 2$	$80 \pm 2$	$15 \pm 1$	$30 \pm 1$

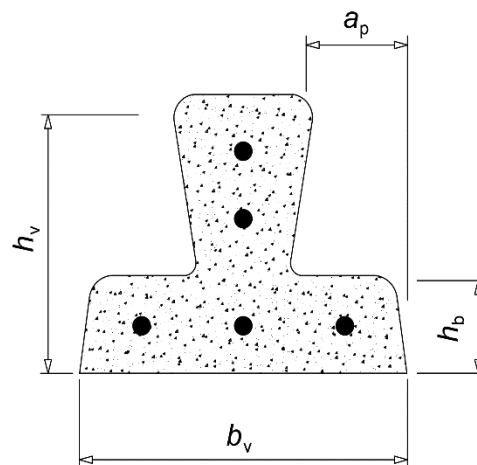
Dimensões em milímetros

Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 3)

#### 2.1.1.1.2 Vigota com armadura protendida

A vigota com armadura protendida (VP) é um elemento pré-fabricado estrutural constituído de concreto de acordo com as especificações das normas NBR 6118 (ABNT, 2014), NBR 8953 (ABNT, 2015) e NBR 12655 (ABNT, 2022) e por armaduras ativas (protendidas), com diâmetro mínimo de 3,0 milímetros, conforme especificações da norma NBR 7482 – Fio de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação (ABNT, 2020). As vigotas também são produzidas no formato “T” invertido conforme apresentado na Figura 19 e as dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais definidas pela norma são indicados no Quadro 2.

Figura 19 – Vigota com armadura protendida



Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 3)



Quadro 2 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura protendida

Largura mínima ( $b_v$ )	Altura mínima ( $h_v$ )	Largura mínima do apoio ( $a_p$ )	Altura mínima do apoio ( $h_b$ )
$100 \pm 2$	$90 \pm 2$	$15 \pm 1$	$30 \pm 1$

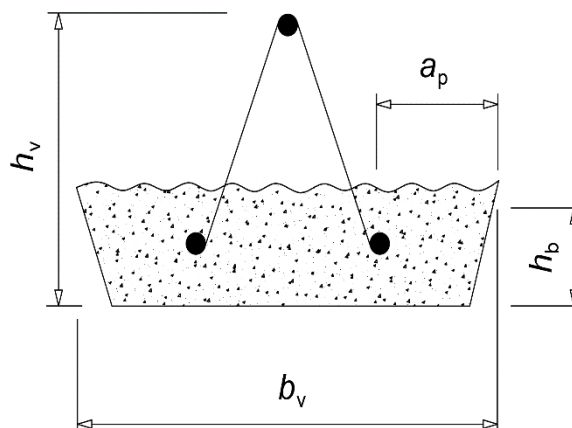
Dimensões em milímetros

Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 4)

### 2.1.1.1.3 Vigota com armadura treliçada

A vigota com armadura treliçada (VT) é um elemento pré-fabricado estrutural constituído de concreto de acordo com as especificações das normas ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014), NBR 8953 (ABNT, 2015) e NBR 12655 (ABNT, 2022) e por armaduras treliçada eletrosoldada, conforme especificações da norma ABNT NBR 14859-3 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armaduras treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas — Requisitos (ABNT, 2017). As vigotas contam com uma base de concreto retangular com a armação treliçada exposta em sua face superior conforme a Figura 20 e as dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais definidas pela norma são indicados no Quadro 3.

Figura 20 – Vigota com armadura treliçada



Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 34)

Quadro 3 – Dimensões mínimas e tolerâncias dimensionais das vigotas com armadura treliçada

Largura mínima ( $b_v$ )	Altura mínima ( $h_v$ )	Largura mínima do apoio ( $a_p$ )	Altura mínima do apoio ( $h_b$ )
130 ± 2	75 ± 2	15 ± 1	30 ± 1

Dimensões em milímetros

Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 5)

#### 2.1.1.2 Elementos pré-fabricados não estruturais de enchimento

A norma NBR 14859-2 – que é a norma diretriz desse componente – define elementos pré-fabricado não estrutural como um elemento inerte, desconsiderado para cálculo de resistência da laje (ABNT, 2016). Além disso, segundo a mesma norma, a função do elemento de enchimento é reduzir o volume de concreto e o peso próprio de laje e servir como fôrma para o concreto da capa complementar.

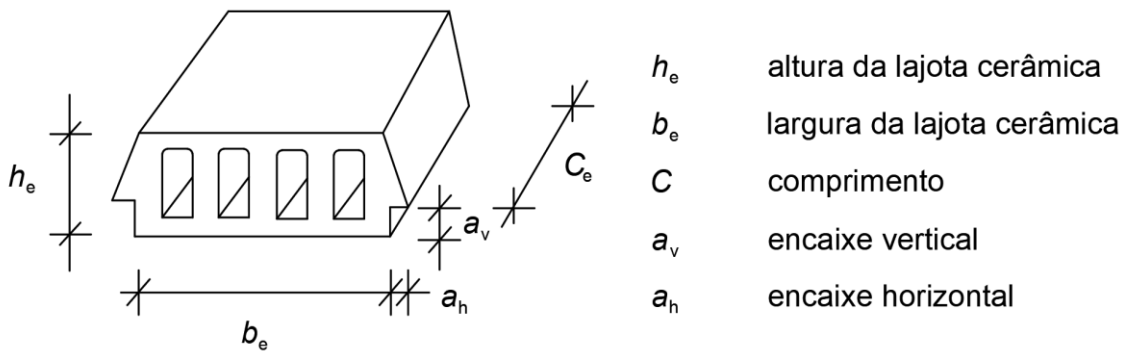
Internacionalmente, a EN 13057-2, não limita a utilização de elementos de enchimento a materiais específicos, mas classifica-os em não resistente, semi-resistente e resistente a partir de ensaio laboratorial com cargas concentradas e com isso definindo se os elementos poderão ou não ser utilizados como colaborantes na resistência final da laje (EUROPEAN STANDARD, 2009).

Já no Brasil, a ABNT (2016) na NBR 14859-2 também não determina, por definição, a fabricação de elementos de enchimento como sendo limitada aos materiais citados pela mesma, mas apresenta a lajota cerâmica, a lajota de EPS, o enchimento misto com utilização do suporte cerâmico, os caixões perdidos e peças adicionais.

##### 2.1.1.2.1 Lajota cerâmica

A lajota cerâmica (LC) é um elemento de enchimento com ruptura frágil, tradicional do mercado brasileiro, produzido através de processo de queima de argila em indústria do ramo ceramista (CAIXETA; HANNUM, 2018).

Figura 21 – Lajota cerâmica

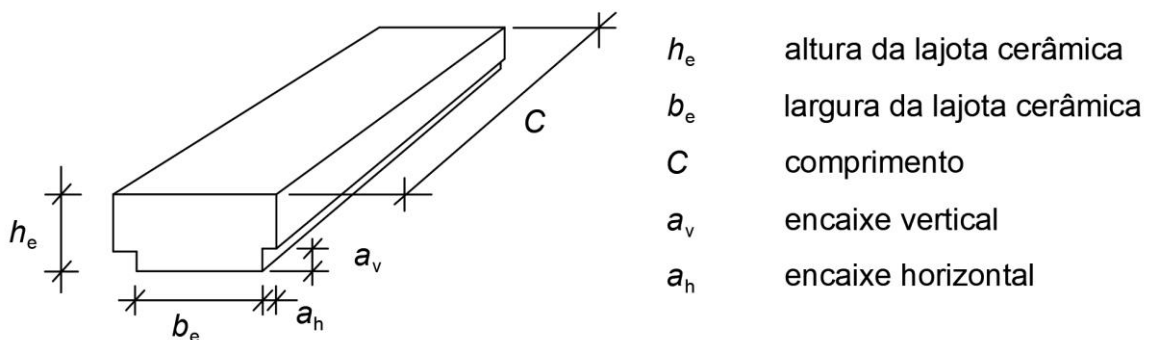


Fonte: ABNT NBR 14859-2 (2016, p. 2)

#### 2.1.1.2.2 Lajota de EPS

A lajota de EPS – poliestireno expandido – (LEPS) é um elemento de enchimento com ruptura dúctil, tem ganhado nos últimos anos espaço no mercado das lajes pré-fabricadas, é derivado do petróleo e grande parte da sua composição é ar, tornando-se um produto de fácil manuseio no canteiro de obras (CAIXETA; HANNUM, 2018).

Figura 22 – Lajota de EPS

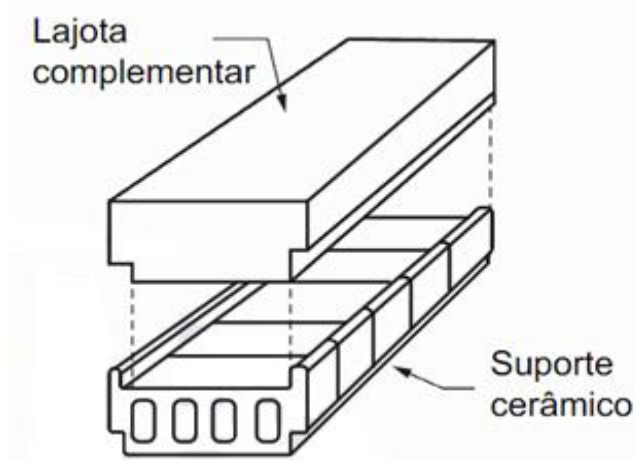


Fonte: ABNT NBR 14859-2 (2016, p. 3)

#### 2.1.1.2.3 Elemento de enchimento misto

O elemento de enchimento misto é a combinação de um suporte cerâmico (SC) que possui abas superiores que permitem o encaixe de outro elemento de enchimento.

Figura 23 – Elemento de enchimento misto



Fonte: ABNT NBR 14859-2 (2016, p. 4)

#### 2.1.1.2.4 Outros elementos

A normativa apresenta ainda outros componentes, como o caixão perdido de EPS (CPEPS) ou de concreto celular autoclavado (CPCCA), comumente utilizado em lajes pré-fabricadas com painéis treliçados, as canaletas plásticas (CP) e o complemento lateral (CL) utilizados para execução de nervuras transversais à direção das vigotas, e como fôrma lateral, respectivamente.

#### 2.1.1.2.5 Características adicionais

A ABNT (2016) na norma NBR 14859-2) estabelece designações, dimensões geométricas e tolerâncias dimensionais padronizadas para os elementos de enchimento, no entanto, permite que, mediante acordo prévio e expresso entre fornecedor e comprador, sejam utilizados elementos de enchimento com alturas diferentes das apresentadas.

Embora no Brasil, embora os elementos de enchimento não contribuam para a resistência da laje, é importante que apresentem características de qualidade e resistência adequada para garantir “[...] a segurança durante a fase de montagem e moldagem das lajes, pois os blocos de enchimento são responsáveis por transferir o peso do concreto ainda fresco às vigotas [...]” (FLÓRIO, 2004). Para tanto, a ABNT NBR 14859-2 (2016), no item 4.3 estabelece resistências características mínimas em ensaios padronizados descritos pela mesma norma, para garantir a capacidade de

suporte de esforços dos trabalhos de montagem e concretagem. Para elementos de enchimento de altura até 80 milímetros, no ensaio a peça deve resistir a uma carga de ruptura mínima de 0,7 kN e elementos mais altos devem resistir a uma carga de 1,0 kN. Elementos de enchimento de EPS, possuem ainda a recomendação de que possuam densidade mínima de 9 kgf/m<sup>3</sup>.

### 2.1.1.3 Capa de concreto armado complementar

O terceiro e último elemento que contribui estruturalmente nas lajes pré-fabricadas é a capa de concreto armado complementar. Após a etapa de montagem das vigotas e dos elementos de enchimento nos devidos locais de utilização, é confeccionada, na obra, a capa de concreto (FIGUEIREDO FILHO, SCHIRAMIZU, 2011). Essa capa também é conhecida como cobertura, e é moldada sobre os demais componentes (vigotas e enchimentos) e seu objetivo é conectar todos os elementos, tornando o sistema monolítico, além de distribuir as cargas atuantes na laje e permitir um acabamento nivelado na face superior da laje (CHIK, KAMIL, YUSOFF, 2018).

Internacionalmente, a norma EN 15037-1 define a espessura mínima da capa de concreto complementar levando em consideração o intereixo das nervuras, a resistência do elemento de enchimento utilizado no ensaio de punção e a posição da capa analisada (sobre a vigota ou sobre o enchimento) (EUROPEAN STANDARD, 2008). Em algumas situações a capa pode ser executada a partir de 3 centímetro sobre a vigota e 3 centímetros sobre o enchimento. Mas vale ressaltar que a norma europeia, permite a execução de lajes pré-fabricadas com cobertura parcial ou até sem cobertura, e, portanto, nesses casos, não existe a definição de espessura mínima de capa.

Nacionalmente, segundo ABNT (2017) na norma NBR 9062 a espessura mínima de capeamento deve ser 3 centímetros em qualquer ponto isolado e a espessura nominal de projeto deve ser de no mínimo 5 centímetros. Já a norma NBR 6118 define que a espessura da mesa (parcela superior da capa, com a dimensão horizontal predominante) em lajes nervuradas, deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces da nervuras e com no mínimo 4 centímetros em qualquer caso, com no mínimo 5 centímetros quando existirem tubulações embutidas com diâmetro até 10 milímetros e com tubulações de diâmetros maiores a espessura deve

ser de 4 centímetros somado o diâmetro das tubulações ou 4 centímetros somado o diâmetro de duas tubulações no caso de cruzamentos.

A capa de concreto complementar deve ser executada com armaduras de distribuição em forma de malha. De acordo com El Debs (2017) essa armadura tem a função de,

- a) Promover um comportamento conjunto mais efetivo da laje com a estrutura;
- b) reduzir os efeitos da retração diferencial entre o CML e o COM;
- c) reduzir a abertura de fissuras devidas à retração e aos efeitos térmicos;
- d) propiciar melhor distribuição transversal de cargas localizada e
- e) propiciar um comportamento de diafragma mais efetivo.

Na Europa, a norma EN 15037-1 define a utilização de malha com seção de aço mínima de  $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$  para os casos de lajes pré-fabricadas com intereixo das nervuras menor que 70 centímetros e carga aplicada menor que  $2,5 \text{ kN/m}^2$ . Além disso, no caso em que o vão livre não for superior a 6,00 metros e quando não houver necessidade de armadura negativa, a malha pode ser substituída por fibras poliméricas. Para todos os outros casos a armadura de distribuição da capa deve ser dimensionada à punção e à flexão transversal (EUROPEAN STANDARD, 2008).

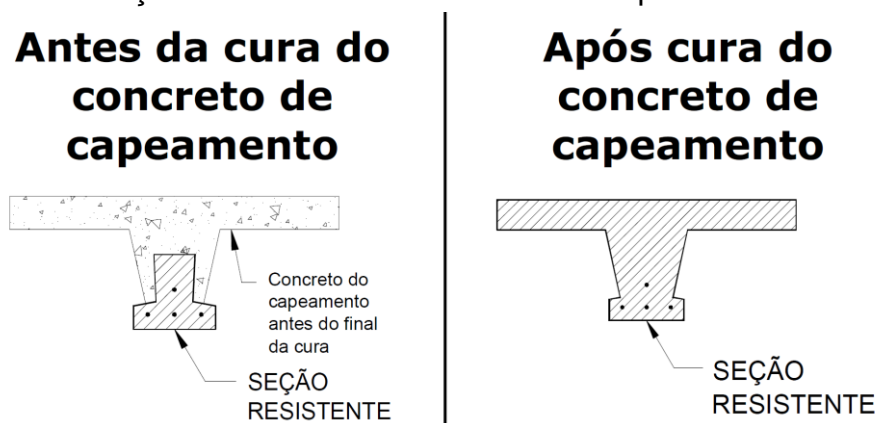
Já no Brasil, de acordo com a ABNT (2016) a norma NBR 14859 substituiu as antigas normas relacionadas às lajes pré-fabricadas, porém, sua parte 4, que contará com indicações relativas a informações complementares de projeto, dimensionamento e detalhamento, e substituirá a antiga NBR 14860-1, ainda não foi lançada. Então, ainda de acordo com a NBR 14860-1 a armadura de distribuição deve ter “[...] seção de no mínimo  $0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$  para aços CA 25 e de  $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$  para aços CA 50 e CA 60, contendo pelo menos três barras por metro”.

Ainda no Brasil, mas de acordo com a ABNT (2014) norma NBR 6118 lajes nervuradas com entre eixos de nervuras for até 65 centímetros, não precisa ser verificada a flexão da mesa, e o cisalhamento pode ser realizado considerando critérios de laje, já lajes nervuradas com entre eixos de nervuras entre 65 e 110 centímetros deve ser verificada a flexão da mesa e a verificação de cisalhamento para entre eixos até 90 centímetros pode ser realizada com critério de laje se a largura das nervuras for maior que 12 centímetros, porém, no restante dos casos deve ser realizada com critério de vigas. Além disso, para casos com entre eixos maiores que 110 centímetros a capa de concreto deve ser projetada como laje maciça apoiada em grelha de vigas.

A armadura de distribuição pode ser montada no local a partir de barras independentes amarradas entre si em forma de malha, ou podem ainda ser utilizadas telas de aço soldadas prontas, conforme a ANBT (2022) NBR 7481, sendo nesse caso realizado o devido transpasse entre os painéis de tela.

Até o momento da cura do concreto utilizado na capa complementar, a seção resistente do sistema é somente a vigota, que é responsável por vencer o vão entre as linhas de escora, suportando o peso dos elementos de enchimento, concreto no estado fresco, instalação e a carga acidental de concretagem, mas após a cura do concreto a seção transversal resistente da laje passa a ser a seção da vigota e a seção da capa de concreto complementar em conjunto, como pode ser observado na figura a seguir.

Figura 24 – Seção transversal resistente antes e após a cura do concreto



Fonte: TATU PREMOLDADOS (2017)

### 2.1.2 Comportamento

Conforme El Debs (2017) as lajes formadas por vigotas têm comportamento semelhante ao de lajes maciças armadas em uma só direção (também chamadas de unidirecionais) e Carvalho (2021 p. 79) complementa dizendo que “as lajes pré-moldadas unidirecionais têm como característica principal a disposição das vigotas segundo uma só direção, geralmente a do menor vão, e simplesmente apoiada nas extremidades”. Dessa forma, a maior parte da carga atuante na laje é direcionada às vigas nas quais as vigotas estão apoiadas, ficando a menor parcela às vigas paralelas às vigotas e estando essa parcela relacionada à rigidez conferida pela capa de concreto armado complementar.

“No projeto estrutural desse tipo de laje, o cálculo das solicitações é normalmente feito considerando a laje como viga, simplesmente apoiada ou contínua” (EL DEBS, 2017, p. 329), mas deve ser levado em consideração que projetando lajes contínuas, quando submetida a momentos fletores negativos, a área comprimida da seção transversal é a base da vigota que é substancialmente menor que a mesa, o que torna a laje menos favorável para momentos fletores negativos, e além disso, pode ocorrer de lajes adjacentes possuírem vigotas sem direções diferentes. Entretanto, ainda de acordo com El Debs (2017) a consideração da continuidade tem vantagens como a redução de flechas e vibrações.

Segundo Carvalho (2021), o comportamento de uma laje pré-fabricada nervurada unidirecional é intermediário se comparado ao comportamento de uma laje formada por vigas de seção “T” independentes e o comportamento de uma laje maciça.

#### 2.1.2.1 Distribuição transversal de cargas

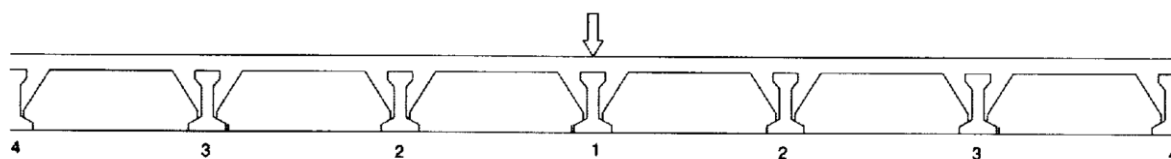
Conforme já exposto, em alguns casos, por razões arquitetônicas é necessário a edificação de paredes sobre lajes. Em lajes, embora a inércia seja menor se comparada a uma viga, existe a vantagem da possibilidade de distribuição de carga em uma área maior. No caso de lajes nervuradas unidirecionais que recebem cargas lineares de alvenarias na direção transversal às vigotas, cada nervura deve suportar uma carga pontual igual a carga linear da alvenaria multiplicada pelo intereixo das nervuras, mas quando a alvenaria é na direção das vigotas é necessário determinar quantas nervuras próximas são solicitadas e a qual carga cada uma deve resistir.

##### 2.1.2.1.1 Procedimento da norma espanhola EF-96

A norma espanhola EF-96 (2002) permite que no caso de paredes ou divisórias pesadas edificadas sobre as lajes na direção das nervuras, a distribuição transversal de cargas possa ser determinada para a nervura principal e para as secundárias, identificadas na Figura 25 multiplicando-se a carga por um coeficiente, conforme o Quadro 4.



Figura 25 – Nervura principal e secundárias em cargas pontuais pela EF-96



Fonte: EF-96 (2002)

Quadro 4 – Coeficientes de determinação de cargas por nervura pela EF-96

Vigota	1	2	3	4
<b>Coeficiente</b>	0,30	0,25	0,15	0

Fonte: EF-96 (2002)

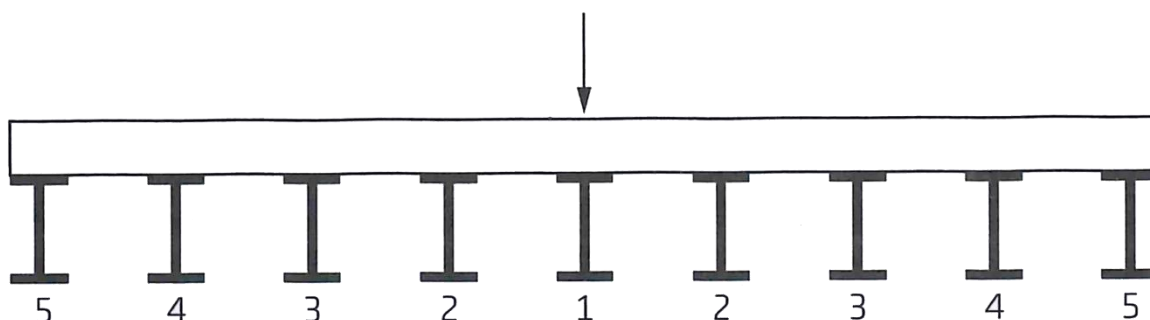
Além disso, a norma indica que no caso de cargas lineares a capa de concreto armado complementar da laje deve ser dimensionada de forma a suportar um momento fletor gerado por um carregando de 30% da carga linear e a armadura calculada para esse esforço deve ser disposta até a vigota lateral número 4.

#### 2.1.2.1.2 Procedimento da Federação Internacional de Protensão (FIP)

A Comissão de Pré-fabricação da Federação Internacional de Protensão – FIP – (1994) demonstra que cargas concentradas em lajes pré-fabricadas são distribuídas por várias nervuras adjacentes através da capa de concreto, que conecta as nervuras, funcionando como uma rótula, transmitindo esforços de cisalhamento, mas não momentos fletores. E essa transmissão de cisalhamento depende da rigidez das nervuras à torção, flexão longitudinal e flexão transversal e restrição de deslocamento lateral entre elas.

Para lajes nervuradas, a FIP (1994) , admite a utilização de um processo simplificado considerado seguro para a maioria dos casos, indicando análises mais específicas em casos mais complexos. A carga concentrada ou linear deve ser considerada distribuída por de 3 a 7 nervuras laterais, sendo que em cada nervura, conforme a Figura 26 a carga aplicada é igual a carga inicial multiplicada pelos coeficientes do Quadro 5.

Figura 26 – Nervura principal e secundárias em cargas pontuais pela FIP



Fonte: EL DEBS (2017) adaptado de FIP (1994)

Quadro 5 – Coeficientes de determinação de cargas por nervura pela FIP

<b>Número de nervuras de cada lado da força</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>2</b>	0,26	0,22	0,15	0			
<b>3</b>	0,24	0,19	0,13	0,06	0		
<b>4</b>	0,22	0,17	0,12	0,07	0,03	0	
<b>&gt;5</b>	0,21	0,17	0,12	0,07	0,03	0,01	0

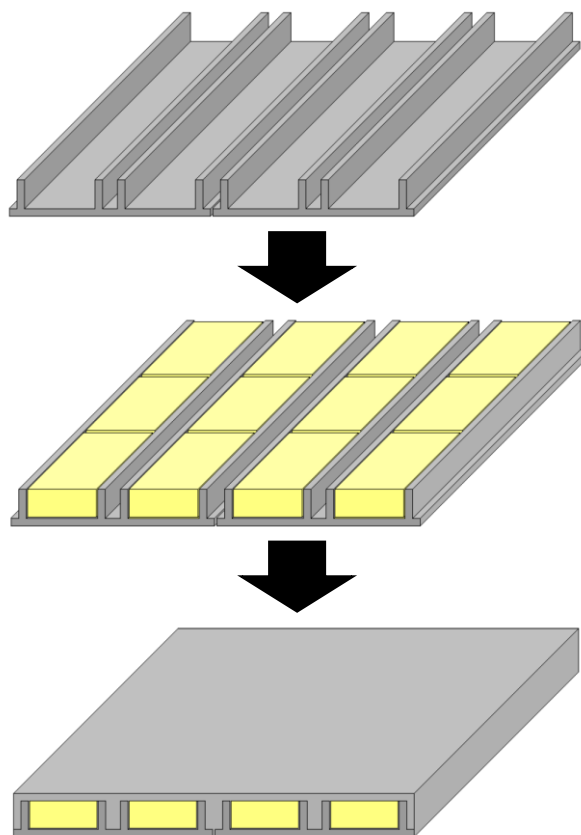
Fonte: FIP (1994)

No entanto deve ser observado que o processo apresentado pode ser aplicado somente em lajes com a cobertura de concreto executada com reforços transversais, distância entre nervuras menor ou igual a 80 centímetros e cargas lineares aplicadas por todo o vão na direção das nervuras.

#### 2.1.2.1.3 Análises e conclusões de Cabral

Cabral (2009) realizou um estudo acerca de distribuição transversal de carga em lajes formadas por painéis nervurados ilustrada na Figura 27 através da modelagem de 1.488 casos diferentes de lajes pelo método dos elementos finitos, variando alturas de seção transversal, vão longitudinal, tipo de carga (linear ou pontual) e posição da carga (centro ou perímetro).

Figura 27 – Painéis do tipo pré-laje nervurados

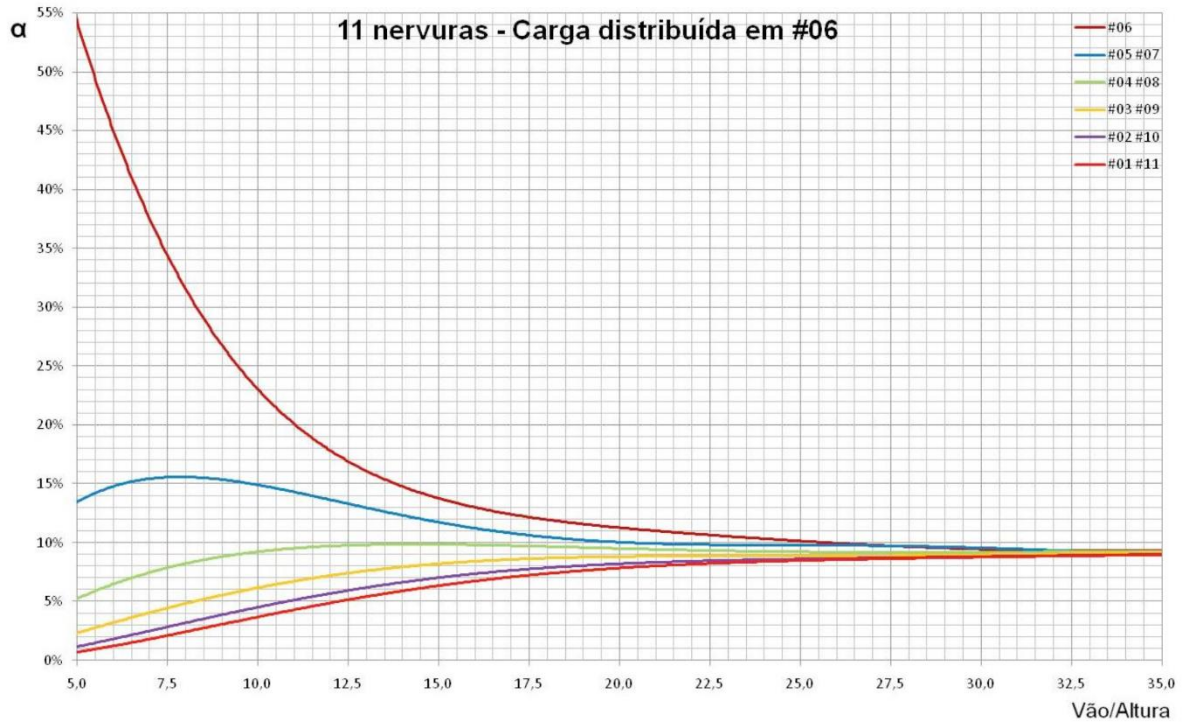


Fonte: Cabral (2009)

Cabral (2009) observou então a convergência dos resultados dos casos modelados para a seguinte lógica: considerando uma viga com seção “I” suportando uma carga distribuída “F”, será observada na viga uma deformação proporcional à carga “F”. Em seguida aplicando uma carga distribuída “F” sobre uma laje formada por vigas “I” solidarizadas observa-se que o somatório das deformações individuais de cada viga é igual a deformação observada na viga “I” inicial que suporta integralmente o carregamento “F”.

Então, com base no exposto, Cabral (2009) elaborou ábacos e tabelas relacionando a relação vão/altura com a porcentagem de carga a ser suportada por cada nervura da laje.

Figura 28 – Ábaco de distribuição de carga para 11 nervuras



Fonte: Cabral (2009)

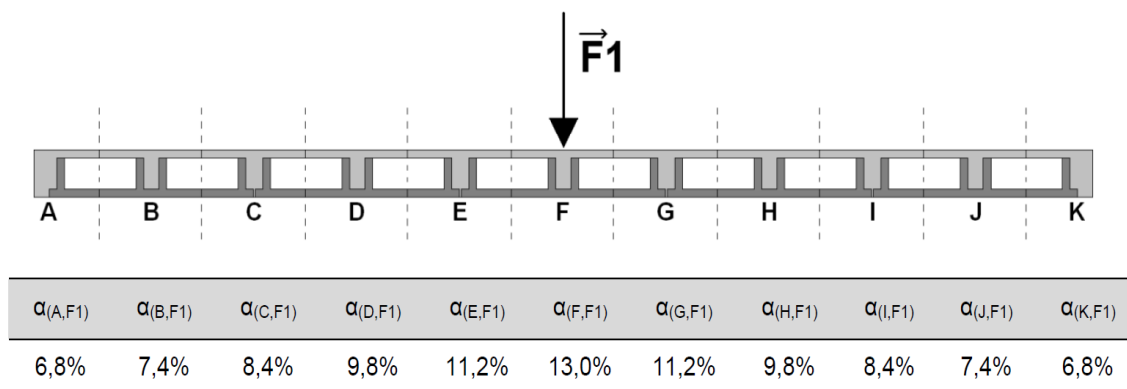
Figura 29 – Tabela de distribuição de carga para 9 nervuras

11 Nervuras - Carga Distribuída em #05											
Vão/Altura	α(#01)	α(#02)	α(#03)	α(#04)	α(#05)	α(#06)	α(#07)	α(#08)	α(#09)	α(#10)	α(#11)
5,00	0,7%	1,2%	2,3%	5,2%	13,5%	54,3%	13,5%	5,2%	2,3%	1,2%	0,7%
5,50	0,9%	1,5%	2,8%	5,9%	14,2%	49,5%	14,2%	5,9%	2,8%	1,5%	0,9%
6,00	1,2%	1,8%	3,2%	6,5%	14,8%	45,1%	14,8%	6,5%	3,2%	1,8%	1,2%
6,50	1,5%	2,1%	3,6%	7,0%	15,2%	41,1%	15,2%	7,0%	3,6%	2,1%	1,5%
7,00	1,8%	2,5%	4,0%	7,4%	15,4%	37,6%	15,4%	7,4%	4,0%	2,5%	1,8%
7,50	2,1%	2,8%	4,4%	7,8%	15,6%	34,4%	15,6%	7,8%	4,4%	2,8%	2,1%
8,00	2,4%	3,2%	4,8%	8,2%	15,6%	31,6%	15,6%	8,2%	4,8%	3,2%	2,4%
8,50	2,7%	3,5%	5,2%	8,5%	15,5%	29,1%	15,5%	8,5%	5,2%	3,5%	2,7%
9,00	3,1%	3,9%	5,5%	8,8%	15,4%	26,8%	15,4%	8,8%	5,5%	3,9%	3,1%
9,50	3,4%	4,2%	5,8%	9,0%	15,2%	24,8%	15,2%	9,0%	5,8%	4,2%	3,4%
10,00	3,7%	4,5%	6,1%	9,2%	14,9%	23,1%	14,9%	9,2%	6,1%	4,5%	3,7%

Fonte: Cabral (2009)

Cabral (2009) finalizou o estudo apresentando um exemplo no qual uma carga “F” é aplicada sobre uma laje com painéis de espessura final 25 centímetros que vence um vão de 4 metros. A porcentagem de carga a ser suportada por cada nervura é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Distribuição de carga por nervura



Fonte: Cabral (2009)

### 2.1.2.2 Distribuição de cargas nas estruturas de apoio

É fato que a maior parcela de carga das lajes pré-fabricadas é direcionada às vigas nas quais as vigotas estão apoiadas e que as vigas onde não estão apoiadas as vigotas recebem uma carga menor e esta parcela é relacionada à rigidez da capa de concreto armado complementar, porém, não é simples a determinação da quantidade de carga direcionada às vigas perpendiculares às vigotas e às vigas paralelas às vigotas.

Diante disso, foi apresentado por Carvalho (2021) um importante estudo, realizado com base no processo de grelha equivalente que aponta o comportamento de lajes pré-fabricadas no que se refere principalmente à determinação das ações sobre as vigas de apoio na direção paralela às vigotas.

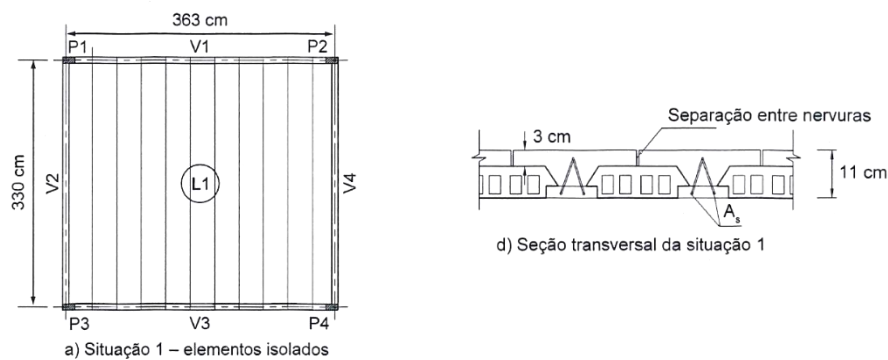
Inicialmente foram definidas três situações de laje, todas elas nas dimensões 330 centímetros na direção principal e 363 centímetros na direção perpendicular à principal, com 11 centímetros de espessura e carregamento distribuído de 5 kN/m<sup>2</sup>, todas apoiadas sobre vigas consideradas indeslocáveis.

Conforme a Figura 31, a situação 1, é composta por vigas seção “T” independentes, a situação 2 é uma laje pré-fabricadas com as nervuras interligadas pela capa de concreto, e a situação 3 é uma laje maciça.

Com isso, Carvalho observou os carregamentos atuantes nas vigas do perímetro conforme apresentado na Figura 34. A curva “E” representa as vigas que recebem os elementos isolados da situação 1, nesse caso as vigas paralelas às vigotas não recebem carga alguma. As curvas “B” e “D” representam respectivamente

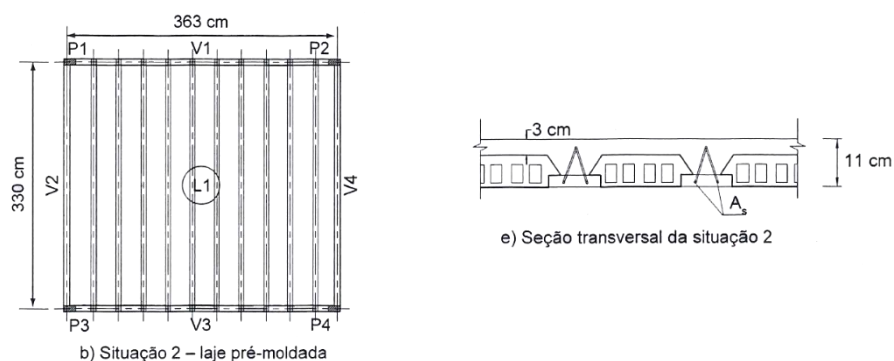
as vigas perpendiculares e paralelas às armaduras no casos da laje maciça e nesse caso é possível observar que é relativamente semelhante a quantidade de carga direcionada a elas, não havendo grande diferença gerada em função da direção das armaduras principais. E por último, as curvas “A” e “C” representam respectivamente às vigas perpendiculares e paralelas às vigotas no caso da laje pré-fabricada, e com isso é possível observar duas questões principais. A primeira é que a quantidade de carga direcionada às vigas perpendiculares às vigotas é intermediária entre a situação 1 com elementos isolados e a situação 3 da laje maciça. E a segunda trata-se da confirmação, através da curva “C”, de que as vigas paralelas às vigotas recebem uma quantidade de carga significativa, impedindo-a de ser desconsiderada em projetos estruturais.

Figura 31 – Situação 1 de lajes analisadas



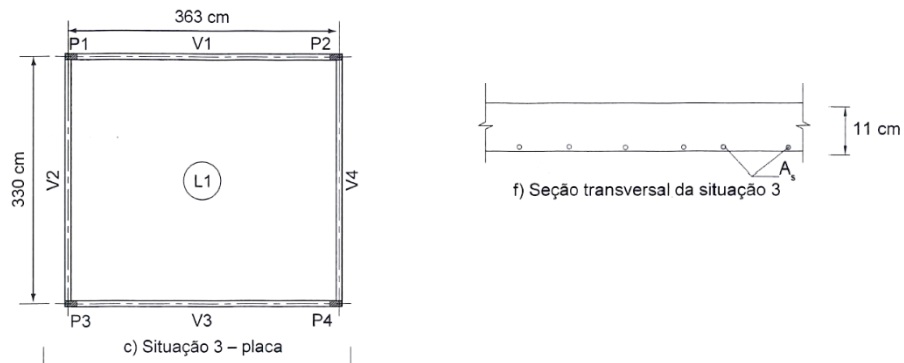
Fonte: Carvalho (2021)

Figura 32 – Situação 2 de lajes analisadas



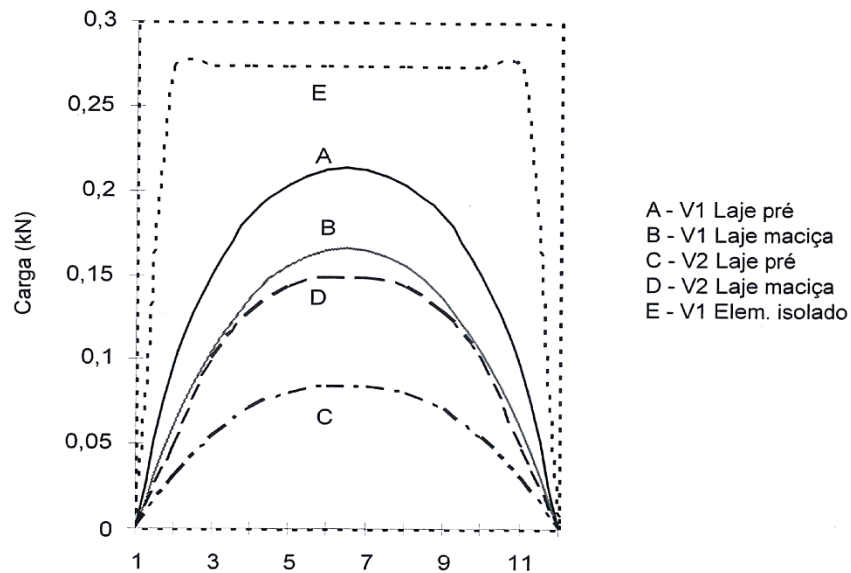
Fonte: Carvalho (2021)

Figura 33 – Situação 3 de lajes analisadas



Fonte: Carvalho (2021)

Figura 34 – Carregamento atuante nas vigas perimetrais



Fonte: Carvalho (2021)

Após, através do mesmo processo de grelha equivalente foram analisados outros casos, mas agora somente de laje pré-fabricadas e submetidas à diferentes condições de contorno, com objetivo de definir o impacto dessas na distribuição de cargas nas vigas de contorno. Os casos analisados e o percentual de carga absorvida nas vigas paralelas às vigotas são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Casos analisados e percentual de carga absorvido pelas vigas paralelas às vigotas

Caso	Dimensões dos pavimentos (m)	Espessura da capa (cm)	Altura da laje (cm)	Condições do contorno	Fissuração da capa	Fissuração das vigas	% absorvida nas vigas secundárias
1	3,30 x 3,63	3,0	11,0	Indeslocável	Não	Não	24
2	3,30 x 3,63	3,0	11,0	Indeslocável	Sim	Não	16
3	3,30 x 7,26	3,0	11,0	Indeslocável	Não	Não	11
4	3,30 x 7,26	3,0	11,0	Indeslocável	Sim	Não	8
5	3,30 x 3,63	3,0	11,0	Viga	Não	Não	27
6	3,30 x 3,63	3,0	16,0	Viga	Não	Não	16
7	3,30 x 3,63	3,0	11,0	Viga	Sim	Não	20

Fonte: Carvalho (2021)

Através desses resultados, Carvalho definiu dois métodos para determinação do carregamento a ser considerado nas vigas de contorno, mas ressaltando que não é possível estabelecer valores que sejam corretos para todos os casos, recomendando análises específicas.

Um método é o processo simplificado, que, através da equação (1) e da equação (2), admite que toda a carga distribuída na laje atue sobre as vigas perpendiculares às vigotas e que 25% da carga total seja direcionado às vigas paralelas às vigotas. Nesse método, portanto, é considerado 125% da carga distribuída na laje atuando sobre as vigas de contorno.

$$p_{vy} = \frac{p * l_x * l_y}{2 * l_y} \quad (1)$$

$$p_{vx} = \frac{0,25 * p * l_x * l_y}{2 * l_x} \quad (2)$$

Onde:

$p_{vy}$  é a carga nas vigas perpendiculares às vigotas pelo processo simplificado

$p_{vx}$  é a carga nas vigas paralelas às vigotas pelo processo simplificado



$p$  é a carga uniformemente distribuída na laje

$l_x$  é a medida do vão na direção paralelas às vigotas

$l_y$  é a medida do vão na direção perpendicular às vigotas

E o outro método é o processo racional, que admite que o porcentual de carga direcionado às vigas depende da relação entre os vãos da laje. No caso de a relação entre vãos ser igual a 1, as vigas perpendiculares às vigotas recebem 75% da carga, e as vigas paralelas às vigotas recebem 25%, e no caso da relação entre vãos ser igual a 2, as vigas perpendiculares recebem 92% da carga e as vigas paralelas recebem 8%, e o casos intermediários pode ser calculados através da equação (3) e da equação (4) .

$$p_{vy} = \frac{(58 + 17 * \lambda) * p * l_x}{200} \quad (3)$$

$$p_{vx} = \frac{(42 - 17 * \lambda) * p * l_y}{200} \quad (4)$$

Onde:

$p_{vy}$  é a carga nas vigas perpendiculares às vigotas pelo processo racional

$p_{vx}$  é a carga nas vigas paralelas às vigotas pelo processo racional

$p$  é a carga uniformemente distribuída na laje

$l_x$  é a medida do vão na direção paralelas às vigotas

$l_y$  é a medida do vão na direção perpendicular às vigotas

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$ , sendo  $l_y \geq l_x$  e para  $l_y \geq 2 * l_x$  deve-se considerar  $l_y = 2 * l_x$

## 2.2 VANTAGENS E PARTICULARIDADES DO CONCRETO PROTENDIDO

O concreto possui resistência considerável à compressão, mas muito pequena de tração, cerca de 10% da resistência à compressão (CARVALHO, 2017). Já o aço possui alta resistência tanto à compressão quanto à tração. A partir disso, convencionou-se a utilização conjunta do concreto com o aço, utilizando o concreto para resistir a tensões de compressão e o aço para resistir a tensões de tração. Porém, já com a presença do aço na área tracionada, é possível ainda tracioná-lo

(torando-a com comportamento ativo) de forma que ao comprimir a seção, o concreto não esteja submetido a tensões de tração, ou apenas atue uma pequena tensão de tração quando submetido a carregamento externo, favorecendo assim sua atuação com melhor desempenho. Este é conceitualmente o concreto protendido (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

Conforme ABNT (2014) a norma NBR 6118 define como elementos de concreto protendido

aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU).

Dessa forma, percebe-se que a função primordial do concreto protendido é evitar a fissuração, o que ocorre através da indução de tensões de compressão nos locais onde, devido às solicitações, haveria tração (CARVALHO, 2017).

De acordo com a norma NBR 7482 os aços utilizados para protensão possuem resistência a tração de 145 a 240 kgf/mm<sup>2</sup> (ABNT, 2020), o que deixa claro que os efeitos da protensão também contribuem no estado limite último, no qual a elevada resistência a tração do aço reduz a área de aço necessária ao dimensionamento.

Tudo isso resulta em peças que, devido as dimensões menores se comparadas ao concreto armado, tornam a estrutura mais leve (CARVALHO, 2017).

### **2.2.1 Classificação do concreto protendido**

O concreto protendido pode ser classificado quanto aos métodos de ancoragem das armaduras ativas. Veríssimo e César Júnior (1998) as descrevem como sendo:

a) Aderência inicial ou pré-tração na qual a armadura é ancorada em apoios estáticos, e posteriormente a peça é concretada, ocorrência a aderência da armadura diretamente na interface com o concreto;

b) Aderência posterior ou pós-tração com aderência, na qual a peça é concretada com as armaduras a serem protendidas posteriormente envoltas por uma bainha de proteção que impede o contato com o concreto, após a cura do concreto é realizada a protensão e após é injetada nata de cimento internamente à bainha, gerando aderência e ancorando a armadura;

c) Sem aderência ou pós-tração sem aderência, na qual a peça é concretada com as armaduras a serem protendidas posteriormente envoltas por uma bainha de proteção que impede o concreto com o concreto e após a cura do concreto é realizada a protensão e a ancoragem se dá apenas nas extremidades dos cabos através de acessórios específicos.

Além disso, a protensão pode ser classificada quanto à intensidade, sendo: completa, limitada ou parcial, e estando elas ligadas a agressividade ambiental do local de utilização e a presença ou não de tração ou formação, ou abertura de fissuras na seção resistente do elemento protendido (CARVALHO, 2017).

### **2.2.2 Perdas de protensão**

Embora inicialmente aparente somente a existência de vantagens na utilização do concreto protendido, deve ser observado que há vários fatores que influenciam no esforço de protensão efetivo atuante nas seções de concreto, havendo uma diminuição no esforço efetivo em relação ao aplicado. Essas diminuições são conhecidas como perdas de protensão e existem as perdas iniciais e as que ocorrem ao longo do tempo (CARVALHO, 2017). Essas perdas devem ser consideradas na elaboração de projetos.

#### **2.2.2.1 Perdas imediatas**

As perdas imediatas são aquelas que ocorrem no ato da protensão, e de acordo com Caixeta; Hannum (2018), podem acontecer:

- a) Devido ao escorregamento dos fios a ancoragem;
- b) Devido à retração inicial do concreto;
- c) Devido à relaxação inicial da armadura.
- d) Devido ao encurtamento imediato do concreto

#### **2.2.2.2 Perdas ao longo do tempo**

As perdas ao longo do tempo, acontecem já na utilização do elemento, quando ele é submetido aos carregamentos externos, e de acordo com Caixeta; Hannum (2018) elas ocorrem:

- a) Devido à retração posterior do concreto;
- b) Devido à relaxação da armadura;
- c) Devido à fluência do concreto.

### **2.2.3 Contribuição no controle da fissuração**

Conforme já abordado a introdução de esforços de tração nas armaduras induzem tensões de compressão na seção de concreto, reduzindo ou eliminando a possibilidade de abertura de fissuras por esforços de tração no concreto. De acordo com Carvalho (2017) a fissuração excessiva contribui para o comprometimento da durabilidade dos elementos, podendo colaborar para a deterioração rápida das armaduras.

Para controle da fissuração, a ABNT (2014) na norma NBR 6118 estabelece formulações que estimam a abertura de fissuras nas áreas localizadas sob a linha neutra da peça e no entorno da localização das armaduras e define limites a serem atendidos.

### **2.2.4 Contribuição na redução da deformação**

Em elementos de concreto armado submetidos à flexão a ABNT (2014) na norma NBR 6118 define que se ultrapassados os esforços de tração que originam a fissuração – o que geralmente ocorre – deve ser utilizada uma inércia equivalente para a determinação de flechas. Essa inércia equivalente é reduzida, considerando que parte da seção está fissurada e não contribui resistindo à deformação. Esse fenômeno de fissuração do concreto é também conhecido como não linearidade física, devido ao fato de que o comportamento, justamente devido à fissuração não ser regularmente elástico.

No caso de elementos protendidos, a mesma norma permite, desde que atendido o estado limite de formação de fissuras a utilização da inércia total de concreto contribuindo na resistência à deformação. Além disso, a carga ativa da protensão contribui gerando esforços contrários ao de utilização.

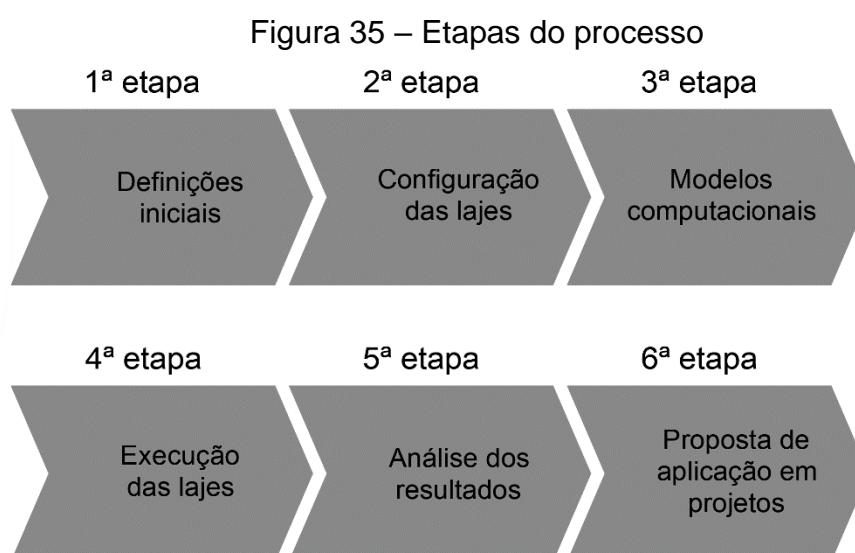
### **2.2.5 Contribuição no dimensionamento à ruptura**

No dimensionamento ao estado limite último de ruptura, as vantagens do concreto protendido estão na elevada resistência ao escoamento do aço, se comparado aos aços convencionalmente utilizados na construção civil e também ao fato de que a força de protensão, provoca um carregamento contrário ao das ações de utilização e permanentes da estrutura, provocando uma “diminuição” de carga no equilíbrio de força na seção.

### 3 METODOLOGIA

O método apresentado para realização do estudo proposto consiste na realização de um processo dividido em etapas, conforme a Figura 35, que inicia com a definição dos materiais a serem empregados e seu respectivo controle tecnológico durante o processo conforme as normas pertinentes, passando pela definição da configuração das lajes a serem utilizadas, pela elaboração de modelos computacionais e execução de lajes reais até a análise dos resultados e proposição de uma forma simplificada de consideração do comportamento observado em projetos estruturais.

É importante ressaltar que as etapas 2, 3 e 4 foram realizadas para duas seções transversais resistentes de lajes com geometrias diferentes, mas complementares entre si, variando-se apenas a espessura da capa de concreto complementar da laje. Dessa forma, a etapa 4, que trata da execução real das lajes, pôde ser realizada aproveitando a primeira laje para execução da segunda, apenas acrescentando uma camada extra de concreto, mas atentando-se ao cisalhamento longitudinal entre as camadas de concreto, de modo a garantir o comportamento habitual da segunda laje, sem interferência da concretagem da capa de concreto complementar ter sido realizada em duas etapas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira etapa remete-se da definição dos materiais empregados, desde o aço e do concreto utilizado para produção das vigotas protendidas e seus respectivos

controles tecnológicos, os elementos de enchimento cerâmicos utilizados nas lajes, o aço da armadura de distribuição e dos conectores de cisalhamento para a interface entre o concreto das diferentes camadas da capa e o concreto empregado na execução da primeira e na segunda etapa da capa de concreto complementar e seus respectivos controles tecnológicos. Além disso foi definido o bloco e o processo a ser utilizado para simular a carga da alvenaria sobre a nervura principal.

A segunda etapa refere-se a determinação das duas configurações das lajes a serem estudadas para o desenvolvimento deste trabalho, fazendo isso a partir de procedimentos, formulações e equações apresentados por normas e bibliografias técnicas, levando em conta a necessidade de utilizar lajes que apresentem deformações visíveis e passíveis de mensuração pelos equipamentos empregados, observando também as limitações e sensibilidade dos mesmos.

A terceira etapa é a elaboração de modelos computacionais das duas lajes definidas no passo anterior em *software* específico, sendo empregado nesse estudo o *software* SCIA ENGINEER que funciona através do método dos elementos finitos, observando a inserção das mesmas geometrias e características dos materiais pré-determinados.

A etapa seguinte, quarta, trata da execução das lajes definidas na segunda etapa em campo e, como já mencionado anteriormente, sendo subdividida em duas partes, a primeira que consistindo na execução da laje inicial, utilizando uma determinada espessura de capa de concreto armado complementar e possuindo de modo protuberante em sua superfície, conectores de cisalhamento longitudinal como “espera” para uma nova camada de concreto, e a segunda parte sendo a complementação da espessura de concreto da capa, de forma solidária a primeira, resultado na última laje definida.

A quinta etapa consiste na observação e comparação dos resultados obtidos através dos cálculos baseados em procedimentos e equações normativas e de bibliografias técnicas, dos resultados obtidos através do modelos computacionais e dos resultados obtidos através de medições nas lajes executadas. Além disso, nessa etapa, se necessário, os cálculos e modelos computacionais poderão ser retroalimentados a partir das características apresentadas, tanto geométricas como mecânicas pelos elementos que compõe a laje, como a resistência à compressão e a tração e o módulo de elasticidade dos diferentes concretos empregados.

A sexta e última etapa trata-se da proposição de uma forma simplificada de consideração e emprego do comportamento da influência da espessura da capa na distribuição transversal de cargas observado nesse estudo no desenvolvimento de projetos estruturais futuros.

### 3.1 DEFINIÇÕES INICIAIS

Os materiais empregados no desenvolvimento deste trabalho foram os materiais utilizados diretamente para execução da laje, como o aço a ser utilizado para produção das vigotas protendidas, o aço a ser utilizado na armadura de distribuição e conectores de cisalhamento utilizados na capa de concreto da laje, os elementos de enchimento cerâmicos e o concreto utilizado nas três etapas, sendo para produção das vigotas, para a primeira e para a segunda parcela de da capa, estes passando pelos devidos controles tecnológicos através de ensaios laboratoriais.

#### 3.1.1 Aço utilizado para produção das vigotas protendidas

O aço utilizado na produção das vigotas protendidas, e conseqüentemente a armadura positiva das lajes, é o aço comumente utilizado na indústria fornecedora das vigotas (Construrohr), é fornecido pelo produtor ArcelorMittal Brasil e segue a norma ABNT NBR 7482:2020 – Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação. O fio utilizado no estudo trata-se do fio “CP175 RB 4 E”, conforme a designação instituída pela própria norma, sendo “CP” referente ao mesmo ser empregado em concreto protendido, “175” referindo-se ao limite mínimo de resistência à tração na unidade “kgf/mm<sup>2</sup>”, “RB” indicando que o aço é de relaxação baixa, “4” indicando o diâmetro do fio na unidade “mm” e a indicação “E” referindo-se ao formato externo do fio, sendo este entalhado.

Conforme a ABNT NBR 7482:2020 fica sob responsabilidade do produtor informar ao comprador por meio de certificado, informações como identificações de controle e de lote, sendo que cada lote deve ter informadas as características dimensionais e mecânicas do material, como o diagrama "carga-deformação", a carga a 1% de alongamento, a carga de ruptura, o alongamento total após ruptura e o módulo de elasticidade. Os ensaios para determinação dessas características devem ser realizados de acordo com a norma ABNT NBR 6349:2022. Além disso os fios



devem ser ensaiados a dobramento conforme a norma ABNT NBR 7482:2020 e a relaxação conforme a norma ABNT NBR 7484:2020, porém com esse último não sendo necessário a cada lote, devido a duração do ensaio, podendo o produtor fornecer resultados realizados nos últimos seis meses.

Por se tratar de um material produzido com alta tecnologia e com grande controle de qualidade no processo que por isso apresentar baixa variação de características geométricas e mecânicas, os ensaios citados não serão reproduzidos, e serão consideradas no estudo as características geométricas e mecânicas informadas pelo fornecedor.

O posicionamento correto dos fios durante a produção das vigotas é garantido por gabaritos de posição localizados no início e final da pista e junto da máquina moldadora das vigotas.

### **3.1.2 Aço utilizado na armadura de distribuição e conectores de cisalhamento da capa de concreto**

A armadura de distribuição empregada na capa de concreto complementar das lajes, que tem como função principal a solidarização das nervuras e como o próprio nome já sugere, a distribuição de cargas, é composta por barras de aço CA 60 armadas entre si em forma de tela seguindo um espaçamento pré-determinado em ambas as direções e posicionada horizontalmente sobre as vigotas e tabelas.

Os conectores de cisalhamento aplicados entre as diferentes camadas da capa de concreto da laje, também é composto por barras de aço CA 60, mas posicionadas na direção vertical e são dispostos de maneira distribuída seguindo espaçamento determinado em cálculo na superfície da laje de modo a prover o comportamento homogêneo das diferentes camadas de concreto

As barras de aço CA 60 seguem a norma ABNT NBR 7480:2022 – Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos, e conforme a própria, as barras devem ser ensaiadas à tração conforme a ABNT NBR 6892:2013 e ISO 15630-1:2019 e ao dobramento conforme ABNT NBR 17005:2021. O produtor deve fornecer, se solicitado, o certificado de qualidade, contendo as identificações necessárias, as características básicas como as propriedades mecânicas de limite de escoamento, resistência e alongamento e os resultados dos ensaios supracitados.

Também tratando-se de aço, semelhante ao item anterior, os ensaios de controle citados não serão reproduzidos, e serão consideradas no estudo as características geométricas e mecânicas informadas pelo fornecedor.

O correto posicionamento da armadura de distribuição e dos conectores de cisalhamento será garantido pela utilização de espaçados do tipo “roseta” distribuído ao longo das armaduras.

### **3.1.3 Concreto utilizado para a produção das vigotas e seu respectivo controle tecnológico**

O concreto utilizado para a produção das vigotas é o tradicionalmente utilizado na indústria fornecedora e é dosado em central específica, possui *fck* de 40 MPa e a composição do traço utilizado está indica a seguir:

- a) 350 kg de cimento CP V ARI RS;
- b) 1120 kg de areia de granulometria média;
- c) 800 kg de brita número 0;
- d) 145 litros de água;
- e) 1,3 litro de aditivo superplastificante.

Após posicionamento e pré-tensionamento dos fio de aço na pista, as vigotas são concretadas através de uma moldadora sobre trilhos que dá o formato da vigota através de um processo de extrusão.

As vigotas utilizadas foram produzidas a partir da mesma betonada e o controle tecnológico deste concreto foi realizado pela moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 centímetros e altura de 20 centímetros e 4 corpos de prova prismáticos com dimensão básica de 10 centímetros e comprimento de 35 centímetros. A preparação dos moldes, moldagem, adensamento, rasamento, manuseio e transporte, cura inicial, desmoldagem, cura e preparação dos corpos de prova para os ensaios foram realizadas observando os procedimentos da ABNT NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaios a compressão, objetivando o acompanhamento do crescimento da resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, nas datas dos ensaios de deformação da primeira e da segunda laje, em cada ocasião sendo rompidos dois corpos de prova.

Já os corpos de prova prismáticos foram utilizados para ensaios de tração na flexão, objetivando a determinação da resistência a tração do concreto, uma vez que o concreto utilizado nas vigotas é o primeiro a ser tracionado na seção resistente da laje, quando submetida a momento fletor, e com esse resultado, além da análise visual das vigotas será possível verificar, a existência de fissuração da seção resistente, ou não. Os ensaios de tração na flexão foram realizados conforme a ABNT NBR 12142:2012 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, e nas datas dos ensaios de deformação da primeira e da segunda laje, em cada momento sendo rompidos dois corpos de prova.

### **3.1.4 Concreto utilizado para a concretagem da primeira e da segunda camada da capa e seus respectivos controles tecnológicos**

O concreto utilizado na execução da primeira e da segunda etapa da capa de concreto foi dosado em central específica, é do tipo autoadensável e foi dosado para atingir um *fck* de 40 MPa a partir da composição do braço indicado abaixo:

- a) 420 kg de cimento CP V ARI RS;
- b) 710 kg de areia de granulometria média;
- c) 330 kg de brita número 0;
- d) 208 litros de água;
- e) 1,9 litro de aditivo superplastificante.

Foi utilizado este concreto, primeiramente pela praticidade, por se tratar de um concreto já utilizado em outro setor da mesma indústria (na fabricação de pilares e vigas pré-fabricadas) já que as lajes do estudo foram executadas dentro do parque fabril por maior facilidade logística no transporte dos materiais necessários, e além disso, foi utilizado um concreto com resistência aos 28 dias de idade superior ao convencionalmente utilizada em obra para concretagem de laje, em função do objetivo de, em 7 dias obter um concreto com resistência à compressão entre 25 e 30 MPa, e com isso, estando o concreto dentro da faixa convencional de concretagem de lajes, realizar a remoção do escoramento e realização do ensaio de deformação, sendo seguido da remontagem do escoramento, da concretagem da segunda etapa da capa de concreto, para realização do segundo ensaio após um novo período de 7 dias, com o mesmo objetivo, mas claramente, ainda observando o crescimento da resistência à compressão do concreto da primeira etapa.

Em função da utilização de concreto autoadensável, a concretagem de ambas as camadas da capa de concreto não precisou contar com outro método de adensamento, apenas foi realizado o espalhamento do concreto sobre a superfície da laje e realizado o nivelamento da face superior com utilização de régua adequada.

Cada concretagem por realizada a partir da mesma betonada, transportada e descarregada sobre a laje através de caixão com capacidade volumétrica suficiente e o controle tecnológico da primeira camada da capa de concreto foi realizado pela moldagem de 14 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 centímetros e altura de 20 centímetros, enquanto a segunda camada da capa de concreto teve seu controle tecnológico realizado com a moldagem de 9 corpos de prova cilíndricos nas mesmas dimensões. A preparação dos moldes, moldagem, adensamento, rasamento, manuseio e transporte, cura inicial, desmoldagem, cura e preparação dos corpos de prova para os ensaios foram realizadas observando os procedimentos da ABNT NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Dos corpos de prova da primeira camada da capa de concreto, 4 foram ensaios apenas a compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, objetivando o acompanhamento do crescimento da resistência à compressão, sendo dois corpos de prova ensaiados na idade de 1 dia e dois na idade de 3 dias. E o restante dos corpos de prova foram separados em dois grupos de cinco unidades, cada grupo tendo dois corpos de prova rompidos a compressão e três passando pela ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) conforme a ABNT NBT 8522-1 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. O primeiro grupo foi ensaiado com o concreto na idade de 7 dias e o segundo grupo com o concreto na idade de 14 dias, em ambos os casos junto com o ensaio de deformação das lajes.

Dos corpos de prova da segunda camada da capa de concreto, 4 foram ensaios apenas a compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, objetivando o acompanhamento do crescimento da resistência à compressão, sendo dois corpos de prova ensaiados na idade de 1 dia e dois na idade de 3 dias. E do restante dos corpos de prova, dois foram rompidos a compressão e três passaram pelo ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) conforme a ABNT NBT 8522-1 – Concreto endurecido –

Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Esses corpos de prova foram ensaiados na idade de 7 dias.

### 3.1.5 Elementos de enchimento cerâmicos

Os elementos de enchimento cerâmicos utilizados seguem a norma ABNT NBR 14859-2:2016 – Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma – Requisitos. São utilizadas lajotas cerâmicas de designação “Hc 8/37/20” sendo “8” a altura em centímetros, “37” a largura da base em centímetros e 20 o comprimento em centímetros, além disso, a largura do apoio é de 1,5 centímetro e a altura do apoio é de 3,0 centímetros.

A lajota cerâmica deve ser ensaiada, com amostragem de lotes, pelo fabricante e a lajota em questão deve, além de requisitos dimensionais, conforme a própria norma, atender ao ensaio de ruptura frágil com uma carga mínima de 0,7 kN, conforme o ensaio apresentado no anexo A da mesma norma.

Figura 36 – Lajota cerâmica Hc 8/37/20



Fonte: Construrohr (2022)

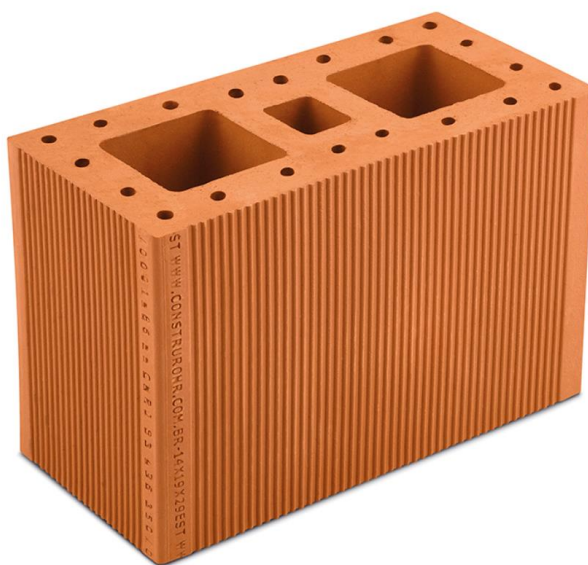
### 3.1.6 Carga da alvenaria a ser aplicada sobre a nervura central

Como o estudo foi realizado através de uma amostra executada apenas para essa análise, e não está inserido em um contexto de obra, que receberá outro fim posteriormente, não existiu a necessidade de execução de uma alvenaria definitiva com assentamento dos blocos e revestimento argamassado como ocorreria de fato, já que a única necessidade era a aplicação de uma carga conhecida sobre a nervura

principal. Dessa forma foi realizado apenas o empilhamento de blocos cerâmicos no formato de uma alvenaria. Mas como existia a necessidade de aplicação de uma carga relativamente alta, com objetivo de obter deformações acentuadas, facilitando as medições, o bloco escolhido foi o apresentado na Figura 37 abaixo.

Trata-se de uma bloco estrutural de  $f_{bk}$  18 MPa, vazado com paredes maciças, comercializado pela mesma empresa fornecedoras do restantes do materiais. Em amostragem aleatória de 3 blocos de um palete foi verificado o peso médio de 10,125 quilogramas por unidade.

Figura 37 - Bloco utilizado para simular a carga da alvenaria



Fonte: Construrohr (2022)

### 3.2 CÁLCULOS PARA DEFINIÇÃO DAS LAJES

A definição das configurações das lajes a serem utilizadas no desenvolvimento do estudo partiu de duas premissas principais:

a) Definir duas lajes com caráter complementar entre si, ou seja, que a segunda laje tenha as mesmas características da primeira, acrescentando somente um complemento na espessura da capa de concreto armado, evitando assim a necessidade de execução de duas lajes distintas completas;

a) Utilizar geometrias e características para que as duas lajes apresentem, quando submetidas ao carregamento determinado, deformações visíveis e possíveis de serem medidas, observando também a limitação dos aparelhos a serem

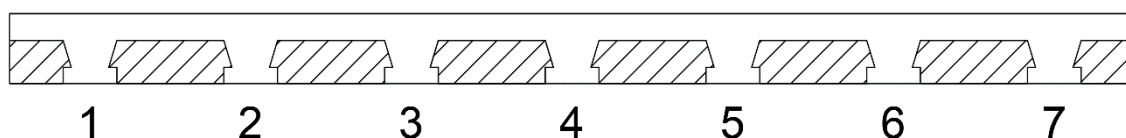
empregados na medição, que serão relógios comparadores com medição de deslocamento máximo de 10 milímetros.

Dessa forma, foi pré-definida a utilização da primeira laje com a menor espessura final possível, sendo composta por um elemento de enchimento cerâmico com altura de 8 centímetros e a espessura da primeira etapa da capa de concreto armado complementar de 5 centímetros, totalizando 13 centímetros de altura. Além disso, foi preconizada a utilização de vigotas com a menor seção de aço produzida, ou seja, com armadura composto por 3 fios de aço, foi determinado um vão longitudinal no sentido das vigotas de 4,0 metros e a utilização de uma nervura central principal, exatamente no alinhamento de aplicação da carga e mais três nervuras secundárias de cada lado, resultando em sete nervuras.

A segunda laje, como já mencionado apresenta as mesmas características da primeira, mas com um acréscimo na espessura de 2 centímetros de concreto sobre a primeira laje. Dessa forma a segunda laje é composta por elementos de enchimento cerâmico de 8 centímetros e capa de concreto com espessura de 7 centímetros, totalizando em uma laje com espessura de 15 centímetros.

A definição da quantidade de nervuras a serem incluídas no estudo baseou-se na norma espanhola EF-96 de 2002, segundo a qual a três nervuras de distância da nervura diretamente sob a aplicação da carga, ou seja, nas nervuras 1 e 7 da Figura 38 não chegariam mais solicitações estruturais relevantes, e nas recomendações da FIP de 1994, cuja recomendação seria da consideração de no máximo 7% da carga linear sobre as nervuras 1 e 7. Dessa forma optou-se por limitar o ensaio às 7 nervuras.

Figura 38 – Identificação das nervuras da laje

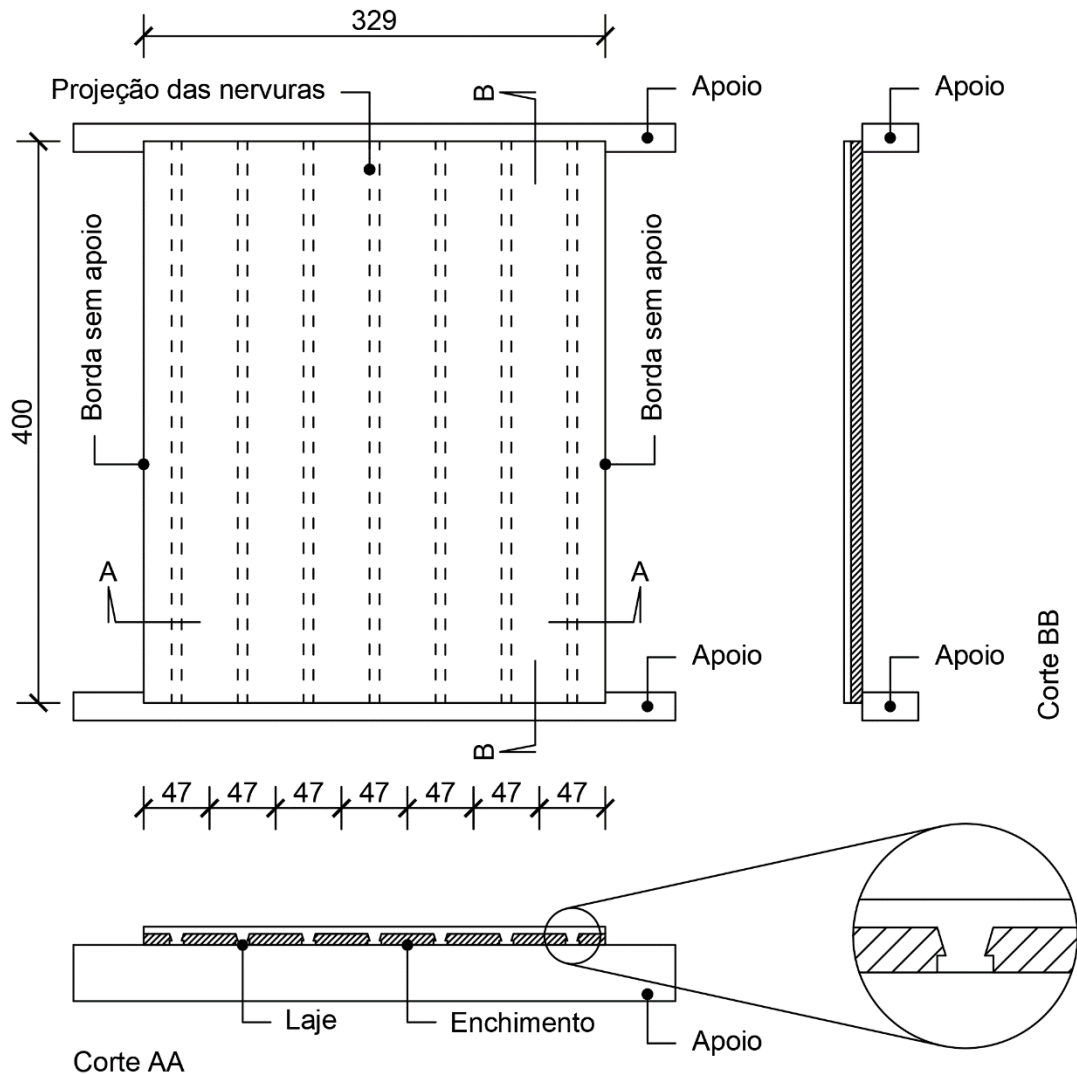


Fonte: Elaborado pelo autor

O formato pré-determinado da primeira laje está apresentado e detalhado na Figura 39 a seguir. E após concluídas as definições iniciais, foi verificada a força de protensão atuante nas armaduras no momento dos ensaios, levando em consideração as perdas de protensão ocorridas até o momento, as nervuras foram verificadas no

estado limite último, foram determinadas as tensões na máximas nas seções transversais e verificar as deformações estimadas por cálculos.

Figura 39 – Configuração das lajes



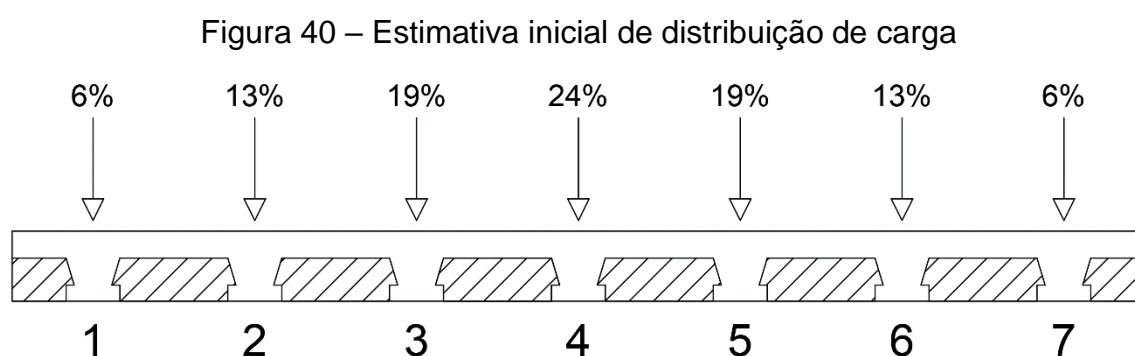
Fonte: Elaborado pelo autor

É necessário salientar que a seguir é apresentado o método utilizado para a realização dos cálculos, sendo os mesmo elaborados com base nas características e no comportamento estimado da lajes mas que após a realização dos ensaios serão revisados com base nas características geométricas e propriedades mecânicas apresentadas pelas lajes executadas, bem com a distribuição de carga observada nos ensaios, a fim de balizar igualmente com o método dos modelos computacionais e reais. Os resultados dos cálculos revisados serão e apresentados no capítulo de análise dos resultados



### 3.2.1 Estimativa inicial de distribuição de cargas

Definida a força de protensão no ato de realização dos ensaios de protensão o próximo passo foi determinar uma estimativa de distribuição transversal de carga, definindo, conforme Figura 40, um carregamento para a nervura principal da laje, ou seja, a nervura que estará na posição de aplicação da carga linear e para as nervuras laterais secundárias que receberão uma parcela menor de carga. Para tanto baseou-se nas recomendações da FIP, que indica 24% da carga na nervura principal (4), 19% para as duas nervuras imediatamente ao lado da principal (3 e 5), 13% para as nervuras seguintes (2 e 6) e 6% para as últimas (1 e 7). O somatório dos percentuais é de 100%, ou seja, a totalidade da carga inicial. Essa estimativa inicial foi utilizada para o dimensionamento de ambas as lajes.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.2 Dimensionamento da armadura de distribuição

A malha adotada para a armadura de distribuição foi definida em conjunto com a capa de concreto de 5 centímetros de espessura a partir das especificações da norma espanhola EF-96 (2002), que indica a utilização de uma capa de concreto que resista a um momento fletor em kNm/m igual a 30% da carga em caso de cargas lineares. Dessa forma, considerando um cobrimento de 2,0 centímetros na face inferior, o resultado é a necessidade de uma armadura de distribuição com área de aço de 1,11 cm<sup>2</sup>/m, e a malha adotada foi composta por barras de aço CA 60 de diâmetro 4,2 milímetros espaçadas a cada 10 centímetros, totalizando uma área de aço de 1,38 cm<sup>2</sup>/m.

### 3.2.3 Dimensionamento dos conectores de cisalhamento

Para garantia do comportamento conjunto entre as duas camadas da capa de concreto que diferencia a primeira e a segunda laje, é necessária a utilização de conectores metálicos que resistam ao cisalhamento longitudinal na interface entre as duas diferentes camadas de concreto.

Pela resistência dos materiais tem-se que a tensão de cisalhamento transversal e longitudinal são numericamente iguais, então esses conectores são dimensionados a partir do esforço solicitante de cisalhamento e das características geométricas da peça.

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{6,08 * 0,000178}{0,00005039 * 0,47} = 45,84 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

Onde:

$\tau$  é tensão de cisalhamento na interface das camadas de capa de concreto;

$V$  é a força de cisalhamento solicitante;

$Q$  é o produto de  $y'$ , que é a distância do centro de gravidade da seção até o centro da área formada pela parcela da seção superior a posição analisada, e  $A'$  que é a área acima da posição analisada, em  $\text{m}^3$ ;

$I$  é inércia da seção, em  $\text{m}^4$ ;

$t$  é largura da seção na posição analisada, em m;

Com isso, e considerando a superfície da laje como sendo de 4,00 metros x 3,29 metros, e a tensão resistente de cisalhamento do aço CA-50 como sendo de 50% da tensão de escoamento a tração, obtém-se a necessidade de 27,75  $\text{cm}^2$  de aço distribuídos pela superfície para resistir ao cisalhamento na interface, sendo adotado barras de  $\varnothing 8\text{mm}$  dispostas verticalmente distribuídas em uma malha 50 x 50 cm.

### 3.2.4 Verificação das perdas de protensão

Após a definição das configurações iniciais, foi necessário primeiramente determinar a força de protensão aplicada nas armaduras das vigotas no momento de

realização dos ensaios reais, ou seja, tornar conhecida a força de protensão aplicada na laje considerando as perdas de protensão até o momento determinado.

Por simplificação do processo, a força de protensão considerada para as análises das duas lajes foi do período médio entre o momento de realização dos dois ensaios de deformação, que foi de 30 dias após a produção das vigota e para determinação da força de protensão no momento determinado, foram consideradas as perdas de caráter inicial, imediato e progressivas.

#### 3.2.4.1 Força inicialmente aplicada

A força inicial, aplicada através de um pistão hidráulico em cada fio que compõe a armadura das vigotas é de 15 kN, o que, considerando o diâmetro de 4,0 milímetros dos fio gera uma tensão na armadura de 119,37 kN/cm<sup>2</sup>.

Essa força é aplicada em fios dispostos em uma pista de 150 metros de comprimento, e com isso, a variação (aumento) de comprimento de cada fio, que pode ser calculada através da lei de Hooke, é de 87,34 centímetros e portando, com uma deformação específica de 0,58%.

$$\sigma = E * \varepsilon \tag{6}$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão

$E$  é o módulo de elasticidade do material

$\varepsilon$  é a deformação específica

#### 3.2.4.2 Perda por acomodação das ancoragens

A perda de protensão por acomodação das ancoragens é uma perda inicial e acontece imediatamente após a liberação do fio do pistão hidráulico quando a armadura tensionada tende a voltar ao tamanho original e nesse movimento, sua ancoragem, formada por uma cunha e um porta cunha, movimenta-se até impedir o restante do deslocamento.

O deslocamento de retorno do fio é de cerca de 6 mm, e a perda de protensão pode ser calculada a partir da lei de Hooke.

No caso das condições do estudo a perda de protensão por acomodação das ancoragens foi determinada em 0,69%;

#### 3.2.4.3 Perda por relaxação inicial da armadura

A relaxação da armadura é um fenômeno característico do aço utilizado, no qual sem alteração na deformação, a tensão aplicada é reduzida em função do tempo de aplicação da força. Essa perda de protensão é calculada a partir do item 9.6.3.4.5 da ABNT NBR 6118:2014.

No estudo em questão, essa perda foi determinada em 1,09%, considerando o instante de aplicação da tensão inicial até a liberação das ancoragens.

#### 3.2.4.4 Perda por retração inicial do concreto

A retração é um fenômeno de longa duração no qual o volume do concreto reduz com a eliminação de água para o ambiente. A partir do momento que o concreto adere as armaduras tensionadas e passa a reduzir de tamanho, conseqüentemente o pré-alongamento das armaduras reduz, provocando perda de protensão. Essa perda foi determinada de acordo com o processo indicado pela norma ABNT NBR 6118:2014, no anexo A como sendo de 0,42%.

#### 3.2.4.5 Perda por encurtamento imediato do concreto

Quando é realizada a liberação das ancoragens, a tensão antes resistida pelos blocos de ancoragens passa a ser transmitida para o concreto, que através de comportamento elástico, encurta com variação linear (Estádio I), sendo válida a lei de Hooke (6) a partir da força aplicada na seção, gerando redução no alongamento das armaduras. Esse encurtamento gera uma redução de protensão de 5,30%.

#### 3.2.4.6 Perda por relaxação posterior da armadura

Da mesma forma eu a perda por relaxação inicial da armadura, ocorre a relaxação posterior. Nesse caso o período considerado é até a realização dos ensaios reais, de em média 30 dias, e com isso obteve-se uma perda de 1,36%.

#### 3.2.4.7 Perda por retração posterior do concreto

Acontece da mesma forma que a perda por retração inicial e também sendo considerada até os 30 dias de idade do concreto essa perda foi determinada em 3,15%.

#### 3.2.4.8 Perda por fluência do concreto

A fluência é outro fenômeno de longa duração que ocorre com o concreto, mas nesse caso é em função das cargas aplicadas que geram, em função do tempo, redução na capacidade de resistência à tensão.

Nesse estudo a fluência foi determinada de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 6118:2014, no anexo A, resultando em 4,71% até o momento de execução dos ensaios.

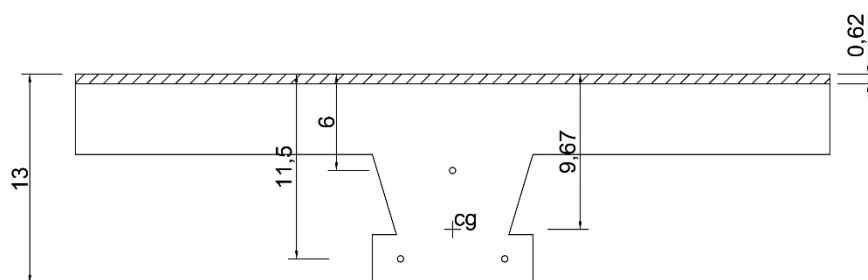
#### 3.2.4.9 Perda de protensão total

O somatório das perdas determinadas totaliza 15,67% e dessa forma a força aplicada inicialmente nas vigotas que era de 15 kN passa a 12,65 kN no período médio de realização dos ensaios.

### **3.2.4 Verificação do estado limite último**

Para a verificação da segurança no estado limite último, foi primeiramente verificada a área de aço necessária para a nervura central (4) da primeira laje (caso crítico). Para tanto foi necessário determinar a posição da linha neutra, a posição do centro de massa das armaduras, o braço de alavanca entre a seção comprimida e o centro de massa das armaduras e a tensão atuantes nas armaduras no momento do ensaio.

Figura 41 – Verificação do estado limite último da primeira laje



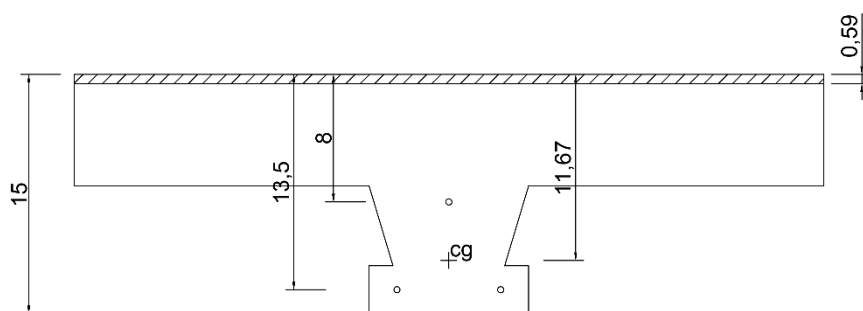
Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, foi verificada a necessidade de  $0,29 \text{ cm}^2$  de aço, como a armadura da vigotas é composta por 3 fios com diâmetro de 4,0 milímetros, o que totaliza uma área de aço de  $0,38 \text{ cm}^2$ , a laje está segura ao colapso.

Em função da nervura central apresentar-se como a nervura crítica, uma vez que receberá mais carga, e que todas as nervuras são armadas com a mesma seção de aço, não se fez necessária a verificação das demais nervuras ao estado limite último.

Para a segunda laje foi realizada a mesma verificação da nervura central, acrescentando 2 centímetros de capa e recalculando a laje com as mesmas premissas da primeira laje.

Figura 42 – Verificação do estado limite último da segunda laje



Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda laje, foi determinada a necessidade de  $0,27 \text{ cm}^2$  de aço, ou seja, o aumento da altura útil da laje reduziu a necessidade de armadura e então, a segunda laje permanece com um coeficiente de segurança maior que a primeira laje.

Do mesmo modo da primeira laje, não foi necessária a verificação das demais nervuras em função da condição crítica ser a nervura central.

### 3.2.5 Verificação das tensões na seção

Conforme ABNT NBR 6118:2014 item 17.3.4 as verificações das tensões na seção transversal podem ser realizadas, para verificações de estados-limites de descompressão e de formação de fissuras, considerando o concreto no estágio I, ou seja, com comportamento elástico linear do elemento.

Dessa forma, levando em consideração a inércia da seção, a posição do centro de gravidade, a força de protensão gerando força normal e momento fletor, e o momento externo, pode-se verificar as tensões nas face extremas da seção.

Na primeira laje, a nervura principal, devido ao carregamento do peso próprio e de 30% da carga linear, as tensões na seção estão apresentadas a seguir.

$$\sigma_{fc} = -0,27 \text{ kN/cm}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{ft} = 0,21 \text{ kN/cm}^2 \quad (8)$$

Onde:

$\sigma_{fc}$  é tensão na face mais comprimida (nesse caso, a superior);

$\sigma_{ft}$  é tensão na face mais tracionada (nesse caso, a inferior);

Na segunda laje, a nervura principal, devido ao carregamento do peso próprio e de 30% da carga linear, as tensões na seção estão apresentadas abaixo.

$$\sigma_{fc} = -0,21 \text{ kN/cm}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{ft} = 0,15 \text{ kN/cm}^2 \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_{fc}$  é tensão na face mais comprimida (nesse caso, a superior);

$\sigma_{ft}$  é tensão na face mais tracionada (nesse caso, a inferior);

Diante do calculado, percebe-se que nas faces inferiores (tracionadas) de ambas as lajes, apresentam tensões de tração de 0,21 kN/cm<sup>2</sup> e 0,15 kN/cm<sup>2</sup>. Essas tensões não ultrapassam o previsto de resistência à tração do concreto, que é de 0,26 kN/cm<sup>2</sup>, calculado a partir da norma ABNT NBR 6118:2014, item 8.2.5 e da previsão de um concreto com fck de 25 MPa na realização dos ensaios.

Dessa forma, as seções estariam trabalhando no estágio I, já que não apresentariam fissuras, ou seja, toda a inércia da seção estaria contribuindo na deformação da laje.

### 3.2.6 Verificação das deformações

Para determinação das deformações, inicialmente foi realizado todo o processo de cálculo para a nervura central da primeira laje, e cada nervura que compõe a laje foi admitida como independente recebendo o peso próprio da laje correspondente e a sua respectiva porcentagem da alvenaria, definida anteriormente.

A primeira etapa é determinar a deformação de cada nervura devido ao seu peso próprio, imediatamente após a retirada do escoramento e antes da aplicação da carga da alvenaria sobre a nervura central. Para tanto é necessário calcular a carga devido ao peso próprio da laje em uma nervura, conforme indicado abaixo.

$$q_t = q_{pp} * I = 2,02 * 0,47 = 0,95 \text{ kN/m} \quad (11)$$

Onde:

$q_t$  é carga total aplicada sobre a nervura em questão;

$q_{pp}$  é o peso próprio da laje, em kN/m<sup>2</sup>;

$I$  é o intereixo da laje, em m.

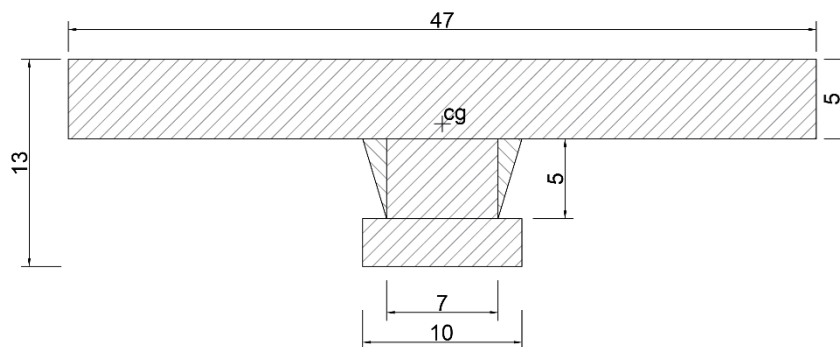
Embora na seção transversal da nervura existam armaduras protendidas e que estas estejam fora do centro de gravidade da seção, o que na teoria origina um momento fletor no sentido contrário ao momento fletor gerado pelas cargas solicitantes, e que por isso, conforme a norma ABNTN NBR 6118:2014, no item 17.3.2.1.3, a protensão deveria ser levada em considerando, no cálculo de flechas, como geradora de uma força externa equivalente contrária as cargas solicitantes, no



caso de lajes pré-fabricadas isso não ocorre como consequência da concretagem da seção de concreto resistente de concreto ocorrer em duas etapas e somente a seção da vigota ser submetida ao momento fletor negativo gerado pela protensão, ou seja, após a concretagem da capa, essa parcela da seção está com o concreto neutro, sem tensões de compressão e nem de tração. Logo, essa parcela de contribuição na redução de flechas é desprezada.

O passo seguinte, foi a determinação do momento de inércia da seção homogeneizada da seção resistente da nervura e para tanto a seção de concreto foi aproximada a partir de três retângulos e dois triângulos, indicados na Figura 43. Obtendo-se uma área de concreto total de 307,50 cm<sup>2</sup> e uma inércia, calculada utilizando o Teorema de Steiner, de 3.293,02 cm<sup>4</sup>, e posição do centro de gravidade situada a 4,05 cm do topo.

Figura 43 – Seção de concreto da nervura



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma maior precisão do resultado da deformação, a seção pode ser homogeneizada, ou seja, a seção de aço das armaduras pode ser incluída na seção de concreto, calculando-se uma seção de aço equivalente em concreto, partindo-se da relação do módulo de elasticidade do aço com o do concreto.

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cs}} = \frac{20.500}{2.898} = 7,07 \quad (12)$$

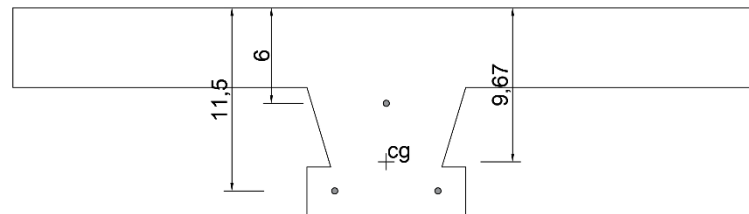
Onde:

$\alpha_p$  é a razão entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto;

$E_p$  é módulo de elasticidade do aço de protensão, em kN/cm<sup>2</sup>, obtido do catálogo do fornecedor;

$E_{cs}$  é módulo de elasticidade secante do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>, calculado conforme norma ABNT NBR 6118:2014 no item 8.2.8.

Figura 44 – Seção de aço da nervura



Fonte: Elaborado pelo autor

As armadura da seção, apresentadas na Figura 44, possuem uma área total de 0,38 cm<sup>2</sup>, inércia total de 2,53 cm<sup>4</sup> e posição do centro de gravidade a 9,67 cm do topo da seção.

Aplicando a razão modular e calculando a seção homogeneizada, obtém-se uma área total de 309,79 cm<sup>2</sup>, inércia total de 3.380,14 cm<sup>4</sup> e centro de gravidade posicionado a 4,09 cm do topo da seção. A inércia calculada refere-se a inércia integral da seção, no estágio I, ou seja, com o concreto sem fissuras.

Com isso, foi possível calcular a flecha devido ao peso próprio das nervuras da primeira laje, conforme apresentado a seguir:

$$f = \frac{5 * q * L^4}{384 * E_{cs} * I_h} = \frac{5 * 0,0095 * 400^4}{384 * 2.898 * 3.380} = 0,323 \text{ cm} \quad (13)$$

Onde:

$f$  é a flecha resultante;

$q$  é a carga, em kN/cm;

$L$  é o vão da laje, em cm;

$E_{cs}$  é módulo de elasticidade secante do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$I_h$  é inércia homogeneizada da seção, em cm<sup>4</sup>;

Então, as nervuras apresentarão, diante das condições indicadas uma deformação de 0,323 centímetros, ou 3,23 milímetros devido ao peso próprio.

Elaborando o mesmo cálculo, para a segunda geometria de laje, com espessura de capa de concreto complementar de 7 cm, ou seja, com 2 cm a mais em relação a primeira e com altura total de 15 cm, a flecha será de 0,258 centímetros, ou 2,58 milímetros.

Na sequência, considerando a carga linear estimada a ser resistida por cada nervura, para a primeira laje, e com objetivo de atingir uma deformação dentro do limite de deslocamento dos aparelhos de leitura (10 milímetros), define-se a carga atuante na nervura conforme apresentado a seguir.

$$q_t = q_{pp} * I + q_{alv} * \%_{alv} = 2,02 * 0,47 + 3,04 * \frac{24}{100} = 1,68 \text{ kN/m} \quad (14)$$

Onde:

$q_t$  é carga total aplicada sobre a nervura em questão;

$q_{pp}$  é o peso próprio da laje, em kN/m<sup>2</sup>;

$I$  é o intereixo da laje, em m;

$q_{alv}$  é a carga linear aplicada, em kN/m;

$\%_{alv}$  é o percentual da carga linear aplicado sobre a nervura em questão.

Também se utiliza o momento de inércia da seção homogeneizada da nervura da primeira laje para cálculo da flecha total.

$$f = \frac{5 * q * L^4}{384 * E_{cs} * I_h} = \frac{5 * (0,0168) * 400^4}{384 * 2.898 * 3.380} = 0,57 \text{ cm} \quad (15)$$

Onde:

$f$  é a flecha resultante;

$q$  é a carga, em kN/cm;

$L$  é o vão da laje, em m;

$E_{cs}$  é módulo de elasticidade secante do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$I_h$  é inércia homogeneizada da seção, em cm<sup>4</sup>;

Então, a nervura central, da primeira laje tem uma deformação calculada de 0,57 centímetros, ou 5,70 milímetros.

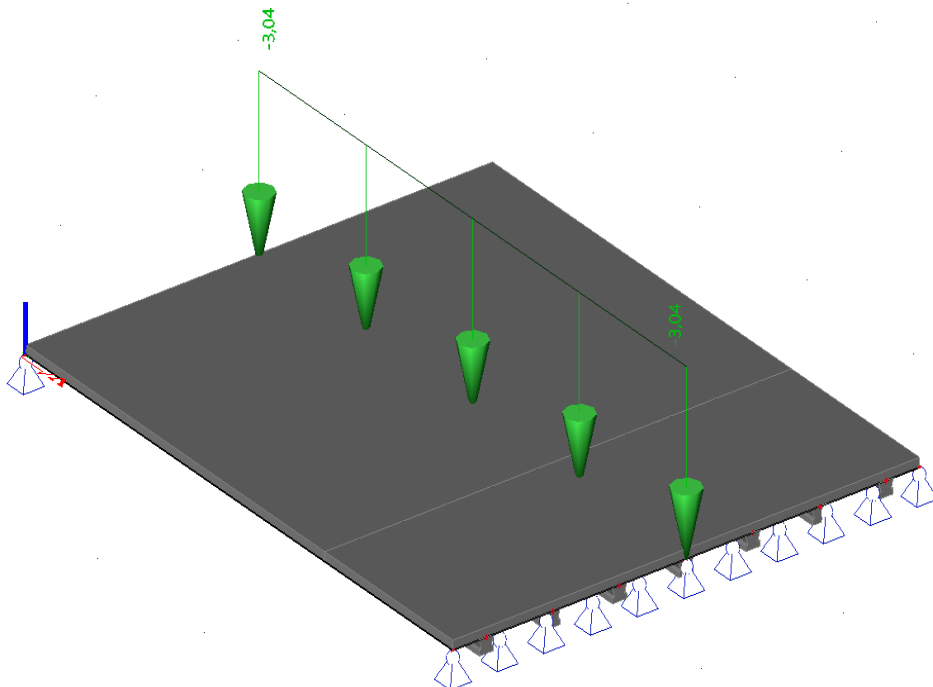
Conforme abordado anteriormente os valores utilizados para exemplificação dos cálculos na apresentação do método são baseados em estimativas de característica da laje e serão revisados a partir dos atributos apresentados pelas lajes executadas e ensaiadas para garantir o balizamento com as diferentes formas de determinação das deformações utilizadas.

### 3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Essa etapa tratou da elaboração dos modelos computacionais das lajes definidas através do método dos elementos finitos e foi desenvolvida no *software* SCIA ENGINEER e os dados dos materiais e as seções transversais inseridos foram os mesmos utilizados nos cálculos manuais do item anterior.

Na Figura 45, é apresentado o modelo da primeira laje, com as nervuras apoiadas sobre apoio linear indeslocável e está indicada a carga da alvenaria sobre a nervura central.

Figura 45 – Lajes modeladas no SCIA ENGINEER



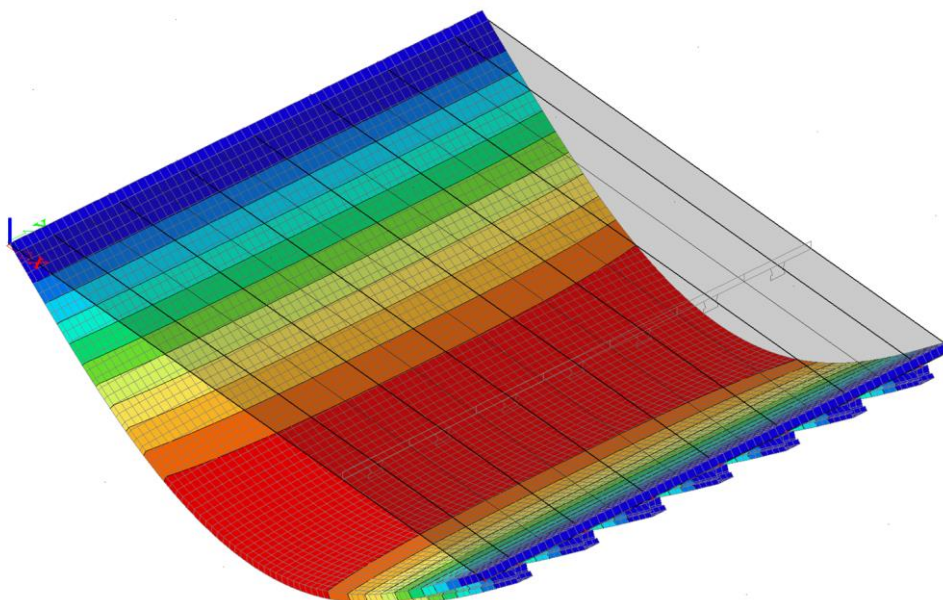
Fonte: Adaptado de SCIA ENGINEER

### 3.3.1 Verificação das deformações

Com isso, foram verificadas as deformações oriundas do peso próprio e referentes à carga da alvenaria, porém, essa última diferentemente dos cálculos manuais do item anterior, não seguiu uma predeterminação de distribuição, mas sim utilizou as próprias premissas do método dos elementos finitos empregado.

Como pode ser verificado na Figura 46, a deformação proveniente do peso próprio é praticamente a mesma em todas as nervuras que compõe a laje.

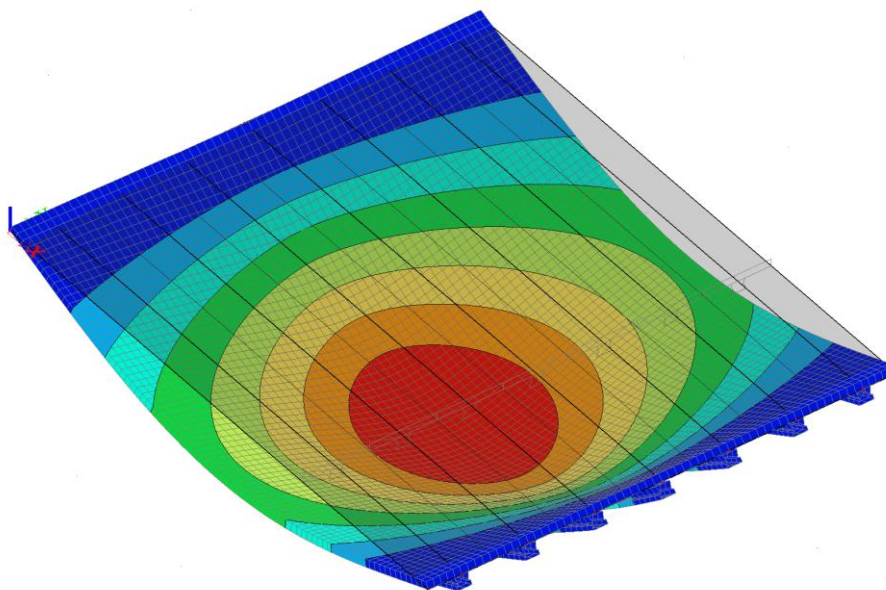
Figura 46 – Deformações apresentadas pelo SCIA devido ao peso próprio



Fonte: Adaptado de SCIA ENGINEER

Já a deformação devido a carga da alvenaria é verificada que ocorre de maneira mais acentuada no centro e diminui gradualmente até as extremidades, conforme demonstrado na Figura 47. Esse comportamento segue aproximadamente o esperado se comparado as indicações das bibliografias técnicas utilizadas nos item anterior para o cálculo manual das nervuras.

Figura 47 – Deformações apresentadas pelo SCIA devido a carga da alvenaria



Fonte: Adaptado de SCIA ENGINEER

Da mesma maneira que os cálculos manuais os valores utilizados para exemplificação das simulações computacionais são baseados em estimativas de característica da laje e serão revisados a partir dos atributos apresentados pelas lajes executadas e ensaiadas para garantir o balizamento com as diferentes formas de determinação das deformações utilizados.

### 3.4 EXECUÇÃO DAS LAJES

#### 3.4.1 Realização da escolha do local

Para a execução das lajes, foi definida a utilização de local plano, sobre piso industrial nivelado, de forma a facilitar o nivelamento da estrutura de apoio da laje e a instalação das caixarias, escoramentos e equipamentos necessários, e estando próximo e acessível a central dosadora de concreto.

#### 3.4.2 Realização da montagem dos apoios

As lajes serão apoiadas, somente nas extremidades das nervuras sobre um cavalete feito de peças pré-fabricadas (quatro blocos de concreto e duas vigas), conforme apresentado na Fotografia 1. Foi observada a disponibilidade de altura útil

livre sob a laje, que permita o acesso para a montagem do escoramento e para instalação dos equipamentos para medição das deformações.

Fotografia 1 – Cavaletes de apoio das lajes



Fonte: Registrado pelo autor

### 3.4.3 Realização da montagem do cimbramento e da laje

Segundo as recomendações do fabricante, para a lajes com 13 centímetros de espessura final, é necessária a execução de uma linha de escoras a cada 2,80 metros de vão livre e portanto, com a laje utilizada, com vigotas de quatro metros, seria necessário apenas a utilização de uma linha de escoras central, ficando de cada lado um vão de aproximadamente 1,92 metro, porém, com a necessidade de montagem dos equipamentos de medição no centro da laje, optou-se pela execução de duas linhas de escora, dividindo o vão das vigotas em 3 parcelas com aproximadamente 1,28 metro de distância entre elas e as vigas de apoio. As linhas de escora foram executadas com o topo correspondendo ao mesmo nível das vigas.

Na sequência foram executadas as fôrmas laterais, determinando a espessura de concretagem para a capa de concreto determinada. E foram posicionadas as vigotas e as tabelas cerâmicas observando a ortogonalidade com as vigas de apoio.

Na Fotografia 2, estão apresentadas as três etapas citadas já concluídas, restando apenas a montagem das armaduras e a concretagem.

Fotografia 2 – Escoramento, fôrmas e vigotas e tabelas cerâmicas montadas



Fonte: Registrado pelo autor

#### **3.4.4 Realização da montagem das armaduras**

Sobre as vigotas e tabelas cerâmicas foi posicionada a armadura de distribuição, composta por barras de aço CA 60 de diâmetro 4,0 milímetros espaçadas a cada 10 centímetros em ambas as direções. Para garantir o posicionamento adequado da malha foram utilizados espaçadores plástico que garantem o cobrimento de 20 milímetros. Além disso, os conectores de cisalhamento, executados em forma de grampo foram amarrados na malha de maneira distribuída sobre a superfície,



exceto no alinhamento central onde viria a ser levantada a alvenaria, em função de não prejudicar o posicionamento dos blocos.

Fotografia 3 – Armadura de distribuição e conectores de cisalhamento posicionados na capa da laje



Fonte: Registrado pelo autor

### 3.4.5 Realização da concretagem

Antes da realização da concretagem toda a superfície das vigotas e tabelas cerâmicas e as fôrmas laterais foram molhadas até o ponto de saturação para impedir a absorção da água do concreto. E, em seguida, foi realizada a concretagem da primeira camada da capa de concreto. Nessa etapa não foi necessário realizar o adensamento com magote vibrador em função da utilização de concreto autoadensável e o nivelamento do concreto foi realizado através de reguamento.

Fotografia 4 – Concretagem da primeira camada da capa de concreto



Fonte: Registrado pelo autor

Realizada esta concretagem, ficaram aparentes sobre a superfície do concreto os conectores de cisalhamento para vinculação com a posterior segunda camada de concreto referente segunda laje, como pode ser observado na Fotografia 5 a seguir.

#### **3.4.6 Realização da moldagem de corpos de prova e cura**

Durante a concretagem foram moldados corpos de prova para os devidos controle das propriedades mecânicas do concreto utilizado. Esse processo foi realizado conforme descrito no item 3.1.4.

Na laje foi realizada cura úmida, iniciada após a pega do concreto e que foi marcada por regas frequentes até o ponto de saturação pelo período de 3 dias. Além disso a laje foi cobertura por lona polimérica para evitar a perda de água para o ambiente.

Fotografia 5 – Conclusão da concretagem da primeira camada da capa de concreto



Fonte: Registrado pelo autor

### 3.4.7 Realização da desforma e retirada do escoramento

Após o período definido de cura, na data de realização do primeiro ensaio, as formas laterais foram removidas, na sequência foi montado um apoio central para instalação dos relógios comparadores estes foram posicionados. Em seguida foram removidas as duas linhas de escoras e registrada a deformação inicial, devido ao peso próprio da laje.

Fotografia 6 – Posicionamento dos relógios comparadores



Fonte: Registrado pelo autor

E na sequência iniciou-se o empilhamento dos blocos cerâmicos da alvenaria sobre a nervura central, conforme apresentado na Fotografia 7 a seguir. Como consequência da escolha da utilização de blocos cerâmicos empilhados formando a carga final de uma alvenaria, foi possível fazer análises parciais das deformações, e assim, após o posicionamento dos blocos referente a cada uma das fiadas, foram anotadas as deformações individuais medidas em cada uma das vigotas.

Fotografia 7 – Alvenaria de blocos concluída



Fonte: Registrado pelo autor

### 3.4.8 Realização da execução da segunda laje

Com a conclusão da realização do ensaio da primeira laje, os blocos cerâmicos que formaram a carga da alvenaria foram recolhidos, os relógios comparadores foram desinstalados e o apoio central removido, as linhas de escoras foram colocadas de volta na posição inicial, as formas laterais foram remontadas, agora observando a espessura da concretagem seguinte de 2 centímetros.

Então foi realizada a nova concretagem, observando o mesmo procedimento da primeira camada, tanto no que se refere diretamente ao processo de concretagem quanto ao controle tecnológico e cura úmida do concreto.

Na data de realização do segundo ensaio de deformação o procedimento de retirada do escoramento, instalação dos relógios comparadores, aplicação da carga da alvenaria e leitura da deformações seguiu o mesmo processo da primeira laje.

### 3.4.9 Realização cronológica das etapas

A seguir são apresentadas as datas de ocorrências de todos os eventos transcorridos durante as etapas de execução das lajes.

Quadro 7 – Datas dos eventos de execução e controle das lajes

<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Descrição</b>
05/04/23	08:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moldagem das vigotas</li> </ul>
25/04/23	08:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concretagem da primeira camada da capa</li> </ul>
26/04/23	17:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's da primeira capa</li> </ul>
28/04/23	17:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's da primeira capa</li> </ul>
01/05/23	09:30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conferência das características geométricas efetivas da primeira laje</li> <li>• Ensaio de deformação da primeira laje</li> </ul>
02/05/23	09:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's das vigotas</li> <li>• Ensaio de tração na flexão de 2 CP's das vigotas</li> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's e de módulo de elasticidade secante de 3 CP's da primeira capa</li> </ul>
02/05/23	14:30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concretagem da segunda camada da capa</li> </ul>
03/05/23	17:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's da segunda capa</li> </ul>
05/05/23	17:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's da segunda capa</li> </ul>
09/05/23	9:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's das vigotas</li> <li>• Ensaio de tração na flexão de 2 CP's das vigotas</li> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's e de módulo de elasticidade secante de 3 CP's da primeira capa</li> <li>• Ensaio de compressão de 2 CP's e de módulo de elasticidade secante de 3 CP's da segunda capa</li> </ul>
09/05/23	15:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conferência das características geométricas efetivas da segunda laje</li> <li>• Ensaio de deformação da segunda laje</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 RESULTADOS

Após a conclusão das atividades apresentadas na metodologia, tanto da conferência das características geométricas efetivas das lajes, quanto a verificação das propriedades mecânicas, através dos ensaios de controle tecnológico das três diferentes etapas de concreto envolvidas no processo, são apresentados os resultados obtidos.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Como consequência de a montagem de fôrmas laterais para contenção do concreto durante a concretagem ser predominantemente manual, é frequente a ocorrência de pequenas variações nas seções geométricas dos elementos de concreto armado. Nesse contexto, após a cura e desforma tanto da primeira, quanto da segunda laje, foram realizadas medições simples no perímetro delas, buscando verificar a espessura de capa que de fato foi executada, e dessa forma foi observado o seguinte:

- a) A seção geométrica da primeira laje, que teve a sua capa definida como de 5,0 centímetros de espessura, foi executada na média com 5,5 centímetros;
- b) A seção geométrica da segunda laje, que teve a sua capa definida como de 7,0 centímetros de espessura, mas que como consequência do aumento de capa da primeira laje, foi executada na média com 7,5 centímetros;

### 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Abaixo são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os CP's moldados juntamente com a fabricação das vigotas e concretagem da primeira e segunda camada da capa de concreto das lajes para determinação das propriedades mecânicas dos concretos utilizados.

#### 4.2.1 Ensaios do concreto das vigotas

Conforme já mencionado anteriormente, foram moldados CP's com o concreto das vigotas para ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão.

#### 4.2.1.1 Ensaio de resistência à compressão

Abaixo são apresentadas as datas, as idades do concreto e os resultados dos ensaios de resistência a compressão.

Tabela 1 – Resistência a compressão do concreto das vigotas

Data	Horário	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		
			Amostra 1	Amostra 2	Média
02/05/23	09:00	27,04	25,90	29,10	27,50
09/05/23	09:00	34,04	25,90	34,90	30,40

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

Abaixo são apresentadas as datas, as idades do concreto e os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

Tabela 2 – Determinação da resistência à tração na flexão do concreto das vigotas

Data	Horário	Idade (dias)	Resistência à tração (MPa)		
			Amostra 1	Amostra 2	Média
02/05/23	09:00	27,04	3,56	3,46	3,51
09/05/23	09:00	34,04	3,50	3,35	3,43

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Ensaio do concreto da primeira camada da capa

Para a primeira camada de concreto da capa foram moldados CP's para ensaio de resistência à compressão e para determinação do módulo de elasticidade secante.



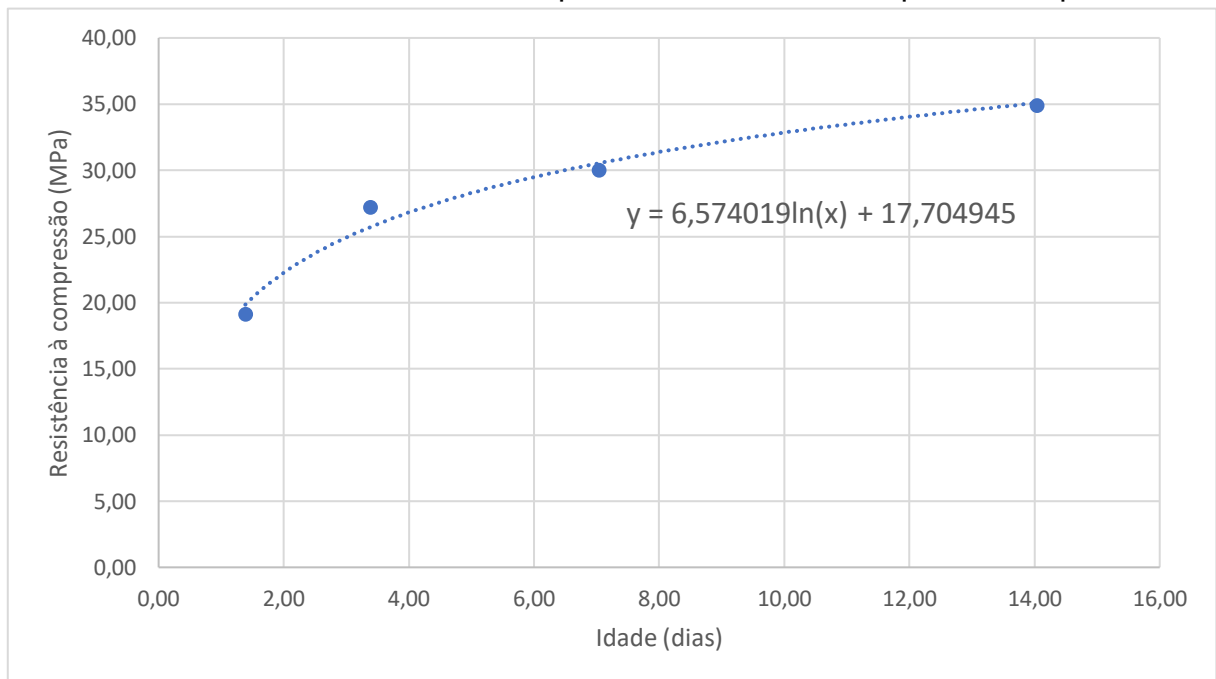
#### 4.2.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Tabela 3 – Resistência à compressão do concreto da primeira capa

Data	Horário	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)					Média
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
26/04/23	17:15	1,39	17,00	21,20	-	-	-	19,10
28/04/23	17:15	3,39	25,00	29,40	-	-	-	27,20
02/05/23	09:00	7,04	31,60	34,40	27,10	28,10	28,80	30,00
09/05/23	09:00	14,04	29,90	32,00	38,60	36,80	37,10	34,88

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 1 – Resistência à compressão do concreto da primeira capa



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante destacar que o ensaio de deformação da primeira laje foi executado com o concreto com 6 dias de idade e o ensaio de compressão foi realizado no 7º dia, então foi utilizada a equação de tendência apresentada no Gráfico 1 para calcular a resistência a compressão no momento de execução do ensaio.

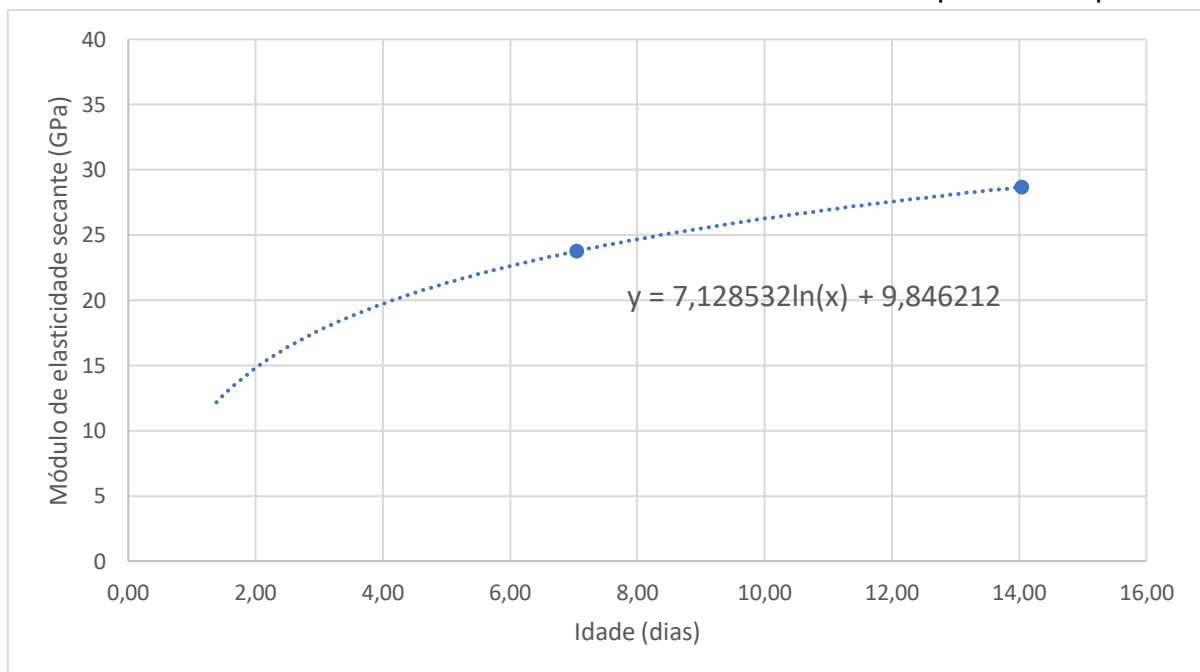
#### 4.2.2.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante

Tabela 4 – Determinação do módulo de elasticidade do concreto da primeira capa

Data	Horário	Idade (dias)	Módulo de elasticidade secante (GPa)			
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
02/05/23	09:00	7,04	23,61	23,39	24,28	23,76
09/05/23	09:00	14,04	29,97	28,28	27,79	28,68

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 – Módulo de elasticidade secante do concreto da primeira capa



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.3 Ensaio do concreto da segunda capa

Para a segunda camada de concreto da capa foram moldados CP's para ensaio de resistência à compressão e para determinação do módulo de elasticidade secante.

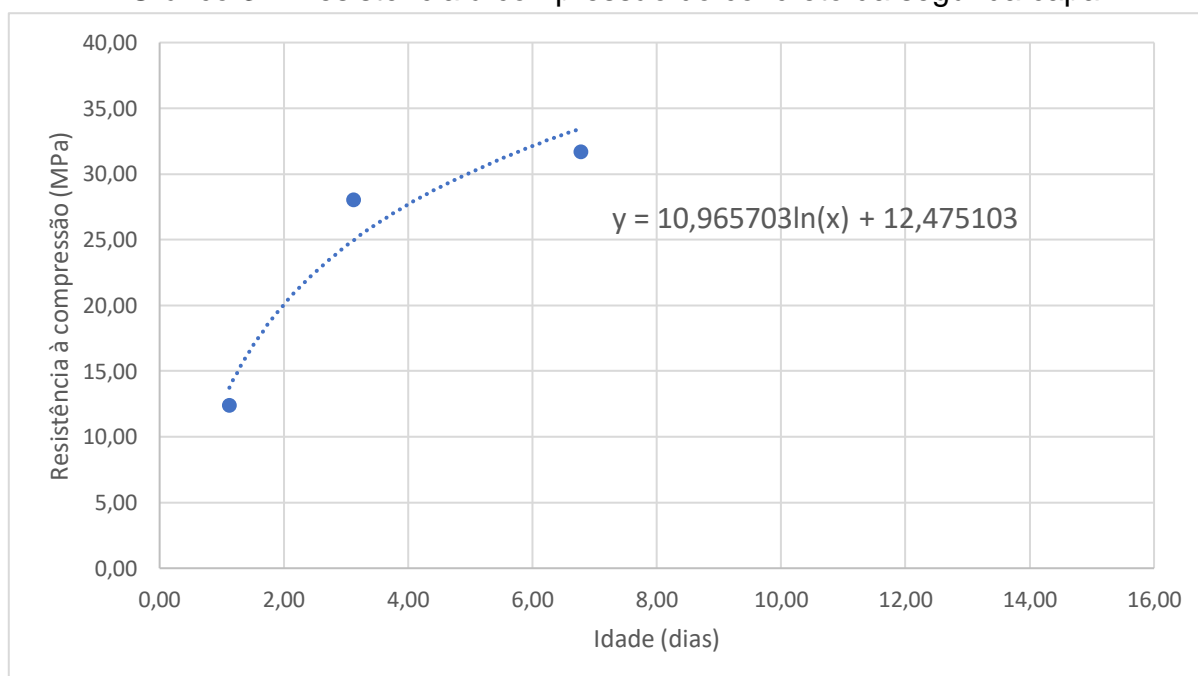
## 4.2.3.1 Ensaio de resistência à compressão

Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto da segunda capa

Data	Horário	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)					Média
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
03/05/23	17:15	1,12	11,50	13,30	-	-	-	12,40
05/05/23	17:15	3,12	27,50	28,60	-	-	-	28,05
09/05/23	09:00	6,78	32,50	30,10	33,50	29,80	32,60	31,70

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 – Resistência à compressão do concreto da segunda capa



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2.3.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante

Tabela 6 – Determinação do módulo de elasticidade do concreto da segunda capa

Data	Horário	Idade (dias)	Módulo de elasticidade secante (GPa)			Média
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
09/05/23	09:00	14,04	26,40	26,21	27,12	26,58

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.4 Resumo das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas inerentes as etapas de concreto utilizadas na execução das lajes cruciais para realização dos cálculos e simulações computacionais é apresentada a seguir:

- a) A resistência a compressão do concreto da primeira camada da capa foi de 29,53 MPa no momento de realização do primeiro ensaio de deformação;
- b) O módulo de elasticidade secante do concreto da primeira camada da capa foi de 22,67 GPa no momento de realização do primeiro ensaio de deformação;
- c) A resistência a compressão do concreto da segunda camada da capa foi de 33,29 MPa no momento de realização do segundo de deformação;
- d) O módulo de elasticidade secante do concreto da segunda camada da capa foi de 27,63 GPa;
- e) Na verificação das deformações da segunda laje através dos cálculos e simulações computacionais, o módulo de elasticidade utilizado para o concreto foi o médio entre o concreto da primeira e da segunda camada da capa;
- f) A resistência à tração do concreto das vigotas, já estabilizada no momento de realização dos ensaios, foi definida como a média entre os 4 corpos ensaiados, ou seja, foi considerado o valor de 3,47 MPa.

#### 4.3 RESULTADOS DOS CÁLCULOS

Nos cálculos manuais cálculos revisados após a realização dos ensaios, além da revisão da geometria e das propriedades mecânicas informadas anteriormente, passou-se a utilizar para cada nervura os percentuais de carga correspondentes ao percentual das flechas apresentadas na Tabela 17 e na Tabela 20, que representam o percentual que cada nervura representa em relação ao somatório de todas as nervuras para o mesmo caso de carga. Uma vez que com a ausência de fissuração da seção de concreto garante-se o comportamento elástico linear do elemento, ou seja, a deformação deve ser proporcional à carga absorvida pela nervura em questão e o somatório da deformação de todas as nervuras é igual a deformação que seria apresentada por uma única nervura isolada submetida a mesma carga.

Então, para o carregamento de 1,65 kN/m (metade do carregamento final do ensaio, foram obtidas as deformação apresentadas na sequência.

Na primeira laje na nervura 4 foi considerado o percentual de 20,47% da carga da alvenaria, para as nervuras 3 e 5 foi de 15,29%, para as nervuras 2 e 6 foi de 13,38% e para as nervuras 1 e 7 foi de 11,10%.

Tabela 7 – Deformações de cálculo revisadas da primeira laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69
Alvenaria	0,70	0,85	0,97	1,30	0,97	0,85	0,70
Total	4,39	4,53	4,65	4,98	4,65	4,53	4,39

Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda laje na nervura 4 foi considerado o percentual de 18,89% da carga da alvenaria, para as nervuras 3 e 5 foi de 15,74%, para as nervuras 2 e 6 foi de 13,73% e para as nervuras 1 e 7 foi de 11,08%.

Tabela 8 – Deformações de cálculo revisadas da segunda laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97
Alvenaria	0,39	0,48	0,55	0,66	0,55	0,48	0,39
Total	3,36	3,45	3,52	3,63	3,52	3,45	3,36

Fonte: Elaborado pelo autor

E, com a revisão dos cálculos, para o carregamento de 3,04 kN/m foram obtidas as deformação apresentadas na sequência.

Na primeira laje na nervura 4 foi considerado o percentual de 18,96% da carga da alvenaria, para as nervuras 3 e 5 foi de 15,68%, para as nervuras 2 e 6 foi de 13,51% e para as nervuras 1 e 7 foi de 11,32%.

Tabela 9 – Deformações de cálculo revisadas da primeira laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69
Alvenaria	1,32	1,58	1,83	2,21	1,83	1,58	1,32
Total	5,01	5,27	5,52	5,90	5,52	5,27	5,01

Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda laje na nervura 4 foi considerado o percentual de 17,71% da carga da alvenaria, para as nervuras 3 e 5 foi de 15,91%, para as nervuras 2 e 6 foi de 13,85% e para as nervuras 1 e 7 foi de 11,38%.

Tabela 10 – Deformações de cálculo revisadas da segunda laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97
Alvenaria	0,74	0,90	1,03	1,15	1,03	0,90	0,74
Total	3,71	3,87	4,00	4,12	4,00	3,87	3,71

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nos modelos computacionais, após a realização dos ensaios, e a partir da características geométricas e propriedades mecânicas observadas em medições e nos ensaios, foram obtidos os resultados indicados a seguir.

Tabela 11 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da primeira laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
Alvenaria	0,63	0,8	0,98	1,08	0,98	0,8	0,63
Total	3,56	3,73	3,91	4,01	3,91	3,73	3,56

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da segunda laje por nervura com a carga de 1,65 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
Alvenaria	0,39	0,47	0,55	0,6	0,55	0,47	0,39
Total	2,44	2,52	2,60	2,65	2,60	2,52	2,44

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da primeira laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
Alvenaria	1,17	1,48	1,81	1,99	1,81	1,48	1,17
Total	4,10	4,41	4,74	4,92	4,74	4,41	4,10

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Deformações apresentadas pelo SCIA com os novos dados da segunda laje por nervura com a carga de 3,04 kN/m

Descrição	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
P.P.	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
Alvenaria	0,72	0,86	1,02	1,11	1,02	0,86	0,72
Total	2,77	2,91	3,07	3,16	3,07	2,91	2,77

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de deformação da primeira laje e de deformação da segunda laje.

##### 4.5.1 Ensaio de deformação da primeira laje

Com a retirada das linhas de escora, a primeira laje apresentou uma flecha de 2,68 milímetros e com o acréscimo fracionado da carga da alvenaria as deformações observadas individualmente em cada nervura foram as apresentadas na Tabela 15.



Tabela 15 – Flechas medidas na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria

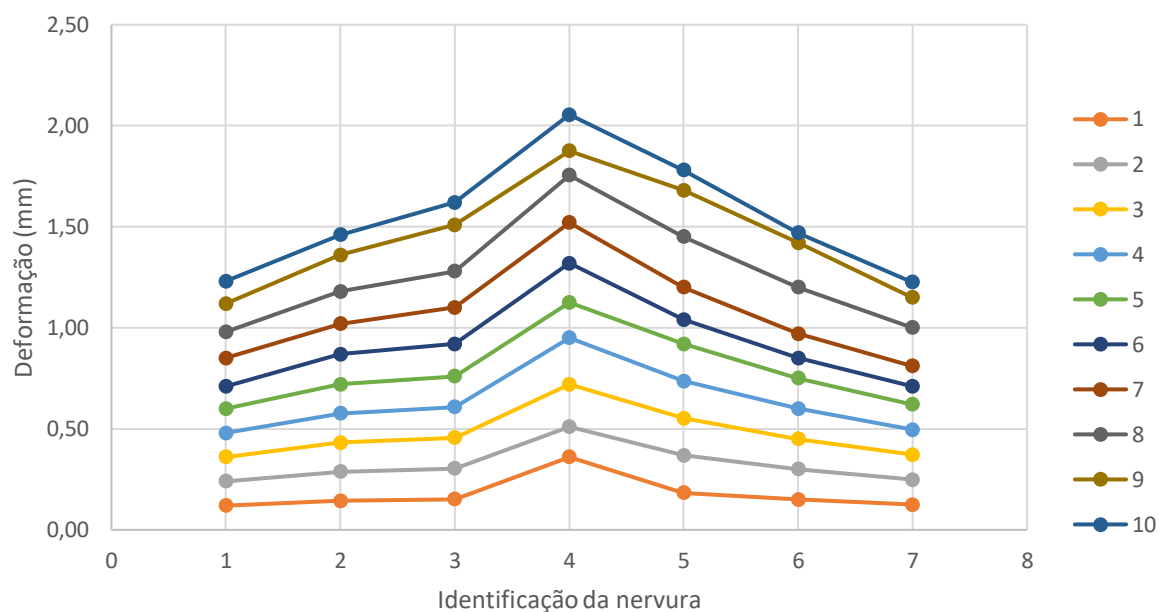
Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras (mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	0,12	0,14	0,15	0,36	0,18	0,15	0,12
2	0,63	0,24	0,29	0,30	0,51	0,37	0,30	0,25
3	1,01	0,36	0,43	0,46	0,72	0,55	0,45	0,37
4	1,27	0,48	0,58	0,61	0,95	0,74	0,60	0,50
5	1,65	0,60	0,72	0,76	1,13	0,92	0,75	0,62
6	1,90	0,71	0,87	0,92	1,32	1,04	0,85	0,71
7	2,28	0,85	1,02	1,10	1,52	1,20	0,97	0,81
8	2,53	0,98	1,18	1,28	1,76	1,45	1,20	1,00
9	2,91	1,12	1,36	1,51	1,88	1,68	1,42	1,15
10	3,04	1,23	1,46	1,62	2,06	1,78	1,47	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 15, a coluna da esquerda identificada como “Fiada” refere-se as linha de tijolos empilhadas sobre a nervura principal das lajes, sendo empilhadas 10 linhas de bloco no total, resultando nas cargas acumuladas apresentadas na segunda coluna da tabela. O restante das colunas refere-se às deformações individuais de cada uma das sete nervuras que compõe a laje para o caso de carga referente ao acúmulo das fiadas de bloco.

O Gráfico 4 foi elaborado baseado na Tabela 15 para comparação visual das deformações de acordo com a fiada de blocos e a carga acumulada correspondente identificada na legenda do gráfico.

Gráfico 4 – Flechas medidas na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor

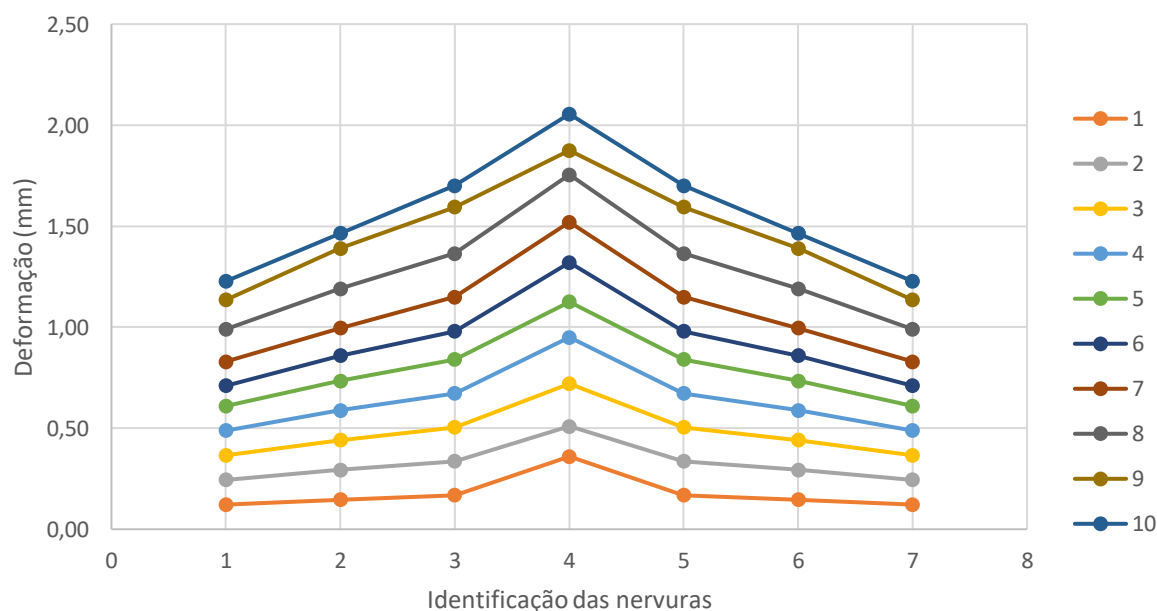
O primeiro passo após o registro das deformações individuais foi, nas nervuras secundárias, passar a considerar cada deformação com a média entre cada nervura com a sua imediatamente oposta, já que o fato delas não terem apresentado exatamente as mesmas deformações se deve ao fato de variações possíveis entre material e seção transversal, já que matematicamente, deveriam ser idênticas.

Tabela 16 – Flechas médias na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria

Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras (mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	0,12	0,15	0,17	0,36	0,17	0,15	0,12
2	0,63	0,24	0,29	0,34	0,51	0,34	0,29	0,24
3	1,01	0,37	0,44	0,50	0,72	0,50	0,44	0,37
4	1,27	0,49	0,59	0,67	0,95	0,67	0,59	0,49
5	1,65	0,61	0,74	0,84	1,13	0,84	0,74	0,61
6	1,90	0,71	0,86	0,98	1,32	0,98	0,86	0,71
7	2,28	0,83	1,00	1,15	1,52	1,15	1,00	0,83
8	2,53	0,99	1,19	1,37	1,76	1,37	1,19	0,99
9	2,91	1,14	1,39	1,60	1,88	1,60	1,39	1,14
10	3,04	1,23	1,47	1,70	2,06	1,70	1,47	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 – Flechas médias na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor

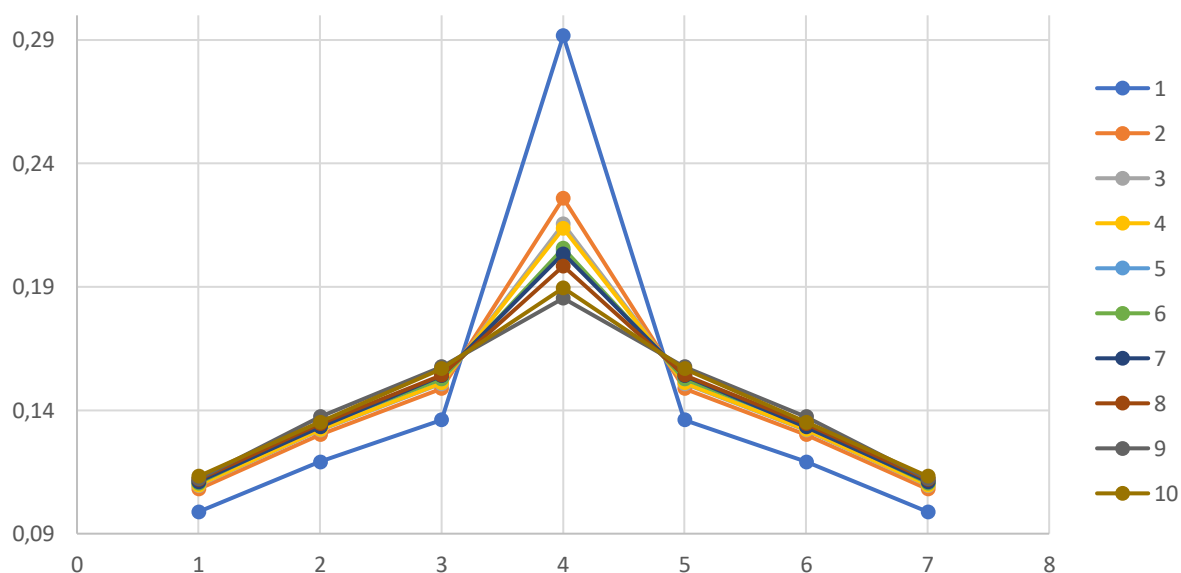
Na sequência, para cada faixa de carregamento, foi verificado qual é o percentual que cada uma das deformações representa do somatório das deformações das sete nervuras para o mesmo carregamento.

Tabela 17 – Flechas percentuais na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria

Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	9,89%	11,91%	13,61%	29,17%	13,61%	11,91%	9,89%
2	0,63	10,81%	13,02%	14,88%	22,59%	14,88%	13,02%	10,81%
3	1,01	10,95%	13,20%	15,08%	21,54%	15,08%	13,20%	10,95%
4	1,27	10,98%	13,23%	15,11%	21,37%	15,11%	13,23%	10,98%
5	1,65	11,10%	13,38%	15,29%	20,47%	15,29%	13,38%	11,10%
6	1,90	11,06%	13,40%	15,26%	20,56%	15,26%	13,40%	11,06%
7	2,28	11,11%	13,32%	15,39%	20,35%	15,39%	13,32%	11,11%
8	2,53	11,19%	13,45%	15,43%	19,84%	15,43%	13,45%	11,19%
9	2,91	11,22%	13,74%	15,77%	18,54%	15,77%	13,74%	11,22%
10	3,04	11,32%	13,51%	15,68%	18,96%	15,68%	13,51%	11,32%

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 – Flechas percentuais na primeira laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5.2 Ensaio de deformação da segunda laje

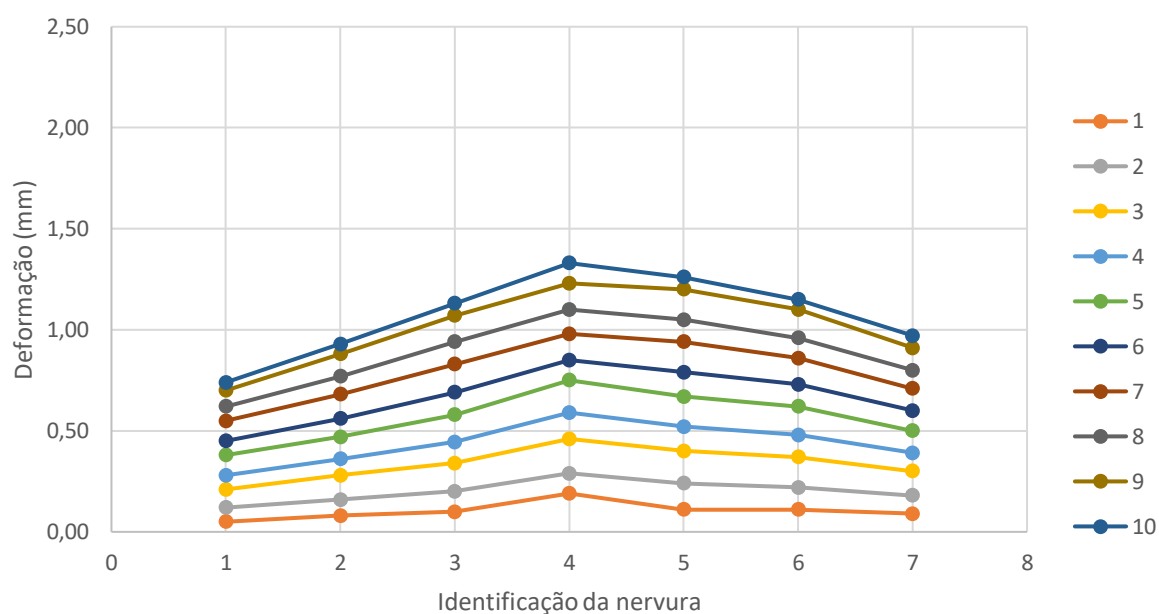
Com a retirada das linhas de escora, a segunda laje apresentou uma flecha de 2,25 milímetros e com o acréscimo fracionado da carga da alvenaria as deformações observadas individualmente em cada nervura foram as apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Flechas medidas na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria

Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras (mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	0,05	0,08	0,10	0,19	0,11	0,11	0,09
2	0,63	0,12	0,16	0,20	0,29	0,24	0,22	0,18
3	1,01	0,21	0,28	0,34	0,46	0,40	0,37	0,30
4	1,27	0,28	0,36	0,45	0,59	0,52	0,48	0,39
5	1,65	0,38	0,47	0,58	0,75	0,67	0,62	0,50
6	1,90	0,45	0,56	0,69	0,85	0,79	0,73	0,60
7	2,28	0,55	0,68	0,83	0,98	0,94	0,86	0,71
8	2,53	0,62	0,77	0,94	1,10	1,05	0,96	0,80
9	2,91	0,70	0,88	1,07	1,23	1,20	1,10	0,91
10	3,04	0,74	0,93	1,13	1,33	1,26	1,15	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 – Flechas medidas na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor

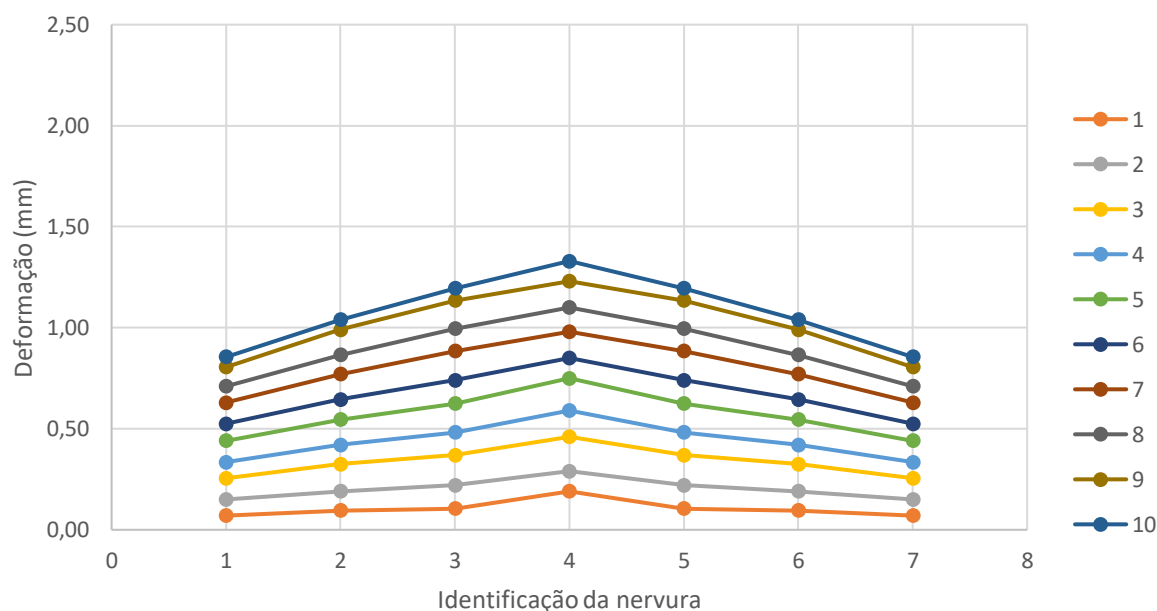
Após o registro das deformações individuais foi, nas nervuras secundárias, passar a considerar cada deformação com a média entre cada nervura com a sua imediatamente oposta, já que o fato delas não terem apresentado exatamente as mesmas deformações se deve ao fato de variações possíveis entre material e seção transversal, já que matematicamente, deveriam ser idênticas.

Tabela 19 – Flechas médias na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria

Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras (mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	0,07	0,10	0,11	0,19	0,11	0,10	0,07
2	0,63	0,15	0,19	0,22	0,29	0,22	0,19	0,15
3	1,01	0,26	0,33	0,37	0,46	0,37	0,33	0,26
4	1,27	0,34	0,42	0,48	0,59	0,48	0,42	0,34
5	1,65	0,44	0,55	0,63	0,75	0,63	0,55	0,44
6	1,90	0,53	0,65	0,74	0,85	0,74	0,65	0,53
7	2,28	0,63	0,77	0,89	0,98	0,89	0,77	0,63
8	2,53	0,71	0,87	1,00	1,10	1,00	0,87	0,71
9	2,91	0,81	0,99	1,14	1,23	1,14	0,99	0,81
10	3,04	0,86	1,04	1,20	1,33	1,20	1,04	0,86

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Flechas médias na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor

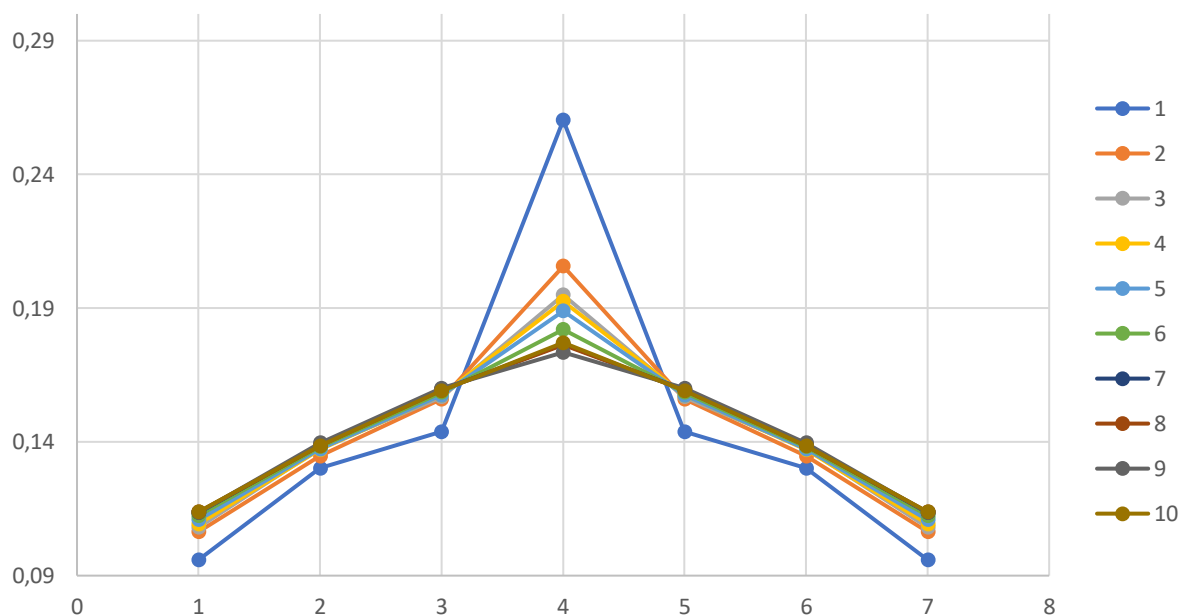
Na sequência, para cada faixa de carregamento, foi verificado qual é o percentual que cada uma das deformações representa do somatório das deformações das 7 nervuras para o mesmo carregamento.

Tabela 20 – Flechas percentuais na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria

Fiada	Carga (kN/m)	Deformação das nervuras						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0,33	9,59%	13,01%	14,38%	26,03%	14,38%	13,01%	9,59%
2	0,63	10,64%	13,48%	15,60%	20,57%	15,60%	13,48%	10,64%
3	1,01	10,81%	13,77%	15,68%	19,49%	15,68%	13,77%	10,81%
4	1,27	10,93%	13,70%	15,74%	19,25%	15,74%	13,70%	10,93%
5	1,65	11,08%	13,73%	15,74%	18,89%	15,74%	13,73%	11,08%
6	1,90	11,24%	13,81%	15,85%	18,20%	15,85%	13,81%	11,24%
7	2,28	11,35%	13,87%	15,95%	17,66%	15,95%	13,87%	11,35%
8	2,53	11,38%	13,86%	15,95%	17,63%	15,95%	13,86%	11,38%
9	2,91	11,35%	13,96%	16,01%	17,35%	16,01%	13,96%	11,35%
10	3,04	11,38%	13,85%	15,91%	17,71%	15,91%	13,85%	11,38%

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 9 – Flechas percentuais na segunda laje referentes somente a carga da alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor



## 4.6 OBSERVAÇÃO DOS RESULTADOS

Agora, de posse dos resultados das deformações obtidas pelos diferentes métodos estas podem ser comparadas com o objetivo de verificar que conclusões podem ser obtidas.

### 4.6.1 Verificação da validade dos cálculos e das simulações

A seguir são comparados os resultados de deformações devido ao peso próprio das duas lajes analisadas.

Tabela 21 – Comparação das deformações devido ao peso próprio da primeira laje

<b>Método</b>	<b>Valor (mm)</b>
Real	2,68
Cálculo	3,69
Software	2,93

Fonte: Elaborado pelo autor

A deformação calculada devido ao peso próprio da laje foi a mais distante do deformação real, sendo 1,01 milímetro superior a deformação medida, ou 37,7% superior, enquanto a deformação estimada pelo SCIA ENGINEER foi bem próxima da real, sendo apenas 0,25 milímetro superior, ou 9,3% superior.

Tabela 22 – Comparação das deformações devido ao peso próprio da segunda laje

<b>Método</b>	<b>Valor (mm)</b>
Real	2,25
Cálculo	2,97
Software	2,04

Fonte: Elaborado pelo autor

A deformação calculada devido ao peso próprio da laje foi a mais distante do deformação real, sendo 0,72 milímetro superior a deformação medida, ou 32,0% superior, enquanto a deformação estimada pelo SCIA ENGINEER foi bem próxima da real, sendo apenas 0,21 milímetro inferior, ou 9,3% inferior.

Nesse cenário, a utilização do software é o método mais recomendado para verificação das deformação devido ao peso próprio na elaboração de projetos, visto que apresentou os resultados mais próximos em relação às lajes executadas. Enquanto os cálculos, embora tenham tido resultados relativamente superiores aos reais, este método pode ser utilizado com ressalvas, dado que fornece resultados conservadores e a favor da segurança.

Como o objetivo principal do trabalho é na realização de análises acerca da distribuição da carga da alvenaria, esse será o foco adiante.

São comparados a seguir os resultados de deformação para a carga distribuída de 1,65 kN/m.

Tabela 23 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e de cálculo para carga de 1,65 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,61	0,74	0,84	1,13	0,84	0,74	0,61
Cálculo	0,70	0,85	0,97	1,30	0,97	0,85	0,70
Dif.	0,09	0,11	0,13	0,17	0,13	0,11	0,09
Dif. %	13,17%	13,17%	13,17%	13,17%	13,17%	13,17%	13,17%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 24 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 1,65 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,61	0,74	0,84	1,13	0,84	0,74	0,61
Software	0,63	0,8	0,98	1,08	0,98	0,8	0,63
Dif.	0,02	0,07	0,14	-0,04	0,14	0,07	0,02
Dif. %	3,17%	8,13%	14,29%	-4,17%	14,29%	8,13%	3,17%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da segunda laje entre real e de cálculo para carga de 1,65 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,44	0,55	0,63	0,75	0,63	0,55	0,44
Cálculo	0,39	0,48	0,55	0,66	0,55	0,48	0,39
Dif.	-0,05	-0,06	-0,07	-0,09	-0,07	-0,06	-0,05
Dif. %	-13,22%	-13,22%	-13,22%	-13,22%	-13,22%	-13,22%	-13,22%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 26 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 1,65 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,44	0,55	0,63	0,75	0,63	0,55	0,44
Software	0,39	0,47	0,55	0,6	0,55	0,47	0,39
Dif.	-0,05	-0,08	-0,08	-0,15	-0,08	-0,08	-0,05
Dif. %	-12,82%	-15,96%	-13,64%	-25,00%	-13,64%	-15,96%	-12,82%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 27 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e de cálculo para carga de 3,04 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	1,23	1,47	1,70	2,06	1,70	1,47	1,23
Cálculo	1,32	1,58	1,83	2,21	1,83	1,58	1,32
Dif.	0,10	0,11	0,13	0,16	0,13	0,11	0,10
Dif. %	7,22%	7,22%	7,22%	7,22%	7,22%	7,22%	7,22%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 28 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 3,04 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	1,23	1,47	1,70	2,06	1,70	1,47	1,23
Software	1,17	1,48	1,81	1,99	1,81	1,48	1,17
Dif.	-0,06	0,02	0,11	-0,07	0,11	0,02	-0,06
Dif. %	-4,91%	1,01%	6,08%	-3,27%	6,08%	1,01%	-4,91%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da segunda laje entre real e de cálculo para carga de 3,04 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,86	1,04	1,20	1,33	1,20	1,04	0,86
Cálculo	0,74	0,90	1,03	1,15	1,03	0,90	0,74
Dif.	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,16	-0,14	-0,12
Dif. %	-16,01%	-16,01%	-16,01%	-16,01%	-16,01%	-16,01%	-16,01%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 30 – Comparação das deformações devido a carga da alvenaria da primeira laje entre real e do software para carga de 3,04 kN/m

Método	Deformação da nervura (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Real	0,86	1,04	1,20	1,33	1,20	1,04	0,86
Software	0,72	0,86	1,02	1,11	1,02	0,86	0,72
Dif.	-0,14	-0,18	-0,18	-0,22	-0,18	-0,18	-0,14
Dif. %	-18,75%	-20,93%	-17,16%	-19,82%	-17,16%	-20,93%	-18,75%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com as comparações realizadas da Tabela 23 a Tabela 30, é possível observar o seguinte:

a) A variação média entre as deformações calculadas e reais foi de 12,4%, a mínima de 7,2% e a máxima de 16,0%;

b) A variação média entre as deformações do software e reais foi de 11,6%, a mínima de 1,0% e a máxima de 25,0%;

c) As maiores variações entre as deformações calculadas e do software e as reais foi na segunda laje;

Então, com uma tolerância média de 12,4% é possível validar tanto o processo de cálculo manual das flechas, quanto o modelo computacional.

#### **4.6.2 Verificação da influência da espessura da capa**

A influência da espessura da capa de concreto armado complementar na distribuição transversal de cargas lineares aplicadas longitudinalmente às nervuras em lajes pré-fabricadas de vigotas protendidas, que também pode ser interpretada como sendo o percentual de carga que é absorvido pela nervura principal e pelas secundárias, pode ser obtido através da comparação dos resultados dos ensaios de deformação das duas lajes, pegando-se os valores das flechas percentuais da primeira laje na Tabela 17 e subtraindo-os das flechas percentuais da segunda laje na Tabela 20. Dessa forma obtém-se a diferença percentual de carga que é absorvido pela nervura principal e pelas secundárias, conforme apresentado na Tabela 31, onde valores percentuais negativos indicam que a nervura em questão recebe menos carga na segunda laje, que na primeira, e valores positivos indicam que a nervura analisada recebe mais carga na segunda laje.

O esperado da comparação de duas lajes com espessuras de capa, e conseqüentemente, rigidezes diferentes, era de que na laje com maior espessura de capa, a nervura principal absorve-se menos carga que sua correspondente na laje com menos espessura de capa, e conseqüentemente as nervuras secundárias recebessem mais carga na laje com maior espessura de capa em relação às nervuras correspondentes da laje com menor capa, ou seja, gerando-se uma maior distribuição da carga aplicada.

Tabela 31 – Diferença de distribuição de carga entre a primeira e a segunda laje

Nervura						
1	2	3	4	5	6	7
-0,30%	1,10%	0,77%	-3,15%	0,77%	1,10%	-0,30%
-0,17%	0,45%	0,72%	-2,02%	0,72%	0,45%	-0,17%
-0,15%	0,58%	0,60%	-2,05%	0,60%	0,58%	-0,15%
-0,05%	0,48%	0,63%	-2,12%	0,63%	0,48%	-0,05%
-0,02%	0,35%	0,46%	-1,58%	0,46%	0,35%	-0,02%
0,18%	0,42%	0,58%	-2,36%	0,58%	0,42%	0,18%
0,24%	0,55%	0,55%	-2,69%	0,55%	0,55%	0,24%
0,19%	0,41%	0,51%	-2,21%	0,51%	0,41%	0,19%
0,13%	0,22%	0,24%	-1,19%	0,24%	0,22%	0,13%
0,06%	0,33%	0,23%	-1,25%	0,23%	0,33%	0,06%

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado, a maior diferença que pode ser observada é de apenas 3,15% da carga, ou seja, a nervura principal da segunda laje estaria recebendo essa porcentagem a menos de carga em relação a da primeira laje.

Logo, é possível concluir que a utilização de uma capa de concreto mais espessa é praticamente insignificante no que se refere a distribuição transversal de carga. Ou ainda, aumentar a espessura da capa de concreto com o objetivo de solicitar mais as nervuras secundárias frente a uma carga linear aplicada sobre a laje no sentido das nervuras é um desperdício.

#### 4.6.3 Verificação da influência do valor da carga aplicada

Ainda a partir da análise da Tabela 17 e da Tabela 20, desconsiderando-se as flechas percentuais das primeiras 4 fiadas, entendendo que até essa fiada a carga aplicada é irrisória se comparada as cargas de paredes e divisórias executadas em edificações tradicionais, observa-se que a diferença dos percentuais é muito pequena, enquanto nas nervuras centrais a variação máxima é de 2,02%, nas nervuras secundárias não existe diferença maior que 0,50%.

Então, é possível afirmar que a carga aplicada não gera impacto significativo sobre a distribuição da carga.

## 4.7 EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS

Utilizando os cálculos manuais, fica-se limitado a validação das informações calculadas através do ensaio real, podendo-se balizar pelas flechas percentuais para outras análises dentro do ensaiado.

Porém, com a disponibilidade de um modelo computacional, calibrado e validado com ensaios reais, dentro de uma tolerância definida, é possível extrapolar os dados e fazer novas análises acerca da distribuição transversal de cargas.

### 4.7.1 Influência da quantidade de nervuras

Como com a utilização de 7 nervuras, as mais distantes do centro ainda receberam uma parcela significativa da carga, logo imagina-se que se consideradas mais nervuras, estas ainda receberiam uma parcela da carga.

Para fazer essa análise, foram utilizadas a configuração da primeira laje e foram modeladas mais 4 lajes semelhantes, com 9, 11, 13 e 15 nervuras, cada uma foi analisada para a carga de 3,04 kN/m e para 5,04 kN/m aplicada sobre a nervura central.

Nas próximas tabelas, a nervura central, na qual é aplicada a carga indicada, é identificada como "0" e as demais nervuras são identificadas de 1 a 7, de acordo com sua distância em relação à nervura principal.

Tabela 32 – Deformações das lajes com mais nervuras com carga de 3,04 kN/m

Qtd nerv	Deformação das nervuras (mm)														
	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
15	0,01	0,10	0,24	0,45	0,76	1,16	1,59	1,83	1,59	1,16	0,76	0,45	0,24	0,10	0,01
13		0,15	0,31	0,53	0,83	1,20	1,58	1,78	1,58	1,20	0,83	0,53	0,31	0,15	
11			0,34	0,56	0,86	1,22	1,60	1,80	1,60	1,22	0,86	0,56	0,34		
9				0,66	0,94	1,29	1,66	1,85	1,66	1,29	0,94	0,66			
7					1,17	1,48	1,81	1,99	1,81	1,48	1,17				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 33 – Deformações percentuais das lajes com mais nervuras com carga de 3,04 kN/m

Qtd nerv	Deformação das nervuras (%)														
	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
15	0,10	0,96	2,30	4,31	7,27	11,10	15,22	17,51	15,22	11,10	7,27	4,31	2,30	0,96	0,10
13		1,37	2,82	4,83	7,56	10,93	14,39	16,21	14,39	10,93	7,56	4,83	2,82	1,37	
11			3,10	5,11	7,85	11,13	14,60	16,42	14,60	11,13	7,85	5,11	3,10		
9				6,03	8,58	11,78	15,16	16,89	15,16	11,78	8,58	6,03			
7					10,72	13,57	16,59	18,24	16,59	13,57	10,72				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 34 – Deformações das lajes com mais nervuras com carga de 5,04 kN/m

Qtd nerv	Deformação das nervuras (mm)														
	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
15	0,01	0,17	0,40	0,75	1,25	1,92	2,64	3,03	2,64	1,92	1,25	0,75	0,40	0,17	0,01
13		0,25	0,52	0,88	1,37	1,99	2,62	2,95	2,62	1,99	1,37	0,88	0,52	0,25	
11			0,56	0,93	1,42	2,03	2,66	2,98	2,66	2,03	1,42	0,93	0,56		
9				1,09	1,56	2,14	2,74	3,06	2,74	2,14	1,56	1,09			
7					1,94	2,45	3,00	3,30	3,00	2,45	1,94				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 35 – Deformações percentuais das lajes com mais nervuras com carga de 5,04 kN/m

Qtd nerv	Deformação das nervuras (%)														
	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
15	0,06	0,98	2,31	4,33	7,22	11,09	15,25	17,50	15,25	11,09	7,22	4,33	2,31	0,98	0,06
13		0,25	0,52	0,88	1,37	1,99	2,62	2,95	2,62	1,99	1,37	0,88	0,52	0,25	
11		1,37	2,86	4,83	7,52	10,93	14,39	16,20	14,39	10,93	7,52	4,83	2,86	1,37	
9			0,56	0,93	1,42	2,03	2,66	2,98	2,66	2,03	1,42	0,93	0,56		
7			3,08	5,12	7,81	11,17	14,63	16,39	14,63	11,17	7,81	5,12	3,08		

Fonte: Elaborado pelo autor



Com a análise da Tabela 33 e da Tabela 35, pode-se observar que na laje com 7 nervuras, as nervuras externas, recebem aproximadamente 11% da carga aplicada, na laje com 9 nervuras, as externas recebem em torno de 6% e nas laje com mais nervuras os percentuais nas nervuras mais distantes da carga recebem 3% da carga ou menos.

Com isso, é possível concluir que a partir da nervura que recebe a aplicação da carga, 4 nervuras para cada lado ainda recebem carga relevante, acima disso a solicitação é desprezível. Porém, a consideração de 3 nervuras laterais recebendo carga é plausível, visto que é uma aplicação conservadora do ponto de vista dimensional e reduz o tempo de dimensionamento pela desconsideração de duas nervuras.

#### 4.7.2 Influência do vão longitudinal

Como os ensaios foram limitados a lajes com nervuras com vãos de 4,0 metros, também é interessante analisar modelos com diferentes medidas de vãos e para tanto foram modeladas mais 4 lajes semelhantes, com vãos de 2, 3, 5 e 6 metros no sentido das nervuras, cada uma para a carga de 3,04 kN/m e para 5,04 kN/m.

Tabela 36 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 3,04 kN/m

Vãos (m)	Deformação das nervuras (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,02	0,07	0,15	0,23	0,15	0,07	0,02
3	0,27	0,44	0,65	0,78	0,65	0,44	0,27
4	1,17	1,48	1,81	1,99	1,81	1,48	1,17
5	3,28	3,69	4,11	4,33	4,11	3,69	3,28
6	7,25	7,73	8,22	8,46	8,22	7,73	7,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 37 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 3,04 kN/m

Vãos (m)	Deformação das nervuras (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
2	2,82	9,86	21,13	32,39	21,13	9,86	2,82
3	7,71	12,57	18,57	22,29	18,57	12,57	7,71
4	10,72	13,57	16,59	18,24	16,59	13,57	10,72
5	12,38	13,93	15,52	16,35	15,52	13,93	12,38
6	13,22	14,09	14,98	15,42	14,98	14,09	13,22

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 38 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 5,04 kN/m

Vãos (m)	Deformação das nervuras (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,03	0,11	0,25	0,38	0,25	0,11	0,03
3	0,45	0,73	1,08	1,30	1,08	0,73	0,45
4	1,94	2,45	3,00	3,30	3,00	2,45	1,94
5	5,43	6,12	6,82	7,18	6,82	6,12	5,43
6	12,02	12,82	13,62	14,02	13,62	12,82	12,02

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 39 – Flechas percentuais para lajes com vãos de 2, 3, 4, 5 e 6 metros com a carga de 5,04 kN/m

Vãos (m)	Deformação das nervuras (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
2	2,59	9,48	21,55	32,76	21,55	9,48	2,59
3	7,73	12,54	18,56	22,34	18,56	12,54	7,73
4	10,73	13,55	16,59	18,25	16,59	13,55	10,73
5	12,36	13,93	15,53	16,35	15,53	13,93	12,36
6	13,22	14,10	14,98	15,42	14,98	14,10	13,22

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando os valores entre a Tabela 37 e a Tabela 39 observa-se que, mesmo modificando as cargas aplicadas, as flechas percentuais correspondentes de uma tabela na outra, são muito próximos, o que apoia o observado no item 4.6.3.

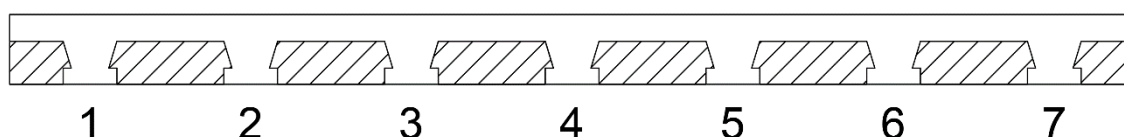
Mas analisando os valores dentro de cada tabela, observa-se que a distribuições transversais variam de acordo com o vão longitudinal das nervuras. A laje com o menor vão longitudinal é a que possui a nervura principal com que recebe a maior porcentagem da carga (32,76%), enquanto a laje com o vão longitudinal maior, é a situação em que a nervura principal recebe o menor percentual da carga (15,42%) e, portanto, é a situação com a maior distribuição de carga.

#### 4.8 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS

Com as verificações de que a espessura da capa e a grandeza da carga aplicada não tem impacto significativo na distribuição de carga, e que a consideração de 7 nervuras como contribuintes na resistência à carga aplicada é adequada, resta vincular o percentual de carga a ser considerado no dimensionamento de cada nervura com o vão longitudinal das mesmas.

Para tanto, a seguir é apresentada uma tabela e um gráfico a partir dos quais é possível definir o percentual de carga que deve ser considerado sobre cada nervura da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 48 – Nervuras consideradas



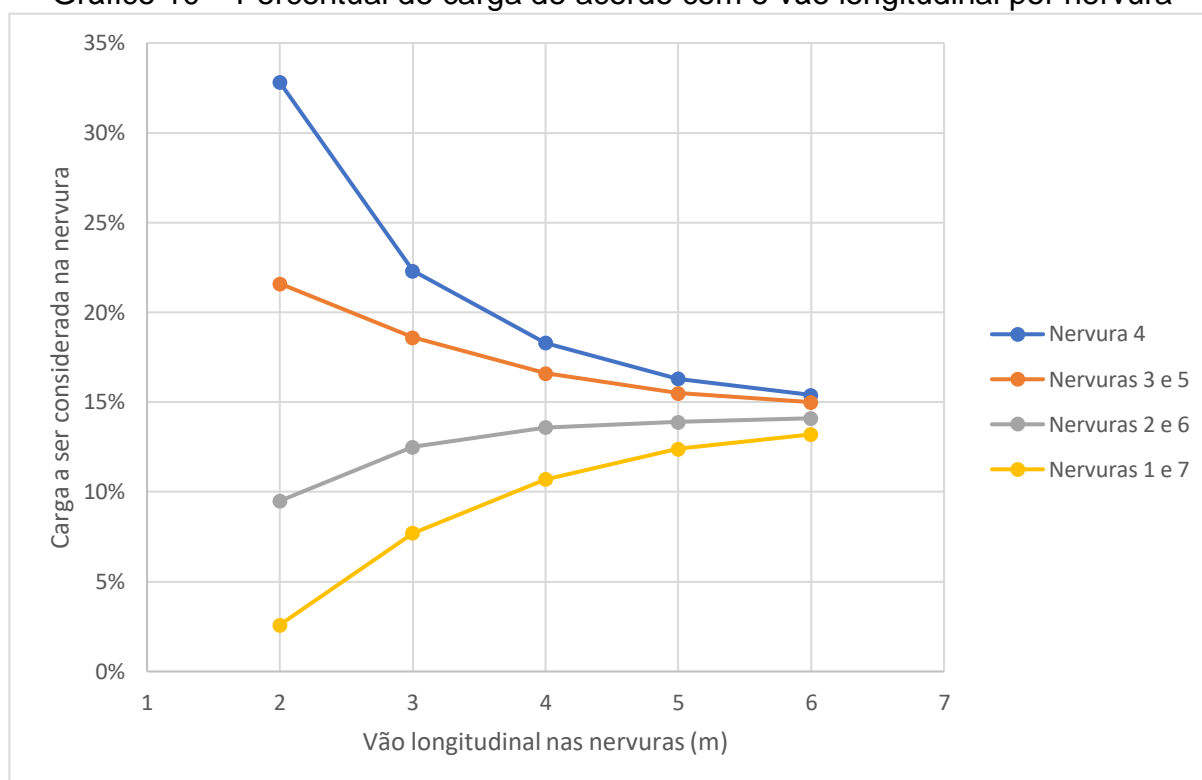
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 40 – Percentual de carga de acordo com o vão longitudinal por nervura

Vão (m)	Nervura						
	1	2	3	4	5	6	7
2	3%	9%	22%	32%	22%	9%	3%
3	8%	13%	18%	22%	18%	13%	8%
4	11%	14%	16%	18%	16%	14%	11%
5	12%	14%	16%	16%	16%	14%	12%
6	13%	14%	15%	16%	15%	14%	13%

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 10 – Percentual de carga de acordo com o vão longitudinal por nervura



Fonte: Elaborado pelo autor

Para utilização da tabela, deve-se na coluna da esquerda localizar o vão da laje analisada, e na segunda linha, localizar a identificação da nervura em questão. O encontro da linha referente ao vão com a coluna referente a nervura, indicará o percentual a ser considerado. Já em condições com vãos intermediários aos da tabela, recomenda-se a utilização do gráfico, no qual, localiza-se inicialmente no eixo “X” o vão da laje, traça-se uma reta vertical até o encontro com os segmentos de reta referente a nervura analisada e o valor correspondente a esse ponto de encontro, no eixo “Y” refere-se ao percentual de carga a ser considerado sobre a nervura.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho que foi baseado no comportamento de lajes pré-fabricadas com vigotas protendidas, e teve as análises realizadas com base em seções de concreto que não ultrapassaram a resistência à tração do mesmo, e, portanto, não apresentaram fissuras e por isso mantiveram-se contribuindo integralmente na rigidez do elemento. Com isso o comportamento das nervuras pôde ser aproximado por processo elástico-linear, e, portanto, obtiveram-se deformações proporcionais ao carregamento. Além disso, deve ser destacado que somando as deformações de todas as nervuras e observando o percentual que a flecha de cada nervura representa desse somatório é o percentual da carga aplicada que a mesma nervura está recebendo. Isso corrobora o comportamento elástico linear da laje.

A partir da comparação entre os resultados das deformações provenientes dos cálculos manuais e das simulações computacionais com as deformações verificadas nos ensaios de deformação realizados nas lajes executadas foi possível validar o método de cálculo de deformações como sendo uma solução conversadora para a previsão de deformações, e o método apresentado, de simulação computacional como um método com grande precisão nesse aspecto.

Além disso, foi observado através dos ensaios que a influência da espessura da capa de concreto armado complementar na distribuição transversal de cargas aplicadas longitudinalmente às nervuras em lajes pré-fabricadas unidirecionais de vigotas protendidas é baixa suficiente para ser desprezada.

E o valor da carga aplicada também não interfere significativamente na distribuição transversal, também podendo ser desconsiderado.

Através da extrapolação dos resultados, por meio de simulações computacionais, foi verificado que é adequada a consideração da distribuição das cargas em apenas sete nervuras, se objetivada a realização do dimensionamento de nervuras de maior velocidade, ou no máximo em nove nervuras, se objetivada a realização do dimensionamento com maior precisão, sendo que a partir de quantidades maiores de nervuras, elas não possuem mais influência significativa.

Observou-se nas extrapolações, também, que as deformações percentuais variam principalmente de acordo com o vão longitudinal das nervuras e por isso, essa características da laje pode ser utilizada para criação um método de consideração dessa distribuição na realização de dimensionamentos através de cálculos manuais.

## REFERÊNCIAS

ABCP. Uma breve história do cimento Portland. *In*: ABCP. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 06 nov 2022

ABRAINCO. PIB da Construção Civil cresce 9,7% em 2021. *In*: ABRAINCO. São Paulo. 4 mar 2022. Disponível em: <https://www.abrainco.org.br/construcao-civil/2022/03/04/pib-da-construcao-civil-cresce-97-em-2021/>. Acesso em: 23 out 2022.

AECWEB. O que é Concreto Armado. *In*: AECWEB. 17 out 2022. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/concreto-armado-e-solucao-duravel-e-economica/6993>. Acesso em: 06 nov 2022.

ALMINHANA, Fábio. **Concreto Armado I**: Notas de Aula. 2020. 1. ed. 2020.

ARCELORMITTAL. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido**. Versão outubro de 2021. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/fios-e-cordoalhas>. Acesso em 28 mai 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14859-1**: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, mini painéis e painéis – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14859-2**: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14859-3**: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armaduras treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7480**: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7481**: Tela de aço soldada nervurada para armadura de concreto - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7482**: Fios de aço para estruturas de concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9062:** Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AVILLA JUNIOR, Jovair. **Contribuição ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas.** 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Pós-Graduação em Construções, universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

BITTENCOURT, Milton Rodrigues Alves. **Principais Tipos de Lajes:** Principais Lajes Utilizadas no Mercado Atual. 2015. Trabalho de disciplina – Técnico em Edificações, SENAI. Curitiba. 2015.

CABRAL, José Pedro Monteiro. **Distribuição transversal de cargas em lajes realizadas com painéis nervurados.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Especialização em Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2009.

CAIXETA, João Paulo Gomes; HANNUM, Murillo Martins. **Dimensionamento de lajes pré-moldadas do tipo vigota em concreto armado e concreto protendido.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, 2018.

CARDOSO, Daniel Luis Antonio. **Vedações verticais e suas interfaces no sistema construtivo de edificações.** 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2007.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estrutura em concreto protendido:** cálculo e detalhamento. 2. ed. São Paulo: Pini: 2017.

CARVALHO, Roberto Chust; DE FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigue. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado:** segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2021.

CBIC. Construção Civil, em 2021, registrou o seu maior crescimento nos últimos 10 anos. *In:* CBIC. Brasília. 11 fev 2022. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-em-2021-registrou-o-seu-maior-crescimento-nos-ultimos-10-anos/>. Acesso em: 23 out 2022.

CDDCARQFEEVALE, 2012. Disponível em: <https://cddcarqfeevale.wordpress.com/2012/05/22/lajes-pre-fabricadas-vigota-e-tabela/>. Acesso em: 27 nov 2022.

CHIK, Tuan Norhayati Tuan; KAMIL, M. R. H.; YUSOFF, Bin Nor Azizi. Vibration Analysis of Beam and Block Precast Slab System due to Human Vibrations. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 995, p. 12115, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012115>. Acesso em: 27 nov 2022.

COIMBRA, Tiago Lopes de Almeida. **Patologias em alvenarias de preenchimento induzidas por deformação dos suportes**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2010.

CONSTRUROHR, 2022. Disponível em: <http://www.construrohr.com.br/categoria/lajes>. Acesso em: 27 nov 2022.

CONSTRUROHR. 2022. Disponível em: <https://www.instagram.com/construrohr/>. Acesso em: 27 nov 2022.

CREA-PE. Construção civil movimentada R\$ 288 bilhões em 2019. *In*: CREA—PE. Recife. 17 jun 2021. Disponível em: <https://www.creape.org.br/construcao-civil-movimentada-r-288-bilhoes-em-2019/#:~:text=Os%20n%C3%BAmeros%20da%20pesquisa%20motram,anterior%20%C3%A0%20pandemia%20do%20Coronav%C3%ADrus>. Acesso em: 23 out 2022.

CUNHA, Mateus Ortigosa. **Recomendações para projeto de lajes formadas por vigotas com armação treliçada**. Orientador: Mounir Khalil El Debs. 2012. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2012.

DE LIMA, Felipe Schneider. **Desempenho acústico de lajes pré-fabricadas nervuras de vigotas protendidas: isolamento ao ruído aéreo e ruído de impacto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2021.

DROPPA JÚNIOR, Alonso. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. Orientador: Mounir Khalil El Debs. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

EUROPEAN STANDARD. **EN 15037-1**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 1: Beams. Versão 1. Bruxelas, 2008.

EUROPEAN STANDARD. **EN 15037-2**: Precast concrete products beam-and-block floor systems – Part 2: Concrete Blocks. Versão 1. Bruxelas, 2009.

FACIBRAS, 2022. Disponível em: <https://facibras.com.br/painel-trelicado-macico/>. Acesso em 27 nov 2022.

FECOMERCIO SP. Como reduzir custos e aumentar o lucro no meio de uma pandemia?. *In*: FECOMPERCIO SP. São Paulo. 21 ago 2020. Disponível em: <https://www.fecomercio.com.br/noticia/como-reduzir-custos-e-aumentar-o-lucro-no-meio-de-uma-pandemia>. Acesso em: 23 out 2022.



FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues; SHIRAMIZU, Alexandre Koiti Hokazono. Design, manufacture and construction of buildings with precast lattice-reinforced concrete slabs. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, São Paulo. v. 4, n. 1, p. 123-146. 2011.

FIP Commission on Prefabrication. **Planning and design handbook on precast building structures**. 1994.

FLÓRIO, Márcio Cardozo. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado**. Orientador: Roberto Chust Carvalho. 2004. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2004.

GALVAMINAS. 2022. Disponível em: <https://www.galvaminas.com.br/blog/tipos-de-laje-e-suas-vantagens/>. Acesso em: 27 nov 2022.

GRUPO FUTURA. 2022. Disponível em: <https://www.sergioelbeck.com.br/bubble-deck-laje-leve-resistente/>. Acesso em 27 nov 2022.

IPOG. Concreto protendido: conceito, aplicações, vantagens e desvantagens do uso. *In*: IPOG. Disponível em: <https://blog.ipog.edu.br/engenharia-e-arquitetura/concreto-protendido/>. Acesso em: 07 nov 2022.

LAJES PATAGONIA, 2022. Disponível em: <https://www.lajespatagonia.com/servico/3/9/laje-pi-tt-para-grandes-vaos>. Acesso em: 27 nov 2022.

MINISTERIO DE FOMENTO. **EF-96**: Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón armado e pretensado. Madrid. 2002.

NAKAMURA, Juliana. Pré-fabricados: como industrializam a construção. *In*: SIENGE. 24 NOV 2019. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/pre-fabricados/>. Acesso em: 04 out 2022.

POLA, Afonso. Sociedade moderna. *In*: PORTALNEWS. Mogi das Cruzes. 14 mar 2017. Disponível em: [https://www.portalnews.com.br/\\_conteudo/2017/03/opiniao/artigos/52615-sociedade-moderna.html](https://www.portalnews.com.br/_conteudo/2017/03/opiniao/artigos/52615-sociedade-moderna.html). Acesso em: 04 out 2022.

POPULATION MATTERS. Current world population. *In*: POPULATION MATTERS. London. 2022. Disponível em: [https://populationmatters.org/population-numbers?gclid=CjwKCAjws--ZBhAXEiwAv-RNL3mQEw1umLGQDqJvXvIVc7AhVj\\_8avCEXSAPugi aH3CPNjfuAVz9nBoCwSgQAvD\\_BwE](https://populationmatters.org/population-numbers?gclid=CjwKCAjws--ZBhAXEiwAv-RNL3mQEw1umLGQDqJvXvIVc7AhVj_8avCEXSAPugi aH3CPNjfuAVz9nBoCwSgQAvD_BwE). Acesso em: 23 out 2022.

SÉRGIO EL BECK, 2022. Disponível em: <https://www.sergioelbeck.com.br/bubble-deck-laje-leve-resistente/>. Acesso em 27 nov 2022.

SINAPROCIM. Pesquisa de produção 2020. São Paulo, 2021.

UFSC, 2022. Disponível em: <https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/laje-alveolar/>. Acesso em: 27 nov 2022.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JÚNIOR, Kléos M Lenz. **Concreto Protendido**: Fundamentos Básicos. 1998. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de

Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil, 1998.

VERTÁTIL ANDAIMES. 2020. Disponível em: <https://www.versatilandaimes.com.br/blog/laje-nervurada-cinco-motivos-para-utilizar-na-construcao-civil>. Acesso em 27 nov 2022.