

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Aplicação em Fábrica de Ensaios Não Destrutivos
em Lajes Alveolares Protendidas para a
Verificação da Conformidade de Projeto**

Luís Fernando Borzi Bazílio

Orientador: Marcelo de Araújo Ferreira

Área de concentração: Construção Civil

São Carlos, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Aplicação em Fábrica de Ensaios Não Destrutivos
em Lajes Alveolares Protendidas para a
Verificação da Conformidade de Projeto**

Luís Fernando Borzi Bazílio

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo de Araújo Ferreira

Área de concentração: Construção Civil

São Carlos, 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luis Fernando Borzi Bazilio, realizada em 14/07/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Profa. Dra. Marcela Novischi Kataoka (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por todas as oportunidades que me propiciaram até aqui, certamente sem eles não existiria “quem eu sou” e “onde estou”.

À minha esposa, Márcia Serra Araldi, que me acompanhou por toda a trajetória desta etapa em minha vida e cuidou de mim para que pudesse manter o foco.

Ao meu orientador e grande amigo Professor Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, exemplo de profissional e de pessoa, pela oportunidade e confiança na elaboração desta pesquisa.

À todos os meus professores pelos ensinamentos passados.

À Bruna Catoia por toda ajuda que me foi prestada.

Ao colega do grupo de pesquisa NETPre, Luiz Carlos de Alvarenga Jr. pela companhia, apoio e auxílio por toda esta trajetória. Esta amizade se manterá por toda a vida!

Aos professores André Luis Christoforo e Marcela Novischi Kataoka, pelas valiosas sugestões e correções no exame de qualificação.

Ao amigo José Luiz Paz por todo ensinamento prático passado! Sem dúvidas me proporcionou o essencial para ser um melhor profissional.

Ao grupo de estudos do Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados (NETPre-UFSCar) e demais colegas pela companhia, que direta ou indiretamente fizeram parte da minha vida durante os anos de PPGE Civ.

À Puma Lajes Alveolares por ceder seu espaço em prol desta pesquisa.

À todos, meu muito obrigado!

“Ninguém é tão sábio que não tenha algo para aprender e nem tão tolo que não tenha algo para ensinar.”

– Blaise Pascal

RESUMO

Para a obtenção da resistência suportada por lajes alveolares é necessária a realização de ensaios destrutivos padronizados, sendo que nestes ensaios é possível verificar o atendimento do produto quanto ao projeto. A ABNT NBR 14861 (2011) não permite a realização de ensaios simplificados em ambiente fabril por falta de estudos na área e a ABNT NBR 9062 (2017) possibilita verificações experimentais como parte do procedimento de projeto. Com base no exposto, o intuito deste trabalho é verificar a conformidade de lajes alveolares com o projeto, através da realização de ensaio não destrutivo em ambiente fabril de forma a se evitar a realização de ensaios destrutivos e diminuir o desperdício de material, tempo e custo na produção de lajes alveolares protendidas.

Palavras-Chave: laje alveolar; concreto protendido; controle de qualidade; prova de carga; desempenho estrutural.

ABSTRACT

To obtain the strength supported by hollow core slabs it is necessary to perform standardized destructive tests, and in these tests it is possible to verify the product's compliance with the design. ABNT NBR 14861 (2011) does not allow the performance of simplified tests in a manufacturing environment due to lack of studies in the area, while ABNT NBR 9062 (2017) allows experimental verifications as part of the design procedure. Based on the above, the purpose of this paper is to verify the compliance of hollow core slabs with the design, by performing non-destructive tests in a factory environment in order to avoid destructive testing and to reduce waste of material, time and cost in the production of prestressed hollow core slabs.

Keywords: hollow core slab; prestressed concrete; quality control; load test; structural performance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA.....	21
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.3 COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 SISTEMA E PRODUÇÃO	24
2.2 DIFERENÇAS ENTRE AS CARACTERÍSTICAS.....	32
2.3 MECANISMOS DE RUPTURA	33
2.3.1 MECANISMOS DE RUPTURA DEVIDOS À FLEXÃO EM LAJES ALVEOLARES	35
2.3.2 MECANISMOS DE RUPTURA DEVIDOS AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES	37
2.3.3 MECANISMOS DE RUPTURA EM LAJES ALVEOLARES COM CAPA	43
2.4 COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS QUE COMPOEM A LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA.....	44
2.4.1 LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO	44
2.4.2 ANCORAGEM	44
2.4.3 CAPA DE CONCRETO.....	50
2.4.4 EFEITO DIAFRAGMA.....	50
2.4.5 LANÇAMENTO, TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO	53
3. DESENVOLVIMENTO	54
3.1 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO.....	54
3.1.1 FATORES INFLUENCIANTES NA LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA... ..	55
3.1.2 CÁLCULO SEGUNDO RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	57
3.2 VERIFICAÇÕES EM LAJE ALVEOLAR.....	70
3.2.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	70
3.2.2 CÁLCULOS A PARTIR DOS RESULTADOS DE ENSAIOS	83

3.2.3	CÁLCULOS TEÓRICOS	86
3.3	CONTROLE DE CONFORMIDADE	93
3.3.1	INSPEÇÃO VISUAL.....	95
3.3.2	INSPEÇÃO DE MATERIAIS	96
3.3.3	INSPEÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	99
3.3.4	ENSAIO DE PROVA DE CARGA.....	100
3.3.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE	105
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	109
4.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	109
4.1.1	PRODUÇÃO DAS LAJES	111
4.1.2	PROCESSO DE SAQUE E VERIFICAÇÃO DA CONTRAFLECHA	114
5.	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	118
6.	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	121
7.	CARACTERIZAÇÃO DAS LAJES	129
7.1	INSPEÇÃO VISUAL EM LAJES ALVEOLARES	130
7.1.1	LAJE 1	131
7.1.2	LAJE 2	132
7.1.3	LAJE 3	135
7.1.4	LAJE 4	138
7.1.5	LAJE 5	142
7.1.6	LAJE 6	144
7.2	MEDIÇÕES PRÉVIAS DOS PROTÓTIPOS ENSAIADOS	146
8.	ENSAIOS	151
8.1	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	151
8.1.1	ELEMENTOS ACESSÓRIOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS ..	151
8.2	ESQUEMA DE ENSAIO.....	155
8.3	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	162
8.3.1	DESLOCAMENTOS.....	162

8.3.2	MOMENTO DE INÉRCIA DA PEÇA	162
8.3.3	AVALIAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO REAL DAS PEÇAS	162
9.	RESULTADOS	164
9.1	ESCORREGAMENTO DE CORDOALHA	164
9.2	LIMITES DE ESCORREGAMENTOS EM CORDOALHA	165
9.3	ANÁLISE DOS CARREGAMENTOS E DESLOCAMENTOS	174
9.3.1	LAJE 1	174
9.3.2	LAJE 2	178
9.3.3	LAJE 3	180
9.3.4	LAJE 4	183
9.3.5	LAJE 5	186
9.3.6	LAJE 6	189
9.4	OBTENÇÃO DA RIGIDEZ – MÓDULO ELÁSTICO (E)	192
9.5	EVOLUÇÃO DA CONTRAFLECHA	196
10.	CONCLUSÃO	200
10.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	200
10.2	PROCEDIMENTO PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS ENVOLVENDO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO EM FÁBRICA	202
10.3	AVALIAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO DAS LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS EM AMBIENTE FABRIL	204
10.4	VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA REAL DO ELEMENTO	205
10.5	INSPEÇÃO VISUAL	205
10.6	ESCORREGAMENTO DE CORDOALHAS	206
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207
	ANEXO I	211
	ANEXO II	217
	APÊNDICE A	220

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Detalhe da seção transversal.....	26
Figura 2-2: Exemplos de seções transversais dos elementos de laje alveolar	27
Figura 2-3: Máquinas de produção de laje alveolar.....	28
Figura 2-4: Ciclo de produção de laje alveolar	30
Figura 2-5: Fissuras no elemento de concreto protendido	34
Figura 2-6: Fissuras de tração na face superior devido a protensão.....	35
Figura 2-7: Fissuras de flexão em elementos de laje alveolar.....	36
Figura 2-8: Interação de fissuras de cisalhamento e flexão	36
Figura 2-9: Posições críticas no cisalhamento próximo ao apoio	38
Figura 2-10: Seção em que $6 > a_v/d > 2,5$	39
Figura 2-11: Ruptura em peça ensaiada a cisalhamento	40
Figura 2-12: Fissura de cisalhamento com carga a $2,5 > a_v/d > 1$	41
Figura 2-13: Fissura de cisalhamento em que $a_v/d < 1$	41
Figura 2-14: Fissura longitudinal devido ao fendilhamento do concreto	42
Figura 2-15: Mecanismos de ruptura em laje alveolar com capa	43
Figura 2-16: Comprimento de transferência e comprimento de desenvolvimento da cordoalha	46
Figura 2-17: Fenômeno <i>Bursting</i>	48
Figura 2-18: Fenômeno <i>Splitting</i>	48
Figura 2-19: Fenômeno <i>Spalling</i>	49
Figura 2-20: Seção da junta longitudinal entre lajes.....	52
Figura 2-21: Armaduras de continuidade (sobre apoios intermediários e de extremidades) posicionadas no capeamento estrutural	52
Figura 2-22: Armaduras de continuidade (sobre apoios intermediários e de extremidades) posicionadas nos alvéolos de lajes alveolares	53
Figura 3-1: Preenchimento de alvéolos.....	60
Figura 3-2: Força cortante nas chavetas ou chaves de cisalhamento	63

Figura 3-3: Fissuração longitudinal devido ao fendilhamento do concreto nas nervuras	65
Figura 3-4: Tensão de fendilhamento na nervura.....	65
Figura 3-5: Núcleo de rigidez	65
Figura 3-6: Força de protensão resultante	66
Figura 3-7: Espessura efetiva das nervuras para a verificação a punção.....	67
Figura 3-8: Amostra para extração dos corpos de prova.....	73
Figura 3-9: Tipos de imperfeições e possíveis causas	76
Figura 3-10: Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento	79
Figura 3-11: Desenho esquemático de ensaio à flexão.....	81
Figura 3-12: Ensaio de interação de cisalhamento e flexão	82
Figura 3-13: Localização de LVDTs para leitura da flecha no ensaio de flexão	86
Figura 3-14: Esquema para cálculo do momento resistente da seção transversal	88
Figura 3-15: Ensaio não destrutivo de prova de carga para avaliação do ELS.....	101
Figura 4-1 Limpeza da Pista	110
Figura 4-2 Aplicação do desmoldante.....	110
Figura 4-3 Posicionamento de Sarrafos.....	110
Figura 4-4 Cordoalha esticada na pista	110
Figura 4-5 Cabos esticados	111
Figura 4-6 Protensão	111
Figura 4-7 Manômetro mostrando o valor da força aplicada	111
Figura 4-8 Máquina Moldadora	112
Figura 4-9 Pá carregadeira	112
Figura 4-10 Esquadro	113
Figura 4-11 Centro das Nervuras.....	113
Figura 4-12 Trena aferindo a altura antes	113
Figura 4-13 Trena aferindo a altura depois	113
Figura 4-14 Reparo manual na laje.....	114
Figura 4-15 Lona cobrindo a laje	115

Figura 4-16 Após a retirada da lona.....	115
Figura 4-17 Posicionamento do cilindro na cabeceira passiva	115
Figura 4-18 Cordoalhas desprontedidas, verificado com o cilindro com curso mínimo.....	115
Figura 4-19 Serra de Corte	116
Figura 4-20 Peso sendo colocado.....	116
Figura 4-21 Corte da Laje	116
Figura 4-22 Garra do Pórtico	116
Figura 4-23 Colaborador posicionando o pontalete.....	117
Figura 4-24 Trena demonstrando a medida da contraflecha da laje.....	117
Figura 5-1 Curva Granulométrica da areia	118
Figura 5-2 Curva Granulométrica do pedrisco.....	119
Figura 5-3 Curva Granulométrica de pó de pedra	119
Figura 5-4 Procedimento para análise do teor de umidade do concreto	120
Figura 6-1 Discos de neoprene	122
Figura 6-2 Prensa utilizada, destacando a data de calibração	122
Figura 6-3 Corpos de prova	125
Figura 7-1 Ilustração de laje alveolar	131
Figura 7-2 Laje 1 Face A – Seção da laje alveolar.....	131
Figura 7-3 Laje 1 Face B – Seção da laje alveolar.....	131
Figura 7-4 Laje 2 Face A - Seção da laje alveolar.....	132
Figura 7-5 Laje 2 Face B - Seção da laje alveolar.....	132
Figura 7-6 Laje 2 - Arraste do concreto.....	133
Figura 7-7 Laje 2 - Fissura por cisalhamento	133
Figura 7-8 Fissura por cisalhamento, outro ângulo	134
Figura 7-9 Fissura dentro do alvéolo.....	134
Figura 7-10 Fissura embaixo da peça.....	134
Figura 7-11 Laje 3 Face A - Seção da laje alveolar.....	135
Figura 7-12 Laje 3 Face B - Seção da laje alveolar.....	135

Figura 7-13 Fendilhamento	135
Figura 7-14 Fissura de fendilhamento do concreto	136
Figura 7-15 Pedaco de concreto destacado.....	136
Figura 7-16 Trecho destacado	137
Figura 7-17 Trecho deslocado	137
Figura 7-18 Laje 4 Face A - Seção da laje alveolar.....	138
Figura 7-19 Laje 4 Face B - Seção da laje alveolar.....	138
Figura 7-20 Quebra na extremidade	138
Figura 7-21 Deslocamento de concreto	139
Figura 7-22 Laje 4 - Nervura 8	139
Figura 7-23 Laje 4 – Nervura 9	140
Figura 7-24 Fissura horizontal	140
Figura 7-25 Fissura horizontal, imagem aproximada.....	141
Figura 7-26 Laje 5 Face A - Seção da laje alveolar.....	142
Figura 7-27 Laje 5 Face B - Seção da laje alveolar.....	142
Figura 7-28 Fissura.....	142
Figura 7-29 Fendilhamento do concreto na armadura.....	143
Figura 7-30 Marca da parada da máquina	143
Figura 7-31 Laje 6 Face A - Seção da laje alveolar.....	144
Figura 7-32 Laje 6 Face B - Seção da laje alveolar.....	144
Figura 7-33 Alvéolo preenchido	144
Figura 7-34 Marca da parada de máquina	145
Figura 8-1 Base de apoio em concreto	152
Figura 8-2 Conferência do nivelamento do apoio.....	152
Figura 8-3 Pontaleta de madeira de 0,10x0,10x1,25 m para apoio das lajes ensaiadas	153
Figura 8-4 Conferência do nivelamento da laje posicionada	153
Figura 8-5 Etiqueta de rolo de cordoalha para identificação do peso do produto	154
Figura 8-6 Relógio Comparador Digital.....	155

Figura 8-7 Relógio Comparador Analógico	155
Figura 8-8 Arranjo de ensaio com duas cargas pontuais	155
Figura 8-9 Arranjo de ensaio com 4 cargas pontuais	156
Figura 8-10 Pontos de apoio do rolo de cordoalha.....	156
Figura 8-11 Esquema de Aplicação de carga em 4 pontos	157
Figura 8-12 Ensaio realizado com 4 apoios	157
Figura 8-13 Esquema de aplicação de carga em 2 pontos	158
Figura 8-14 Ensaio realizado com 2 apoios	158
Figura 8-15 Leitura do deslocamento por meio de linha e trena.....	159
Figura 8-16 Forças Atuantes LJ 5 18/05/2021	160
Figura 8-17 Forças Atuantes na LJ 1; LJ 2; LJ 3; LJ 4; LJ 6- 18/05/2021	160
Figura 8-18 Forças atuantes nas lajes ensaidas no dia 01/06/2021 e 14/06/2021	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens das lajes alveolares protendidas	25
Tabela 3-1: Sequência do procedimento implantado	94
Tabela 6-1 Traço do Concreto	123
Tabela 6-2 Ensaio de resistência à compressão do concreto – Moldagem em mesa vibratória	123
Tabela 6-3 Ensaio de resistência à compressão do concreto – Moldagem na máquina moldadora.....	124
Tabela 7-1 Resistência à Compressão do Graute.....	129
Tabela 7-2 Características geométricas – dimensões.....	146
Tabela 7-3 Verificação do cobrimento mínimo para evitar o fendilhamento – posição efetiva dos cabos – parte 1.....	147
Tabela 7-4 Verificação do cobrimento mínimo para evitar o fendilhamento – posição efetiva dos cabos – parte 2.....	148
Tabela 7-5 Posicionamento das Cordoalhas.....	149
Tabela 7-6 Características Geométricas - Nervuras.....	150
Tabela 8-1 Peso das cordoalhas aplicados na laje 5 - 18/05/2021	159
Tabela 8-2 Peso das cordoalhas aplicadas nas demais lajes - 18/05/2021.....	159
Tabela 9-1 Escorregamento de cordoalha - Laje 1	166
Tabela 9-2 Escorregamento de cordoalha - Laje 2	166
Tabela 9-3 Escorregamento de Cordoalha - Laje 3.....	167
Tabela 9-4 Escorregamento de Cordoalha - Laje 4.....	167
Tabela 9-5 Escorregamento de Cordoalha - Laje 5.....	168
Tabela 9-6 Escorregamento de Cordoalha - Laje 6.....	168
Tabela 9-7 Laje LJ 1 - Com 1 dia de idade	175
Tabela 9-8 Laje LJ 1 - Com 7 dias de idade.....	175
Tabela 9-9 Laje LJ 1 - Com 15 dias de idade.....	175
Tabela 9-10 Laje LJ 1 - Com 28 dias de idade.....	176

Tabela 9-11 Laje LJ 2 - Com 1 dia de idade	178
Tabela 9-12 Laje LJ 2 - Com 7 dias de idade.....	178
Tabela 9-13 Laje LJ 2 – Valores medidos nos relógios comparadores das extremidades..	179
Tabela 9-14 Laje LJ 3 – Com 1 dia de idade.....	180
Tabela 9-15 Laje LJ 3 - Com 7 dias de idade.....	181
Tabela 9-16 Laje LJ 3 - Com 15 dias de idade.....	181
Tabela 9-17 Laje LJ 3 - Com 28 dias de idade.....	181
Tabela 9-18 Laje LJ 4 - Com 1 dia de idade	183
Tabela 9-19 Laje LJ 4 - Com 7 dias de idade.....	183
Tabela 9-20 Laje LJ 4 - Com 15 dias de idade.....	184
Tabela 9-21 Laje LJ 4 - Com 28 dias de idade.....	184
Tabela 9-22 Laje LJ 5 - Com 1 dia de idade	186
Tabela 9-23 Laje LJ 5 - Com 7 dias de idade.....	186
Tabela 9-24 Laje LJ 5 - Com 15 dias de idade.....	187
Tabela 9-25 Laje LJ 5 - Com 28 dias de idade.....	187
Tabela 9-26 Laje LJ 6 - Com 1 dia de idade	189
Tabela 9-27 Laje LJ 6 - Com 7 dias de idade.....	189
Tabela 9-28 Laje LJ 6 - Com 15 dias de idade.....	190
Tabela 9-29 Laje LJ 6 - Com 28 dias de idade.....	190
Tabela 9-30 Valores reais do momento de inércia para seção lado A e lado B.....	192
Tabela 9-31 Lajes utilizadas para obtenção da inércia real média	193
Tabela 9-32 Ec Teórico para cada idade do concreto	193
Tabela 9-33 Comparação entre (E) teórico e experimental - Ensaio com 1 dia.....	194
Tabela 9-34 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 7 dias	194
Tabela 9-35 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 15 dias	194
Tabela 9-36 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 28 dias	195

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 6-1 Ensaio de resistência à compressão do concreto 3 dias	125
Gráfico 6-2 Ensaio de resistência à compressão do concreto 7 dias	126
Gráfico 6-3 Ensaio de resistência à compressão do concreto 15 dias	126
Gráfico 6-4 Ensaio de resistência à compressão do concreto 28 dias	126
Gráfico 6-5 Curva de aumento de resistência à compressão do concreto – Mesa vibratória	127
Gráfico 6-6 Curva de aumento de resistência à compressão do concreto – Mesa vibratória da máquina moldadora	127
Gráfico 9-1 Evolução do escorregamento de cordoalha para Laje 1	170
Gráfico 9-2 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 2	170
Gráfico 9-3 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 3	171
Gráfico 9-4 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 4	171
Gráfico 9-5 Escorregamento de cordoalha para a Laje 5	172
Gráfico 9-6 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 6	172
Gráfico 9-7 Força x Deslocamento LJ 1 - 1o dia	177
Gráfico 9-8 Força x Deslocamento LJ 1 - 7o dia	177
Gráfico 9-9 Força x Deslocamento LJ 1 - 15o dia	177
Gráfico 9-10 Força x Deslocamento LJ 1 - 28o dia	177
Gráfico 9-11 Força x Deslocamento LJ 2 - 1o dia	179
Gráfico 9-12 Força x Deslocamento LJ 2 - 7o dia	179
Gráfico 9-13 Força x Deslocamento LJ 3 - 1o dia	182
Gráfico 9-14 Força x Deslocamento LJ 3 - 7o dia	182
Gráfico 9-15 Força x Deslocamento LJ 3 - 15o dia	182
Gráfico 9-16 Força x Deslocamento LJ 3 - 28o dia	182
Gráfico 9-17 Força x Deslocamento LJ 4 - 1o dia	185
Gráfico 9-18 Força x Deslocamento LJ 4 - 7o dia	185
Gráfico 9-19 Força x Deslocamento LJ 4 - 15o dia	185

Gráfico 9-20 Força x Deslocamento LJ 4 - 28o dia	185
Gráfico 9-21 Força x Deslocamento LJ 5 - 1o dia	188
Gráfico 9-22 Força x Deslocamento LJ 5 - 7o dia	188
Gráfico 9-23 Força x Deslocamento LJ 5 - 15o dia	188
Gráfico 9-24 Força x Deslocamento LJ 5 - 28o dia	188
Gráfico 9-25 Força x Deslocamento LJ 6 - 1o dia	191
Gráfico 9-26 Força x Deslocamento LJ 6 - 7o dia	191
Gráfico 9-27 Força x Deslocamento LJ 6 - 15o dia	191
Gráfico 9-28 Força x Deslocamento LJ 6 - 28o dia	191
Gráfico 9-29 Evolução da contraflecha em LJ 1	196
Gráfico 9-30 Evolução da Contraflecha em LJ 2	196
Gráfico 9-31 Evolução da Contraflecha em LJ 3	197
Gráfico 9-32 Evolução da Contraflecha em LJ 4	197
Gráfico 9-33 Evolução da Contraflecha em LJ 5	198
Gráfico 9-34 Evolução da Contraflecha em LJ 6	198
Gráfico 9-35 Evolução da Contraflecha.....	199

1. Introdução

As estruturas de concreto pré-fabricado vêm ganhando espaço no mercado competitivo em virtude de benefícios como a garantia do controle de qualidade, velocidade de construção, redução dos desperdícios e organização do canteiro de obras. Dentre os elementos, a laje alveolar em concreto protendido é um dos produtos mais avançados e com alto grau de industrialização na indústria de concreto pré-fabricado e têm culminado em grande crescimento de utilização devido a sua versatilidade. São eficientes componentes para pavimentos e para a vedação lateral em construções comerciais e industriais, podendo ser apoiadas sobre estrutura de concreto pré-fabricado, moldado no local, estruturas metálicas e alvenaria estrutural. A diversidade fez com que tenha aumentado consideravelmente no mundo todo a sua utilização como solução para pisos em construções mistas, sendo bem conhecidas como sistema de produção de edificações com larga escala de repetição.

As lajes alveolares protendidas pré-fabricadas possuem como características essenciais os alvéolos (que são vazios longitudinais) e cordoalhas de protensão como única armadura presente. Podem variar na seção transversal e no método de produção – por forma extrusora ou forma moldadora – e surgiram da necessidade da redução do peso próprio do elemento, com redução do custo de fabricação e conseqüentemente o preço de venda. Possuem um alto custo inicial com maquinário e a produção têm grande produtividade por ser em sua maior parte automatizada, este sistema é caracterizado pela rapidez de execução e montagem, se torna competitivo por vencer grandes vãos com uma altura de seção reduzida devido a ajuda da armadura protendida e possuir em sua estrutura alvéolos que diminuem o peso da laje, a montagem é rápida e elimina a necessidade de escoramento. Com a demanda de mercado em alto volume de lajes concretadas, esta competitividade se torna maior, pois nesse sistema há a racionalização de materiais, redução no volume de concreto e aço e economia de formas para o fabricante.

Ainda é pouca a existência de literatura nacional e pequeno o número de profissionais com conhecimento sobre o assunto que se responsabilizem pelo dimensionamento e comportamento desse tipo de laje. O processo de fabricação é baseado em processos internacionais provenientes principalmente da Europa e Estados Unidos, com equipamento importado e com concreto adaptado as condições de trabalho dessas máquinas. O estudo desta laje vem se intensificando nos últimos anos, foi publicada em 2002 a primeira versão da ABNT NBR 14861 – Laje pré-fabricada (Painel alveolar de concreto protendido – requisitos) que tratava apenas do recebimento e utilização das lajes alveolares. Até então não existiam documentos nacionais que regulamentavam a produção e controle de qualidade desses elementos, sendo bem recente a primeira revisão da norma oficial brasileira que conferiu tais

características, a ABNT NBR 14861 (2011) - Lajes Alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Destaca-se por sua vez a identificação de uma necessidade de nova revisão e aprimoramento da mesma para que aborde ensaios não destrutivos, visto que a referida norma não permite a realização por não se possuir estudos conclusivos e suficientes.

O objeto de estudo deste trabalho será a obtenção de conformidade do projeto em ambiente fabril através da realização de ensaio não destrutivo de prova de carga em lajes protendidas pré-fabricadas. Este procedimento de prova de carga apresentado no trabalho se baseia na ABNT NBR 9062 (2017) – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – item 5.5 – Projeto Acompanhado por verificação experimental, item 5.5.1, o qual diz que parte do procedimento de projeto pode ser executado com base em verificações experimentais e onde a economia pode resultar de ensaios em protótipos. Neste caso se trata de economia de materiais, transporte e tempo, uma vez que pode se adotar para certas situações a verificação da conformidade do elemento de laje alveolar sem a necessidade de rompimento e inutilização da peça.

1.1 JUSTIFICATIVA

O controle tecnológico e de qualidade de elementos pré-fabricados é rigoroso. Em lajes alveolares é necessária a realização de ensaios de cisalhamento e flexão que identificam o comportamento estrutural e as resistências últimas suportadas pelo elemento, que pode variar muito a depender das características geométricas e força de protensão aplicadas em cada elemento. A ABNT NBR 14861 (2011) de lajes alveolares pré-moldadas em concreto protendido não permite a realização de ensaios na fábrica para verificar se as lajes estão em conformidade com o projeto, devido à falta de informações acerca do assunto e sendo necessária a realização dos ensaios em laboratório conforme as prescrições contidas nos boletins FIB (1992), FIP (2002), EN 1168 (2005) e ABNT NBR 14861 (2011), para a verificação dos requisitos a serem atendidos. Com o intuito de reduzir o desperdício de material com ensaios destrutivos a cada lote de produção de lajes alveolares, este trabalho aborda uma vertente da realização no ambiente fabril do ensaio não destrutivo de prova de carga em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, para análise do atendimento das peças quanto ao projeto, tendo em vista que diminuirá a frequência de realização de ensaios destrutivos em laboratório e conseqüentemente reduzirá o desperdício de materiais com a inutilização das peças. O custo e tempo envolvidos com transporte até o laboratório, realização dos ensaios e liberação das lajes para utilização também serão reduzidos.

A contribuição deste trabalho aborda uma etapa a mais no processo de controle de qualidade de lajes alveolares, onde existe primeiramente a verificação por inspeção visual de fissuras nos elementos, escorregamento de cordoalhas e contraflecha para verificação da conformidade dos parâmetros da peça com o projeto, passa pela etapa de inspeção dos insumos utilizados, devidamente caracterizados, e uma etapa de validação com ensaio não destrutivo em ambiente fabril para verificação ao atendimento do ELS e observação quanto ao comportamento estrutural da laje para que apenas em caso de divergência para lajes com comportamentos conhecidos, sejam realizados os ensaios destrutivos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estruturar procedimento para controle da qualidade de lajes alveolares envolvendo ensaio não destrutivo, inspeções visuais e caracterização geométrica para verificação da conformidade do produto com o projeto. Com os objetivos específicos:

1. Estruturar procedimento não destrutivo para avaliar em ambiente fabril o desempenho da laje alveolar protendida;
2. Contribuição de estudo para avaliação de desempenho estrutural de lajes alveolares protendidas para manter o controle da qualidade e visando proporcionar informações para normalização.

1.3 COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido em dez capítulos:

No Capítulo 1 é apresentado a introdução ao assunto, justificativa e objetivos;

No Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica com principais considerações sobre o comportamento das lajes alveolares, englobando a descrição dos mecanismos de funcionamento e ancoragem;

No Capítulo 3 é feito o desenvolvimento do trabalho, com considerações de cálculo, verificações em laje alveolar e controle de conformidade do produto em ambiente fabril;

No Capítulo 4 é demonstrado os materiais e métodos utilizados nos ensaios realizados;

No Capítulo 5 é feita uma revisão a respeito da caracterização de agregados;

No Capítulo 6 é demonstrada a Caracterização do concreto;

No Capítulo 7 é apresentada a Caracterização das Lajes;

No Capítulo 8 é relatado programa experimental;

No Capítulo 9 é analisado os resultados;

No Capítulo 10 é feita a conclusão.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 SISTEMA E PRODUÇÃO

Historicamente, as primeiras construções que utilizaram grandes elementos pré-fabricados surgiram na Europa, o que resultou no Brasil, Estados Unidos e Canadá passarem a ser influenciados pela cultura europeia de construção utilizando esta metodologia (FERNANDES, 2007). A partir da década de 60 começaram a surgir associações/comissões de estudo no sistema de pré-fabricados e lajes alveolares, atuando fortemente até a atualidade e sendo as principais associações de lajes alveolares pré-fabricadas com estudos e desenvolvimento de pesquisas pelo mundo:

- British Standards Institution (BSI – Europa)
- Fédération International du Béton (FIB – Europa)
- Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI – EUA)
- National Precast Concrete Association (NPCAA – Australia)

No Brasil não existiu uma política de desenvolvimento tecnológico para o setor da construção industrializada até a década de 90, na qual empresários passaram a se interessar no avanço da industrialização através da redução de custos e maior agilidade de execução. Por este motivo, a utilização de pré-fabricados é mais expressiva em construções industriais, comerciais e no setor hoteleiro, onde os investimentos são elevados e possuem necessidade rápida de retorno de capital (FERNANDES, 2007).

Os elementos pré-fabricados – elementos fabricados fora do canteiro de obra – oferecem vantagens para que esse modo de edificar ganhe espaço na construção civil. Com o avanço da verticalização e de pequenos canteiros de obra, se mostra vantajosa a utilização destes elementos que chegam na obra para serem montados/encaixados nas estruturas existentes, permitindo o aumento da velocidade de execução da estrutura e da obra, tendo em vista a maior capacidade de ocupação do canteiro de obras com outros materiais utilizados e maior liberdade de movimento nos pavimentos, já que o sistema de laje alveolar pretendida pré-fabricada permite a eliminação de escoramento e a pré-fabricação também reduz o tempo de execução “*in loco*” da obra.

Destaca-se para construções pré-moldadas a simplicidade de produção, a padronização dos procedimentos e a elevada qualidade dos produtos, as estruturas pré-fabricadas permitem elementos mais esbeltos e o uso otimizado de materiais quando se trata

de eficiência estrutural. Estas características devem-se ao trabalho em ambiente industrial de forma padronizada e conseqüente redução de custos, com a utilização de equipamentos mais sofisticados para a fabricação das peças, de formas de elevada qualidade e ao emprego de mão-de-obra qualificada (BARBIERI; GASTAL, 2000). A pré-fabricação de elementos de concreto tem buscado oferecer economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho aos operários (FERNANDES, 2007).

Na Tabela 2-1 são destacadas as vantagens e desvantagens das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens das lajes alveolares protendidas

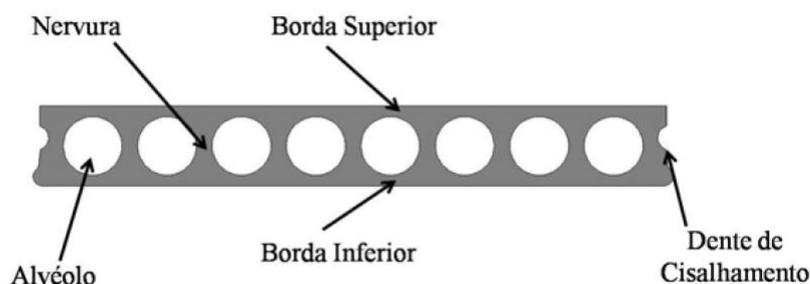
Vantagens	Desvantagens
Aplicações variáveis, como pisos, forros e paredes;	Inflexibilidade em projetos devido a largura padrão e recortes;
Alta produção com mão de obra reduzida;	Resistência à flexão transversal limitada;
Bom acabamento na face inferior;	Diferentes deformações;
Peso próprio reduzido;	Requer equipamentos especiais para produção e manuseio;
Ótima relação peso/ carregamento devido a protensão;	Alto custo inicial de equipamentos;
Bom isolamento térmico e acústico;	
Vencem grandes vãos;	
Dispensam escoramentos e formas	
Plataforma de trabalho imediata	

Fonte: Adaptado de Petrucelli (2009)

O elemento pré-fabricado é definido pela ABNT NBR 9062 (2017) como o elemento que é executado fora do local de utilização definitivo da estrutura, produzido em usina ou instalações análogas e que disponham de pessoal, laboratórios e controle de qualidade permanente, abrangendo pelo menos as seguintes etapas: formas, armadura, mistura, lançamento de concreto, armazenamento, transporte e montagem. A ABNT NBR 14861 (2011) define laje alveolar como peça de concreto produzida industrialmente e fora do local de utilização definitiva, por se tratar de um elemento pré-fabricado. Possui como características uma armadura longitudinal ativa que engloba totalmente a armadura inferior de tração, possui seção transversal com presença de almas de concreto e alvéolos e ausência de armadura transversal de cisalhamento.

De acordo com a norma europeia EN 1168 – *Precast Concrete products: Hollow Core Slabs* (2005), laje alveolar é um elemento monolítico que pode ser protendido ou armado, com espessura total constante e dividida em um flange superior e outro inferior, com ligação de nervuras verticais que consistem alvéolos vazios longitudinais na seção transversal conforme Figura 2-1.

Figura 2-1: Detalhe da seção transversal



Fonte: Costa (2009)

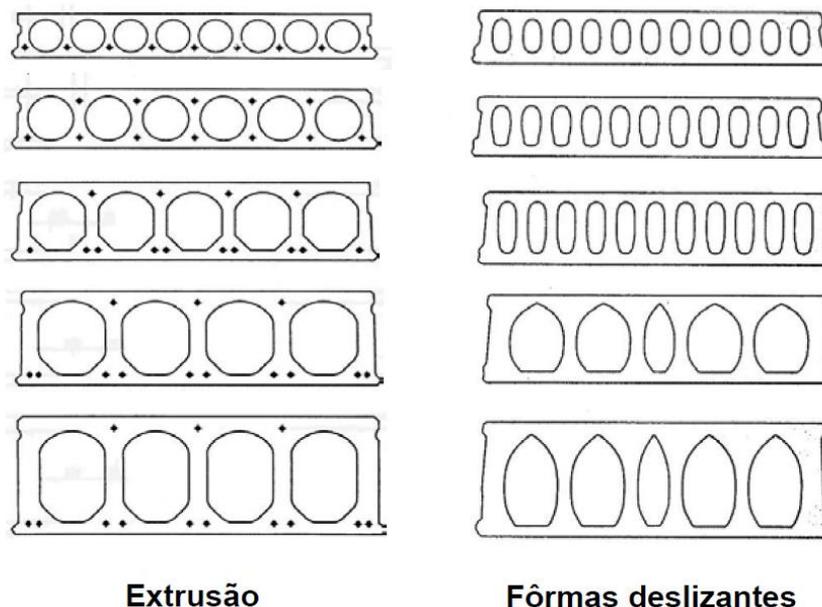
As lajes são responsáveis pela captação de todo o carregamento vertical dos pavimentos e transmiti-los respectivamente para vigas, pilares e fundação. Em edifícios altos, distribuem os esforços horizontais entre os pilares da edificação e agem como um diafragma entre os pavimentos (FERNANDES, 2007).

Este sistema de laje é constituído de seção transversal de concreto com alvéolos (núcleos vazios) que reduzem o peso da estrutura, possui cordoalhas de protensão como única armadura presente, sendo responsáveis por aumentar a capacidade portante, reduzir deslocamentos verticais, diminuir a fissuração do concreto, de fácil instalação e capazes de cobrir grandes vãos. As cordoalhas podem estar dispostas tanto nas fibras inferiores como nas superiores, a depender da solicitação de cada peça, sendo responsáveis pelo suporte aos esforços no sentido longitudinal e o concreto pela resistência à tração no sentido transversal, considerando a não existência de armadura nesta direção (PETRUCELLI, 2009).

A fabricação deste tipo de laje possibilita a utilização da protensão em bancada, ou seja, cordoalhas pré-tracionadas, sendo uma técnica simples, que emprega perfis retos para as armaduras e com protensão de aderência inicial (BARBIERI; GASTAL, 2000). Podem existir variações na seção transversal.

As principais características que diferem cada tipo de variação são: a altura, largura, quantidade de cordoalhas e o formato dos alvéolos, que é definido de acordo com o tipo de máquina utilizada no processo produtivo, podendo, por exemplo, ser oval quando utilizada a forma deslizante ou circular no caso de uma extrusora, conforme Figura 2-2 (COSTA, 2009).

Figura 2-2: Exemplos de seções transversais dos elementos de laje alveolar



Fonte: Costa (2009)

A diferença no formato dos alvéolos ocorre em função do equipamento utilizado no sistema de produção. Os formatos podem ser: circular, oval, ogival, semi-ogival ou retangular e na produção podem ser utilizados formas convencionais com tubos sacados ou com forma perdida.

A protensão proporciona a redução na espessura da laje e os vazios reduzem o peso próprio do pavimento, sendo que a porcentagem da área vazia na seção transversal pode variar entre 30 e 50% (FERREIRA, 2003). A superfície inferior das lajes possui qualidade do acabamento que permite a sua utilização sem nenhum tratamento em vários tipos de edificação e possui boas características termo acústicas (BARBIERI; GASTAL, 2000). O fato de ser considerado um produto industrializado envolve um baixo número de horas/homem. Caso seja necessária intervenção manual, algum recorte ou reforços nos alvéolos da laje, este eleva bastante seu custo de produção (COSTA, 2009).

As lajes alveolares protendidas são utilizadas para vãos entre 4 e 20 m e possuem geralmente largura nominal de seção de 1,2 m (padrão europeu) e 1,25 m (padrão EUA), que pode variar dependendo do projeto. A largura real da laje é geralmente de 3 a 6 mm menor que a dimensão nominal para permitir ajustes construtivos e para prevenir excessos quando instaladas no pavimento, devido ao acréscimo acumulativo de possíveis discrepâncias.

Usualmente, a altura deste tipo de laje é entre 10 cm a 40 cm, mas há registro de empresas que fabricam lajes com 50 cm de altura na Itália. A capacidade de carga de utilização suportada é superior a 30 kN/m² e no comércio desse tipo de laje existe

normalmente um fator limitante no comprimento devido aos veículos que transportam lajes com no máximo 12,5 m e em capacidade de carga de equipamentos de içamento de no máximo 200 kN (FERNANDES, 2007).

Os métodos utilizados na produção de lajes alveolares protendidas são dois: através de máquinas extrusoras (Figura 2-3a) ou moldadoras de forma deslizante (Figura 2-3b). Ambos os sistemas são rápidos na execução e montagem, no sistema de extrusão o concreto é bombeado pelo equipamento e comprimido nas paredes do molde, enquanto na máquina moldadora de forma deslizante, a fabricação ocorre através de camadas, sendo que o concreto é lançado e compactado pela máquina em dois ou quatro estágios e a compactação é realizada por vibradores externos (COSTA, 2009).

Figura 2-3: Máquinas de produção de laje alveolar



a) Máquina extrusora

Fonte:
[https://www.nordimpianti.com/Produtos/Extrusora-Série-EVO](https://www.nordimpianti.com/Produtos/Extrusora-Serie-EVO). Acesso em: <20 set. 2019>.



b) Máquina moldadora

Fonte:
[https://www.nordimpianti.com/Produtos/Moldadora-Série-SF](https://www.nordimpianti.com/Produtos/Moldadora-Serie-SF). Acesso em: < 20 set. 2019>.

As lajes feitas de forma extrusiva apresentam melhor qualidade final com alto grau de compacidade, tendo em vista que a relação água/cimento utilizada no sistema de extrusão é da ordem de 0,3 a 0,4, muito baixo e próximo ao necessário para a hidratação do cimento, o que garante altas resistências do concreto que variam de 50 a 75 MPa para resistência a compressão e 4 a 7 MPa para resistência à tração. Já no sistema de forma deslizante a relação água/cimento é maior e conseqüentemente a resistência à compressão menor, as empresas costumam ter sua própria usina de concreto para maior controle da qualidade e

este concreto possui parâmetros não usuais que merecem atenção ao moldar corpos de prova, não sendo possível a realização do ensaio *slump test*, a ABNT NBR 6118 (2014) – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento fornece parâmetros de ensaios para este caso.

O sistema pode adotar processos de cura variados, podendo ser cura a vapor, cura térmica ou cura simples, devendo em todos os casos ser bem controlado para que se garanta a qualidade final da laje. Vale destacar que os processos de cura a vapor e térmica são acelerados e mais indicados para a liberação da protensão e da pista mais rapidamente (PETRUCELLI, 2009). A resistência mínima do concreto deve ser respeitada para que na liberação da protensão não ocorra o escorregamento da armadura e para se evitar problemas de tração nas lajes.

As lajes alveolares protendidas possuem um alto grau de industrialização e são parte de um processo linear no qual o produto é fabricado de forma contínua em pistas de protensão com comprimentos variáveis e geralmente da ordem de 150 a 200 m de comprimento, a depender do comprimento da pista e quantidade de pistas, é possível produzir até 500 m² de laje por dia. Os comprimentos das lajes definidos em projeto são marcados nas pistas durante a concretagem, e após a cura são cortados e estocados, ou transportados para a obra. O ciclo de produção envolve a preparação das pistas de concretagem com limpeza e aplicação do desmoldante, posicionamento dos cabos de protensão e realização da pré-tração, lançamento do concreto através da máquina extrusora ou moldadora, marcação dos pré-cortes e possíveis recortes, endurecimento e cura do concreto, liberação da protensão e cortes das lajes, içamento e estocagem.

Ao final do ciclo de produção é feita a estocagem do material e/ou transportado até a obra. A montagem é feita rapidamente com a utilização de guindastes, onde as lajes são posicionadas, niveladas, é feito o grauteamento das chavetas, instaladas as telas soldadas e concretada uma capa de no mínimo 5 cm de espessura (PETRUCELLI, 2009). A execução da capa de concreto moldada no local não é obrigatória, a depender do dimensionamento da estrutura, porém a opção com capa é a mais utilizada no Brasil, sendo assim, as lajes devem conter ranhuras na superfície superior para que possa ser garantida a boa aderência no momento da concretagem na obra. As etapas do ciclo de produção são elencadas na Figura 2-4 a-j.

Ao longo do comprimento as bordas laterais das peças são frisadas para assegurar a transferência do cisalhamento vertical entre os elementos da laje, essas chavetas devem ser grauteadas na instalação das lajes e possuem como função o intertravamento longitudinal das peças, passando a laje solidarizada do pavimento a atuar como uma parede. As ações

verticais além de serem absorvidas pelo apoio, passam também em parte pelas chaves de cisalhamento criadas.

Figura 2-4: Ciclo de produção de laje alveolar



a) Proteção das cordoalhas para aplicação do desmoldante



b) Posicionamento do macaco de protensão isolada



c) Pré-corte da laje



d) Cura com lona térmica

Fonte: Petrucelli (2009)

Figura 2-4: Ciclo de produção de laje alveolar (continuação)



e) Corte da laje após liberação da protensão



f) Içamento das lajes através do sistema de garras e balancins



g) Estocagem das lajes na fábrica



h) Içamento de uma laje alveolar para posicionamento na obra



i) Posicionamento dos painéis



j) Nivelamento das lajes e grauteamento das chaves de cisalhamento

Fonte: Petrucelli (2009)

2.2 DIFERENÇAS ENTRE AS CARACTERÍSTICAS

As lajes alveolares produzidas no Brasil possuem características diferentes quando comparadas com as produzidas na Europa e Estados Unidos. As espessuras comuns no Brasil variam entre 150 e 300 mm enquanto nos EUA e Europa as espessuras variam entre 265 e 500 mm (CATOIA, 2011). A menor altura das lajes no Brasil influencia para que sejam necessárias maiores porcentagens de armadura de protensão, comparadas às lajes de mesmos vãos e carregamentos e utilizadas nos países supracitados. A grande diferença de espessura entre os modelos se baseia na exigência de projetos arquitetônicos e pelo tipo de ação externa existente, como por exemplo a possibilidade de abalos sísmicos em alguns países (FERREIRA *et al*, 2008).

Na Europa se utilizavam lajes de 200 mm e 265 mm de espessura e com alvéolos circulares. Ao passar dos anos foram substituídas por lajes mais espessas, entre 320 mm e 500 mm e com alvéolos não circulares. A ideia se baseava em elevada porcentagem de vazios, otimizando o peso da peça para essas lajes mais espessas, porém passou-se a evidenciar elementos de ruptura frágil e uma tensão de cisalhamento inicial próximo aos apoios. A resistência ao cisalhamento também é menor que as calculadas pelos métodos da ACI e Eurocode EC2 (BRUNESI *et al*, 2015).

Na concepção de lajes alveolares com alturas maiores, são aplicadas forças de protensão menores, conseqüentemente é menor a tensão de tração na nervura quando comparado a peças produzidas no Brasil. Outra comparação é que lá fora não é comum o preenchimento dos alvéolos antes da liberação da protensão, enquanto no Brasil é uma prática comum, possibilitando que a maior seção receba as tensões de protensão e evitando que sejam causadas tensões de tração excessivas. Essas diferenças nas lajes prejudicam a utilização de mesmos critérios para a avaliação dos elementos, sendo que os cálculos teóricos das lajes alveolares no Brasil consideram a presença de uma capa de concreto com espessura média de 50 mm estabelecendo uma seção composta e contribuindo para o aumento da resistência à flexão e ao cisalhamento. Pelo exposto, os mecanismos resistentes críticos que estão presentes nas lajes de maior altura não serão sempre compatíveis com as situações de projeto existentes no Brasil, sendo necessária a realização de ensaios em lajes tipicamente brasileiras para melhor entendimento do funcionamento das mesmas (FERREIRA *et al*, 2007).

O Manual da FIB (2000) apresenta equações para resistência ao cisalhamento, nas situações de laje alveolar com/sem capa de concreto e sem/com preenchimento dos alvéolos. São as mesmas equações que são obtidas na ABNT NBR 14861 (2011).

Sabe-se que as características geométricas, número e diâmetro das cordoalhas, força de protensão, tamanho do vão e resistência do concreto alteram o comportamento das lajes próximo a ruptura. A EC2-Commentary (2008) observa que na equação para lajes sem capa, para classes de concreto de menor resistência os resultados obtidos não possuem muitas discrepâncias, mas que para classes de maior resistência a diferença nos resultados se torna muito superior. Também é citado que a origem da equação é para cálculo de vigas que rompem por cisalhamento com flexão, e não é válida para as lajes da Europa, que pelas suas características geométricas geralmente rompem por tração devida ao cisalhamento.

2.3 MECANISMOS DE RUPTURA

As lajes alveolares precisam ser verificadas se estão de acordo quanto ao projeto de forma que funcionem adequadamente e para evitar o colapso. Existem diversos estudos quanto aos mecanismos de ruptura deste tipo de laje e os mesmos identificaram que a laje alveolar é bastante influenciada pela geometria da peça, nível de protensão, pelas resistências à tração e compressão do concreto e pelo nível de aderência entre o concreto e a armadura ativa. É necessária inclusive atenção a parâmetros que caracterizam os itens supracitados, como espessura das nervuras, formato dos alvéolos, altura da laje e perdas de protensão inicial e ao longo do tempo. O comportamento das lajes alveolares é simplificado no cálculo teórico onde se admite que elas atuam como vigas simplesmente apoiadas e sem tensão causada por momento fletor negativo e momento torsor, porém essa suposição se torna difícil de descrever o comportamento em casos de aberturas na laje e faz-se inadequado para lajes contínuas com ligações rígidas nos apoios (EDEKLING; RETTNE, 2006).

O estudo de Costa (2009) sintetiza os diversos mecanismos de ruptura que lajes alveolares protendidas podem sofrer e a autora define estes como mecanismos de comportamento próximo ao colapso. Estas lajes podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura, sendo que podem ocorrer mais do que um quando a peça está próxima ao colapso. Costa (2009) cita os seguintes como mecanismos de ruptura, entre os diversos existentes, para lajes alveolares protendidas:

- a) Falha por perda da ancoragem (escorregamento da armadura);
- b) Falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência de tração do concreto);
- c) Falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento);
- d) Falha por cisalhamento combinado com torção (em peças que não são planas);

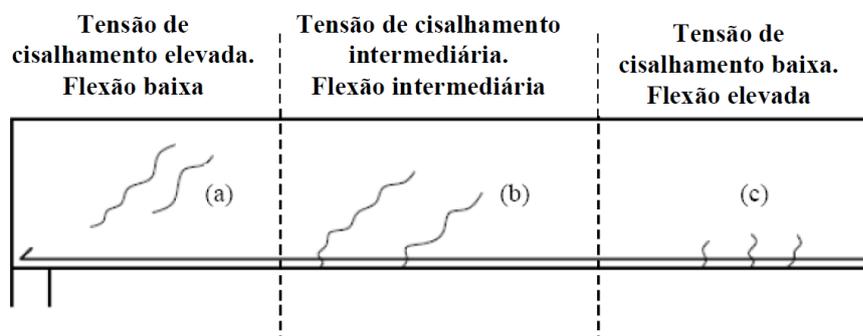
- e) Falha por flexão (ELU), com grande possibilidade, próximo à ruptura, do escorregamento da armadura ativa junto ao apoio;
- f) Falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento, que pode ocorrer em peças com vãos pequenos e/ou com carregamentos mais elevados;
- g) Falha por combinação de flexão e escorregamento da armadura ativa;
- h) Separação da capa de concreto com o elemento pré-fabricado.

As características dos mecanismos de ruptura são observadas pela inclinação e extensão das fissuras. No geral, as fissuras possuem uma interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento e assim são denominadas. O mecanismo de ruptura nem sempre é bem definido, sendo resultado da interação ou combinação de mecanismos. Kong e Evans (2001) concluíram que o modo de ruptura é fortemente dependente da relação entre o vão submetido ao cisalhamento (a_v) e a altura efetiva da laje (d).

Há três diferentes configurações de fissuras: de flexão, de cisalhamento e de flexo-cortante.

- Próximo ao apoio ocorrem fissuras inclinadas de cisalhamento na nervura. Neste ponto o cisalhamento é maior e o momento quase nulo; (Figura 2-5a)
- Nas regiões intermediárias, as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento; (Figura 2-5b)
- Nas regiões centrais é mais comum a incidência de fissuras verticais de flexão. Na região central o momento é mais elevado e o cisalhamento reduzido. (Figura 2-5c).

Figura 2-5: Fissuras no elemento de concreto protendido



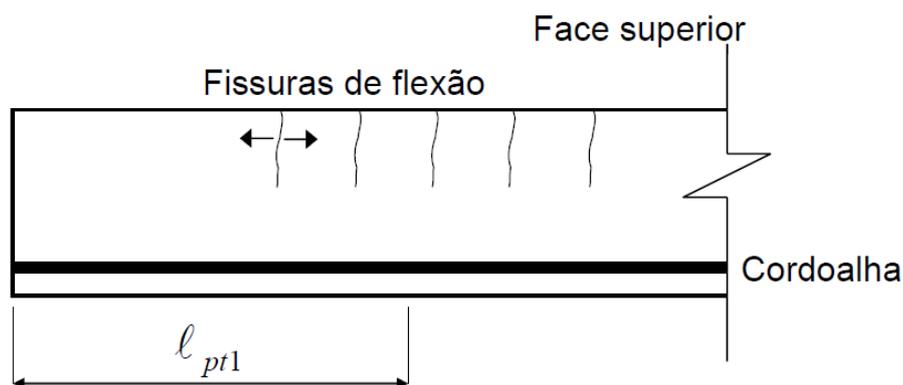
Fonte: Rettne e Edkling (2006)

2.3.1 MECANISMOS DE RUPTURA DEVIDOS À FLEXÃO EM LAJES ALVEOLARES

Para lajes alveolares protendidas, o procedimento de projeto em relação a ruptura por flexão é similar ao utilizado em vigas maciças protendidas onde a tensão de tração no Estado Limite Último é tradicionalmente suportada pela armadura (YANG, 1994). Quando a carga concentrada na laje é aplicada a uma distância do apoio $a_v/d > 6$, a ruptura tende a ocorrer por flexão (KONG; EVANS, 2001). Os mecanismos de ruptura devidos à flexão, podem ocorrer devido a um mecanismo ou combinação dos que são elencados (EDEKLING; RETTNE, 2006):

- Ruptura por tração na face superior da laje devida a protensão (Figura 2-6), quando esta não possui armadura e que é caracterizada pelo aparecimento de fissuras junto a borda superior e próximas ao apoio. Este tipo de ruptura ocorre apenas no momento da liberação da protensão na fábrica, quando é retirada a ancoragem dos cabos protendidos e ultrapassando a resistência do concreto à tração;
- Fissuração por tração na face inferior quando o momento positivo é superior ao momento de fissuração e ultrapassa a resistência do concreto à tração (Figura 2-7);
- Ruptura das cordoalhas por tração devida à solicitação da peça por flexão;
- Ruptura do concreto à compressão devida à solicitação por flexão;
- Deformação excessiva da laje.

Figura 2-6: Fissuras de tração na face superior devido a protensão



Fonte: Costa (2009)

Figura 2-7: Fissuras de flexão em elementos de laje alveolar



a) Fissura

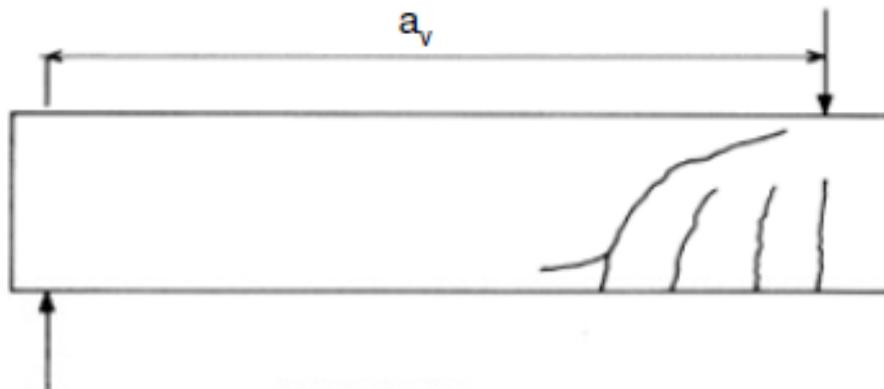
b) Ruptura

Fonte: Catoia (2011)

Fissuras de flexão podem se propagar em forma de fissura diagonal caso o cisalhamento seja significativo, quando os ensaios de flexão são realizados com aplicação de carga concentrada e a depender do comprimento da laje, se tornando um mecanismo de ruptura combinado de flexo-cisalhamento. Caso essa região esteja longe do apoio e com uma condição de ancoragem razoável, é provável que a fissura diagonal avance em direção à face superior da laje e ocorrendo ruptura por compressão do concreto.

Já nos casos de um vão de comprimento pequeno, o mais provável é que se desenvolva uma fissura de fendilhamento a partir do encontro da fissura de flexão com a fissura diagonal (Figura 2-8) (CATOIA, 2011).

Figura 2-8: Interação de fissuras de cisalhamento e flexão



Fonte: Catoia (2011)

2.3.2 MECANISMOS DE RUPTURA DEVIDOS AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES

Segundo a ABNT NBR 14861 (2011), os mecanismos de ruptura de uma laje alveolar para a resistência às tensões de cisalhamento podem ocorrer quando a tensão de cisalhamento supera a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo e quando a tensão de cisalhamento se combina com as tensões de tração oriundas da protensão ou da flexão da peça.

As rupturas por cisalhamento são bruscas e ocasionadas pela combinação de forças cortantes e momentos fletores, caracterizadas por pequenas flechas e falta de ductilidade. É dificultosa a verificação da resistência de elementos de concreto armado ao cisalhamento por não possuir uma teoria geral aceita, o que torna problemática a previsão dessa resistência no caso das lajes alveolares protendidas (CATOIA, 2011).

O método de produção das lajes alveolares não permite o emprego de armadura de cisalhamento, principalmente o método de extrusão. A proporção de vazios na seção da laje torna suscetível à ruptura por cisalhamento e o fato da protensão necessitar de um comprimento de transferência causa tensão adicional de força cortante na região de transferência, que é próxima aos apoios.

Os mecanismos de falha devidos ao cisalhamento são os seguintes:

- Falha da nervura por tração devida ao cisalhamento;
- Fissuração do concreto devido à interação de cisalhamento e flexão;
- Falha por compressão no concreto devida ao cisalhamento;
- Falha por escorregamento devido ao cisalhamento ao longo de uma fissura inclinada;
- Falha de ancoragem dos cabos;
- Fissura longitudinal.

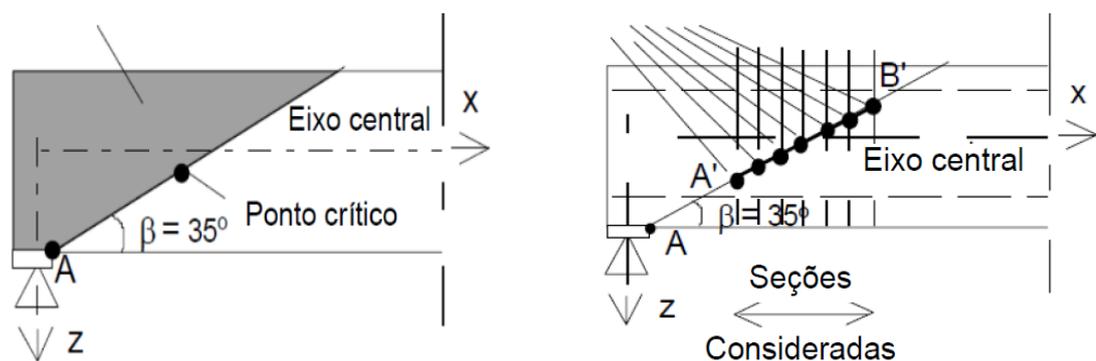
a) Falha da nervura por tração devida ao cisalhamento

Quando a tensão de tração alcança a resistência do concreto à tração, pode ocorrer uma fissura inclinada na região da nervura, que se propaga nos dois sentidos e resulta em uma ruptura imediata. Essa fissura é formada na região onde termina a influência da tensão normal causada pela reação de apoio, o qual é o mesmo ponto onde a força de protensão ainda não se desenvolveu totalmente.

Yang (1994) identificou que a posição mais crítica de cisalhamento está próxima ao apoio, ao longo de uma linha inclinada em 35° com o eixo horizontal (Figura 2-9a). Acima desta linha, a falha por tração devida ao cisalhamento não é crítica devido a influência de tensão de compressão vertical próxima ao apoio. Para cada caso de carregamento, a tensão principal tem seu valor máximo determinado (ponto crítico) e devem ser verificados os pontos considerados dentro do intervalo A' -B' (Figura 2-9b). Pela variação da carga é determinada a resistência contra a falha por cisalhamento da nervura, sendo que a posição do ponto crítico pode variar para seções com alvéolos circulares e misulados. A fissura na parte da nervura próxima ao apoio pode conduzir à ruptura à tração por cisalhamento devido as nervuras serem estreitas e a laje alveolar não possuir armadura de cisalhamento (CATOIA, 2011).

Edekling & Rettne (2006) realizou uma análise paramétrica em modelagem computacional e utilizando o método de Yang (1994) mostrou que a localização do ponto crítico se movia para longe do apoio e a capacidade reduzia a longo prazo, assim como a perda de protensão possui grande influência na localização do ponto crítico enquanto um aumento da força de protensão inicial possui pouca influência. A ideia de que o ponto crítico é localizado ao longo de uma linha com 35° de inclinação também não foi apropriada para a análise a longo prazo, a recomendação então passa a ser de que ao utilizar o método de Yang para tensão de cisalhamento se utilize 35° de inclinação para o curto prazo, combinado com um comprimento de transferência curto e 25° de inclinação para longo prazo combinado com um comprimento de transferência longo.

Figura 2-9: Posições críticas no cisalhamento próximo ao apoio



a) Possível localização do ponto crítico na região afetada pela reação de apoio

b) Seções consideradas nos cálculos

Fonte: Pajari (2005)

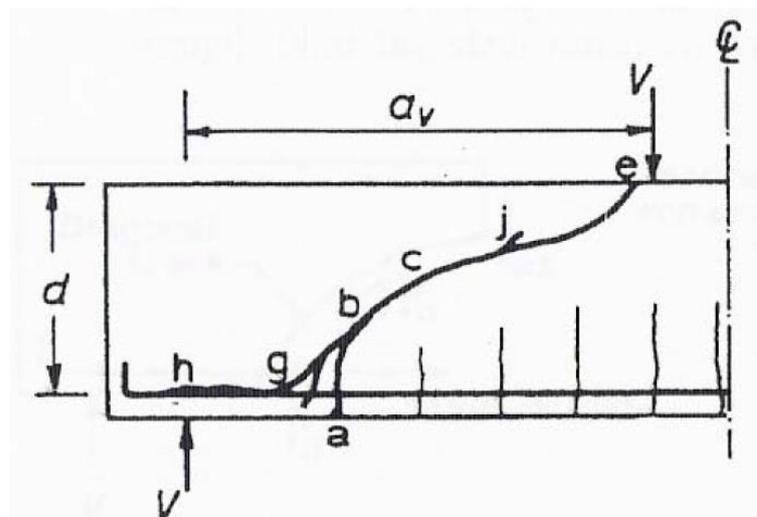
b) Fissuração do concreto devida à interação de cisalhamento e flexão

O ponto crítico é onde a tensão de cisalhamento é máxima, ele se encontra próximo aos apoios e são regiões com zona de perturbação devido a força de protensão transferir ao concreto tensões de aderência. Quando um elemento protendido é submetido a esforços de flexão e cisalhamento, ele pode apresentar separadamente fissuras de flexão (predominante na região central da peça onde os momentos são mais elevados e o cisalhamento é reduzido), fissuras de cisalhamento (predominante próximo aos apoios onde o cisalhamento é maior e o momento quase nulo), e uma combinação entre os dois tipos de fissura que ocorre em região entre as fissuras isoladas, nessa região intermediária as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento (CATOIA, 2011).

Quando a carga concentrada é aplicada a uma distância de $6 > a_v / d > 2,5$ do apoio, a tendência de falha é por cisalhamento e existe a interação com fissuras de flexão. (KONG; EVANS, 2001)

Na Figura 2-10 ocorre que, com o aumento da força V , a fissura vertical a-b tende a se tornar inclinada e se propaga em direção ao ponto de aplicação da força, a junção da fissura vertical com a fissura inclinada é conhecida como fissura de cisalhamento e flexão (pontos a-b-c). Quanto maior a relação a_v / d , mais rapidamente a fissura se estenderia até o ponto “e” e causando ruptura em dois pedaços que é denominado ruptura por tração diagonal, se a relação a_v / d for baixa a fissura tende a parar próximo ao ponto “j”.

Figura 2-10: Seção em que $6 > a_v/d > 2,5$



Fonte: Kong & Evans (2001)

A fissura diagonal é ampliada e se propaga em direção ao ponto g-h, no nível da armadura de tração conforme a força V é aumentada, assim como pode ocorrer um número de fissuras aleatórias em torno da armadura longitudinal de tração e causar a perda de

aderência entre concreto e aço. Se não houver gancho na extremidade da armadura longitudinal, essa destruição da aderência somada ao fendilhamento do concreto causará colapso imediato. Caso existam os ganchos, o aumento da força destruirá o concreto existente ao redor do gancho, onde ocorre o colapso. Esse modo é chamado de ruptura por tração devida ao cisalhamento ou falha da ancoragem devida ao cisalhamento (CATOIA, 2011). A Figura 2-11 ilustra a ruptura em uma peça ensaiada ao cisalhamento com relação $a_v/d = 2,5$.

Figura 2-11: Ruptura em peça ensaiada a cisalhamento



Fonte: Costa (2009)

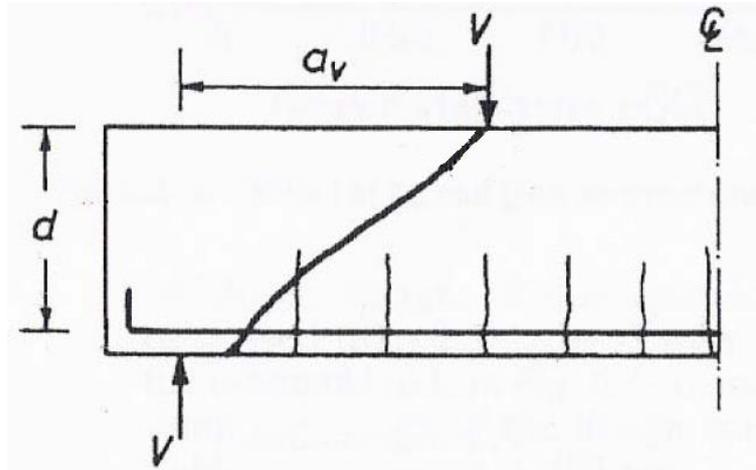
c) Falha por compressão no concreto devida ao cisalhamento

Este tipo de ruptura é praticamente impossível de ocorrer em lajes alveolares protendidas sem armadura de cisalhamento pois a ruptura da nervura por tração devida ao cisalhamento ocorre antes (YANG, 1994).

A ruptura por compressão devida ao cisalhamento se inicia quando a tensão de compressão na nervura alcança a resistência do concreto à compressão. Ela ocorre na região do concreto entre as fissuras inclinadas de cisalhamento e surge à medida que a tensão de compressão se eleva, somada a tensão de tração que é perpendicular a ela.

Para carga concentrada aplicada a uma distância em relação ao apoio de $2,5 > a_v/d > 1$ a fissura diagonal (Figura 2-12) se forma de maneira independente e não como continuidade de uma fissura de flexão (KONG; EVANS, 2001). Com o aumento da aplicação da carga a fissura diagonal aumenta e passa pelo estágio de penetração na zona de compressão do concreto até a falha por esmagamento do concreto, sendo estimado que a força última seja mais que o dobro daquela relativa à fissura diagonal (CATOIA, 2011).

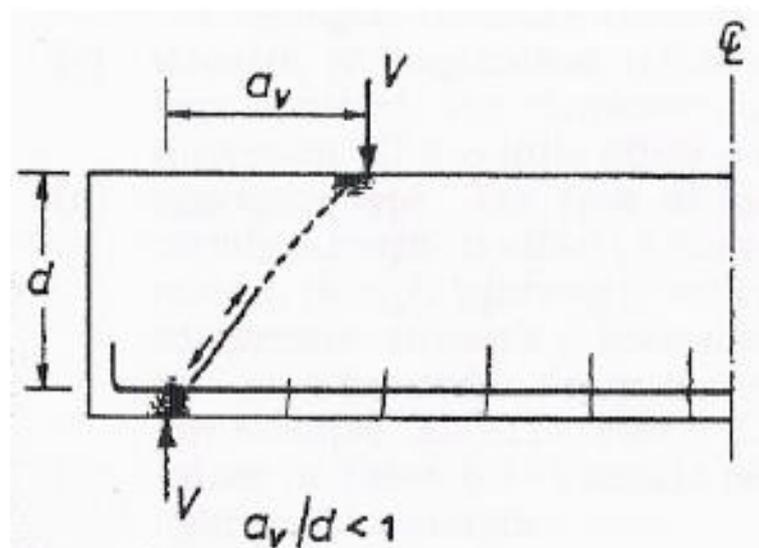
Figura 2-12: Fissura de cisalhamento com carga a $2,5 > a_v/d > 1$



Fonte: Kong e Evans (2001)

Em situações onde a carga concentrada é aplicada a uma distância do apoio $a_v/d < 1$, a fissura diagonal forma uma linha unindo os pontos de carregamento e de apoio (Figura 2-13) onde a força de compressão é transmitida diretamente do ponto de carregamento ao apoio, com o início da fissura acima da face inferior da viga em $d/3$ e se propagando em ambas as direções conforme aumento da força V . Quando a fissura alcança o ponto de carregamento ou ponto de apoio, ocorre a ruptura por esmagamento do concreto (KONG; EVANS; 2001).

Figura 2-13: Fissura de cisalhamento em que $a_v/d < 1$



Fonte: Kong e Evans (2001)

d) Falha por escorregamento devido ao cisalhamento

Ocorre em elementos de concreto sem armadura transversal quando o atrito, o efeito de intertravamento nas fissuras, o efeito do aço de protensão e efeito de pino na armadura

passiva são insuficientes para transferir o cisalhamento. No ensaio de flexão, após a formação das fissuras verticais e a depender do comprimento da laje, caso o cisalhamento na seção seja significativo, as fissuras de flexão podem se desenvolver em fissuras diagonais e ocorre a interação de mecanismos de flexão e cisalhamento. Se a região fissurada se encontra longe do apoio, a probabilidade é de que a fissura diagonal avance para a face superior da laje até que ocorra uma ruptura por compressão do concreto.

e) Falha de ancoragem dos cabos

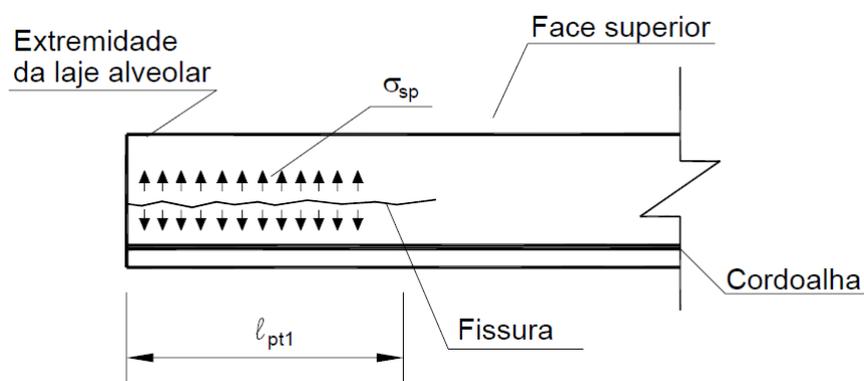
A falha de ancoragem ocorre predominantemente em peças pré-tracionadas do que em peças pós-tracionadas. Ocorre que na pré-tração a introdução da protensão causa tensões normais de tração ao longo de um trecho da cordoalha, piorando as condições de ancoragem. Nas peças com pós-tração existem dispositivos mecânicos específicos para a introdução do esforço de protensão.

A falha por ancoragem dos cabos pode ocorrer em duas situações, onde a primeira é relacionada a falha em regiões fissuradas por flexão por picos de tensão próxima a essas fissuras que ao ultrapassar a tensão de aderência máxima ocorre o escorregamento da cordoalha, a segunda provém da combinação de fissuras de cisalhamento com fissuras de flexão, onde pode ocorrer também uma fissura horizontal na região ao longo da armadura de protensão, que acaba com a aderência entre concreto e cordoalha, causando o escorregamento da armadura.

f) Fissura longitudinal

Ocorre a fissuração longitudinal (Figura 2-14) devido ao fendilhamento do concreto na região das nervuras nas extremidades da laje por altas tensões de protensão e acaba ocorrendo uma tração na direção perpendicular a protensão.

Figura 2-14: Fissura longitudinal devido ao fendilhamento do concreto



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

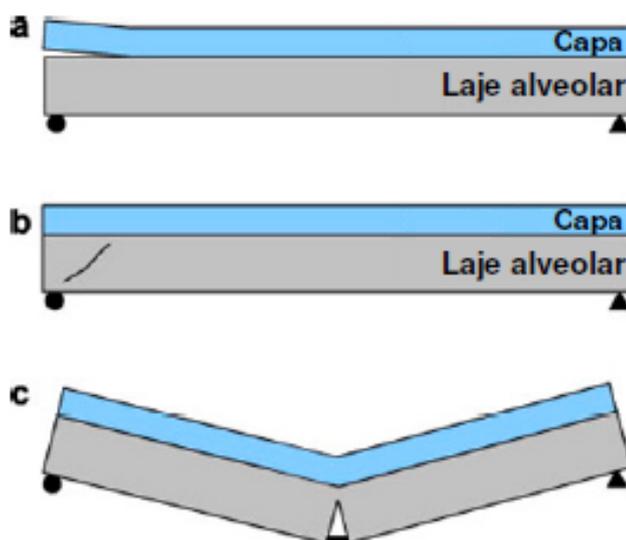
2.3.3 MECANISMOS DE RUPTURA EM LAJES ALVEOLARES COM CAPA

Na prática, a laje alveolar funciona em conjunto com uma capa de concreto que é acrescentada *in loco*, esta aumenta a rigidez da estrutura e é necessária atenção as questões de aderência entre o elemento pré-fabricado e a capa. Em grandes vãos principalmente, isso passa a ser uma desvantagem e, pelo menos na Europa, a capa passa a não ser utilizada devido à diferença entre os concretos utilizados para tornar este um elemento composto, que pode vir a possuir uma ligação duvidosa (BRUNESI *et al*, 2015). Quando este elemento composto laje + capa é submetido à flexão surge uma tensão de cisalhamento entre as superfícies que quando ultrapassa o valor resistente do concreto causa a separação de laje e capa. Os mecanismos de ruptura são bastante influenciados pela geometria da peça (altura efetiva, espessura das nervuras e formato dos alvéolos), pela carga de protensão (considerando o escorregamento da armadura e perda de protensão ao longo do tempo), pelas resistências à compressão e tração do concreto e qualidade da aderência entre concreto e armadura (COSTA, 2009).

Girhammar e Pajari (2008) identificaram três modos de ruptura em elementos alveolares com capa:

- Ruptura por cisalhamento na interface da laje com a capa de concreto (Figura 2-15a);
- Ruptura da nervura por tração devida ao cisalhamento na laje (Figura 2-15b);
- Ruptura das cordoalhas (Figura 2-15c).

Figura 2-15: Mecanismos de ruptura em laje alveolar com capa



Fonte: Girhammar e Pajari (2008)

2.4 COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS QUE COMPOEM A LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA

2.4.1 LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO

As lajes alveolares são normalmente constituídas apenas por cordoalhas protendidas, as quais são posicionadas em uma ou mais camadas na região inferior das nervuras, podendo em alguns casos ser inseridas cordoalhas na região superior.

É dificultosa a execução de lajes alveolares protendidas com a utilização de armaduras de cisalhamento, ainda mais pelo método da forma extrusora, sendo normal a não utilização dessas armaduras e devendo ser levado em consideração no cálculo das peças. Devido a esse fato de não apresentarem essa armadura transversal, dependem exclusivamente da qualidade da ancoragem por aderência das cordoalhas protendidas e da resistência do concreto à tração.

A resistência ao cisalhamento é avaliada ao longo do vão da laje alveolar, em cada localização e comparada com valores de cálculo das forças na seção. Uma laje com região próxima ao apoio fissurada por flexão precisa ser checada quanto a capacidade de ancoragem para a força real da cordoalha sendo que a capacidade resistente da ancoragem das cordoalhas é essencial e o valor de cálculo do comprimento de transferência depende do nível de protensão e tipo de cordoalha utilizada (CATOIA, 2011).

2.4.2 ANCORAGEM

Existem dois tipos de ancoragem na armadura ativa protendida, a primeira delas utiliza elementos mecânicos como cunhas e blocos de aço para garantir a protensão e não é utilizada a princípio a aderência entre concreto e aço, caracterizando elementos pós-tracionados. A segunda maneira utiliza a aderência entre concreto e aço, sendo primeiramente a armadura tracionada com auxílio de equipamentos externos e depois realizada a concretagem do elemento protendido, neste caso não há dispositivo de ancoragem ou de distribuição de tensão, caracterizando elementos pré-tracionados, este é o caso de lajes alveolares protendidas.

Deve-se tomar cuidado na produção, o concreto deve resistir já nas primeiras idades os esforços de compressão e tração e costuma-se em 24h de concretagem realizar o corte das lajes, com isto as cordoalhas tendem a encurtar e voltar a posição inicial, causando contraflecha na laje e possivelmente escorregamento de cordoalha.

De acordo com Catoia (2011), armaduras ativas de pré-tração possuem comportamento similar ao de armaduras passivas quanto à aderência ao concreto, onde existem:

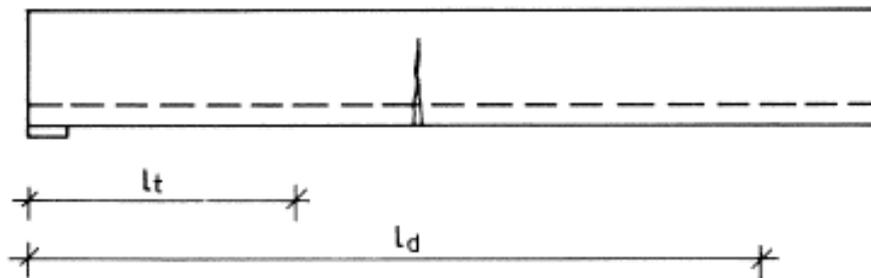
- Fenômenos de adesão como resistência à separação dos materiais;
- Ligações físico-químicas geradas na reação de pega do cimento;
- Atrito (quando existe a tendência ao deslocamento relativo entre os materiais);
- Rugosidade superficial da cordoalha, somada à pressão transversal exercida pelo concreto sobre ela;
- Fenômeno de engrenagem mecânica que depende da conformação superficial das cordoalhas.

2.4.2.1 COMPRIMENTO DE TRANSFERÊNCIA

Para a análise da capacidade de ancoragem das cordoalhas se considera a força de protensão e como ela é introduzida no concreto pela extremidade do elemento. Quando se libera a protensão, a cordoalha tende a voltar a sua posição inicial com tendência ao encurtamento. A conformação superficial das cordoalhas realiza boa aderência ao concreto que gera tensões de atrito e tende ao equilíbrio para que as cordoalhas parem de escorregar. Nos casos de protensão com aderência inicial, a força de protensão a ser ancorada é elevada e é necessário garantir uma aderência mecânica através de efeitos que produzam um denteamento entre a armadura de protensão e o concreto, como nervuras na cordoalha ou efeito de “saca-rolha”.

A cordoalha de protensão é tracionada pelas extremidades do elemento e quando liberada tende a voltar para a posição inicial com tendência ao encurtamento e desenvolvimento de tensões de atrito. A tendência é de que um equilíbrio natural se estabeleça e as cordoalhas parem de escorregar. Desta forma, existe um comprimento necessário ao desenvolvimento da força de protensão que é chamado de comprimento de transferência (l_t). Ao término deste, inicia-se o comprimento de desenvolvimento da cordoalha (l_d), conforme observado na Figura 2-16.

Figura 2-16: Comprimento de transferência e comprimento de desenvolvimento da cordoalha



Fonte: Walraven & Mercx (1983, *apud* CATOIA, 2011)

Em relação a fissuração que pode ocorrer nessas zonas, de acordo com Walraven & Mercx¹ (1983, *apud* CATOIA, 2011), uma fissura de flexão ao longo do comprimento de transferência dificilmente possibilita o aumento da tensão no aço devido ao estado limite de equilíbrio existente, mas se a fissura ocorre fora do comprimento de transferência, é possível um aumento da tensão no aço, entretanto é necessário cuidado pois caso a tensão elevada devido à fissura for muito grande, a zona afetada invade a região do comprimento de ancoragem (l_i), perturbando o equilíbrio na zona de transferência e possibilitando o escorregamento das cordoalhas. Caso a distância da extremidade seja grande o suficiente, pode ser alcançada a tensão última nas cordoalhas, sendo a distância denominada comprimento de desenvolvimento (l_d).

Para o cálculo do comprimento de transferência, considera-se os valores inferior, médio e superior, o menor valor é utilizado para verificações de tensões locais na liberação da protensão e o maior valor para estados limites últimos.

Segundo o EC2 (2004), para o valor de projeto do comprimento de transferência pode ser considerado o mais desfavorável entre os dois limites, pelas Equações 1, 2 e 3:

$$l_{pt1} = 0,8 \times l_{pt} \quad (1)$$

$$l_{pt2} = 1,2 \times l_{pt} \quad (2)$$

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}} \quad (3)$$

Onde:

¹ WALRAVEN, J.C.; MERCX, W.P.M. (1983). *The bearing capacity of prestressed hollow core slabs*. HERON. Delft University of Technology. v.28, n.3, 1983.

α_1 – 1,0 (liberação gradual da protensão), 1,25 (liberação repentina da protensão);

α_2 – 0,19 (cordoalhas de 3 e 7 fios);

\varnothing – diâmetro nominal da cordoalha;

σ_{pm0} – tensão na cordoalha logo após a liberação da protensão;

f_{bpt} – tensão de aderência – $f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t)$;

η_{p1} – coeficiente que considera o tipo de cordoalha e a situação de aderência na liberação da protensão. $\eta_{p1} = 3,2$ para cordoalhas com 3 e 7 fios;

η_1 – 1,0 para boas condições de aderência;

$f_{ctd}(t)$ – valor de projeto da resistência do concreto à tração, no instante da liberação da protensão.

De acordo com ASSAP (2002), as equações para valor médio do comprimento de transferência (l_{bp}) e limite superior do comprimento de transferência (l_{bpd}) são definidos segundo as Equações 4 e 5:

$$l_{bp} = 70\varnothing \quad (4)$$

$$l_{bpd} = 1,2 \times l_{bp} = 1,2 \times 70\varnothing = 84\varnothing \quad (5)$$

A resistência ao cisalhamento pode ser avaliada substituindo o comprimento de transferência por $50\varnothing$ (onde \varnothing é o diâmetro da cordoalha) na avaliação quanto ao desenvolvimento da protensão na seção (ACI 318, 2019).

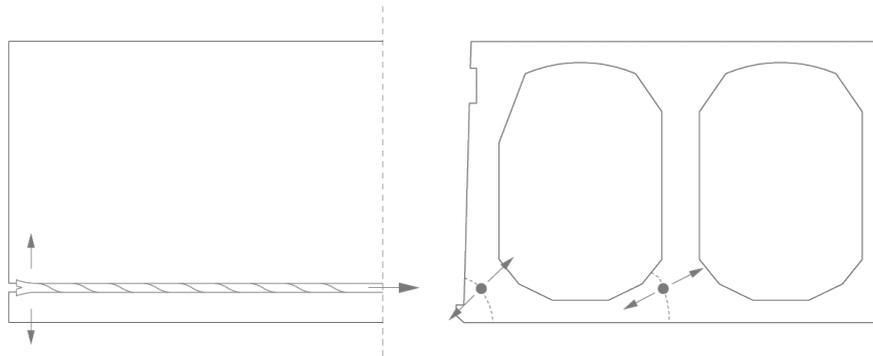
2.4.2.2 TENSÃO DE TRAÇÃO NA REGIÃO DE TRANSFERÊNCIA

A ancoragem das armaduras é muito afetada pela presença de fissuras na região de transferência, sendo que para evitar a fissuração é necessário verificar tensões de tração nesta região, que são denominadas *bursting*, *splitting* e *spalling* (CATOIA, 2011).

O *bursting* é gerado pelo escorregamento das cordoalhas na extremidade da laje que pode ir além de limites aceitáveis, a armadura estirada pode ser cortada e tornar-se uma cunha, que com a retração do concreto pode criar tensões de tração perpendiculares à armadura. As cordoalhas posicionadas incorretamente em seções estreitas podem causar este fenômeno (Figura 2-17). O comprimento desse tipo de fissura não é usualmente maior que 8 a 10 cm, a única consequência é o prolongamento da região de ancoragem ao

comprimento da fissura. Para se evitar o problema deve-se respeitar as espessuras adequadas dos cobrimentos das cordoalhas e assim serão contidos pelo concreto.

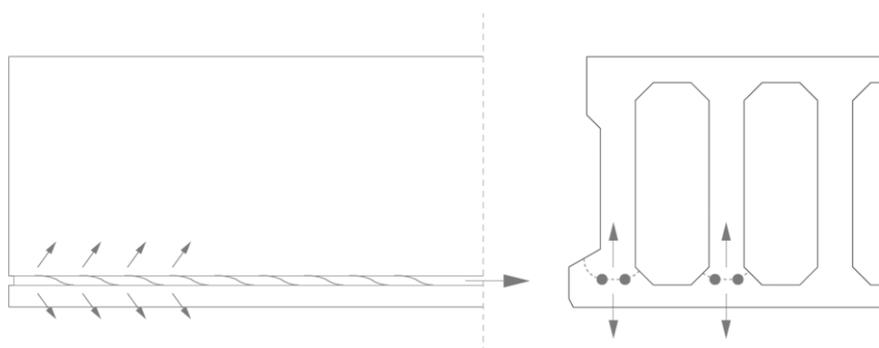
Figura 2-17: Fenômeno *Bursting*



Fonte: ASSAP (2002)

O fenômeno de *splitting* são tensões causadas pelo desenvolvimento da protensão na região de ancoragem que transfere gradualmente as forças de protensão ao concreto (Figura 2-18). As forças de transferência possuem uma tendência a se inclinar e geram tensões de tração no concreto e, caso sejam maiores que a resistência do concreto à tração, podem aparecer fissuras horizontais que unem as cordoalhas que estão muito próximas umas das outras a ponto de quase causar o descolamento do bordo inferior da laje. As fissuras geralmente são limitadas e são evitadas mantendo um cobrimento adequado das cordoalhas.

Figura 2-18: Fenômeno *Splitting*



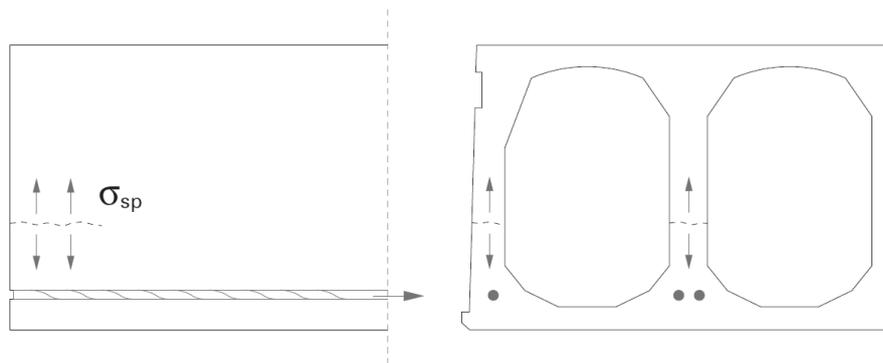
Fonte: ASSAP (2002)

Já o fenômeno de *spalling* ocorre acima do eixo das cordoalhas onde as nervuras estão com larguras mínimas, também na região da extremidade das lajes alveolares (Figura 2-19). Ocorrem com a transferência gradual da protensão no concreto e em conjunto com a

combinação das tensões de flexão e compressão por meio de linhas de fluxo de tensões, com direções não paralelas ao eixo da laje que tendem separar o concreto.

Esse tipo de fissura tende a reduzir a resistência da peça ao cisalhamento, rapidamente se estende por grande comprimento e pode progredir durante o transporte e içamento. Pode ser ocasionada por um excesso de cordoalhas que geram tensões de tração superiores a resistência à tração do concreto no corte da peça. Para se reduzir este fenômeno em nervuras armadas com duas ou mais cordoalhas, deve-se revestir uma delas neutralizando-a por um comprimento entre 50 e 70 cm a partir das extremidades. De acordo com o manual da ASSAP (2002), caso a laje apresente uma fissura horizontal em uma das nervuras, pode ser aceita seguindo avaliação de possíveis consequências, mas caso a fissura de *spalling* apareça em duas ou três nervuras, deve-se rejeitar a laje.

Figura 2-19: Fenômeno *Spalling*



Fonte: ASSAP (2002)

2.4.3 CAPA DE CONCRETO

É obrigatório que seja realizado o projeto estrutural da capa de concreto, quando a mesma possui função estrutural devido a colaboração na seção resistente com a laje alveolar e demais elementos estruturais. Neste projeto deve-se prever o detalhamento da armadura, detalhe das juntas e especificação do concreto.

Para o lançamento do concreto da capa, deve-se tamponar os alvéolos para que não haja perdas ou estrangulamento da seção a ser preenchida. As superfícies das lajes devem estar saturadas e secas, sendo abundantemente encharcadas por 6h, cessando-se essa saturação 2h antes do início do lançamento do concreto, também devem ser rugosas ou conter ranhuras, de modo a garantir a aderência entre concreto da laje e concreto da capa. Antes do início da concretagem deve-se limpar a superfície da laje com jato de ar ou de água sob pressão, as superfícies também devem ser isentas de óleo e graxa e deve-se verificar a conformidade das armaduras com o projeto (ABNT NBR 14861, 2011).

Na concretagem da capa, deve-se evitar o acúmulo de concreto na região central do vão das lajes alveolares, descartar a primeira porção de concreto para o caso de utilização de concreto do tipo bombeável, e o adensamento do concreto deve ser realizado com vibradores de imersão ou régua vibratórias apoiadas sobre guias no alinhamento dos pilares. A cura da capa de concreto estrutural pode ser química ou úmida por pelo menos sete dias consecutivos, o período de cura deve ser respeitado, iniciando-se as etapas construtivas posteriores e trânsito de pessoas e de equipamentos somente após este período.

Existem duas possibilidades de concretagem, no caso de lançamento do concreto da capa ser posterior ao chaveteamento, deve-se executar o capeamento somente após o término da cura do concreto, sendo o lançamento do concreto da capa feito de forma a evitar o desnivelamento das lajes alveolares motivados pelo peso do concreto fresco. Já para o caso de a concretagem da capa ser realizada juntamente ao chaveteamento, verifica-se a resistência do concreto da fase inicial das chavetas de forma que suportem os esforços provenientes do peso do concreto em estado fresco, a fim de evitar o rompimento e desnivelamento das lajes (ABNT NBR 14861, 2011).

2.4.4 EFEITO DIAFRAGMA

Para se constituir um efeito diafragma de estabilidade global da construção, é necessária primeiramente a divisão deste conceito em duas partes, onde na primeira os esforços horizontais são transmitidos através da estrutura do piso para paredes de contravantamento ou estruturas que resistem ao momento fletor, para isso é necessária a

correta ligação dos elementos pré-moldados, que são elementos individuais encaixados, para que a estrutura se torne um elemento sólido, assim as ações horizontais de vento serão transmitidas diretamente através da área do piso, resistindo a carregamentos de forma conjunta. Para as lajes alveolares, as ligações do piso devem ser projetadas para desenvolver uma chave de cisalhamento que garanta a interação dos elementos adjacentes com deslocamentos iguais nas juntas longitudinais.

A segunda parte ocorre quando as ações horizontais distribuídas em cada pavimento são transmitidas para a fundação através de pilares ou elementos de contraventamento. Assim, o piso é projetado para resistir a forças cortantes e momentos fletores através da união das lajes alveolares com concreto moldado no local em região de solidarização (preenchimento dos alvéolos) ou através da confecção de uma capa de concreto armado sobre a área do piso.

Segundo Elliott (2002), quando realizado o intertravamento dos elementos, a estrutura do piso passa a funcionar como uma parede onde as ações verticais são absorvidas parte pelos apoios e parte pelas chaves de cisalhamento. Estas estruturas de lajes podem ser utilizadas com a consideração de efeito diafragma, que é rigidez no plano e funcionamento como chapa.

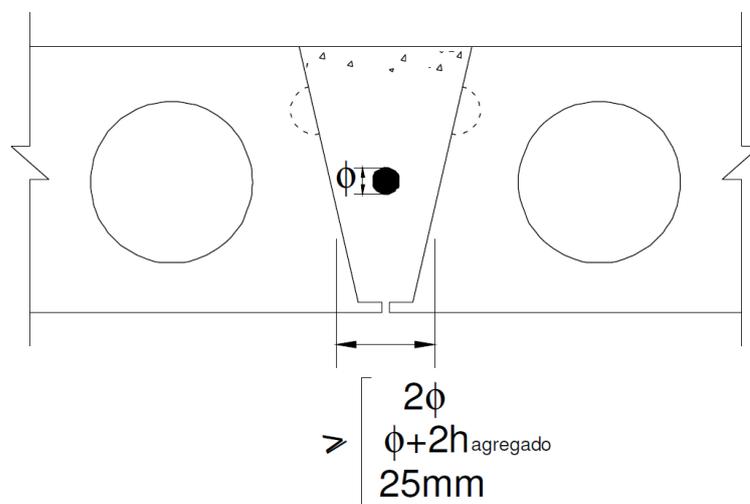
O modo de se assegurar o efeito diafragma é através da continuidade entre os sistemas de laje alveolar com ligações rígidas entre elas, a concretagem das chavetas ao longo das juntas longitudinais e o concreto de capa estrutural com seus apoios e solidarização com as vigas de bordo, garantindo a transmissão de esforços horizontais para os demais sistemas que estabilizam a edificação, aumentando a eficiência do contraventamento e conseqüentemente não ocorre deslocamentos relativos entre lajes e apoios. A ABNT NBR 14861 (2011) ainda salienta que:

- O processo de cálculo do efeito diafragma pode se basear nos modelos de treliça, viga Vierendeel, modelos em estado plano ou modelo de viga parede;
- As forças cortantes devem ser resistidas pelas juntas paralelas e perpendiculares aos esforços horizontais;
- No dimensionamento de estruturas de contraventamento, deve-se levar em consideração esforços horizontais provenientes do diafragma.

As lajes possuem seção transversal feitas para transmitir forças horizontais quando estão unidas e formando o efeito diafragma, o cisalhamento no plano é transferido através do atrito entre as juntas das unidades de laje alveolar (EDEKLING; RETTNE, 2006). Para tornar duas lajes adjacentes com comportamento de laje contínua, deve ser adotado procedimento

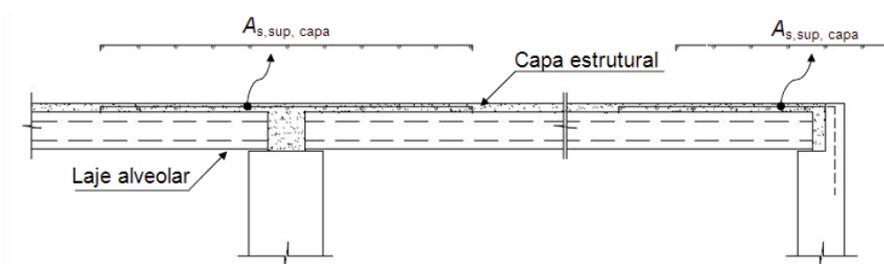
de colocação de armadura nas chavetas de cisalhamento (Figura 2-20), na capa estrutural (Figura 2-21) ou através da concretagem e armação dos alvéolos (Figura 2-22). A laje pode perder sua capacidade para absorver esforços horizontais caso esses procedimentos não sejam adequadamente executados. Para dimensionamento da armadura tanto na capa estrutural quanto nos alvéolos, a determinação é feita através dos momentos elásticos com abatimento para redistribuição dos momentos negativos, garantindo a posição da linha neutra, conforme ABNT NBR 6118 (2014).

Figura 2-20: Seção da junta longitudinal entre lajes



Fonte: Adaptado da FIB (2000)

Figura 2-21: Armaduras de continuidade (sobre apoios intermediários e de extremidades) posicionadas no caapeamento estrutural



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Figura 2-22: Armaduras de continuidade (sobre apoios intermediários e de extremidades) posicionadas nos alvéolos de lajes alveolares



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

2.4.5 LANÇAMENTO, TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO

Deve-se tomar cuidado para não se introduzir esforços na laje alveolar não previstos no projeto estrutural durante as etapas transitórias, sendo realizada movimentação das peças lentamente para que não ocorram impactos, fissuras ou quebras de canto. As lajes devem possuir dispositivos de içamento adequados e posicionados de acordo com o projeto.

Nas etapas de transporte e armazenamento, as lajes devem possuir calços de madeira ou sacos de areia posicionados de acordo com projeto, de forma a não gerar esforços não previstos. Deve-se tomar cuidado com a capacidade de suporte do solo quando as lajes forem empilhadas, realizando um perfeito alinhamento da pilha e dos calços entre as peças e do terreno para que não haja inclinação na pilha. O número máximo de lajes empilhadas depende do comprimento e altura das peças, devendo ser orientado pelo fabricante e de acordo com o projeto estrutural.

3. Desenvolvimento

3.1 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO

A partir de novembro de 2011 utiliza-se predominantemente a ABNT NBR 14861 (2011) – Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e Procedimentos, que foi revisada e substituiu a norma anterior de 2002, que tratava apenas dos procedimentos para o recebimento e utilização das lajes alveolares protendidas, agora a norma revisada trata de requisitos e procedimentos a serem atendidos no projeto, produção e na montagem das lajes alveolares. A ABNT NBR 14861 (2011) é utilizada para o cálculo da resistência ao esforço cortante, sendo que a norma trata detalhadamente de projeto, produção e montagem de lajes alveolares. Nesta norma estão detalhados como devem ser realizados o dimensionamento das seções transversais das lajes alveolares, considerando a necessidade de resistirem à flexão, à força cortante, à punção, ao fendilhamento longitudinal e estabelece também a resistência das chavetas ao esforço cortante.

No cálculo estrutural, assim como as estruturas de concreto convencionais, também se utilizam Estado Limite Último (ELU), Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite de Deformação (ELD), e de acordo com a ABNT NBR 14861 (2011), são levadas em consideração características adicionais:

- Os cálculos dos elementos componentes da estrutura devem partir da definição do comportamento efetivo das ligações, sob o ponto de vista dos graus de liberdade existentes;
- As dimensões dos elementos devem ser fixadas de forma a considerar as tolerâncias de fabricação e montagem;
- A análise da estrutura deve levar em conta as retrações e deformações diferenciais devido às idades diferentes dos concretos, composições e propriedades mecânicas;
- A análise deve considerar as diferentes fases que os elementos possam passar e que sejam suscetíveis a condições desfavoráveis, que são: fabricação, manuseio, armazenamento, transporte, montagem, transitórias de construção e final com a obra finalizada.

No dimensionamento e verificação dos elementos, devem ser verificados obrigatoriamente ao ELU, conforme ABNT NBR 6118 (2014) e considerando todas as fases que o elemento possa passar. Os esforços solicitantes a que sejam submetidos nessas fases são: a força normal, força cortante, momento fletor e momento torsor, os quais devem ser analisados separadamente ou em conjunto. Ressalta-se que a verificação experimental é um componente importante de avaliação em situações em que o cálculo conduz a resultados duvidosos, para que se avalie e garanta os requisitos normativos. As lajes alveolares devem possuir conjunto de armaduras para suprir a retração, variação de temperatura, capeamento estrutural, arranques das vigas, fissuração, protensão da laje, distribuição e de continuidade.

3.1.1 FATORES INFLUENCIANTES NA LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA

Fusco (2008) e Hedman & Losberg (1978) apresentaram investigações experimentais com um número elevado de ensaios e proporcionou dados importantes ao desenvolvimento dos principais modelos de cálculo da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares sem armadura transversal. Nesses estudos foram percebidos que a resistência à força cortante em peças maciças sem armadura de cisalhamento depende da resistência do concreto, taxa de armadura longitudinal de flexão, espessura da peça e tipo de carregamento.

A força cortante resistente é calculada pela Equação 6:

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd1} \cdot b_w \cdot d \quad (6)$$

Onde:

τ_{Rd1} : Valor de cálculo da tensão resistente para peças sem armadura de cisalhamento;

b_w : largura da alma;

d : altura útil da peça.

A resistência à compressão do concreto está diretamente correlacionada à resistência à tração, sendo este fator fundamental na eficiência da ancoragem e resistência ao cisalhamento. A resistência à tração do concreto é o parâmetro principal considerado no cálculo da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares protendidas, onde a armadura transversal é dispensada. Segundo a FIP (1992) também são fatores influenciadores que

alteram a resistência à tração efetiva do concreto: a forma geométrica dos alvéolos, o traço do concreto e o método de produção.

A influência da armadura longitudinal na resistência ao cisalhamento decorre da capacidade que essa armadura possui de transferir esforços diagonais pelo engrenamento dos agregados graúdos ao longo da espessura da peça e garantir o efeito de pino que possibilita a transferência de esforços através das fissuras, que tendem a ancorar na armadura de flexão. Nos estudos se concluiu que valores superiores a 2% de taxa de armadura não garantem aumento significativo na resistência ao cisalhamento.

A altura útil possui influência na resistência ao cisalhamento devido ao seu papel no controle de abertura de fissuras de flexão (FUSCO, 2008). A armadura de flexão realiza essencialmente este controle e perde eficiência à medida que se aumenta a espessura da peça e conseqüentemente a armadura se afasta da face superior da seção transversal. Nos estudos se concluiu que a influência da altura útil da peça deixa de ser significativa a partir de 0,6m. A seguinte expressão simplificada pode ser adotada e está a favor da segurança para lajes de menor espessura $k = (1,6 - d)$ (com d em metros).

Já a influência que o tipo de carregamento possui sobre a resistência ao cisalhamento, os estudos chegaram à conclusão de que para cargas diretas em linha e suficientemente afastadas dos apoios, a resistência depende somente do engrenamento dos agregados, efeito de pino da armadura e resistência à tração do concreto. Já para cargas afastadas a uma distância de $a > 3d$ dos apoios, a resistência ao cisalhamento média da laje é constante e depende apenas da espessura e resistência à tração do concreto. A expressão obtida para a resistência ao cisalhamento para cargas em linha paralela ao apoio em elemento sem armadura de cisalhamento e de concreto armado é obtido pela Equação 7:

$$\tau_{Rd1} = 0,070 \cdot (1 + 50 \cdot \rho_1) \cdot (1,6 - d) \cdot f_{ck} \quad (7)$$

Onde:

τ_{Rd1} – Valor de cálculo da tensão resistente para peças sem armadura de cisalhamento;

ρ_1 – Taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré moldada;

d – Altura útil da seção transversal da laje alveolar;

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão

Para cargas uniformemente distribuídas, concluiu-se que a resistência à força cortante é cerca de 50% superior à resistência em carregamentos em linha e aplicados longe dos

apoios. A resultante para elementos de concreto armado, sem armadura de cisalhamento e com carga uniformemente distribuída é obtida pela Equação 8:

$$\tau_{Rd1} = 0,11 \cdot (1 + 50 \cdot \rho_1) \cdot (1,6 - d) \cdot f_{ck} \quad (8)$$

Onde:

τ_{Rd1} – Valor de cálculo da tensão resistente para peças sem armadura de cisalhamento;

ρ_1 – Taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré moldada;

d – Altura útil da seção transversal da laje alveolar;

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão

O tipo de carregamento indica com certa precisão o posicionamento da fissura crítica que levará a laje a ruptura.

3.1.2 CÁLCULO SEGUNDO RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

De acordo com a ABNT NBR 14861 (2011) – Lajes alveolares pré-moldadas em concreto protendido – requisitos e procedimentos, devem ser verificadas a resistência ao cisalhamento de acordo com 3.1.2.1 até 3.1.2.6.

3.1.2.1 RESISTÊNCIA DA LAJE ALVEOLAR À FORÇA CORTANTE EM LAJES COM OU SEM CAPEAMENTO ESTRUTURAL

A verificação da resistência à força cortante deve ser feita pelas Equações 9 a 21, considerando ou não o preenchimento de alvéolos e a capa estrutural.

A resistência das lajes alveolares, em uma determinada seção transversal, em regiões fissuradas, deve ser considerada satisfatória, quando verificadas simultaneamente as condições das Equações 9 e 10:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (9)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \text{ ou } V_{Sd} \leq V_{Rd2 \text{ capa}} \quad (10)$$

Onde:

V_{Sd} – Força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd1} – Força cortante resistente de cálculo na seção;

V_{Rd2} – Força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd2} capa – Força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto da laje alveolar com capa e alvéolos preenchidos;

Fazem parte as Equações 11, 12 e 13:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} v f_{cd} 0,9 d \Sigma b_{w,1} \quad (11)$$

$$V_{Rd2} \text{ capa} = \frac{1}{2} v f_{cd} 0,9 d_{tot} \Sigma b_{w,2} \quad (12)$$

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (13)$$

Onde:

$\Sigma b_{w,1}$ e $\Sigma b_{w,2}$ – são o somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;

d – Altura útil da seção transversal da laje alveolar;

d_{tot} – Altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;

f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão do concreto usada no projeto, conforme a ABNT NBR 9062 (2017).

A resistência V_{Rd1} à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural deve ser calculada segundo a Equação 14:

$$V_{Rd1} = V_{C,1} + V_{p,1} \quad (14)$$

Fazem parte as Equações 15 a 21:

$$V_{C,1} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40 \rho_1) \Sigma b_{w,1} d \quad (15)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \sigma_{cp,1} \Sigma b_{w,1} d \quad (16)$$

$$\Sigma b_{w,1} = \Sigma b_{w, \text{ext}} + \Sigma b_{w, \text{int}} \quad (17)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1} d} \quad (18)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \alpha \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (20)$$

$$k=1,6-d \geq 1, \text{ com } d \text{ em metros (m)} \quad (21)$$

Onde:

V_{Rd1} – Força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural;

F_{ctd} – Resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado e do moldado no local;

$\sum b_{w,1}$ – Somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar;

A_s – Área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

ρ_1 – Taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada;

d – Altura útil total da seção transversal, considerando a altura da laje alveolar (d) ou da laje alveolar mais a altura da capa na seção composta ($d = dtot$);

$\sigma_{cp,1}$ – Tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido (ou com alvéolo preenchido após a liberação da protensão);

N_p – Força de protensão final, depois de todas as perdas;

A_c – Área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada;

l_x – Distância da seção x a partir do final da laje;

l_{pt2} – Valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ).

3.1.2.2 RESISTÊNCIA DA LAJE ALVEOLAR À FORÇA CORTANTE EM LAJES COM PREENCHIMENTO DE ALVÉOLOS

Quando for adotado o preenchimento de alvéolos, o comprimento longitudinal desse preenchimento ao longo dos alvéolos das lajes alveolares deve ser pelo menos maior que L_{pr} , dado pela Equação 22.

$$L_{pr} = l_{pt2} + k_c \quad (22)$$

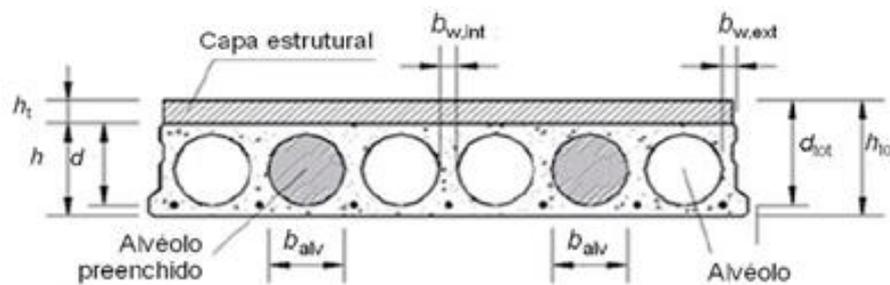
Onde:

l_{pt2} – Valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ);

l_{fc} – Soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante com a altura da seção transversal.

Se considera o preenchimento de até dois alvéolos (com contribuição de 50% da largura do alvéolo), em condições de simetria na seção transversal (Figura 3-1).

Figura 3-1: Preenchimento de alvéolos



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Para o preenchimento dos alvéolos, deve ser usado concreto adequado, com mesma resistência e durabilidade do concreto do elemento a ser preenchido, considerando-se as verificações das parcelas de resistência dos alvéolos, conforme as Equações 23 e 31.

Para laje alveolar com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista, a resistência à força cortante deve ser calculada pela Equação 23:

$$VR_{d1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (23)$$

Fazem parte as Equações 24 a 30:

$$V_{c,2} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40 \rho_2) \sum b_{w,2} d \quad (24)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \sigma_{cp,2} \sum b_{w,2} d \quad (25)$$

$$\sum b_{w,2} = \sum b_{w, ext} + \sum b_{w, int} + 0,5 \cdot n \cdot b_{alv} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (26)$$

$$\rho_2 = \frac{A_s}{\sum b_{w,2} d} \quad (27)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \alpha \quad (28)$$

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv} \quad (29)$$

$$A_{alv} = \frac{\pi b_{alv}^2}{4} \quad (30)$$

Onde:

$V_{Rd1,a1}$ – Força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

$\Sigma b_{w,2}$ – Somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;

ρ_2 – Corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolo preenchido;

$\sigma_{cp,2}$ – Tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

n – Quantidade de alvéolos preenchidos;

A_{alv} – Área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria. Para alvéolo com seção circular, a área da seção deve ser calculada pela Equação 30;

B_{alv} – Largura horizontal do alvéolo a ser preenchido;

E_c/E_p – Relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado no local (E_c) e do concreto pré-moldado (E_p).

Para laje alveolar com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista, a resistência à força cortante deve ser calculada pela Equação 31, que é a soma das Equações 24 e 16:

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (31)$$

Onde:

$V_{Rd1, a2}$ – Força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.

3.1.2.3 RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE NAS CHAVETAS

Para caso de ações distribuídas de um elemento de laje alveolar para outro adjacente, podem provocar esforços cortantes na direção vertical na chaveta, sendo que a resistência ao esforço cortante depende das propriedades do concreto da chaveta. A resistência ao esforço cortante na chaveta, V_{Rd1} , é expressa como uma resistência linear e é o menor valor encontrado a partir das Equações 32 e 33:

$$V_{Rd1} = 0,25 \times f_{ctd} \times \Sigma h_f \quad (32)$$

$$V_{Rd1} = 0,15 \times (f_{ctd, ch} \times h_{ch} + f_{ctd, t} \times h_t) \quad (33)$$

Onde:

f_{ctd} – Valor de cálculo da resistência à tração do concreto da laje alveolar;

$f_{ctd, ch}$ – Valor de cálculo da resistência à tração do concreto da chaveta;

$f_{ctd, t}$ – Valor de cálculo da resistência à tração do concreto da capa estrutural;

Σh_f – Soma das menores espessuras das flanges da face inferior e da face superior com a espessura da capa estrutural (na Figura 3-7, $\Sigma h_f = h_{f1} + h_{f2} + h_t$);

h_{ch} e h_t – Alturas da chaveta e da capa, respectivamente, conforme representado na Figura 3-2.

Com relação às ações concentradas, a resistência ao esforço cortante, $V_{Rd1, conc}$, pode ser calculada conforme a Equação 34:

$$V_{Rd1, conc} = V_{Rd1} \times (a + h_{ch} + h_t + 2a_s) \quad (34)$$

Onde:

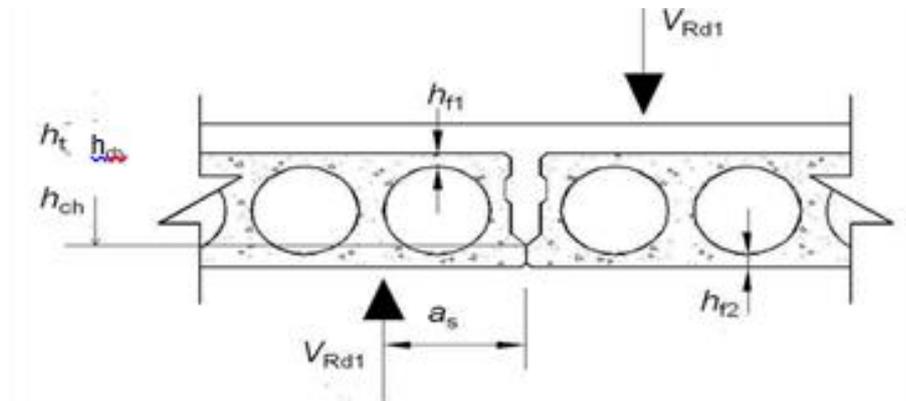
V_{Rd1} – Menor valor entre os calculados pelas Equações 32 e 33;

a – Comprimento da ação paralela à junta longitudinal;

a_s – Distância entre o centro de aplicação da ação concentrada e o centro da junta longitudinal;

h_{ch} e h_t – Alturas da chaveta e da capa, respectivamente, conforme representado na Figura 3-2.

Figura 3-2: Força cortante nas chavetas ou chaves de cisalhamento



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

3.1.2.4 FENDILHAMENTO LONGITUDINAL

Durante o processo produtivo, no momento da liberação das cordoalhas de protensão, não é permitido nenhum tipo de fissuração longitudinal nas nervuras e deve ser garantido que a tensão na nervura mais solicitada (σ_{sp}) seja inferior à tensão de tração do concreto ($f_{ctkj,inf}$), conforme Equações 35, 36 e 37:

$$\sigma_{sp} \leq f_{ctkj,inf} \quad (35)$$

$$\sigma_{sp} = \frac{P_0}{b_w \times e_p} \cdot \frac{15 \times \alpha_e^{2,3} + 0,07}{1 + \left(\frac{l_{pt1}}{e_p}\right)^{1,5} \times (1,3 \times \alpha_e + 0,1)} \quad (36)$$

$$\alpha_e = \frac{(e_p - k)}{h} \quad (37)$$

Onde:

$f_{ctkj,inf}$ – Valor da resistência à tração característica inferior do concreto, na data em que é realizada a liberação da protensão com base no controle tecnológico do concreto;

P_0 – Força de protensão inicial logo após a liberação dos cabos, na nervura considerada;

b_w – Espessura de uma nervura individual (nervura interna ou externa);

e_p – Excentricidade da força de protensão;

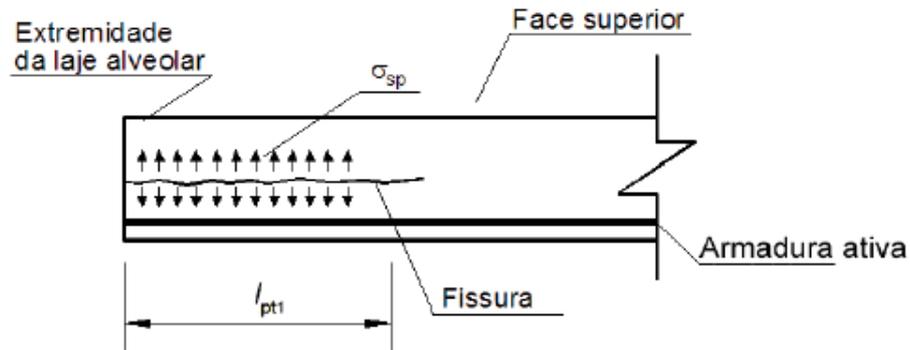
l_{pt} – Valor inferior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 60ϕ);

k – Meia altura do núcleo de rigidez na nervura, calculada pela razão entre o módulo resistente da seção na fibra inferior e a área da seção transversal do concreto (Figura 3-5);

h – Altura da nervura da seção transversal.

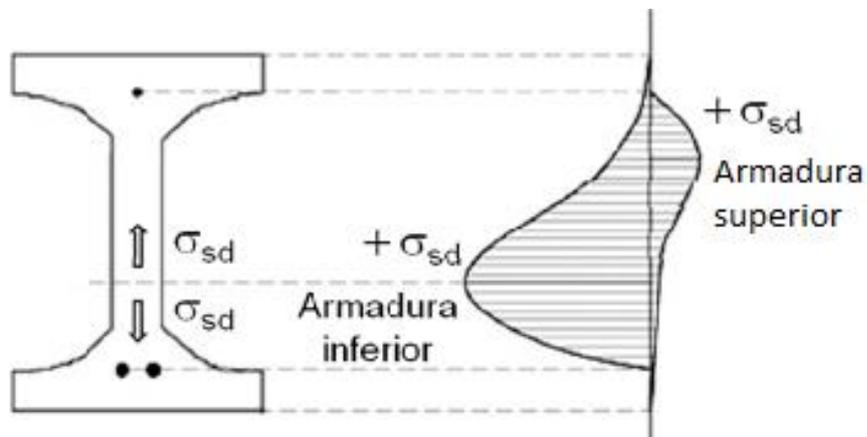
A Figura 3-3, Figura 3-4 e Figura 3-5 ilustram a representação dos esforços a serem considerados para verificação do fendilhamento.

Figura 3-3: Fissuração longitudinal devido ao fendilhamento do concreto nas nervuras



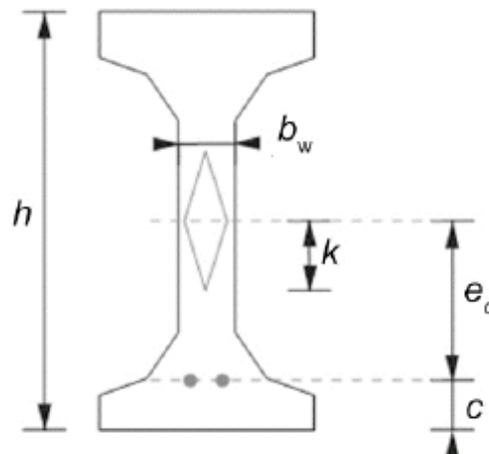
Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Figura 3-4: Tensão de fendilhamento na nervura



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Figura 3-5: Núcleo de rigidez

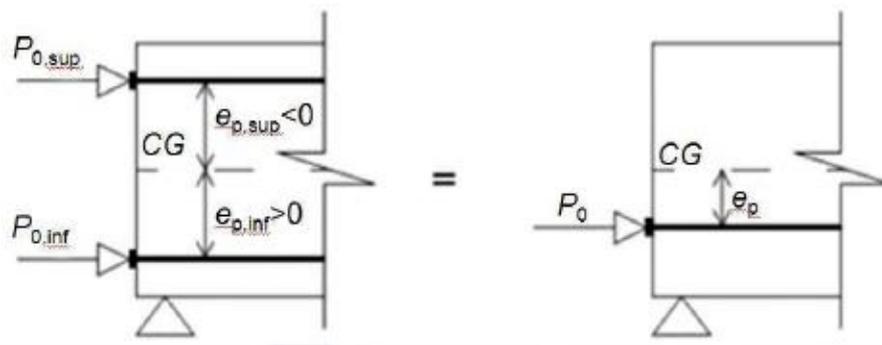


Sendo: $k_{bi} = W_{nerv}/A_{c,nerv}$, onde k é o raio do núcleo central da nervura

Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Para o caso da presença de armaduras ativas superiores, a verificação deve ser feita levando em conta os efeitos da força de protensão resultante conforme Figura 3-6.

Figura 3-6: Força de protensão resultante



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

A excentricidade resultante é obtida pelas Equações 38 e 39:

$$e_p = \frac{P_{0,inf} \times e_{p,inf} + P_{0,sup} \times e_{p,sup}}{P_0} \quad (38)$$

$$P_0 = P_{0,inf} + P_{0,sup} \quad (39)$$

Onde:

$e_{p,inf}$ – Excentricidade dos fios/cordoalhas de protensão inferior;

$e_{p,sup}$ – Excentricidade dos fios/cordoalhas de protensão superior;

$P_{0,inf}$ – Força de protensão com perdas iniciais e imediatas nos fios/cordoalhas inferiores;

$P_{0,sup}$ – Força de protensão com perdas iniciais e imediatas nos fios/cordoalhas superiores;

P_0 – Força de protensão resultante (do fio/cordoalha equivalente).

3.1.2.5 RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Na ausência de justificativa para a desconsideração do cálculo da resistência à punção da nervura, devem ser utilizadas as Equações 40 e 41:

$$V_{Rd} = b_{ef} \times h \times f_{ctd} \times \left(1 + 0,3 \times \alpha \times \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}}\right) \quad (40)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (41)$$

Onde:

V_{Rd} – Resistência à punção da nervura da laje alveolar, expressa em newtons (N);

α – Relação entre a distância da extremidade da laje ao ponto de aplicação da ação (l_x) e o valor superior do comprimento de ancoragem (l_{pt2});

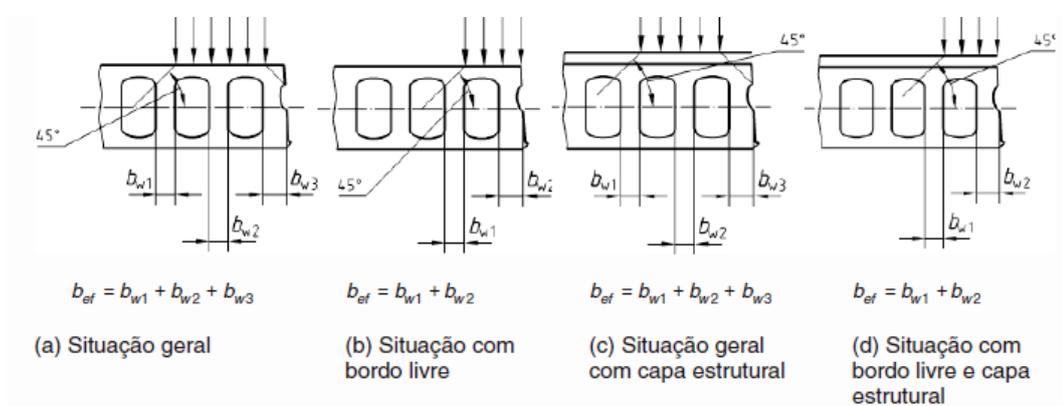
σ_{cp} – Tensão de compressão do concreto no centro de gravidade da peça devido à força de protensão;

b_{ef} – Espessura efetiva das nervuras, calculada para as situações e variáveis mostradas na Figura 3-7.

f_{ctd} – Resistência de cálculo à tração do concreto da nervura da laje alveolar, a ser usada no projeto;

h – Altura total da laje sem capa ou equivalente a h_{tot} , da seção composta formada pela laje e capa estrutural.

Figura 3-7: Espessura efetiva das nervuras para a verificação a punção



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

3.1.2.6 ESCORREGAMENTO DA CORDOALHA NA EXTREMIDADE DA LAJE ALVEOLAR

O escorregamento médio das cordoalhas nas extremidades das lajes alveolares a ser considerado no cálculo das perdas de protensão, pode ser calculado pela Equação 42. O escorregamento-limite das cordoalhas em cada extremidade das lajes alveolares é dado pela Equação 43.

$$\Delta l_0 = 0,4 \times l_{pt2} \times \frac{\sigma_{cpo}}{E_p} \quad (42)$$

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \times \Delta l_0 \quad (43)$$

Onde:

Δl_0 – Escorregamento da cordoalha;

Δl_{lim} – Escorregamento limite da cordoalha;

l_{pt2} – Valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ);

σ_{cpo} – Tensão de protensão no instante da liberação da protensão;

E_p – Módulo de elasticidade da armadura ativa.

Quando é feito o corte nas lajes, a força de protensão é transferida ao concreto por um comprimento de transferência, que depende diretamente da aderência entre cordoalha e concreto, que deve possuir resistência adequada para uma boa aderência. No entanto não é garantia de que o escorregamento de cordoalhas não ocorra, havendo escorregamento, deve-se avaliar a laje.

O escorregamento inicial deve ser analisado em cada cordoalha e inspecionado em relação à própria laje, sendo realizada inspeção visual em todas as lajes nas duas extremidades, e na constatação de escorregamento, devem ser inspecionadas de 2 a 3 lajes por pista, com anotação dos valores medidos com paquímetro. O valor representativo é medido através da média dos valores em lados opostos da laje, dos dois fios mais externos.

No caso de valores de escorregamento da cordoalha maiores que os valores-limite de projeto, recomenda-se que a cordoalha seja desprezada e somente o restante do aço pretendido considerado efetivo, devendo ser reavaliado pelo projetista. Para o caso de grande escorregamento em qualquer posição da pista, verifica-se se ocorre em no máximo duas cordoalhas e deve-se reduzir a carga de projeto como forma de ainda se aproveitar a laje caso sejam cumpridos os requisitos:

- As cordoalhas que deslizaram devem ser marcadas em cada extremidade da laje;
- O número original de cordoalhas e o número das que foram aceitas devem ser marcados na laje;
- A designação original da laje deve ser cancelada e substituída por outra nova.

Para o caso de rejeite da laje, a mesma deve ser marcada com um aviso claro e permanente de rejeição e eliminadas todas as outras marcações, retirando-se do pátio de estocagem de imediato.

3.2 VERIFICAÇÕES EM LAJE ALVEOLAR

3.2.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A realização dos ensaios de flexão ou cisalhamento devem sempre utilizar o mesmo arranjo, mesmo procedimento e mesmo critério de aceitação, sendo que podem ser realizados para três funções distintas: para iniciar uma nova produção de lajes (com propósito de pesquisa e desenvolvimento), como ensaio de aceitação/avaliação do desempenho ou como controle de qualidade durante a produção.

Conforme Costa (2009), os ensaios com propósito de pesquisa e desenvolvimento são ensaios realizados predominantemente em centros de pesquisa devido a necessidade de instrumentação que meça um número de parâmetros significativo de força, deslocamentos e deformações para caracterização do comportamento estrutural, este ensaio é realizado para um elemento novo ou um que já foi desenvolvido como também para validar ou ajustar modelos analíticos que são utilizados no projeto de elementos estruturais. Já os ensaios para avaliação de desempenho podem ser subdivididos em três grupos: ensaios para a caracterização das propriedades dos materiais; ensaios para validação de projeto; e ensaios para validação do produto, que compõe o processo de Certificação do Produto e da Qualidade.

E para ensaios de controle de qualidade, quando já iniciada a produção, os ensaios podem ser realizados com certa frequência para se obter o controle da conformidade do desempenho do produto, sendo que para estes as amostras devem ser escolhidas por pessoas técnicas ou auditores que não façam parte da empresa, mas podendo ser realizado pela própria empresa desde que passados por auditoria externa.

Para certificar a qualidade dos produtos, devem ser realizados ensaios padronizados regularmente e a cada lote pré-determinado. A recomendação é de realizar pelo menos 3 ensaios destrutivos por lote e os ensaios de controle de materiais conforme recomendação nas respectivas normas correspondentes (FERNANDES, 2007). Para a controle da qualidade devem ser ensaiadas pelo menos 1 peça de cada modelo a cada 3 a 6 meses ou 25.000 m² a 50.000 m², onde a quantidade de modelos ensaiados depende do volume de produção ou especificidade desses elementos (FIB, 2000). Para casos onde a fábrica não controle rigorosamente os agregados e granulometria, o período deverá ser de no máximo a cada 3 meses, visando garantir que eventuais variações da qualidade dos agregados não comprometam o desempenho final das lajes alveolares. Já para casos de estudos de desenvolvimento de produto, Fernandes (2007) recomenda uma amostragem de pelo menos 3 unidades, sendo o ideal 5 unidades para melhor representatividade dos resultados obtidos,

e para casos de mudança das características da laje ou de materiais utilizados, devem ser realizados ensaios em amostras de 5 unidades ou mais.

É recomendado pelo manual da FIP (1982) que as empresas fabricantes de laje alveolar possuam em suas instalações uma parte destinada a realização de procedimento de ensaio reconhecido, sendo o responsável pelo controle de qualidade uma pessoa competente e independente da linha de produção. Tkalcic *et al* (2007) diz que a precisão dos resultados depende da média de ensaios, quanto maior o número, maior a precisão, sendo que com os resultados é possível comparar com valores de cálculo e aferir a qualidade do produto.

A EN 1168 (2005) prescreve que sejam ensaiados ao menos três elementos para as situações:

- Novo projeto de laje a ser produzida;
- Novo equipamento e/ou nova linha de produção;
- Alteração significativa no projeto;
- Modificação no processo produtivo;
- Modificação dos materiais.

A ABNT NBR 9062 (2017) determina que os ensaios devem ser executados por pessoal qualificado e utilizando-se equipamentos calibrados, onde é necessária a validação do procedimento de ensaio que deve explicitar a frequência e amostragem para os ensaios posteriores. Para isso devem ser obedecidos os requisitos ao realizar os ensaios:

- O elemento estrutural ensaiado deve possuir o mesmo nível de confiabilidade de um que é projetado conforme prescrições de projeto estabelecidas na ABNT NBR 9062 (2017) com relação a todos os possíveis estados-limites e todas as situações de projeto;
- A amostragem a ser ensaiada e condições durante os ensaios devem ser representativas, reproduzindo-se as condições de carregamento e apoio;
- Não podem ser feitas extrapolações diretas de ensaios efetuados em outros países, podendo ser feitas adequações a estes ensaios desde que consideradas as condições locais, tipos de materiais e equipamentos utilizados;
- Os ensaios devem ser periodicamente repetidos quando realizados nas usinas produtoras de elementos em série, sempre que houver qualquer modificação significativa nos materiais, processo executivo ou equipamento;
- Os ensaios cujos resultados sejam considerados na elaboração do projeto devem ter seus resultados disponíveis durante o período de projeto. Quando as recomendações de projeto da ABNT NBR 9062 (2017) se basearem em condições implícitas

de segurança, estas condições devem ser levadas em conta na avaliação dos resultados experimentais obtidos, podendo ser necessária a realização de algumas correções no caso de situações similares.

As verificações experimentais com base em protótipos que a ABNT NBR 9062 (2017) sugere como forma de obter economia possui como objetivos:

- Estabelecer a resistência última ou comportamento em serviço de elementos estruturais;
- Obter propriedades específicas de materiais;
- Testar novos materiais ou produtos;
- Reduzir incertezas de parâmetros de carga ou em modelos de resistência.

3.2.1.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Para a realização dos ensaios é necessário conhecimento das características dos materiais de aço e concreto empregados na laje. O controle da qualidade do aço deve ser claramente definido, com características de relaxação e deformação conhecidas para condições normais de temperatura e de cura, podem ser obtidos junto ao fabricante ou verificados. Também se inclui no controle da qualidade do aço as perdas de protensão, onde após a liberação da protensão, ocorrem os efeitos de perdas iniciais de protensão e perdas ao longo do tempo. Ocorre que a armadura tenta retornar ao comprimento que possuía antes de ser tracionada e acaba por provocar esforços de compressão no concreto devido a aderência ao mesmo. As perdas iniciais de protensão podem ser originadas devido aos seguintes:

- Perda de protensão por deformação da ancoragem;
- Perda de protensão por deformação imediata do concreto (continua ocorrendo por um certo período de tempo);
- Perda de protensão por retração do concreto;
- Perda de protensão por fluência do concreto;
- Perda de protensão por relaxação da armadura.

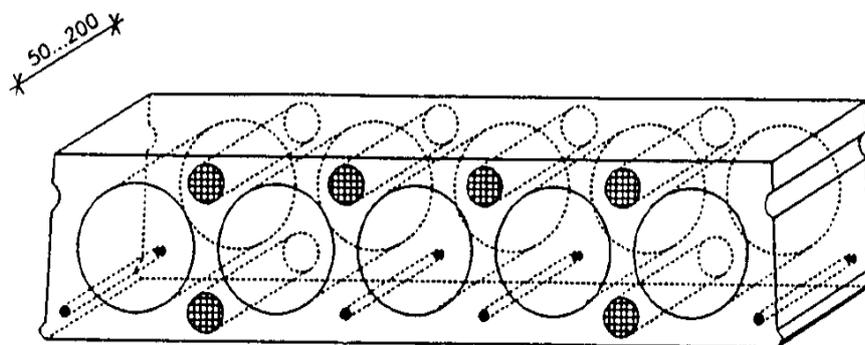
Para o controle de qualidade do concreto, deve-se determinar os valores característicos de resistência à compressão, resistência à tração, deformação, retração e módulo de elasticidade. Segundo a FIP (1992) deve-se extrair de três a seis testemunhos cilíndricos e ensaiados imediatamente após extração, os ensaios a serem realizados são o de

compressão axial e de compressão diametral, realizados respectivamente de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018) – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos e ABNT NBR 7222 (2011) – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

A extração dos testemunhos deve ser feita em uma faixa de laje alveolar a ser ensaiada, com comprimento variando entre 50 e 200 mm, a extração deve ocorrer na parte superior da laje alveolar devido ao grau de compactação na parte inferior ser maior e apresentar valores de resistência um pouco superiores.

Para realização do controle de qualidade, recomenda-se o corte de uma faixa da laje, onde os testemunhos sejam mantidos sob condições úmidas e extraídos conforme Figura 3-8. Os valores para o módulo de elasticidade, deformação e retração são medidos de uma a duas vezes por ano, e para resistência a compressão deve-se realizar o ensaio no momento da liberação da protensão e depois de 28 dias. Os corpos de prova devem ser submetidos as mesmas condições ambientais e de cura da laje, e para as resistências de compressão e tração aos 28 dias deve-se permitir, pelo número de amostras, o cálculo estatístico para determinação dos valores.

Figura 3-8: Amostra para extração dos corpos de prova



Fonte: FIP (1992)

Para o valor da resistência à tração, o corpo de prova deve corresponder ao tipo de tensões de tração permitidas na laje, ou seja, podem ser realizados os ensaios de resistência à tração direta (f_{ct}) ou de resistência à tração na flexão ($f_{ct, f}$) em corpos de prova de seção prismática. No total há três formas de obtenção da resistência à tração do concreto, a terceira delas é o ensaio de tração na compressão diametral ($f_{cs, sp}$). Ressalta-se que os resultados para cada ensaio são diferentes e o ensaio de referência é o de tração direta, portanto é necessária a utilização de coeficientes de conversão. A resistência à tração direta (f_{ct}) é igual a $0,9 f_{ct, sp}$ ou $0,7 f_{ct, f}$.

Outra maneira é, na falta de ensaios, a determinação da resistência à tração direta do concreto em função da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) pelas Equações 44, 45 e 46, com as resistências expressas em MPa:

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (44)$$

(f_{ctm} para concreto de classe até C50)

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} \quad (45)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm} \quad (46)$$

Além dos testemunhos, pode-se confeccionar corpos de prova cilíndricos para determinação da qualidade do concreto, desde que o concreto das amostras seja o mesmo utilizado na laje e a compactação do concreto seja muito próxima àquele encontrado na laje, para isto é necessária a utilização de uma máquina que realiza a vibração deste concreto com baixa trabalhabilidade.

Mizumoto *et al* (2013) propõe uma metodologia para o preparo de corpos de prova para controle tecnológico do concreto utilizado em lajes alveolares protendidas, onde o abatimento é nulo, tendo em vista que os mesmos não são abordados na ABNT NBR 5738 (2015) e ABNT NBR 5739 (2018), para esta metodologia é necessário treinamento da equipe envolvida na moldagem e necessária a verificação dos resultados de resistência obtidos e validação com testemunhos extraídos do concreto por ser um procedimento que não é estabelecido pela ABNT. Para realização da moldagem são necessários os seguintes materiais:

- Peso padrão cilíndrico de dimensão 98 mm x 200 mm, com massa de 7,0 kg;
- Fôrmas metálicas cilíndricas de dimensão 10x20 cm;
- Mesa vibratória em aço de capacidade de 3.600 v.p.m;
- Bolacha metálica cilíndrica de dimensão 50 mm x 400 mm, com massa de 7,0 kg;
- Cronômetro.

A moldagem dos corpos de prova é realizada conforme os seguintes:

1. Coletar amostra da caçamba de concreto produzido;
2. Realizar a homogeneização do concreto no carrinho de mão;

3. Preencher a 1° camada de concreto na forma;
4. Ligar a mesa vibratória e colocar o peso padrão;
5. Manter o sistema em vibração por 120 segundos;
6. Desligar a mesa vibratória;
7. Preencher a 2° camada de concreto na fôrma, deixando um excesso;
8. Ligar a mesa vibratória e colocar o peso padrão;
9. Manter o sistema em vibração por 120 segundos;
10. Desligar a mesa vibratória e colocar uma quantidade de concreto para realizar o acabamento superficial;
11. Ligar a mesa vibratória e empregar a bolacha metálica para realização do acabamento da face superior.

Em virtude do tempo de moldagem e a temperatura do ambiente, é necessário realizar duas coletas de amostras do concreto para garantia de um bom adensamento:

1° coleta do concreto: após 50% da pista produzida e moldagem de 4 corpos-de-prova, referentes as idades de 7 dias e 28 dias.

2° coleta do concreto: nas últimas caçambas de concreto, sendo moldados 3 corpos-de-prova, referentes a idade de 16h para liberação da protensão da pista.

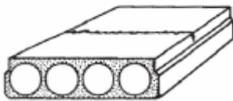
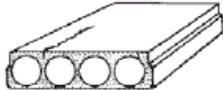
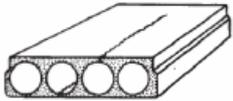
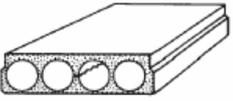
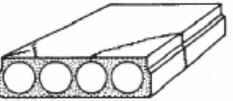
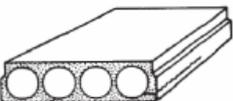
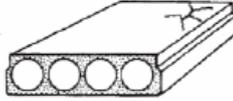
3.2.1.2 PROCEDIMENTO PARA REGISTRO DE ENSAIOS

Como medidas preliminares ao ensaio, de acordo com Costa (2009), devem ser respeitados alguns parâmetros que servem para calcular a força efetiva esperada para que a laje rompa e verificar se há divergências com o projetado, diferenças de material, temperatura ou calibração da máquina produtora de laje alveolar:

- As tolerâncias dimensionais deverão ser respeitadas;
- Antes da montagem do ensaio é necessário medir as características geométricas, como altura, largura, comprimento da laje, largura na metade da nervura, diâmetro dos alvéolos e preenchimento ou não dos alvéolos;
- Indicar a quantidade de cabos, área de aço, força de protensão, afundamento das cordoalhas, distância do centro da cordoalha até a borda inferior;
- Indicar existência de capa e altura da capa;

- O comprimento da laje pode influenciar nas condições de apoio, assim como as extremidades da laje devem estar niveladas para que não se originem tensões de torção;
- As fissuras devem ser mapeadas, sendo que alguns tipos como as fissuras horizontais nas nervuras próximas à extremidade não podem ser aceitas. Os tipos de fissuras e possíveis causas são mostrados na Figura 3-9;
- Fissuras transversais de retração não podem ser aceitas antes da liberação da protensão.

Figura 3-9: Tipos de imperfeições e possíveis causas

Tipos de imperfeições		Possíveis causas
Fissura Transversal		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio Inapropriado
Fissura longitudinal na nervura		Produção Inapropriada
Fissura longitudinal ao longo dos alvéolos (causa, prevenção, efeito, reparo)		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio e Estocagem Inapropriados
Fissura na nervura acima das cordoalhas		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada
Fissura no canto do elemento		Produção Inapropriada Manuseio e Estocagem Inapropriados
Fissuras longitudinais na nervura, próximos à cordoalha		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio Inapropriado
Fissuras com diversos padrões		Retração da Superfície Mistura do Concreto Inapropriada Operação Inapropriada de Equipamentos

Fonte: [FIB (2007); PCI (1983)] apud COSTA (2009)

Ao se iniciar o ensaio, Costa (2009) elenca um *check-list* de itens a serem observados e anotados:

- Identificação da peça a ser ensaiada;
- Data da produção;
- Data e local do ensaio;
- Temperatura ambiente;
- Laboratório e pessoa responsável pelo ensaio;
- Características dos materiais utilizados no ensaio;
- Qualquer tipo de problema observado durante a inspeção visual;
- Tipo de ensaio a ser realizado;
- Equipamentos utilizados durante o ensaio;
- Força prevista para a falha da laje;
- Força de ruptura;
- Tipo de falha caracterizada pela abertura de fissuras;
- Quaisquer observações sobre o ensaio e eventuais transtornos percebidos durante a realização do ensaio.

3.2.1.3 RECOMENDAÇÃO PARA APLICAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

De acordo com a EN 1168 (2005), a velocidade de carregamento aplicada deve ser 10% da carga última por minuto, desta forma os ensaios terão duração de 10 minutos e a força será aplicada de forma gradual, tendo em vista que a velocidade de aplicação da carga influencia nos resultados e na maneira da laje se comportar.

Para avaliação da capacidade da laje a um esforço, é recomendado que na realização do ensaio se atinja a carga correspondente a ruptura do elemento, assim a relação entre o valor resistido e calculado permite avaliar a segurança do procedimento de cálculo e a capacidade do elemento. É imprescindível que o valor calculado seja realizado sem a consideração de coeficientes de segurança (COSTA, 2009). FIP (1992) sugere para casos de ensaios de controle da qualidade a aplicação de 1,25 vezes a força cortante solicitante de projeto. Para carregamentos cíclicos a EN 1168 (2005) recomenda a aplicação de dez ciclos com cerca de $70\% \pm 2\%$ da carga última, com avanço até a ruptura no último ciclo.

3.2.1.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO

Este ensaio é utilizado para avaliar a resistência de lajes alveolares ao esforço cortante. Sabe-se que no ensaio de cisalhamento podem ser avaliados ambos os esforços cortantes e torsões, mas neste ensaio realizado em lajes alveolares costuma-se desconsiderar o momento torsor. A resistência das lajes alveolares ao cisalhamento é relacionada à resistência do concreto à tração tendo em vista que esse tipo de laje não possui armadura transversal. O formato geométrico dos alvéolos, dosagem do concreto e processo de fabricação também influenciam diretamente na resistência.

A determinação da resistência à tração do concreto é difícil de ser determinada por métodos tradicionais, sendo que não é possível determinar diretamente a influência da forma da seção transversal e método de fabricação. O ensaio padrão de cisalhamento é proveniente do manual da FIP (1992) e norma europeia EN 1168 (2005), ele foi desenvolvido para determinar alguns parâmetros relacionados à capacidade resistente do apoio e resistência ao cisalhamento, sendo que para a realização do mesmo devem ser levadas em consideração alguns fatores:

- As amostras de ensaio devem ser produzidas na mesma pista de concretagem e serem fabricadas com a mesma classe de concreto;
- Ser um elemento de largura real;
- Possuir vão de 4 m ou 15 x h (o que for maior entre os dois valores);
- Temperatura de ensaio entre 0 °C e 40 °C.

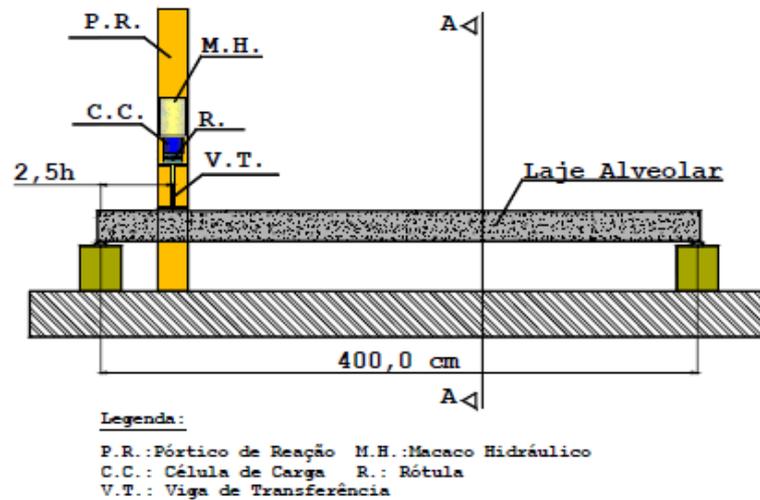
Devem ser extraídos testemunhos para obter valores de referência da resistência do concreto, ou a utilização de corpos de prova desde que comprovados que possuem compactação igual à da laje.

Para o ensaio, o apoio mais próximo deve ser móvel para que não seja gerada nenhuma força axial pela rotação do elemento no apoio, também é necessário compensar possíveis irregularidades existentes na superfície e eventuais curvaturas na direção transversal da peça, para isso podem ser utilizados uma espessura de 10 mm neoprene, madeira ou gesso entre a laje e a viga de suporte.

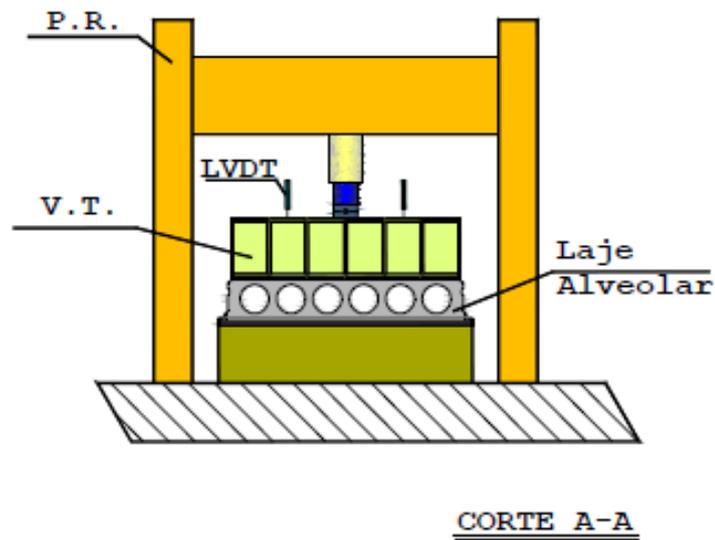
A força é passada pelo macaco hidráulico e célula de carga através de uma viga de transferência que deve ser rígida, preferencialmente metálica e possuir altura mínima de 150 mm, sendo preferencialmente de 250 mm. Podem ser utilizadas uma ou duas linhas de carga. A viga deve possuir largura suficiente a transferir uniformemente a força ao longo de toda a largura da laje. Em relação aos apoios da laje, o mais próximo do pórtico deve ser móvel para que não seja gerada força axial pela rotação do elemento no apoio. Entre a laje e viga de

apoio deve também ser utilizado material para a distribuição de cargas, podendo ser neoprene, madeira compensada de espessura 10 mm ou faixa de argamassa ou de gesso para distribuição das cargas com 10 mm de altura, de forma a compensar irregularidades da superfície da laje ou alguma eventual curvatura na direção transversal (Figura 3-10).

Figura 3-10: Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento



a) Vista lateral



b) Vista Frontal

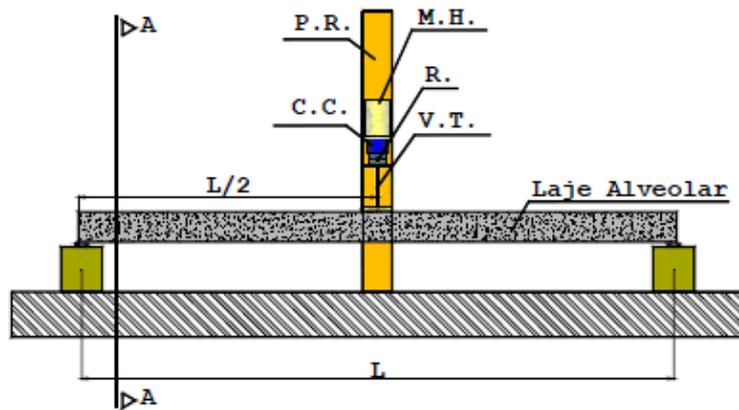
Fonte: Costa (2009)

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios de cisalhamento devem ser comparados com os valores teóricos de cálculo. O requisito de desempenho para a resistência à força cortante deve ser satisfatório nos modelos ensaiados, sendo que as resistências experimentais devem ser superiores aos valores teóricos previstos. A resistência teórica última é obtida considerando-se as resistências efetivas do concreto e do aço sem coeficientes de minoração da resistência dos materiais. Para condição de aceitação do ensaio, calcula-se $V_{\text{test}} / V_{\text{calc}} \geq 0,95$ para cada ensaio e para a média de 3 ensaios, $V_{\text{test}} / V_{\text{calc}} \geq 1,00$. Onde V_{calc} é a resistência última ao cisalhamento calculada e V_{test} é a resistência última ao cisalhamento ensaiada. Caso os resultados sejam insuficientes, recomenda-se melhorar a produção e testar três novos elementos ou ajustar o modelo de projeto para a concepção do produto.

3.2.1.5 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão padrão (Figura 3-11) é realizado de acordo com o manual da FIP (1992), podendo ser com a parte remanescente da peça utilizada no ensaio de cisalhamento. Este ensaio possui como objetivo obter informações sobre a força de protensão e a resistência do concreto à tração na flexão. Durante o ensaio a força aplicada no meio do vão deve ser aumentada gradativamente até que ocorram fissuras por flexão, após, a laje é descarregada e carregada novamente. Desta forma, quando o momento de descompressão (M_0) é atingido ocorre novamente a abertura das fissuras e é possível obter a resistência à tração na flexão (f_{ctf}) e tensão de protensão no aço (σ_p) através do momento de fissuração (M_r) e do momento de descompressão (M_0). Ferreira *et al* (2007) identificou que para lajes tipicamente brasileiras, é mais adequado empregar lajes com 6 m de comprimento, ou 30 x h no ensaio de flexão, tendo em vista a diferença com as lajes utilizadas para o desenvolvimento do manual da FIP (1992).

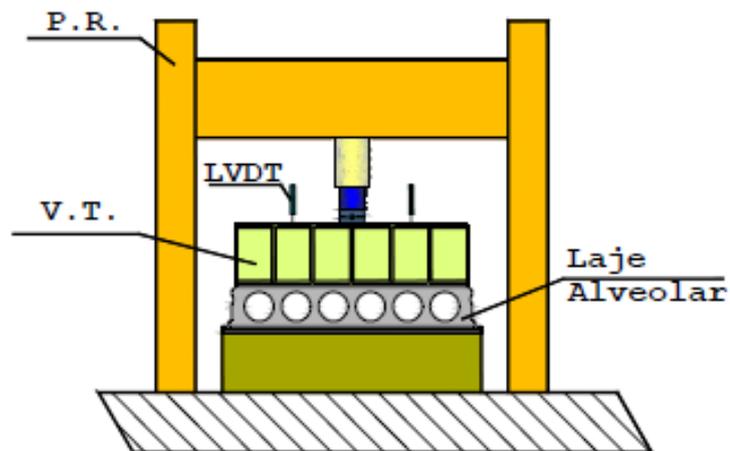
Figura 3-11: Desenho esquemático de ensaio à flexão



Legenda:

P.R.: Pórtico de Reação M.H.: Macaco Hidráulico
 C.C.: Célula de Carga R.: Rótula
 V.T.: Viga de Transferência

a) Vista lateral



CORTE A-A

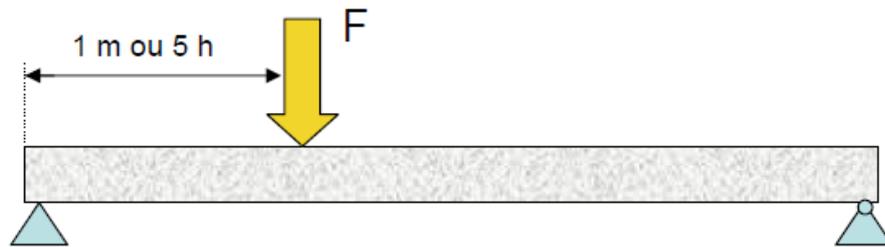
b) Vista Frontal

Fonte: Costa (2009)

3.2.1.6 ENSAIO DE INTERAÇÃO COM CISALHAMENTO E FLEXÃO

Este ensaio é realizado para se observar a interação da flexão com o cisalhamento e de acordo com a FIP (1982) com carregamento aplicado a 1 m ou 5h de distância do apoio em uma laje de comprimento de 3 m (Figura 3-12).

Figura 3-12: Ensaio de interação de cisalhamento e flexão



Fonte: Costa (2009)

3.2.2 CÁLCULOS A PARTIR DOS RESULTADOS DE ENSAIOS

3.2.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO

É possível obter a resistência à tração através dos resultados dos ensaios de flexão ou cisalhamento.

A partir do ensaio de flexão é possível calcular a resistência à tração do concreto utilizando-se a expressão do momento de fissuração e isolando o valor da resistência à tração (COSTA, 2009). Para obtenção da resistência à tração de forma mais representativa, utiliza-se as Equações 47 e 48 de resistência média do concreto à tração, que possui uma menor variabilidade dos resultados para formação de fissuras de flexão.

$$f_{ctm} = \frac{\left[\frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p \times e_p \times y_t}{I_0} - \frac{M_{r,exp} \times y_t}{I_0} \right]}{\alpha_f} \quad (47)$$

$$M_{r,exp} = \frac{P_{r,exp} \times L}{4} + \frac{pp \times L^2}{8} \quad (48)$$

Onde:

M_r - Momento de fissuração relativo à força aplicada no atuador, no momento da primeira fissura da laje (considerando o peso próprio (pp) da laje);

N_p - Força de protensão na data do ensaio (descontando as perdas calculadas para a data do ensaio);

A_c - Área de concreto considerando a geometria efetiva da laje ensaiada;

I_h - Momento de inércia da geometria homogênea da laje ensaiada;

e_p - excentricidade efetiva (valor médio para as posições das cordoalhas da laje ensaiada);

$\alpha_f = 1,5$.

De outro modo, é possível realizar a verificação do valor da resistência à tração através de resultados obtidos no ensaio de cisalhamento. Este em específico serve mais para o controle de desempenho da peça ao cisalhamento devido a possibilidade de interação ou combinação de mecanismos de fissuração que pode conduzir a uma interpretação errônea dos resultados (COSTA, 2009). A Equação 49 é modificada a partir da expressão que fornece o valor do cortante resistido por um painel alveolar, com o valor da resistência à tração isolado em função das demais variáveis.

$$f_{ctm} = \frac{\left[\frac{V_{R,exp} - 0,15 \times \sigma_{cp} \times d \times \sum b_w}{0,25 \times d \times k \times \sum b_w \times (1,2 + 40 \times \rho)} \right]}{0,70} \quad (49)$$

As Equações 50, 51 e 52 fazem parte:

$$V_{R,exp} = P_{exp} \times \left(\frac{L - 2,5 \times h}{L} \right) + \frac{pp \times L}{2} \quad (50)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A_c} \quad (51)$$

$$\rho = \frac{A_s}{d \times \sum b_w} \quad (52)$$

Onde:

N_p – Força de protensão na data do ensaio (descontando as perdas calculadas para a data do ensaio);

A_c – Área de concreto considerando a geometria efetiva da laje ensaiada;

A_s – Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;

d – Altura útil da laje ensaiada (considerando a geometria efetiva e a posição média das cordoalhas);

$\sum b_w$ – Somatória das larguras efetivas das nervuras da laje ensaiada;

$k = 1,6 - d$;

h – Altura da laje.

De acordo com a FIP (1992), através do ensaio de flexão, por meio do momento de fissuração (M_r) e do momento de descompressão (M_0), é possível obter a resistência à tração na flexão (f_{ctf}) e a tensão de protensão no aço (σ_p), com o emprego Equações 53 e 54:

$$f_{ctf} = \frac{M_r - M_0}{W} \quad (53)$$

$$\sigma_p = \frac{M_0}{A_p \left(\frac{W}{A_c} + e \right)} \quad (54)$$

Onde:

A_p – Área total da seção transversal de aço protendido;

W – Módulo de resistência da seção;

A_c – Área total da seção transversal do concreto;

e – Excentricidade dos cabos protendidos.

Conforme a ABNT NBR 14861 (2011), a laje deve ser verificada na resistência à flexão com a verificação das tensões admissíveis quanto ao atendimento dos requisitos de flexão e durabilidade, utilizando-se as Equações 55 e 56 para verificação em serviço:

$$\sigma_{ct} \leq \frac{1,3f_{ct,m}}{\gamma_c} \quad (55)$$

$$\sigma_c \leq \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \quad (56)$$

Onde:

σ_{ct} – Tensão de tração no concreto;

σ_c – Tensão de compressão no concreto;

$f_{ct,m}$ – Resistência média à tração do concreto;

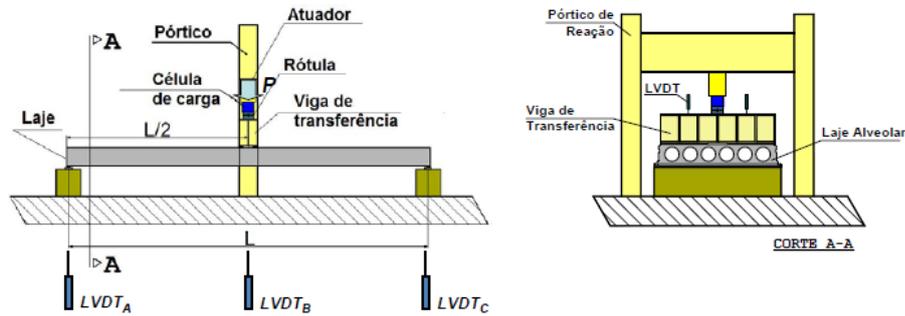
f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto;

γ_c – Coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

3.2.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

É possível determinar o valor do módulo de elasticidade através da flecha na laje obtida no ensaio de flexão, para isto é necessária a instalação de aparelhos LVDT na realização do ensaio para a leitura da flecha. A localização dos LVDTs de acordo com Costa (2009) é elucidada na Figura 3-13:

Figura 3-13: Localização de LVDTs para leitura da flecha no ensaio de flexão



Fonte: Costa (2009)

O módulo de elasticidade varia conforme a idade do concreto, portanto deve ser anotado o dia do ensaio e levar em consideração que a resistência do concreto e dos cabos mudam ao longo do tempo. As Equações 57 e 58 são para estimativa do módulo de elasticidade do concreto:

$$E_{c,ef} = \frac{P_{exp}}{\alpha_{exp}} \times \left(\frac{L^3}{48 I_0} \right) \quad (57)$$

$$\alpha_{exp} = LVDT_B - \frac{LVDT_A + LVDT_C}{2} \quad (58)$$

3.2.3 CÁLCULOS TEÓRICOS

3.2.3.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A Equação 59, proveniente da ABNT NBR 14861 (2011) é sugerida para o cálculo da resistência ao cisalhamento:

$$V_{Rd} = [\tau_{Rd} \times k \times (1,2 + 40 \times \rho_1) + 0,15\sigma_{cp}] \times b_w \times d \quad (59)$$

As quais as equações 60, 61, 62 e 63 fazem parte:

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd} \quad (60)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (61)$$

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \times d} \quad (62)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_{c,calc}} \quad (63)$$

Onde:

κ – Coeficiente com os seguintes valores:

- Para elementos em que 50% da armadura inferior não chega ao apoio: $\kappa = 1$;
- Para os demais casos: $\kappa = 1,6 - d$ (não menor que 1), com d em metros;

A_{s1} – Área da armadura de tração que se estende até não menos que $d + L_{b,nec}$ além da seção considerada;

b_w – Largura mínima da seção ao longo da altura útil d ;

d – Altura útil ($h_{laje} - d'$);

N_{sd} – Força longitudinal na seção devida à protensão;

γ_c – 1,0 - Não sendo considerado no cálculo, neste caso;

$A_{c,calc}$ – Área calculada de concreto nos painéis de laje alveolares.

Para comparação entre os valores obtidos no ensaio e valores obtidos pelo cálculo teórico, a resistência de ruptura média nos ensaios ($V_{rup,med}$) deve ser superior à resistência última de cálculo (V_{Ru}) calculado pela Equação 64 sem os coeficientes de minoração dos materiais (COSTA, 2009).

$$V_{rup,med} \geq V_{Ru} \quad (64)$$

O cisalhamento máximo de serviço (V_{max}) na região do apoio da laje alveolar é determinado pela Equação 65 (COSTA, 2009).

$$V_{max} \leq \frac{V_{Rd}}{1,4} \quad (65)$$

Onde:

V_{Rd} – Resistência última de cálculo, com coeficientes de segurança aplicados.

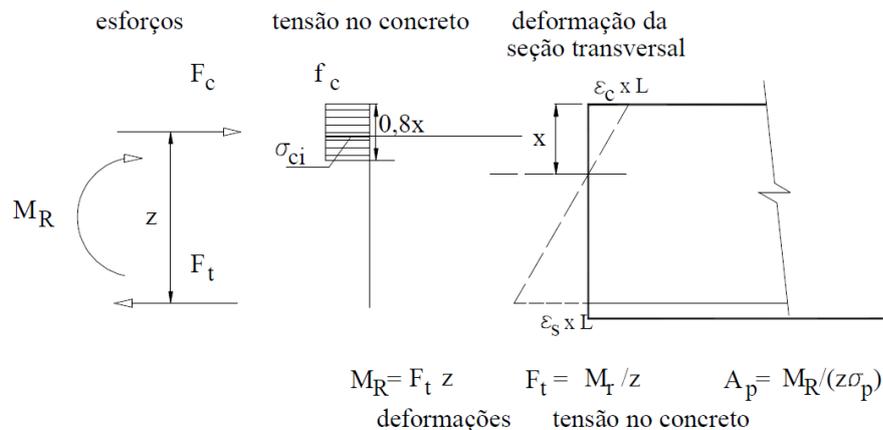
3.2.3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Segundo Fusco (2008) a fissuração por flexão nas lajes sem armadura de cisalhamento ocorre sem a inviabilização da integridade da peça, ocorrendo a ruptura somente no surgimento da fissura crítica, correspondendo a primeira fissura inclinada que é característica de ruptura por força cortante.

Neste caso deseja-se verificar se o momento último de cálculo concorda com o valor de ensaio, são conhecidas a área da armadura de protensão, geometria e resistência à compressão do concreto, desejando apenas verificar se o momento último de cálculo decorrente destas condições é superior ou inferior ao momento de ensaio.

Para o cálculo do momento resistido, deve-se partir de uma posição de linha neutra (contida nos domínios 2, 3 ou 4) e para este valor, determinar as intensidades da força de compressão (F_c) e força de tração (F_t) conforme Figura 3-14. Se os valores destas forças forem iguais, para solução do problema basta calcular o momento resistido (M_R) que é comparado com o momento último (M_U) obtido no ensaio.

Figura 3-14: Esquema para cálculo do momento resistente da seção transversal



Fonte: Costa (2009)

Primeiramente é necessário calcular os valores teóricos esperados para o momento de fissuração e o momento resistente da seção transversal, obtendo dados básicos de características geométricas da seção, características mecânicas do concreto, dados da armadura protendida e dados complementares como temperatura, idade do concreto no dia do ensaio e umidade relativa do ar, deve-se também calcular as perdas de protensão para obtenção de σ_p e para todos os cálculos, caso a seção da laje possua capa, deve-se considerar no cálculo como parte da laje. A Equação 66, para o cálculo do momento de fissuração, é adaptada por Costa (2009) e proveniente da ABNT NBR 6118 (2014):

$$M_r = \left(\alpha f_{ctm} + \frac{N_p}{A} \right) \times \frac{I}{y_t} + N_p \times e \quad (66)$$

Onde:

α – 1,2 para seções em forma de T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares;

$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$ para concreto de classe até C50;

N_p – Força normal de protensão;

A – Área de concreto da seção transversal;

I – Momento de inércia da seção bruta de concreto;

y_t – Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada;

e – Excentricidade da peça.

Para comparação se obtém o valor de resistência à tração que seria usado pelo projetista, que é dado pela expressão $f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$. Após, é necessário obter o valor de resistência à tração no ensaio realizado em corpo de prova ou testemunho.

No cálculo do momento resistente da seção é necessário primeiramente encontrar a linha neutra (x) pelas Equações 67 e 68:

$$x = \frac{F_t}{0,8 \times b \times f_{ck}} \quad (67)$$

$$F_t = A_p \times \sigma_p \quad (68)$$

Onde:

x – Linha neutra;

F_t – Força de tração;

A_p – Área de aço da cordoalha;

σ_p – Tensão na cordoalha;

b – base da laje;

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto.

E depois deve-se utilizar a Equação 69 para obtenção do momento resistido:

$$M_R = F_t \times (d - 0,4x) \quad (69)$$

Onde:

M_R – Momento resistido;

F_t – Força de tração;

d – Altura útil da seção (distância do cg da armadura a fibra mais comprimida);

x – Linha neutra.

Para fazer a comparação do momento resistente teórico com o momento último obtido no ensaio, é preciso calcular o peso próprio da laje para ser descontado no momento último, para então verificar se os valores de ensaio são maiores que os valores de cálculo.

3.2.3.3 CORRELAÇÃO ENTRE CÁLCULOS TEÓRICOS E CÁLCULOS EXPERIMENTAIS

Para a capacidade resistente ao cisalhamento, deve-se comparar as resistências teóricas com as resistências atingidas nos ensaios, sendo que nestas é necessário considerar as cortantes últimas devido a força aplicada no atuador somadas as cortantes devidas ao peso próprio da laje e da viga metálica. O cálculo das Equações 70 e 71 resultam na força máxima cortante aplicada no ensaio, é realizado com base na cortante característica (V_{Rk}) que é a capacidade final de carga da seção sem nenhum coeficiente de ponderação, e descontadas as cortantes devidas ao peso próprio da laje e da viga metálica, realizando-se um cálculo reverso e obtendo a carga máxima aplicada prevista (COSTA, 2009).

$$P_{max} = V_{max} \times \left(\frac{L}{0,897 \times L} \right) \quad (70)$$

$$V_{max} = V_{Rk} - V_{pp} \quad (71)$$

Para a capacidade resistente ao momento fletor, deve-se comparar as resistências teóricas com as resistências atingidas nos ensaios, sendo que as resistências experimentais devem considerar os momentos últimos devidos à força aplicada no atuador somados aos momentos devidos ao peso próprio da laje e da viga metálica. O cálculo a se realizar obtido pela Equação 72 também é reverso, com base no M_{Rk} e descontados os momentos devido ao

peso próprio da laje e da viga metálica, obtendo-se o momento máximo aplicado no ensaio e consequentemente a carga máxima aplicada prevista (COSTA, 2009).

$$P_{max} = \frac{4 \times M_{max}}{L} \quad (72)$$

Onde:

M_{Rk} – Momento resistente característico (calculado considerando a seção do ponto de aplicação da carga, sem nenhum coeficiente de segurança);

Para o momento de fissuração, deve-se comparar os momentos efetivos com momentos teóricos, considerando-se para os valores experimentais os momentos de fissuração relativos ao peso próprio da laje e da viga metálica. O cálculo realizado pelas Equações 73 e 74 é reverso e obtém tanto o valor de momento aplicado (M_r) esperado na fissuração quanto a carga aplicada (P_r) prevista para a fissuração (COSTA, 2009).

$$P_r = \frac{4 \times M_{r2}}{L} \quad (73)$$

$$M_{r2} = M_{r,teor} - M_{pp} \quad (74)$$

Os dados dos materiais e forças de protensão aplicadas na fabricação podem ser fornecidos pelo fabricante, e assim determinadas as perdas iniciais e calculados os valores esperados para as resistências ao cisalhamento e flexão. Para verificar se o cálculo teórico usado para referência está correto, com carga ou momento últimos calculados para a comparação com resultados experimentais, os valores teóricos devem ser calculados sem a consideração de coeficientes de segurança dos materiais, assim pode-se obter o coeficiente real de segurança (λ) entre o resultado experimental e o teórico através das Equações 75 e 76. O modelo teórico deve apresentar uma relação próxima de 1 e também pode ser considerado preciso caso apresente baixa dispersão.

$$\lambda_V = \frac{V_{exp}}{V_{teor}} \quad (75)$$

$$\lambda_M = \frac{M_{exp}}{M_{teor}} \quad (76)$$

Onde:

λ_V – Coeficiente real de segurança à cortante;

λ_M – Coeficiente real de segurança ao momento fletor;

V_{exp} – Força cortante obtida no ensaio;

V_{teor} – Força cortante de cálculo;

M_{exp} – Momento fletor obtido no ensaio;

M_{teor} – Momento fletor de cálculo.

3.3 CONTROLE DE CONFORMIDADE

O relatório da *Fédération Internationale du Béton - FIB (1992) - Guide to Good Practice: Quality Assurance of Hollow Core Slab* elenca alguns pontos importantes para instaurar a qualidade na fábrica. Nele é relatado que todo fabricante deve possuir equipamentos necessários para realizar o controle de qualidade em suas instalações, no decorrer da produção ou aferindo regularmente a qualidade em laboratórios que atestem o desempenho das peças periodicamente.

O desempenho correto do produto está diretamente ligado ao controle da qualidade, sendo que devem ser atendidos requisitos preliminares antes do início da aferição da qualidade, que se referem aos materiais empregados desde a caracterização de agregados e controle da qualidade do concreto e do aço, método de fabricação, processo construtivo ou de montagem na obra. As verificações devem ocorrer constantemente para os processos produtivos e construtivos para cada novo lote de produção, devendo ser extraídos corpos de prova de concreto utilizado na fabricação das peças para ensaios de resistência média a compressão para a liberação de protensão, além de serem coletadas regularmente amostras de agregados para conferência da granulometria e analisadas a presença de materiais nocivos, também deve ser analisada a água de amassamento quanto a presença de sais ou outros compostos que possam afetar a reação química com o cimento.

Devem ser realizadas verificações adicionais para os elementos de laje alveolar, sendo eles a dosagem, compactação e cura do concreto, nível de protensão da armadura, dimensões e controle de fissura, ensaios de carga, escorregamento das cordoalhas e ruptura dos corpos de prova à compressão (FIP, 1992).

O controle de qualidade rigoroso da produção permite que os resultados teóricos sejam mais próximos dos resultados de ensaios, assim espera-se que os elementos sejam duráveis. Este sistema de laje possui grande controle em todos os aspectos da execução das peças por ser altamente industrializado, Petrucelli (2009) os elenca:

- Fornecimento de materiais (agregados miúdos, graúdos, aditivos e aços) controlados com ensaios;
- Análises periódicas de resistência e deformação do concreto;
- Ensaios em laboratório dos elementos como um todo para validação da peça;
- Uso de equipamentos mecanizados que garantem a produção com qualidade, como macacos de protensão, medidores de pressão e de deformação, central de dosagem e mistura do concreto, equipamentos de produção, de corte e içamento, etc.;
- Locais adequados para execução e estoques;

- Mão de obra específica e treinada;
- Procedimentos normalizados, sendo devidamente identificados, listados e acompanhados;
- Apoio de escritório de projetos.

De forma a melhorar o controle da qualidade em ambiente fabril é necessária a realização de inspeção visual das lajes quanto a existência e tipo de fissuras, contraflecha, escorregamento da armadura, estrangulamento do alvéolo e inspeção quanto aos materiais empregados na produção das lajes quanto a fornecedores diferentes e realização de caracterização dos agregados e ensaios de controle tecnológico de resistência à compressão e *slump test*.

Estudos na área vêm incentivando a adoção do ensaio não destrutivo de prova de carga no ELS em ambiente fabril, de forma a aumentar o controle de conformidade quanto ao projeto, considerando-se uma etapa adicional a ser implantada com procedimento adequado de forma a evitar a realização de ensaios destrutivos em laboratório quando existe o conhecimento prévio do comportamento estrutural do elemento de laje alveolar com características geométricas, de protensão e materiais utilizados semelhantes.

Desta forma, a sequência de etapas da Tabela 3-1 será testada para obtenção da conformidade de projeto, sendo que as três primeiras etapas podem ser realizadas em ambiente fabril.

Tabela 3-1: Sequência do procedimento implantado

Etapa	Nome	Características
1ª	Inspeção Visual	Tipo de Fissura Contraflecha Escorregamento da armadura Estrangulamento do alvéolo
2ª	Inspeção de materiais	Caracterização dos materiais (areia, brita, cimento, aço, etc.) Controle tecnológico do concreto (resistência à compressão e à tração, slump test)
3ª	Ensaio não destrutivo em fábrica	Prova de carga com controle de deformação da laje

Fonte: Próprio Autor (2021)

Neste contexto permite-se realizar a inspeção visual das peças, ter o controle dos materiais utilizados e realizar ensaios de prova de carga na fábrica, de forma a manter o controle de conformidade do projeto e efetiva utilização para o proposto para cada peça. Comparativamente, uma laje alveolar protendida que possua o desempenho esperado não

precisa passar pelos ensaios destrutivos de flexão e cisalhamento para validação de todo lote, sendo necessário a execução destes ensaios apenas em caso de divergência nas três primeiras etapas, com isso espera-se maior economia de material, tempo e custo.

3.3.1 INSPEÇÃO VISUAL

Na inspeção visual é possível constatar inconformidades que variam desde má compactação até a existência de fissuras provenientes de diversos mecanismos, ocorridas no processo de produção, transporte e montagem das lajes alveolares (MIZUMOTO *et al*, 2013). Através da inspeção visual pode-se perceber possíveis problemas nas lajes alveolares, sendo que os requisitos e critérios para inspeção em fábrica encontram-se nos manuais de projeto e controle da qualidade do PCI – *Precast Concrete Institute* e da FIB (CEB-FIP) – *Commission on Prefabrication* 6:

- Fissurações Pré-Existentes (identificação de fissuras, caracterização do tipo de fissura e correlação com possível causa da mesma);
- Verificação de Escorregamento em Cordoalhas (identificação visual de afundamentos nas cordoalhas, seguida de medição com paquímetro e verificação do afundamento máximo médio ΔL_o (valor médio entre cordoalhas) bem como do valor máximo de escorregamento em uma cordoalha e afundamento máximo em uma cordoalha dados pela ABNT NBR 14861 (2011) pelas expressões: $\Delta L_o = 0,4 \times 85\phi \times \sigma_{po} / E_p$ e $\Delta L_{o,lim} = 1,3\Delta L_o$. Considera-se ainda, para fins da medição uma tolerância de 1 mm;
- Verificação de cobrimentos mínimos das cordoalhas por questões de durabilidade. Esta verificação é muito importante principalmente com relação ao cobrimento da cordoalha junto à sua face inferior, por ser a face exposta da laje. Segundo a ABNT NBR 9062 (2017), para lajes alveolares pré-fabricadas com concretos com $f_{ck} > 40$ MPa e fator A/C < 0,45, o cobrimento mínimo permitido é de 20 mm.
- Verificação do cobrimento mínimo para evitar fendilhamento, que conforme a ABNT NBR14861 (2011) este cobrimento deve ser $2\phi = 25$ mm. Entretanto, segundo interpretação da ASSAP (2002), que segue os mesmos critérios da comissão C6-FIB, dentro deste cobrimento de 2ϕ está embutido uma tolerância de 5 mm, ou seja, o valor nominal seria $C_{nom} = 2\phi = 25$ mm, mas onde o valor mínimo deste cobrimento seria então dado por $C_{min} = 2\phi - 5$ mm = 20 mm (que coincide com o cobrimento mínimo por durabilidade);

- Verificação do distanciamento entre cordoalhas. Segundo recomendações do ASSAP (2002), a distância média horizontal entre cordoalhas deveria ser superior a $2\phi = 25$ mm. Entretanto, admite-se uma distância mínima de $1\phi = 12,5$ mm desde que se aumentasse o cobrimento mínimo destas cordoalhas;
- Verificação do posicionamento efetivo do centro de gravidade das cordoalhas em relação à face inferior da laje. Este posicionamento é importante para avaliar a variação da excentricidade da protensão na seção da laje;
- Verificação das variações geométricas na seção da laje alveolar, incluindo espessura de nervuras e mesas superiores e inferiores;
- Verificação das contraflechas.

3.3.2 INSPEÇÃO DE MATERIAIS

3.3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Deve ser realizada a caracterização dos materiais componentes da laje alveolar, controlando com ensaios os agregados miúdos, graúdos, aditivos e aços, conferindo-se a granulometria e analisando a presença de materiais nocivos, assim como análise da água de amassamento para verificação da presença de compostos que possam afetar a reação química com o cimento.

Para caracterização dos agregados miúdos e graúdos, para o aceite do material no momento do recebimento destes na fábrica, o laboratorista responsável deve realizar inspeção visual preliminar de uniformidade dos agregados em termos de geometria e excessos de impureza no material. Devem ser realizados ensaios a cada 15 dias para verificação das características físicas e na mudança de fornecedor ou origem do agregado, devem ser realizados os ensaios para aprovação da mudança (MIZUMOTO *et al*, 2012), para todos os ensaios devem ser obedecidas as especificações contidas na ABNT NBR 7211 (2019) e suas referências normativas.

No caso do cimento Portland, o fornecimento para as fábricas pode ser em forma de sacos ou a granel. Para o caso de recebimento e armazenamento de sacos de cimento, é necessário respeitar o máximo empilhamento e exposição à umidade. Já para o fornecimento a granel é necessário verificar a carga de pressurização da descarga do material (inferior a $1,5 \text{ kgf/cm}^2$) e conformidade do equipamento de descarga. É necessário o armazenamento no laboratório de amostras de cada lote de cimento recebido, para realização de testes em caso de problemas encontrados no concreto produzido. As análises físico-químicas do

cimento devem ser realizadas de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018) e comparada com os laudos fornecidos pela fabricante do cimento (MIZUMOTO *et al*, 2012).

No recebimento do aço, deve-se realizar inspeção visual a fim de verificar irregularidades como desalinhamento de rolos ou presença de oxidação e etiqueta para conferência dos dados com o laudo do fornecedor. O armazenamento deve ser realizado em local protegido do tempo e afastado do solo para evitar contato com umidade, evitando-se a ocorrência de oxidações excessivas, carepas, materiais aderidos, deformações ou dobramentos antes da montagem. Os laudos fornecidos devem ser comparados aos limites previstos na ABNT NBR 7480 (2007) (MIZUMOTO *et al*, 2012).

O controle realizado em aditivos consiste na comparação entre os dados técnicos obtidos com o fornecedor, e a coleta de uma amostra para verificação do desempenho do produto, realizando ensaio em um traço de concreto padrão e de acordo com a ABNT NBR 11768 (2019).

Para a água de amassamento, deve ser coletada amostra e enviada a laboratório para análise físico-química, onde devem ser obedecidas as especificações contidas na ABNT NBR 15900 (2009) em todas as partes (1 a 11). A presença de impurezas na água pode influenciar negativamente na resistência à compressão do concreto, além de alterar o tempo de pega, causar eflorescências ou resultar na corrosão da armadura.

3.3.2.2 CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO

O controle tecnológico é realizado em concreto no estado fresco e endurecido, de acordo com propriedades especificadas em projeto. São realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone (*slump-test*) e moldagem de corpos de prova com compactação muito próxima a realizada pela máquina extrusora/moldadora que fabrica as lajes alveolares protendidas, também pode-se separar uma parte da laje para extração de testemunhos. A amostra de corpos de prova/testemunhos deve ser respeitado o mínimo de 6 exemplares por lote de concreto produzido, com no mínimo 1 amostra por pista de produção ou a cada 30 m³ de um mesmo traço de concreto produzido (MIZUMOTO *et al*, 2012). Os corpos de prova são utilizados para verificação da resistência à compressão do concreto na desforma ou liberação da protensão (f_{cj}) e aceitação final (f_{ck}).

Usualmente para a desforma ou liberação da protensão em lajes alveolares protendidas é necessário $f_{cj} \geq 28$ MPa, com realização de ensaios em no mínimo dois corpos de prova e um período superior a 18h de cura sob condições iguais as da laje alveolar, para atingir o valor de resistência. Os demais corpos de prova devem ser mantidos em cura em

câmara úmida ou imersos em tanques de água, conforme ABNT NBR 5738 (2015) e ABNT NBR 9479 (2006). Os demais ensaios são realizados para as idades de 7 dias e 28 dias para valores de f_{ck} , assim como o módulo de elasticidade para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias para cada traço de concreto. Para ensaios de tração deve ser respeitado o mínimo de 6 corpos de prova ou testemunhos para cada lote de concreto produzido e com no mínimo 1 amostra por pista de produção.

Em lajes alveolares é comum a utilização de cura térmica, por ser um processo que acelera a resistência do concreto, onde o aquecimento acelera as reações de hidratação do cimento e assim o concreto pode ser manuseado nas primeiras idades. De acordo com a ABNT NBR 9062 (2017), para o aquecimento na cura térmica, a velocidade não deve ser superior a 20 °C/h e a velocidade de resfriamento não deve ser superior a 30 °C/h, com pico de temperatura constante entre 60 °C e 70 °C, nunca superior a 70 °C, pelo período de 4h a 6h.

3.3.2.3 CONTROLE DA PROTENSÃO DA CORDOALHA

Para que as cordoalhas recebam a força de protensão especificadas em projeto é necessário converter essa força especificada em projeto em tensão de protensão a ser aplicada na cordoalha pelo macaco de protensão. Envolve dois parâmetros, que é o controle de tensão lida no manômetro acoplado ao macaco de protensão e o alongamento teórico do cabo. Para a conversão pelo cálculo da força real a ser aplicada no macaco de protensão, ajustada pela função de calibração obtida a partir dos dados indicados no laudo de calibração é dada pelas Equações 77 e 78 (MIZUMOTO *et al*, 2012).

$$Y = Ax + B \quad (77)$$

Onde:

Y – Força real do macaco de protensão, em kgf;

A e B – constantes determinadas na calibração;

x – força de protensão de projeto, em kgf.

$$\sigma_p = \frac{Y}{A_p} \quad (78)$$

Onde:

σ_p – Tensão de protensão no macaco;

Y – Força de protensão;

A_p – Área do pistão no macaco.

No processo de aplicação da protensão, posiciona-se os cabos de cordoalha na pista de protensão e aplica-se uma tensão prévia no cabo, para eliminar o efeito de catenária. Após, calibra-se o macaco de protensão com base no valor de tensão calculado, procede-se a marcação de referência do alongamento na cordoalha, aplica-se a tensão pelo macaco hidráulico e realiza-se a verificação do alongamento. Para isso é necessário conhecimento das características físico-mecânicas da cordoalha e obtido pela Equação 79 (MIZUMOTO *et al*, 2012).

$$Al = \frac{F \times L_{pista}}{E \times A_c} \quad (79)$$

Onde:

Al – Alongamento;

F – Força de protensão estabelecida em projeto;

L_{pista} – Comprimento da pista de protensão;

E – Módulo de elasticidade da cordoalha, obtido do laudo do fabricante;

A_c – Área da cordoalha, obtido do laudo do fabricante.

3.3.3 INSPEÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

Como medidas adicionais, deve-se inspecionar o processo de produção para obter um controle de qualidade contínuo, de acordo com FIP (1992) e Fernandes (2007):

- O acompanhamento de pessoa técnica responsável é importante em todas as fases tendo em vista que a cada lote pode ser diferente a força de protensão, número de cordoalhas, tempo para retirada da protensão e corte dos elementos;
- O escorregamento de cordoalhas de protensão é crítico e deve-se tomar como precaução após a concretagem, o corte da laje deve ser realizado apenas após a obtenção da resistência mínima de projeto. Caso não seja respeitado o tempo, o concreto não será capaz de restringir mecanicamente o movimento do aço;
- Deve-se verificar visualmente a existência de fissuras na região das nervuras, corte das peças e face superior em primeiras idades, não deve haver formação de fissuras na zona de transferência de protensão, principalmente ocorrendo por

resistência ao cisalhamento. Fissuras até 0,2 mm de abertura e relação de comprimento/profundidade ≤ 3 são permitidas desde que não sejam em ambiente quimicamente agressivo;

- Deve-se verificar as dimensões principais das peças (comprimento, largura, espessura dos flanges, espessura de cada nervura e espessura total das nervuras), bem como posicionamento dos cabos, número de cabos e cobertura do aço, se há empenamentos, esquadro da peça e estrangulamento e forma dos alvéolos;
- Deve-se conferir o embutimento dos cabos e fissuras que sejam paralelas às posições dos cabos;
- Deve-se verificar em todo elemento a existência de partes lascadas, soltas ou estufadas e desprendidas dos fios ou cabos;
- A soma das espessuras das nervuras deve ser respeitada para que se obtenha a resistência ao cisalhamento prevista;
- Devem ser respeitados os cobrimentos das armaduras e altura da peça quanto à segurança ao fogo e proteção física do aço proporcionado pelo concreto;
- A resistência ao cisalhamento deve ser verificada regularmente como requisito de aferição de qualidade, por meio de ensaios destrutivos ou não destrutivos.

3.3.4 ENSAIO DE PROVA DE CARGA

Atualmente a ABNT NBR 14861 (2011) não permite a realização de ensaios em fábrica, devendo os mesmos serem realizados exclusivamente em laboratório, porém, a ABNT NBR 9062 (2017) – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, estabelece de uma forma genérica e não especificamente para lajes alveolares, que podem ser realizadas verificações experimentais como parte do procedimento de projeto, sendo eles:

- a) ensaio para estabelecer a resistência última ou comportamento em serviço;
- b) para obter propriedades específicas de materiais;
- c) para reduzir incertezas de parâmetros de carga ou de modelos de resistência.

Este incentivo de realização de verificações experimentais permite a realização de estudos e ensaios em fábrica para validação da conformidade de projeto, reduzindo o tempo e custo de produção das lajes. A mesma ABNT NBR 9062 (2017) estabelece requisitos para projeto, execução e controle das estruturas de concreto, sendo elas pré-moldadas, armadas

ou protendidas. Para que a construção com elementos pré-moldados se torne competitiva, preferencialmente utiliza-se a repetição das peças. Esta padronização impacta diretamente na redução dos prazos de fabricação e otimização de recursos.

Sendo o ensaio de prova de carga realizado em ambiente fabril uma realização de verificação experimental, ele é resguardado pela ABNT NBR 9062 (2017). Antes do início do ensaio, é necessário realizar medições para caracterização geométrica de cada elemento de laje, posições das cordoalhas e espessura das nervuras para que sejam empregados valores médios nos cálculos teóricos. Este ensaio possui como etapas do processo o cálculo do ELS da laje, aplicação do carregamento de 50 a 85% da carga calculada e análise da curva de carregamento x deslocamento. Também é possível a visualização da fissuração, módulo de elasticidade e afundamento das cordoalhas, sendo necessária a inspeção antes e após o ensaio para verificar a ocorrência do aumento do recuo das mesmas.

A prova de carga pode ser feita tanto para avaliação do elemento no ELU quanto no ELS. Para a análise do ELU o elemento é levado a ruptura e para o ELS o ensaio não é destrutivo com o carregamento aplicado de forma a preservar o comportamento elástico do elemento, fazendo com que não atinja o momento de fissuração e elimina a possibilidade de flechas residuais após o alívio do carregamento (MIZUMOTO *et al*, 2013). Este ensaio de flexão pode ser realizado tanto por meio de carregamento concentrado sendo este com carga aplicada em um ou dois pontos (Figura 3-15a) ou distribuído (Figura 3-15b). A medição dos deslocamentos é realizada através de relógios comparadores analógicos ou digitais em três pontos (nos apoios e no meio do vão).

Figura 3-15: Ensaio não destrutivo de prova de carga para avaliação do ELS



a) Ensaio com carga concentrada

Fonte: Costa (2009)



b) Ensaio com carga distribuída

Fonte: RT1399-12/LA2013-02 NETPRE (2013)

Como procedimento para realização de prova de carga em lajes alveolares, adota-se a metodologia proposta por Mizumoto *et al* (2013), apresentada abaixo:

1. Posicionamento da laje: colocação de vigas de madeira de dimensão 0,25x0,25x3 m nas extremidades das lajes, posicionadas a uma distância de $h/2$ (sendo h a altura da laje), simulando a condição de montagem em obra;
2. Medição de contraflecha: Estica-se um fio de náilon de uma extremidade à outra da laje, aplicando força necessária para eliminar o efeito catenária no mesmo. Marca-se o meio do vão com marcador industrial e realiza-se a medição da contraflecha inicial com o auxílio de uma trena ou relógio comparador, sendo este um instrumento mais apropriado;
3. Carregamento da laje: Tanto para carga concentrada quanto para carga distribuída, recomenda-se aplicar a carga em estágios para verificar a contraflecha a cada incremento de carga. Para o valor máximo de carregamento devem ser consideradas a capacidade resistente da laje e o momento de fissuração;
4. Alívio de carga na laje: Realizar o descarregamento da laje a fim de retomar a condição inicial do ensaio e proceder com a medição da contraflecha residual.

A ABNT NBR 9607 (2019) – Prova de carga estática em estruturas de concreto – Requisitos e procedimentos estabelece diretrizes para planejamento e realização do ensaio. Para isso, primeiramente é necessário definir a finalidade de ensaio, que irá influenciar nos critérios de carregamento e de aceitação, sendo estabelecidas condições de utilização prevista para a estrutura, com parâmetros relativos à intensidade, natureza e frequência das ações externas, e estado limite de utilização (ELS) relativo a deformações e fissuração. Os requisitos e procedimentos descritos na norma são aplicados às situações:

- a) Aceitação de estrutura;
- b) Alterações das condições de utilização da estrutura;
- c) Fases construtivas que acarretem solicitações excepcionais em parte da estrutura;
- d) Após acidentes ou anomalias observados durante a execução ou tempo de serviço de uma estrutura;
- e) Falta total ou parcial de elementos de projeto;
- f) Desconhecimento das condições construtivas;
- g) Estudo do comportamento/desempenho da estrutura;

- h) Dimensões, qualidade e/ou quantidade dos materiais que não atendam aos requisitos de projeto;
- i) Passagem de conjuntos transportadores de cargas especiais indivisíveis.

Para a realização do ensaio de prova de carga, é necessário conhecimento das condições reais da obra, onde deve ser analisada a memória de cálculo para os seguintes aspectos e devendo ser dada atenção especial para ensaios realizados em estruturas que pode ocorrer ruptura frágil, que é o caso de lajes alveolares protendidas, onde há a ruptura por força cortante:

- Critérios de projeto;
- Normas utilizadas;
- Materiais especificados;
- Carregamentos de projeto;
- Coeficientes de segurança;
- Relação entre as quantidades de materiais resultantes do dimensionamento e as efetivamente aplicadas na estrutura.

Para avaliação do estado limite último da estrutura, é imprescindível a análise das características e propriedades dos materiais utilizados, deve-se obter certificado de ensaio dos materiais, idade da obra, condições de conservação e de utilização da estrutura. É necessário também avaliar o controle de execução das lajes, que servem como indicador da confiabilidade e consideram tipos de controle, métodos e equipamentos utilizados, frequência e representatividade das amostras e ensaios dos materiais utilizados e verificação das dimensões. Em casos de ensaios realizados em obra, deve-se efetuar inspeção visando confrontar os dados de execução com o estado atual da estrutura, verificando eventuais sinais de deterioração dos materiais, existência de fissuras, deformações, movimentações de juntas ou recalques, aparelhos de apoio e intensidade e frequência dos carregamentos já ocorridos na estrutura.

Como pré-requisitos para realização do ensaio, é necessário determinação dos critérios para o ensaio:

- Determinação da capacidade portante da estrutura;
- Dimensionamento do carregamento;
- Escolha dos efeitos e pontos da estrutura a serem controlados;
- Previsão teórica destes efeitos;

- Tolerâncias dos desvios entre medidas realizadas e previsão das medidas adotadas como requisitos de aceitação;
- Requisitos de aceitação ou liberação para as várias fases de carregamento, permanência de carga e descarregamento.

A ABNT NBR 9607 (2019) prescreve para realização de prova de carga em estruturas de edificações e passarelas para pedestres a adoção do carregamento pelas Equações 80 e 81:

$$P_{ensaio} = 0,85 \times [1,35 \times (G - G_0) + 1,5 \times Q] - G_1 \quad (80)$$

$$G = G_0 + G_1 + G_2 \quad (81)$$

Onde:

G – Representa as ações permanentes totais;

P_{ensaio} – Carga a ser aplicada na prova de carga;

G_0 – Ações permanentes devidas ao peso próprio;

G_1 – Ações permanentes atuantes no momento do ensaio, exceto o peso próprio;

G_2 – Ações permanentes adicionais, previstas ao longo da vida útil da estrutura;

Q – Ações variáveis previstas ao longo da vida útil da estrutura.

O número de amostras a serem ensaiadas deve ser suficiente para o controle do comportamento/desempenho da estrutura e o carregamento do ensaio deve ser realizado em etapas, parcelando-se as cargas e as diferentes posições que elas ocupam na estrutura, o número de etapas não pode ser inferior a 4 etapas para carregamento e 2 etapas para descarregamento, sendo a intensidade da carga em cada etapa limitada a 25% do carregamento de prova, e as posições na estrutura devem ser facilmente identificadas durante os ensaios. Para comparar os valores durante a execução da prova de carga, devem ser especificados de acordo com os limites da ABNT NBR 6118 (2014) os seguintes:

- Deslocamentos lineares;
- Rotações;
- Deformações específicas;
- Influência das condições ambientais;
- Abertura de fissuras.

O carregamento deve ser realizado por meio de procedimento que proporcione precisão de $\pm 5\%$ em relação ao previsto no projeto de prova de carga, onde a cada etapa do ensaio devem ser observados os deslocamentos-limite estabelecidos, abertura de fissuras e estabilização dos deslocamentos. Na última etapa de carregamento, a carga total de ensaio deve ser mantida por no mínimo 12h, e caso sejam observados deslocamentos contínuos, não estabilizados e acima dos limites aceitáveis, deve-se avaliar a necessidade de realizar o descarregamento da estrutura. Ao final do ensaio realiza-se a etapa de descarregamento da laje com remoção completa da carga, e se avalia o deslocamento residual em no mínimo 60 minutos.

Para o elemento ser considerado aprovado na prova de carga, o deslocamento residual Δr deve satisfazer a Equação 82 e o deslocamento máximo determinado durante o ensaio satisfazer o deslocamento teórico obtido por meio do modelo representativo da estrutura e os limites apresentados na ABNT NBR 6118 (2014).

$$\Delta r = \frac{\Delta l}{4} \quad (82)$$

Onde:

Δr – Deslocamento residual medido logo após a finalização da etapa de descarregamento da estrutura ensaiada;

Δl – Deslocamento máximo, medido após a aplicação da carga de ensaio.

Caso o deslocamento máximo obtido na prova de carga apresente $\Delta l < 1 \text{ mm}$ ou $\Delta l < L/2000$, o deslocamento residual pode ser descartado.

Caso o deslocamento residual não atenda ao parâmetro inicial, porém o deslocamento máximo atenda aos limites prescritos, pode-se realizar nova prova de carga em no mínimo 72h após a conclusão da primeira prova de carga, e o novo deslocamento residual determinado 24h após o descarregamento.

3.3.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A avaliação do módulo de elasticidade pode ser feita tanto de acordo com a prescrição da ABNT NBR 8522-1 (2021) quanto de maneira indireta por meio da realização da prova de carga, quando conhecida a inércia da seção transversal, o carregamento, o vão da laje ensaiada e a flecha aferida, obtendo o módulo de elasticidade do concreto, sendo que a prova de carga não deve atingir o momento de fissuração do elemento para determinação do módulo de elasticidade de forma indireta. Para efeito de dimensionamento e previsão de

deslocamentos (ELS) é necessário conhecer a rigidez (EI) do elemento ensaiado. (MIZUMOTO *et al*, 2013).

A rigidez do elemento ensaiado pode ser obtida através da Equação 83 de flecha para elemento simplesmente apoiado com carregamento distribuído e através da Equação 84 de flecha para elemento simplesmente apoiado com carregamento concentrado no meio do vão:

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (83)$$

Onde:

f - Medida da flecha;

q - Valor do carregamento uniformemente distribuído;

l - Comprimento do elemento entre apoios;

E - Módulo de elasticidade;

I - Momento de inércia da seção;

$$f = \frac{q \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (84)$$

Onde:

f - Medida da flecha;

q - Valor do carregamento concentrado;

l - Comprimento do elemento entre apoios;

E - Módulo de elasticidade;

I - Momento de inércia da seção.

3.3.4.1 REQUISITOS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO EM FÁBRICA

No caso de estudos para desenvolvimento de produto, recomenda-se uma amostragem de pelo menos três peças por tipo de ensaio, sendo ideal um conjunto de 5 peças para boa representatividade dos resultados, podem também ser realizados ensaios pilotos para verificação dos seguintes (FERNANDES, 2007):

- Verificação da eficiência dos apoios;
- Nivelamento dos apoios;
- Comportamento do elemento sobre os diversos materiais de regularização dos apoios extremos;
- Nivelamento da superfície que receberá o carregamento;
- Eficiência dos materiais de regularização do apoio da viga transversal;
- Sistemas de carregamento e medição;
- Sistemas de controle de taxa de carregamento;
- Sistema de aquisição de dados.

3.3.4.2 LISTA DE MATERIAIS

- Sistema de pórtico de reação adequado;
- Sistema de aplicação de carga que permita o controle da taxa de carregamento;
- Sistema de relógio comparador com leitura simultânea de três canais;
- Régua de alumínio de 2 m de comprimento;
- Linha de náilon;
- Trena;
- Vassoura;
- Esquadro;
- Fio marcador de obra;
- Prumo de centro;
- Marcador industrial;
- Nível de mangueira;
- Nível de mão com 50 cm ou mais;
- Prancheta;
- Lápis e borracha;
- Extrator de testemunhos;
- Relógio com cronômetro.

3.3.4.3 PREPARAÇÃO DAS PEÇAS PARA ENSAIO

Fernandes (2007) recomenda que a fabricação das lajes ocorra 10 dias antes dos ensaios por ser o tempo médio de aplicação das peças fabricadas, na realização dos ensaios deve-se conferir o sistema de pórtico de reação e posicionamento da laje para que não resultem em ações secundárias:

- Medir a distância entre apoios necessária conforme o vão do elemento;
- Verificar o nivelamento longitudinal, com desnível inferior a 5 mm;
- Verificar a ortogonalidade dos apoios com uso de linha de náilon indeformável (medida cruzada entre extremidades de forma que as duas diagonais tenham as mesmas distâncias);
- Posicionamento da laje sobre as bases;
- O centro da laje e dos apoios também deve ser o centro do aplicador de carga/carga aplicada;
- Verificação de nivelamento transversal nos apoios;
- Marcar as faces laterais, faces inferior e superior, para facilitar a visualização e anotação das fissuras ocorridas no ensaio;
- Posicionamento dos relógios comparadores;
- Verificação da taxa de carregamento;
- Preenchimento da folha de campo com todas as informações de características da laje.

4. Materiais e Métodos

O intuito dessa pesquisa foi analisar o comportamento estrutural de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, com dimensões de 1,245 m de largura, 0,2 m de altura e com 6 m de comprimento, com 6 cordoalhas de 7 fios de 12,7 mm e 2 cordoalhas de 7 fios de 9,5 mm CP190RB distribuídas ao longo da largura inferior, com a laje confeccionada em máquina moldadora.

4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para o processo de fabricação das lajes, primeiramente é necessário realizar o saque das lajes que estão na pista, realizar a limpeza da pista com raspagem e depois com água e rodo de modo a retirar detritos de concreto, como mostrado na Figura 4-1.

Na fábrica, o próximo passo é aplicar o desmoldante exposto na Figura 4-2 na pista e depois são posicionados sarrafos de madeira ao longo do comprimento da pista como mostra a Figura 4-3, com espaçamento médio de 1 m entre os sarrafos, de modo que, ao esticar as cordoalhas ao longo da pista, as mesmas tenham o mínimo de contato com o desmoldante já aplicado na etapa anterior, apontado na Figura 4-4.

Os cabos já esticados (Figura 4-5) são protendidos (Figura 4-6) de acordo com o projeto, porém neste dia a equipe de protensão informou que a tensão aplicada no macaco hidráulico quando estava próxima ao de projeto (165 kgf/cm^2 para cabos de $\varnothing 12,7 \text{ mm}$ e 100 kgf/cm^2 para cabos de $\varnothing 9,5 \text{ mm}$) o mostrador saltava para $175\text{-}179 \text{ kgf/cm}^2$ como é possível ver na Figura 4-7. A unidade motriz e macaco de protensão foram calibrados pelo fabricante no início de maio/2021.

Figura 4-1 Limpeza da Pista



Figura 4-2 Aplicação do desmoldante

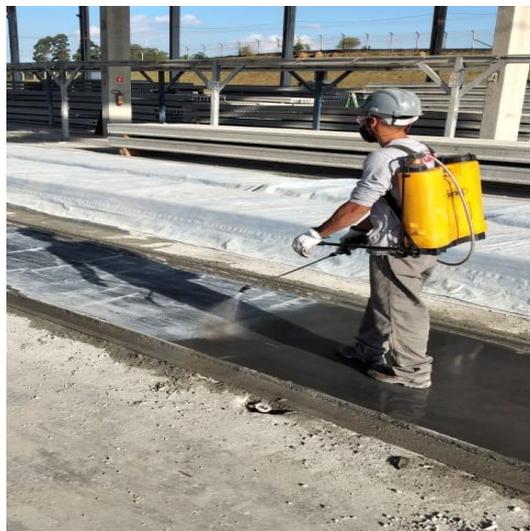


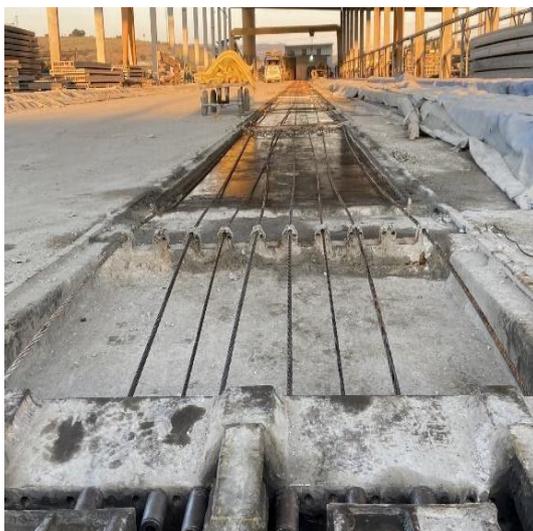
Figura 4-3 Posicionamento de Sarrafos



Figura 4-4 Cordoalha esticada na pista



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 4-5 Cabos esticados**Figura 4-6 Protensão**

Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 4-7 Manômetro mostrando o valor da força aplicada

Fonte: Próprio Autor (2021)

4.1.1 PRODUÇÃO DAS LAJES

A produção das peças ocorreu no dia 17 de maio de 2021, com início da produção às 18h40 e término às 21h, a pista utilizada para a produção destas possuía comprimento de 134 m. De acordo com a plataforma digital do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO, oscilou entre 12,9 °C mínimo e 24,5 °C de máxima. (Disponível em <<http://www.ciiagro.org.br/janeladofruticultor/estacao.php?id=7>> Acesso em: 20 de maio de 2021).

Antes de iniciar o processo de fabricação, é passada uma relação ao líder de produção contendo informações a respeito das lajes a serem produzidas, com seus respectivos projetos, acompanhado de informações como: numeração da laje de acordo com o projeto de modulação, número e nome da obra, dimensões das lajes, código de identificação da laje no sistema, para identificação e rastreio das peças com informações de caracterização do concreto, lote de cordoalha e local de estocagem.

O processo de produção foi realizado por meio de máquina moldadora (Figura 4-8), onde foi apontada uma velocidade de produção de lajes de 1,33 m/min. O Silo de alimentação da máquina moldadora comporta aproximadamente 3 m³ e o processo de alimentação é realizado através da concha de pá carregadeira como mostra a Figura 4-9, dessa forma, enquanto ainda há concreto dentro do silo da moldadora, este é distribuído nas caçambas da frente e atrás da máquina para formar o flange inferior, nervuras e flange superior.

Figura 4-8 Máquina Moldadora



Figura 4-9 Pá carregadeira



Fonte: Próprio Autor (2021)

A máquina molda a laje continuamente por toda a pista, por isso é necessário realizar a marcação dos tamanhos das lajes no concreto ainda fresco, utilizando esquadro para marcação em 90° e para medir o comprimento da laje, exemplificado na Figura 4-10.

Durante a moldagem é realizada inspeção do posicionamento das cordoalhas através de janelas de abertura, para verificação da altura da cordoalha e se a mesma está centralizada no meio da nervura. Na inspeção foi constatado a necessidade de ajuste do posicionamento das cordoalhas no centro das nervuras, verificado na Figura 4-11 e abaixar a altura, conforme Figura 4-12. Também foi verificada a altura das lajes que estavam sendo produzidas tal como a Figura 4-13, estas etapas são importantes para garantir as características da seção das lajes e de posicionamento dos cabos.

Figura 4-10 Esquadro



Figura 4-11 Centro das Nervuras



Figura 4-12 Trena aferindo a altura antes



Figura 4-13 Trena aferindo a altura depois



Fonte: Próprio Autor (2021)

Durante a produção aconteceu um imprevisto que acarretou no aumento do tempo total de produção, onde o equipamento ficou parado no período das 20h até as 20h28. O incidente ocorreu devido a faca da máquina moldadora enroscar no bisotê, travando o equipamento. Para o destravamento foi necessária uma operação que consistiu em levantar a frente da máquina moldadora com o pórtico rolante enquanto a moldagem da pista continuava, até que o final dessa faca saísse totalmente do bisotê, este entrou na laje moldada.

Em função deste ocorrido, acarretou uma falha na moldagem de aproximadamente 60 cm de comprimento onde a equipe com intuito de não perder uma das lajes do ensaio, realizou uma concretagem com compactação manual nesta falha de moldagem (arraste do concreto) como observado na Figura 4-14, colocando também 5 pedaços de cordoalha neste trecho.

Figura 4-14 Reparo manual na laje



Fonte: Próprio Autor (2021)

4.1.2 PROCESSO DE SAQUE E VERIFICAÇÃO DA CONTRAFLECHA

À medida que as lajes foram sendo produzidas, o trecho pronto ia sendo coberto com uma lona grossa de 3 camadas e impermeável para a realização da cura térmica, como mostra a Figura 4-15. Com a lona cumprindo seu papel de manter a temperatura no local, a água que é expulsada do concreto através do calor em forma de vapor, volta ao seu estado físico líquido permanecendo no local e garantindo que a superfície se mantenha úmida, fazendo assim a cura térmica.

No outro dia, após decorridos 11h de cura térmica da laje, foram rompidos os corpos de prova para liberação da protensão. Após verificação de que o concreto do corpo de prova atingiu a resistência mínima, a pista foi descoberta, em seguida foram removidas as lonas, ficando tal como a Figura 4-16.

Figura 4-15 Lona cobrindo a laje**Figura 4-16 Após a retirada da lona**

Fonte: Próprio Autor (2021)

Após essa etapa são posicionados os cilindros de desprotensão, e é feito o bombeamento do óleo para dentro destes cilindros, fazendo com que seu curso se expanda e até que as maletas de travamento fiquem livres para serem retiradas. Processo demonstrado nas Figuras 4-17 e 4-18, a desprotensão acontece quando o óleo, que neste momento está dentro dos cilindros, é retirado de maneira gradual e parcial, tomando cuidado para que não ocorra o escorregamento significativo das cordoalhas.

Figura 4-17 Posicionamento do cilindro na cabeceira passiva**Figura 4-18 Cordoalhas desprotedidas, verificado com o cilindro com curso mínimo**

Fonte: Próprio Autor (2021)

Com a pista desprotendida, é posicionada a serra de corte com disco diamantado de 900 mm de diâmetro e realiza-se o corte, como na Figura 4-19 em cima das marcações que foram executadas no concreto em estado fresco. Em alguns casos, quando as lajes fabricadas possuem um número elevado de cordoalhas ou são peças mais curtas, existe a necessidade de se colocar um peso em cima das lajes para que não ganhem contraflecha no momento do corte, a fim de se evitar quebras no corte ou travamento do disco, evidenciado na Figura 4-20.

Figura 4-19 Serra de Corte



Figura 4-20 Peso sendo colocado



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 4-21 Corte da Laje



Figura 4-22 Garra do Pórtico



Fonte: Autor Próprio (2021)

Figura 4-23 Colaborador posicionando o pontalete

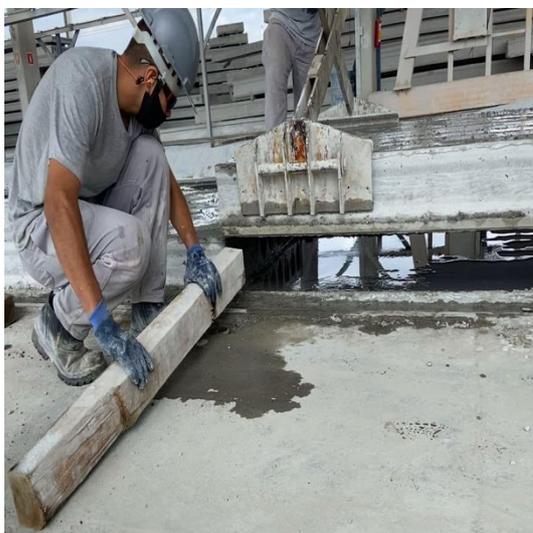


Figura 4-24 Trena demonstrando a medida da contraflecha da laje



Fonte: Autor Próprio (2021)

Após o corte (Figura 4-21), as lajes foram içadas com o pórtico rolante e o auxílio de uma garra/pinça (Figura 4-22), então foram posicionados os pontaletes de madeira, como pode ser visto na Figura 4-23, para verificação das contraflechas das lajes.

Para a medição da contraflecha das lajes foi esticado uma linha de náilon até que se eliminasse o efeito catenária, foi marcado o meio do vão da laje e utilizada trena para verificação, como demonstra a Figura 4-24.

5. Caracterização dos Agregados

O termo agregado é definido como sendo qualquer material de dimensões e características inertes apropriados para utilização na engenharia. Possuem um papel importante em sua aplicação para concretos, podendo ser elas tecnológicas ou econômicas, logo pode-se dizer, então, que são um dos maiores responsáveis pela qualidade do concreto utilizado (ABESC, 2007).

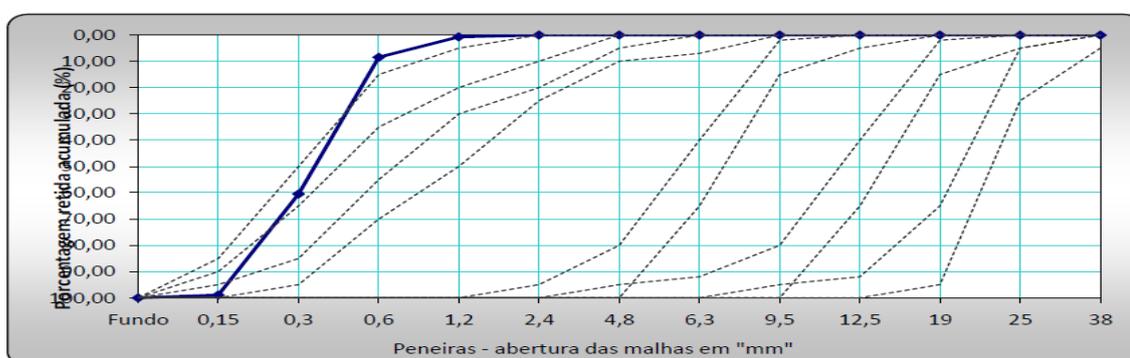
De acordo com Neville e Brooks (2013), aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume final de concreto é composto por agregados, logo percebe-se a sua importância, visto que eles não interferem somente na resistência do material, mas também influencia na durabilidade e desempenho do mesmo.

Os agregados podem ser de origens naturais ou artificiais, uma forma de caracterização destes é por meio de sua massa unitária, ou seja a razão entre a sua massa e o volume geralmente em (Kg/dm^3) incluindo os vazios, tais agregados podem ser considerados como leves se esta razão for maior que um, normal se estiver entre um e dois e pesado quando maior que dois (RIBEIRO, 2002).

Para a caracterização do agregado miúdo determinou-se a sua composição granulométrica segundo a ABNT NBR NM 248 (2003), cujo os relatórios encontram-se disponíveis no Anexo II.

Inicialmente na Figura 5-1 é mostrado a curva granulométrica da areia, onde o valor da massa específica obtida foi de $2,63 \text{ g}/\text{cm}^3$.

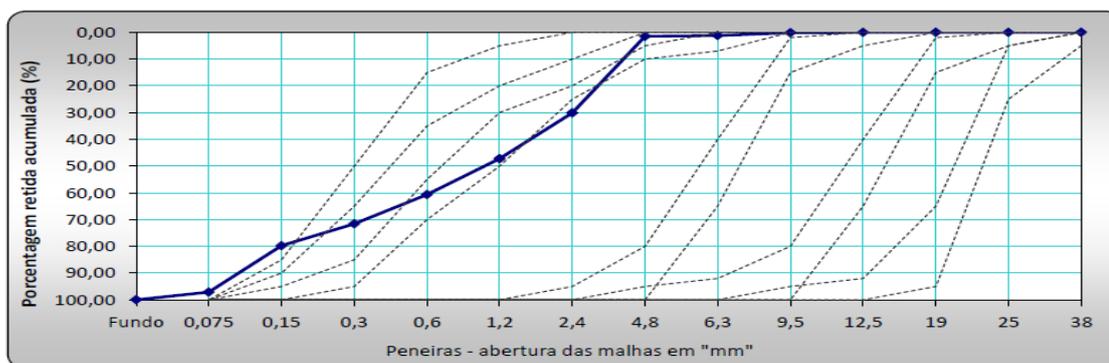
Figura 5-1 Curva Granulométrica da areia



Fonte: Banco de dados Puma Lajes Alveolares (2021)

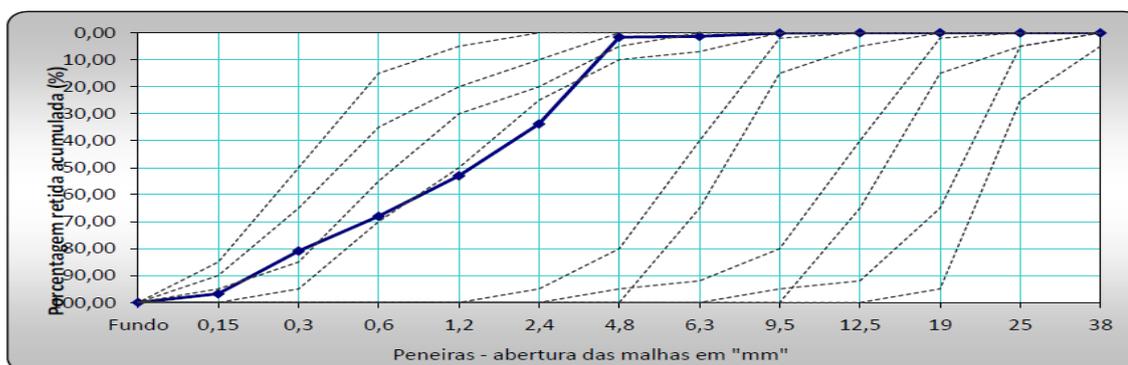
A seguir na Figura 5-2 é demonstrada a curva granulométrica do pedrisco, onde o valor da massa específica obtida foi de 2,71 g/cm³. E logo em seguida na Figura 5-3, a curva granulométrica do pó de pedra cujo a massa específica é de 2,66 g/cm³.

Figura 5-2 Curva Granulométrica do pedrisco



Fonte: Banco de dados Puma Lajes Alveolares (2021)

Figura 5-3 Curva Granulométrica de pó de pedra



Fonte: Banco de dados Puma Lajes Alveolares (2021)

De acordo com Salgado (2014), é obrigatório a utilização de água limpa para produção do concreto, a água precisa ser livre de impurezas físicas e químicas como por exemplo teor de ferro de sulfatos solúveis e pH. Em caso de dúvidas deve-se sempre realizar testes em laboratórios, Neville e Brooks (2013) menciona que não basta a água ser apenas potável, mas também é preciso analisar a concentração de sódio e potássio dissolvido na mesma.

No Anexo I, encontra-se o relatório de análise da água utilizada para o amassamento do concreto, do qual não há indícios de material orgânico, sulfatos e íons cloretos, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 6118 (2014).

O aditivo utilizado no concreto é do tipo líquido pronto para uso, isento de cloretos, destinado a plastificar e incorporar ar ao concreto e argamassa. Do qual cumpre com todos

os requisitos e especificações da norma ABNT NBR 11768 (2019) - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland; é caracterizado como aditivo incorporador de ar - IA.

Um outro procedimento adotado pela empresa, é a verificação do teor de umidade do concreto, onde costuma-se trabalhar na faixa dos 7,5 a 10%. Em um recipiente de massa conhecida é pesado o concreto que sai da central, ainda úmido, em seguida este mesmo concreto após secagem é levado a balança e é feita a verificação do quanto de massa ele perdeu, sendo estes os parâmetros para determinação do teor de umidade, por meio da massa do concreto, o processo de pesagem encontra-se visível na Figura 5-4. Considerando o peso da tara de 0,16122g, o teor de umidade ficou em 7,7%.

Figura 5-4 Procedimento para análise do teor de umidade do concreto



Fonte: Próprio Autor (2021)

6. Caracterização do concreto

O concreto utilizado para a fabricação das lajes é produzido em central de concreto, dentro da própria fábrica. Na produção desta pista foram necessários 17 m³ de concreto, conseqüentemente foram necessárias 17 betonadas, pois o misturador da central de concreto da empresa produz 1 m³ por ciclo. O traço de concreto realizado e fornecido pela empresa se encontra na Tabela 6-1.

Conforme procedimento realizado por Mizumoto *et al* (2013), a coleta do concreto para moldagem dos corpos de prova ocorreu em duas etapas, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm. Na primeira coleta a empresa realizou a moldagem de 4 corpos de prova, sendo 2 para a idade de 7 dias e 2 para a idade de 28 dias na 11^a betonada, assim como realizou a moldagem de 2 corpos de prova na com o concreto coletado na 15^a betonada para verificação da liberação da protensão.

Essas moldagens foram realizadas no vibrador da própria máquina moldadora, que de acordo com os estudos da empresa, foi constatado que de forma geral, esse método apresenta uma resistência um pouco inferior à moldagem realizada na mesa vibratória. A empresa utiliza essa moldagem apenas em algumas situações, que depende das condições climáticas tendendo a baixas temperaturas, onde o procedimento é realizar a moldagem dos corpos de prova no vibrador da máquina moldadora, a fim de garantir que se atinja a resistência mínima à compressão do concreto para a liberação da protensão, com a margem de segurança da moldagem do corpo de prova que apresentará uma resistência menor.

Também foram moldados corpos de prova para este trabalho com base na metodologia da ABNT NBR 5738 (2015) em conformidade com a metodologia aplicada por Mizumoto *et al* (2013), realizados em mesa vibratória. As coletas ocorreram na 16^a e 17^a betonada, sendo que os 4 corpos de prova para realização de ensaio de resistência à compressão para liberação da protensão foram moldados na 17^a betonada. Moldou-se 16 corpos de prova de 10x20 cm sendo 3 para cada idade (liberação da protensão, 3 dias, 7 dias, 15 dias, 28 dias) e mais um para simples verificação, que foi deixado fora da lona que realiza a cura térmica nas lajes.

Os corpos de prova para resistência à compressão do concreto que haviam sido rompidos para verificação de liberação da protensão foram deixados em cima da laje moldada na pista e abaixo da lona de 3 camadas que proporciona a cura térmica. Já todos os demais corpos de prova permaneceram no laboratório em uma estante, cobertos com lona plástica simples, e após a desforma os corpos de prova foram retificados para corrigir a superfície e

submergidos em tanque com água para cura saturada, até a data de ensaio de resistência à compressão para cada idade especificada.

A realização do ensaio de resistência à compressão do concreto ocorreu conforme a ABNT NBR 5739 (2018), na execução dos ensaios, os corpos de prova foram pesados para verificação da densidade e qualidade da moldagem dos corpos de prova, pois os mesmos apresentaram porosidade na superfície ao longo da altura. Os corpos de prova foram posicionados para ensaio em pratos de compressão removíveis com discos neoprene de dureza shore 70, como demonstrado na Figura 6-1. A prensa utilizada é da marca Solotest e foi calibrada em 04/05/2021 (Figura 6-2).

Figura 6-1 Discos de neoprene



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 6-2 Prensa utilizada, destacando a data de calibração



Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 6-1 Traço do Concreto

Traço do concreto			
Material	Densidade (g/cm ³)	Kg para 1m ³	Litros para 1m ³
Água	1	168	168
Cimento CP-V ARI	3,06	386	126
Areia	2,63	537	204
Pó de pedra	2,7	424	157
Pedrisco	2,71	936	345
Aditivo	1,01	0,579	0,57
Ar incorporado por m ³		0,03	
Umidade da massa		7,4	
Teor da argamassa		0,6	
% argamassa		59,01	
Total kg		2451,62	
TOTAL (parcial)		1001,56	
Volume real com ar incorporado		1032	
A/C		0,435	

Fonte: Próprio Autor (2021)

O ensaio de resistência à compressão do concreto para os corpos de prova moldados na mesa vibratória obtiveram a média de resistência de 28,55 MPa, conforme Tabela 6-2.

Tabela 6-2 Ensaio de resistência à compressão do concreto – Moldagem em mesa vibratória

Ensaio de resistência à compressão do concreto - 11h na cura térmica						
DATA	Peso (Kg)	D (cm)	H (cm)	H/D	TF (Prensa)	MPa
18/05/2021						
CP1	3,53	10	19,6	1,96	22,54	28,61
CP2	3,595		19,7	1,97	22,49	28,57
CP3	3,57		19,7	1,97	22,41	28,46
Média						28,55

Fonte: Próprio Autor (2021)

Já os corpos de prova moldados no vibrador da máquina moldadora obtiveram uma média de resistência de 25,47 MPa, conforme tabela 6-3. Ressalta-se que foram moldados apenas 2 corpos de conforme procedimento da empresa e que a resistência mínima para liberação da protensão para lajes de 20 cm de altura é de 28 MPa, sendo que quando o concreto não atinge a resistência mínima, o inspetor de qualidade verifica a aparência do concreto e da moldagem para decidir se abrirá exceção para desprotender a pista com menos de 28 MPa de resistência, conforme ocorrido no caso das lajes deste estudo.

Tabela 6-3 Ensaio de resistência à compressão do concreto – Moldagem na máquina moldadora

Ensaio de resistência à compressão do concreto - 11h na cura térmica						
18/05/2021	Peso (Kg)	D (cm)	H (cm)	H/D	TF (Prensa)	MPa
CP4	3,545	10	19,5	1,95	21	26,63
CP5	3,49		19,6	1,96	19,15	24,3
Média						25,47

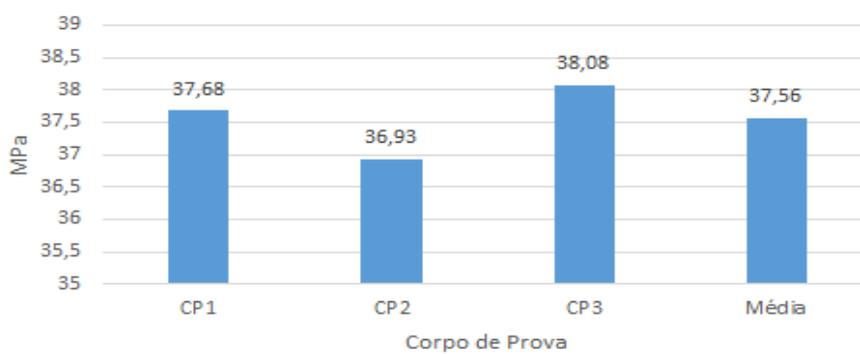
Fonte: Próprio Autor (2021)

Analogamente, foi moldado um corpo de prova a mais para simples verificação da resistência à compressão do concreto, com o concreto em cura ambiente. Este corpo de prova foi deixado junto aos corpos de prova das idades de 3 dias, 7 dias, 15 dias e 28 dias em uma estante no laboratório da empresa e coberto por uma lona plástica simples cujo intuito é simplesmente diminuir a evaporação de água. Este corpo de prova foi rompido após 11h30 de cura, para comparação da eficiência da cura térmica realizada nas lajes, salienta-se que conforme a ABNT NBR 5739 (2018) preconizada em sua tabela 1, nessa situação em cura ambiente o corpo de prova deveria ter sido rompido com 24h com tolerância de $\pm 0,5h$ para a idade de ensaio. Este corpo de prova apresentou coloração diferente dos demais corpos de prova submetidos à cura térmica, apresentando uma resistência à compressão de 5,3 MPa. A Figura 6-3 apresenta à esquerda o corpo de prova que não foi submetido à cura térmica, e a direita o corpo de prova da direita que foi submetido à cura térmica.

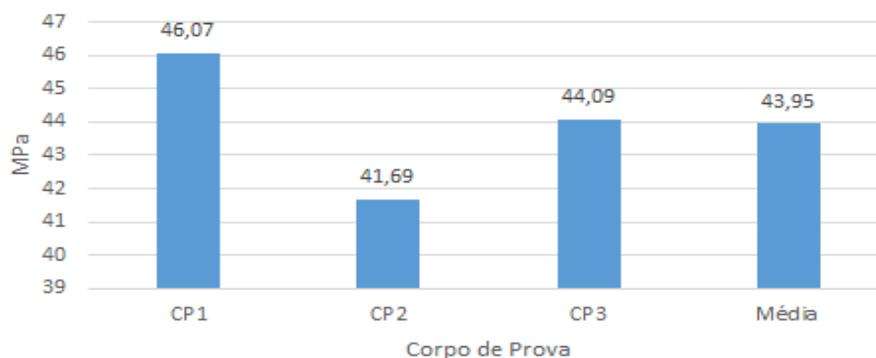
Figura 6-3 Corpos de prova

Fonte: Próprio Autor (2021)

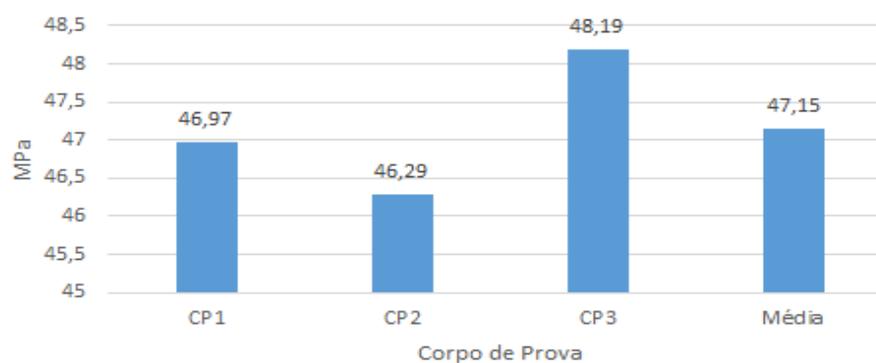
As resistências à compressão do concreto para as idades de 3 dias, 7 dias, 15 dias e 28 dias são apresentadas nos Gráficos 6-1 a 6-4.

Gráfico 6-1 Ensaio de resistência à compressão do concreto 3 dias

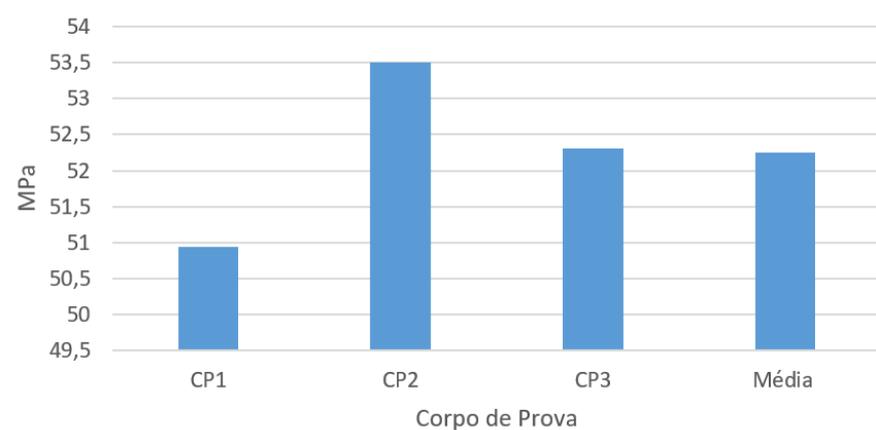
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 6-2 Ensaio de resistência à compressão do concreto 7 dias

Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 6-3 Ensaio de resistência à compressão do concreto 15 dias

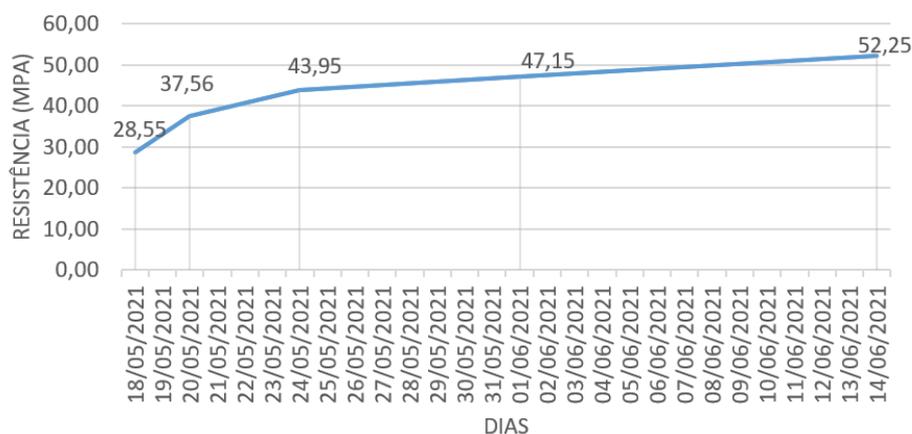
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 6-4 Ensaio de resistência à compressão do concreto 28 dias

Fonte: Próprio Autor (2021)

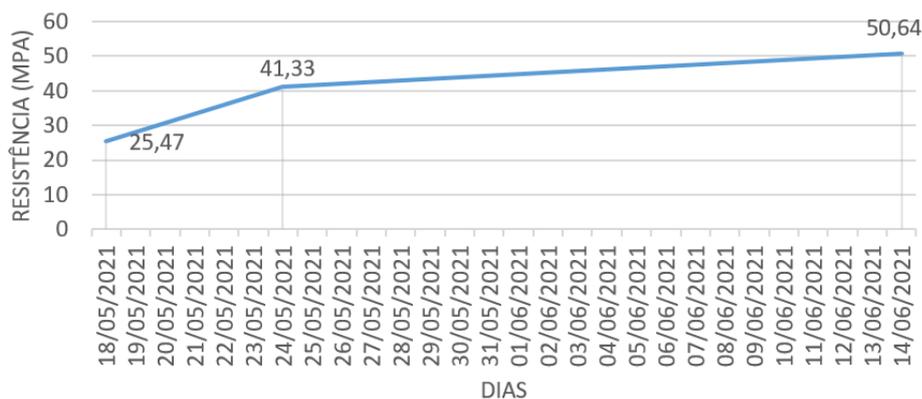
A curva do aumento de resistência à compressão do concreto das lajes ensaiadas é apresentada no Gráfico 6-5. A fim de se comparar os resultados dos corpos de prova moldados na mesa vibratória (Gráfico 6-5), também é apresentado o Gráfico 6-6, moldado pela equipe de produção no vibrador da máquina moldadora.

Gráfico 6-5 Curva de aumento de resistência à compressão do concreto – Mesa vibratória



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 6-6 Curva de aumento de resistência à compressão do concreto – Mesa vibratória da máquina moldadora



Fonte: Próprio Autor (2021)

Os resultados das resistências dos corpos de prova moldados na mesa vibratória com a metodologia descrita por Mizumoto *et al* (2013) foi maior que os resultados obtidos na moldagem dos corpos de prova realizados no vibrador da máquina moldadora em todas as idades analisadas. Nota-se que o vibrador da máquina moldadora possui um peso e um contrapeso, que atuam no adensamento da laje no processo de produção. A moldagem

realizada neste mesmo vibrador é próxima ao motor, onde é aproveitada apenas a vibração do equipamento.

O peso utilizado nos dois procedimentos de moldagem foi o mesmo, sendo proveniente da metodologia aplicada por Mizumoto *et al* (2013). Por eliminação, o ponto de diferenciação entre os dois processos de moldagem é a capacidade de vibração dos equipamentos e o tempo de adensamento por vibração de cada camada, onde a moldagem na mesa vibratória manteve-se o sistema em vibração por 120 segundos por camada e a moldagem realizada no vibrador da máquina moldadora manteve-se o sistema em vibração por cerca de 15 segundos por camada.

7. Caracterização das Lajes

No dia 17/05/2021, no período entre 18h45 e 21h, com temperatura de 17 °C, foram fabricadas 6 lajes de 6 m de comprimento, 20 cm de altura, com 6 cordoalhas de 12,7 mm e duas cordoalhas de 9,5 mm, todas posicionadas na flange inferior, cordoalha de 7 fios 190RB. As lajes foram nomeadas LJ_N, sendo LJ (laje) e N (número do modelo), sendo assim a laje número 1 foi denominada “LJ 1”, a laje número 2 “LJ 2”, assim sucessivamente até a laje 6 “LJ 6”.

Após o saque das lajes, realizou-se três enchimentos de alvéolo com graute em lajes distintas estudadas e foram moldados 6 corpos de prova de 10x20 cm para a verificação da resistência à compressão do graute, sendo utilizados 2 corpos de prova para idade de 2h, 2 para a idade de 24h e 2 para a idade de 7 dias, assim demonstrado na Tabela 7-1.

Tabela 7-1 Resistência à Compressão do Graute

Idade	Resistência à Compressão (MPa)
2h	27,81
24h	52,39
7 dias	56,9

Fonte: Próprio Autor (2021)

Segundo a equipe responsável pelo acabamento, este tipo de reparo com o enchimento de alvéolos é executado em lajes que apresentam fendilhamento do concreto na região da armadura, mesmo que somente se evidencie em apenas para o lado de fora do alvéolo, com a finalidade de evitar que as fissuras de fendilhamento do concreto se abram por um comprimento maior durante as etapas de movimentação da peça, como o transporte e a montagem.

7.1 INSPEÇÃO VISUAL EM LAJES ALVEOLARES

Todas as lajes alveolares devem passar por inspeção visual com o objetivo de identificar:

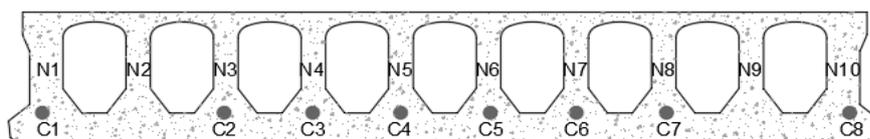
- Falhas de concretagem, com atenção especial nas nervuras;
- Identificação de fissuras causadas por tensões superiores à resistência de tração do concreto na data da liberação da protensão, fissura de fendilhamento horizontal na nervura (spalling ou boca de jacaré) na extremidade da laje e fissuras de fendilhamento na posição das cordoalhas (bursting ou splitting);
- Identificação visual de problemas de tolerâncias dimensionais na produção;
- Identificação visual de problemas de deformações excessivas, como a contraflecha muito superior ao limite de deslocamento normativo ($L/300$ com tolerância $\pm L/1000$), ou mesmo observação da ausência de contraflecha, que pode indicar que o momento de protensão não ultrapassou com folga o momento fletor devido ao peso próprio da laje;
- Identificação visual de escorregamentos nas cordoalhas pré-tracionadas, na zona de ancoragem nas extremidades das lajes alveolares.

A ocorrência simultânea dos itens acima podem sugerir evidências da ocorrência de algum problema no processo de produção da laje alveolar, e de que o concreto da laje não atendeu aos critérios de cálculo adotados em projeto (FERREIRA, 2021).

7.1.1 LAJE 1

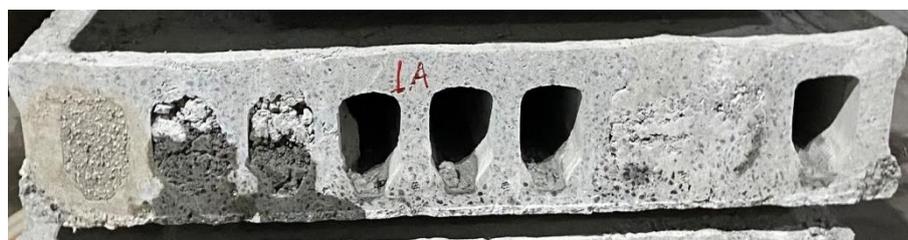
Para melhor entendimento dos casos relatados abaixo, a Figura 7-1 ilustra a nomenclatura adotada de cordoalhas (C) e nervuras (N).

Figura 7-1 Ilustração de laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-2 Laje 1 Face A – Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-3 Laje 1 Face B – Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

A Laje 1, face A (Figura 7-2) possui 4 alvéolos preenchidos que se tratam de aberturas para inspeção da posição das cordoalhas, sendo que os alvéolos 2 e 3 da esquerda para a direita possuem o enchimento de aproximadamente 20 cm de comprimento e os alvéolos 7 e 8 possuem enchimento em 40 cm de comprimento aproximadamente.

O alvéolo mais à esquerda (1º alvéolo) foi preenchido de grude em 23 cm de comprimento por conta de um fendilhamento do concreto na região da armadura da posição 1 de mesmo comprimento, como pode ser visto na Figura 7-2. A Figura 7-3 retrata uma laje com seus alvéolos perfeitamente formados e sem preenchimentos. Nas faces A e B foram observadas quebras de extremidade pequenas.

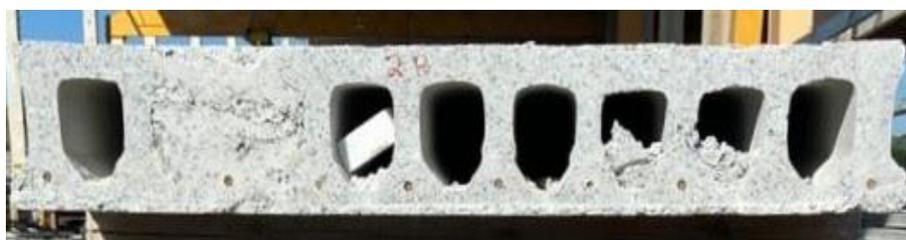
7.1.2 LAJE 2

Figura 7-4 Laje 2 Face A - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-5 Laje 2 Face B - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

A Laje 2 possui enchimento nos alvéolos realizado com compactação manual na pista devido ao arraste do concreto ocorrido quando, que por uma falha do equipamento, a faca travou no bisotê. Na face A (Figura 7-4) é possível observar que nesta região restaram dois alvéolos inteiros e um parcial. Na face B (Figura 7-5) os alvéolos 2 e 3 foram preenchidos em 30 cm de comprimento por conta da abertura da janela para inspeção do posicionamento dos cabos, assim como os alvéolos 7 e 8 possuem um acúmulo de concreto somente próximo à face, ocasionado pelo mesmo motivo.

A Laje 2 também apresentou um arraste do concreto observado pela lateral, que possivelmente ficou apenas nesta primeira nervura. Esta falha está entre 2 a 2,5 m de distância da face B, que pode ser visto na Figura 7-6.

Figura 7-6 Laje 2 - Arraste do concreto



Fonte: Próprio Autor (2021)

No 2º ensaio, realizado com 7 dias de idade do concreto, a Laje 2 rompeu no apoio como mostrado na Figura 7-7 à Figura 7-10, enquanto era colocado o 3º rolo de cordoalha, para alcançar a carga de 8 toneladas. A fissura no apoio é típica de cisalhamento e foi atrelada à necessidade de compactação manual devido ao arraste do concreto quando a faca da máquina moldadora travou no bisotê, ocasionando a fissura ao longo de 56 cm de comprimento.

Figura 7-7 Laje 2 - Fissura por cisalhamento



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-8 Fissura por cisalhamento, outro ângulo



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-9 Fissura dentro do alvéolo



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-10 Fissura embaixo da peça



Fonte: Próprio Autor (2021)

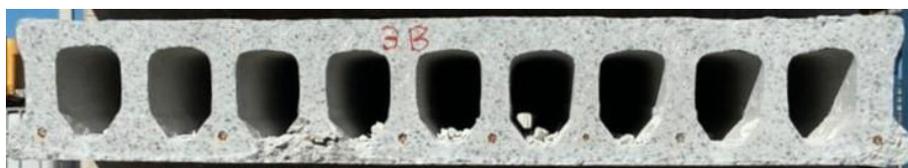
7.1.3 LAJE 3

Figura 7-11 Laje 3 Face A - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-12 Laje 3 Face B - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

As Figuras denominadas Figura 7-11 e Figura 7-12 exibem as duas faces da Laje 3, que apresentou um fendilhamento no concreto na região da armadura da posição 1 (Figura 7-13) onde pode-se observar fissuras em 3 direções, para a lateral externa por um comprimento de 24,5 cm (Figura 7-14), para a lateral interna e para a face inferior da laje por um comprimento de 9,23 cm.

Figura 7-13 Fendilhamento



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-14 Fissura de fendilhamento do concreto



Fonte: Próprio Autor (2021)

Este alvéolo, em específico, não foi preenchido, e após a realização do terceiro ensaio nesta laje, com idade de 15 dias, este pedaço de concreto no apoio se destacou da laje, como mostra a Figura 7-15 e Figura 7-16.

Figura 7-15 Pedaco de concreto destacado



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-16 Trecho destacado



Fonte: Próprio Autor (2021)

Também foi observado no momento do içamento da laje na pista, que deslocou o concreto do fundo, sendo realizado reparo com argamassa de acabamento (Figura 7-17).

Figura 7-17 Trecho deslocado



Fonte: Próprio Autor (2021)

7.1.4 LAJE 4

Figura 7-18 Laje 4 Face A - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-19 Laje 4 Face B - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

A Laje 4 (Figura 7-18 e 7-19), possui em sua face B (Figura 7-19) um enchimento de alvéolo com graute em 40 cm de comprimento e sofreu uma quebra na extremidade após a realização do primeiro ensaio, com 24h de idade, como pode ser visto na Figura 7-20.

Figura 7-20 Quebra na extremidade



Fonte: Próprio Autor (2021)

A laje também possui um deslocamento de concreto à 2 m de distância da face B que pode ser visto na Figura 7-21.

Figura 7-21 Deslocamento de concreto



Fonte: Próprio Autor (2021)

Após a realização do 2º ensaio observou-se que abriram fissuras não observadas anteriormente na face A, nas nervuras 8 (Figura 7-22) e 9 (Figura 7-23) à contar da esquerda para a direita.

Figura 7-22 Laje 4 - Nervura 8

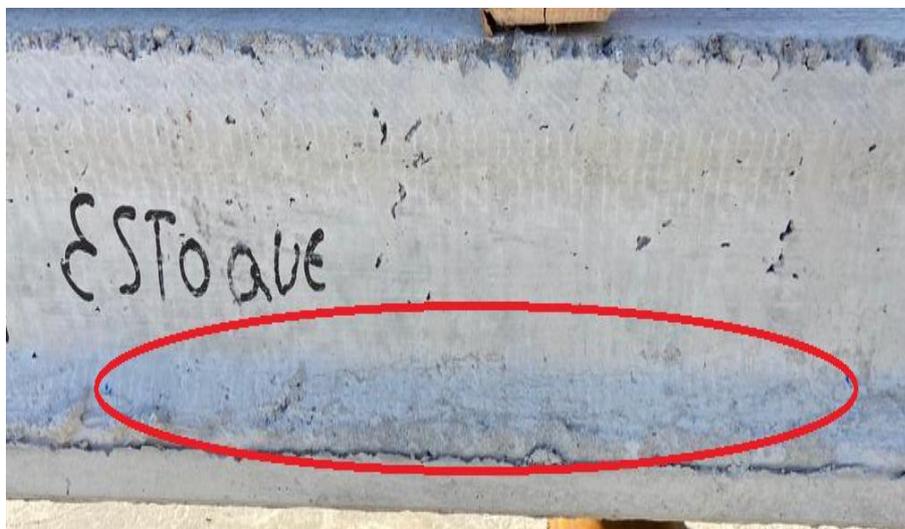


Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-23 Laje 4 – Nervura 9

Fonte: Próprio Autor (2021)

Após o terceiro ensaio, com 15 dias de idade, observou-se uma fissura horizontal próxima as cordoalhas de 60 cm de comprimento no meio do vão, podendo ser observado nas Figura 7-24 e Figura 7-25.

Figura 7-24 Fissura horizontal

Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-25 Fissura horizontal, imagem aproximada



Fonte: Próprio Autor (2021)

7.1.5 LAJE 5

Figura 7-26 Laje 5 Face A - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-27 Laje 5 Face B - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

A Laje 5 (Figura 7-26 e Figura 7-27) possui uma fissura na primeira nervura acima das cordoalhas de 22,5 cm de comprimento visto na Figura 7-28 e um fendilhamento do concreto na região da armadura de 8 cm, observado na Figura 7-29.

Figura 7-28 Fissura



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-29 Fendilhamento do concreto na armadura



Fonte: Próprio Autor (2021)

Esta mesma laje também possui uma marca na flange superior, ocasionada devido a uma parada da máquina na pista, próxima ao apoio, como demonstrado na Figura 7-30.

Figura 7-30 Marca da parada da máquina



Fonte: Próprio Autor (2021)

7.1.6 LAJE 6

Figura 7-31 Laje 6 Face A - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 7-32 Laje 6 Face B - Seção da laje alveolar



Fonte: Próprio Autor (2021)

A laje 6 possui na face A (Figura 7-31) os alvéolos sem enchimentos, com apenas uma quebra na extremidade que foi reparada. Na face B (Figura 7-32) possui um alvéolo preenchido com graute por 43 cm de comprimento, que é o mesmo comprimento do fendilhamento do concreto na região da armadura, como mostrado na Figura 7-33 e com mais detalhes na Figura 7-34.

Figura 7-33 Alvéolo preenchido



Fonte: Próprio Autor (2021)

A laje também possui uma marca de parada de máquina no meio do vão e um reparo em dois alvéolos que foram preenchidos por cerca de 50 cm na pista, como pode ser visto na Figura 7-34.

Figura 7-34 Marca da parada de máquina



Fonte: Próprio Autor (2021)

7.2 MEDIÇÕES PRÉVIAS DOS PROTÓTIPOS ENSAIADOS

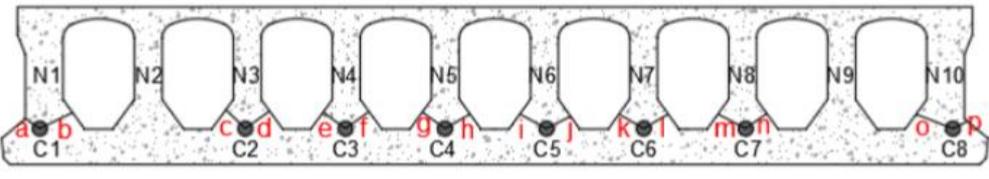
Antes de cada ensaio foram realizadas diversas medições para a caracterização geométrica de cada elemento de laje como demonstrado na Tabela 7-2. Também foram medidos os cobrimentos mínimos para evitar o fendilhamento (Tabela 7-3 e Tabela 7-4), posicionamento das cordoalhas (Tabela 7-5) a espessura das nervuras medidos na parte superior e inferior de cada nervura (Tabela 7-6), sendo possível obter um valor médio para ser empregado nos cálculos teóricos.

Tabela 7-2 Características geométricas – dimensões

LAJE ENSAIADA	DIMENSÕES DA LAJE									
	ALTURA				LARGURA			COMPRIMENTO		
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	MÉDIA (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	MÉDIA (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	MÉDIA (mm)
LJ 1A	195	197	200	198,00	1240	1244	1242,00	6022	6017	6019,5
LJ 1B	199	197	200							
LJ 2A	197	190	189	195,50	1237	1241	1239,00	5985	5987	5986,0
LJ 2B	201	199	197							
LJ 3A	195	202	196	198,67	1240	1239	1239,50	6005	6007	6006,0
LJ 3B	197	202	200							
LJ 4A	197	200	201	199,50	1245	1245	1245,00	5990	5993	5991,5
LJ 4B	197	201	201							
LJ 5A	200	205	197	199,33	1240	1245	1242,50	6001	5999	6000,0
LJ 5B	199	200	195							
LJ 6A	198	198	-	200,00	1250	1240	1245,00	5980	5987	5983,5
LJ 6B	195	205	204							

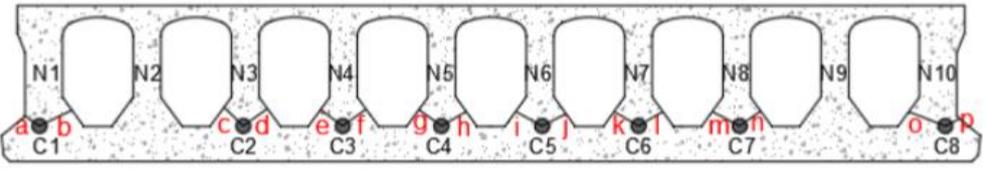
Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 7-3 Verificação do cobrimento mínimo para evitar o fendilhamento – posição efetiva dos cabos – parte 1

LAJE								
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)	h (mm)
LJ 1A	39,54	42,69	32,62	41,2	32,17	34,25	34,17	35,21
LJ 1B	38,09	40,75	32,08	34,21	36,11	36,91	35,28	38,25
LJ 2A	40,36	53,35	-	-	-	-	-	-
LJ 2B	35,74	38,07	-	-	-	34,92	33,55	34,21
LJ 3A	31,29	42,14	30,07	32,84	30,04	28,94	31,45	32,62
LJ 3B	35,91	37,37	31,22	32,73	33,21	36,66	31,12	37,07
LJ 4A	37,7	40,03	31,75	34,22	26,34	27,9	33,22	32,86
LJ 4B	38,38	34,34	34,25	33,01	35,24	32,69	34,03	33,41
LJ 5A	34,17	40,98	29,55	32,7	28,15	26,7	30,96	28,89
LJ 5B	33,4	32,7	31,04	30,32	32,31	30,96	31,9	30,02
LJ 6A	41,26	41,23	33,75	30,36	30,39	24,66	35,68	23,83
LJ 6B	34,07	34,11	32,04	29,16	31,2	28,91	32,33	29,09

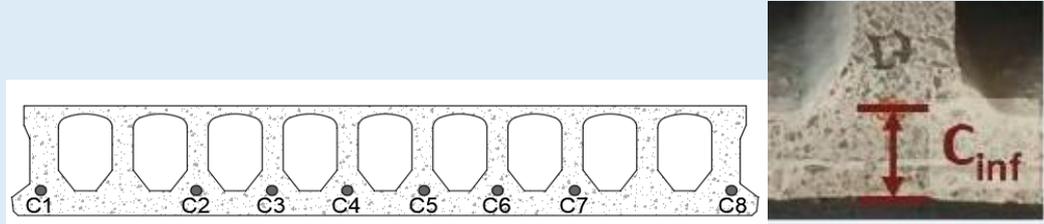
Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 7-4 Verificação do cobrimento mínimo para evitar o fendilhamento – posição efetiva dos cabos – parte 2

LAJE								
	i (mm)	j (mm)	k (mm)	l (mm)	m (mm)	n (mm)	o (mm)	p (mm)
LJ 1A	38,25	37,5	36,68	35,03	-	-	38,77	37,1
LJ 1B	33,97	33,3	37,35	34,33	38,53	35,59	43,13	43,83
LJ 2A	-	-	-	-	-	46,44	41,66	35,11
LJ 2B	33,01	32	34,04	31,32	34,31	38,69	45,5	42,7
LJ 3A	32,01	33,91	32,78	33,94	30,88	32,93	34,67	35,36
LJ 3B	32,65	34,22	29,57	29,81	34,89	33,1	42,83	40,59
LJ 4A	32,72	31,04	32,52	35,13	32,2	34,16	34,49	31,43
LJ 4B	34,71	32,52	29,28	27,4	34,59	30,69	50,28	39,93
LJ 5A	28,94	30,51	29,13	31,64	28,91	31,17	34,82	34,87
LJ 5B	31,6	29,52	28,77	28,49	33,7	32,23	38,97	30,03
LJ 6A	30,78	27,29	30,49	28,01	29,4	25,19	-	-
LJ 6B	29,97	28,82	27,71	26,99	33,53	31,47	34,14	30,32

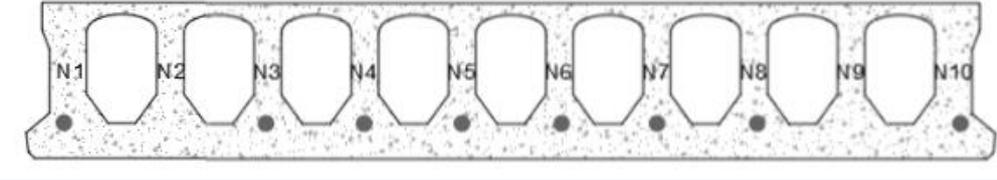
Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 7-5 Posicionamento das Cordoalhas

LAJE									
	C1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C4 (mm)	C5 (mm)	C6 (mm)	C7 (mm)	C8 (mm)	C _{inf} (mm)
LJ 1A	34,45	34,64	34,41	37,28	33,48	35,02	38,23	40,07	35,95
LJ 1B	35,22	33,78	31,13	30,12	32,88	31,02	31,1	30,86	32,01
LJ 2A	28,94	29,18	29,19	32,69	28,89	28,26	34,63	40,29	31,51
LJ 2B	39,84	38,34	35,08	33,35	36,45	35,33	34,8	32,86	35,76
LJ 3A	34,47	39,36	39,11	37,25	34,61	37,4	37,9	37,49	37,2
LJ 3B	38,2	36,92	38,24	32,29	35,04	36,56	36,65	32,01	35,74
LJ 4A	33,49	37,21	37,79	36,6	36,68	36,63	37,76	38,64	36,85
LJ 4B	38,7	37,92	37,17	36,35	36,61	39,65	38,17	30,21	36,85
LJ 5A	37,24	39,17	41,77	37,79	40,92	40,07	42,64	39,28	39,94
LJ 5B	40,2	38,55	36,37	34,73	34,37	38,47	36,14	33,16	36,98
LJ 6A	34,66	41,4	43,45	42,83	43,42	41,36	42,6	29,51	39,9
LJ 6B	38,84	40,25	40,29	40,37	40,85	42,05	41,66	36,54	40,11

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 7-6 Características Geométricas - Nervuras

LAJE											Σb_w (mm)	Σb_w médio (mm)
	N1 (mm)	N2 (mm)	N3 (mm)	N4 (mm)	N5 (mm)	N6 (mm)	N7 (mm)	N8 (mm)	N9 (mm)	N10 (mm)		
LJ 1A	50,05	32,69	38,74	33,12	39,7	36,36	37,78	-	40,67	46,54	355,7	358,8
	50,02	34,76	38,22	35,98	40,47	38,57	37,78	-	38,5	47,73	362	
LJ 1B	46,21	38,51	36	37,54	36,13	37,74	32,31	39,14	31,16	50,26	385	388,95
	47,25	38,44	34,51	36,85	37,54	39,75	35,25	39,31	32,44	51,53	392,9	
LJ 2A	50,13	-	-	-	-	-	-	34,47	39,55	46,72	170,9	174,3
	52,77	-	-	-	-	-	-	35,49	40,64	48,75	177,7	
LJ 2B	46,37	39,79	-	37,34	36,3	40,36	34,5	40,74	31,79	52,18	359,4	363,2
	48,98	39,89	-	37,19	37,57	40,93	35,56	41,7	34,96	50,34	367,1	
LJ 3A	49,11	30,72	39,23	32,76	37,28	35,66	37,85	35,56	40,06	45,63	383,9	388,2
	47,36	32,77	40,02	33,53	39,83	37,01	38,52	35,53	39,63	48,36	392,6	
LJ 3B	44,72	37,94	34,35	38,78	35,65	38,81	32,67	38,19	29,91	48,16	379,2	385
	45,88	37,92	35,16	37,91	37,12	40	33,75	40	33,95	49,09	390,8	
LJ 4A	50,47	35,14	39,29	35,07	38,83	37,54	38,46	37,19	39,05	46,52	397,6	413,8
	51,1	38,04	47,96	38,46	42,43	41,58	40,67	37,21	43,18	49,35	430	
LJ 4B	45,84	39,86	36,57	38,75	36,28	39,37	34,25	39,46	36,26	49,23	395,9	409
	53,02	40,75	36,57	41,49	41,45	41,48	36,86	41,44	39,85	49,31	422,2	
LJ 5A	46,96	30,21	38,76	32,29	38,58	36,06	38,3	34,9	38,18	42,61	376,9	383,5
	46,65	33,28	40,11	32,5	39,09	38,97	38,01	35,5	38,65	47,33	390,1	
LJ 5B	45,2	38,36	34,24	37,51	35,93	38,35	33,35	38,94	30,66	48,93	381,5	390,7
	47	40,81	36,14	37,81	37,48	40,35	36,2	41,83	32,24	50,05	399,9	
LJ 6A	51,06	31,28	40,82	33,81	38,72	36,35	36,41	34,02	38,92	43,44	384,8	391,5
	52,73	34,33	41,83	34,23	38,05	38	37,89	35,04	40,61	45,49	398,2	
LJ 6B	45,42	38,85	35,25	37,56	36,41	39,05	32,83	38,55	36,23	47,46	387,6	395,3
	47,8	39,6	37,44	38,11	37,67	39,48	34,04	40,04	39,91	48,84	402,9	

Fonte: Próprio Autor (2021)

8. Ensaaios

8.1 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em ambiente de fabril, com base em Mizumoto *et al* (2013) e ABNT NBR 9607 (2019). O objetivo destes ensaios foi de avaliar o desempenho da estrutura das lajes alveolares por meio de medição e controle dos efeitos causados pela aplicação de ações externas, segundo a ABNT NBR 9607 as ações de carregamento externo aplicados à estrutura foram classificadas como estática e de permanência rápida.

Uma das principais finalidades em se realizar os ensaios de flexão é a determinação do módulo elástico real da peça, os ensaios ocorreram em 04 dias distintos, o primeiro no dia 18 de maio de 2021, período em que as lajes se encontravam com 01 dia de idade. A segunda bateria de ensaios ocorreu no dia 24 de maio de 2021, com 07 dias de idade, os ensaios subsequentes ocorreram nos dias 01 de junho e 14 de junho, datas em que a lajes encontravam-se com 15 e 28 dias de idade respectivamente.

8.1.1 ELEMENTOS ACESSÓRIOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

8.1.1.1 APOIOS

As bases de apoio utilizados para realização dos ensaios foram cortadas de uma laje H30 (30 cm de altura) em 46 cm de comprimento, foi escolhido o local para realização dos ensaios, os apoios foram posicionados, concretados todos os alvéolos e regularizados a superfície, ficando com uma altura total de 48 cm e largura de 30 cm (Figura 8-1). Também foi realizada a conferência do nivelamento dos apoios (Figura 8-2), colocado o pontalete de madeira de 0,10x0,10x1,25 m (Figura 8-3) para simulação do apoio em obra, respeitando-se a regra de que o apoio deve ser pelo menos a metade da altura da laje e verificado o nivelamento da laje sobre os apoios antes da execução dos ensaios (Figura 8-4).

Figura 8-1 Base de apoio em concreto



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-2 Conferência do nivelamento do apoio



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-3 Pontaletes de madeira de 0,10x0,10x1,25 m para apoio das lajes ensaiadas



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-4 Conferência do nivelamento da laje posicionada



Fonte: Próprio Autor (2021)

8.1.1.2 CARGA APLICADA

Foram utilizados rolos de cordoalha como carga a ser aplicada nos ensaios, os rolos de cordoalha foram escolhidos com base em seu peso verificado na etiqueta (Figura 8-5) e espaçamento entre os pontaletes do próprio rolo que fossem iguais em rolos distintos de forma a gerar simetria nos pontos de carga aplicados nos ensaios.

Figura 8-5 Etiqueta de rolo de cordoalha para identificação do peso do produto



Fonte: Próprio Autor (2021)

8.1.1.3 RELÓGIOS COMPARADORES

Foram utilizados relógios comparadores da marca Digimess, sendo dois digitais, um de curso de 25 mm (Figura 8-6) e outro de curso de 50 mm, e outro relógio comparador de mesma marca, analógico, de curso de 25 mm (Figura 8-7), todos novos e calibrados por laboratórios certificados pelo Inmetro antes da realização dos ensaios.

Figura 8-6 Relógio Comparador Digital



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-7 Relógio Comparador Analógico



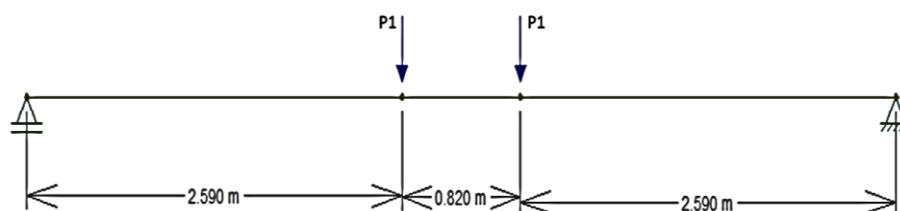
Fonte: Próprio Autor (2021)

8.2 ESQUEMA DE ENSAIO

Todos os ensaios foram realizados dentro do regime elástico das lajes, para isso foi calculado o momento de fissuração com base nas informações de projeto, tais como: geometria, momento de inércia, força de protensão e F_{ck} a partir de resultados laboratoriais.

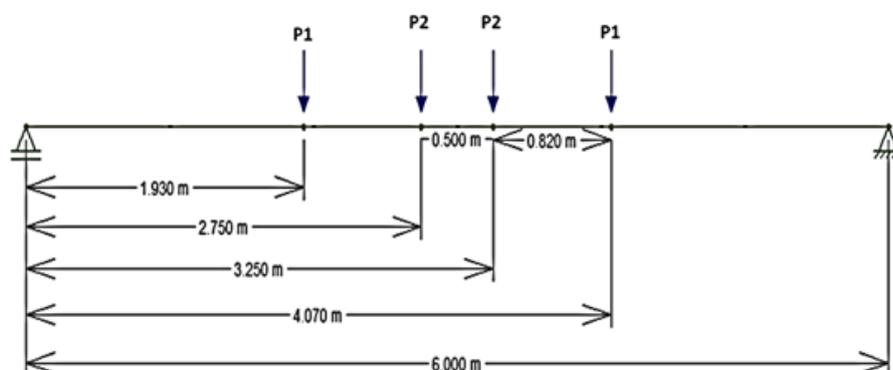
O procedimento de cálculo segue a metodologia utilizada por Catoia (2011) em seu apêndice A, onde é demonstrando o cálculo. Para as amostras ensaiadas, foram empregados dois arranjos de ensaio, com duas cargas pontuais (Figura 8-8) e com quatro cargas pontuais, conforme Figura 8-9.

Figura 8-8 Arranjo de ensaio com duas cargas pontuais



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-9 Arranjo de ensaio com 4 cargas pontuais



Fonte: Próprio Autor (2021)

Como forma de aplicação das cargas pontuais foram utilizados rolos de cordoalha, cujo o peso é conhecido. Cada rolo possui dois pontos de aplicação de carga (composto por pontalete de madeira de seção 10x10 cm), conforme Figura 8-10.

Figura 8-10 Pontos de apoio do rolo de cordoalha



Fonte: Próprio Autor (2021)

Para a aplicação de carga em quatro pontos foi adotado o esquema mostrado na Figura 8-11 e Figura 8-12. O posicionamento das lajes foi realizado em pontaletes de madeira de 10x10 cm simulando o posicionamento da laje em obra, os pontaletes foram posicionados sobre apoios em concreto.

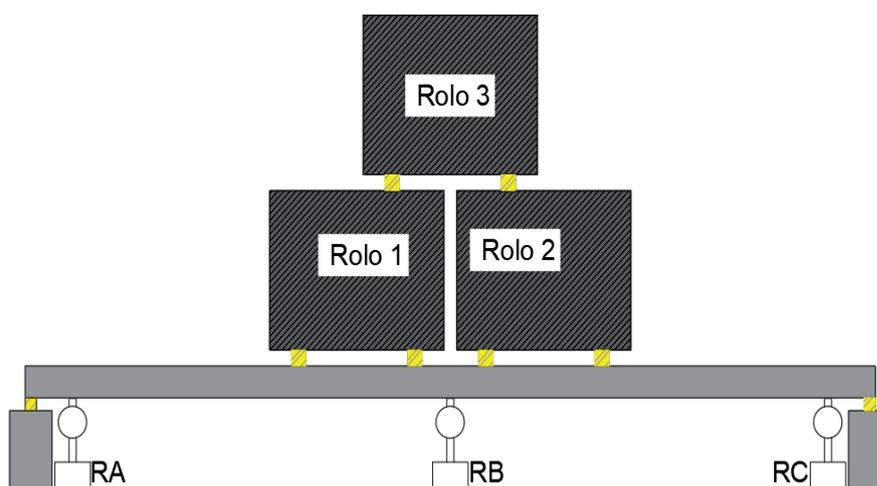
Após o posicionamento das lajes, são colocados os relógios comparadores para a leitura dos deslocamentos, estes foram nomeados de Relógio A (RA), Relógio B (RB) e Relógio C (RC). Os relógios RA e RC são de extremidades, sendo o RA (analógico)

posicionado na extremidade esquerda e RC (digital) na extremidade direita. O Relógio RB (digital) é posicionado no meio do vão da peça.

Então, é feita a leitura dos relógios para identificação dos mostradores no ponto zero, para situação da laje em “vazio”, em seguida é colocado o primeiro rolo de cordoalha “Rolo 1”, e realizado uma nova leitura dos relógios comparadores, novamente é posicionado o rolo de cordoalha número dois “Rolo 2” e conferida as leituras dos relógios comparadores, por fim é posicionado o terceiro e último rolo de cordoalha “Rolo 3” e realizada a penúltima leitura dos relógios.

A leitura final dos relógios ocorre quando são retiradas todas as cargas aplicadas na laje, para verificação dos deslocamentos residuais.

Figura 8-11 Esquema de Aplicação de carga em 4 pontos



Fonte: Próprio Autor (2021)

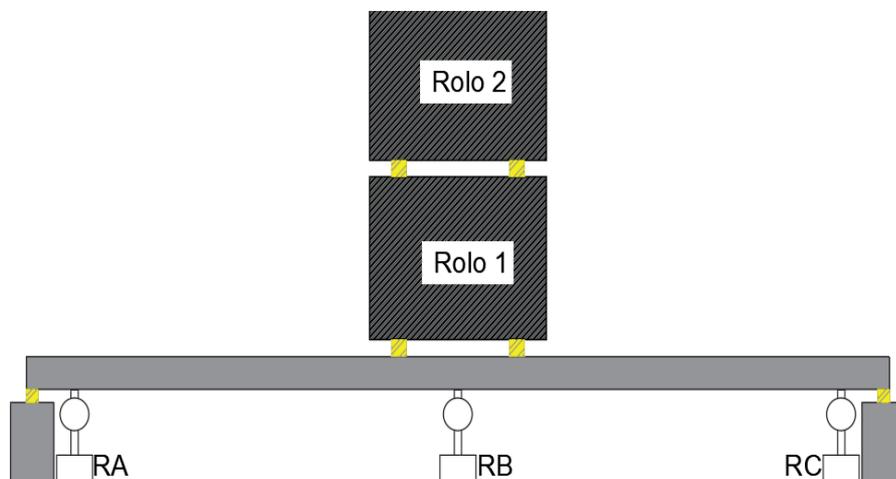
Figura 8-12 Ensaio realizado com 4 apoios



Fonte: Próprio Autor (2021)

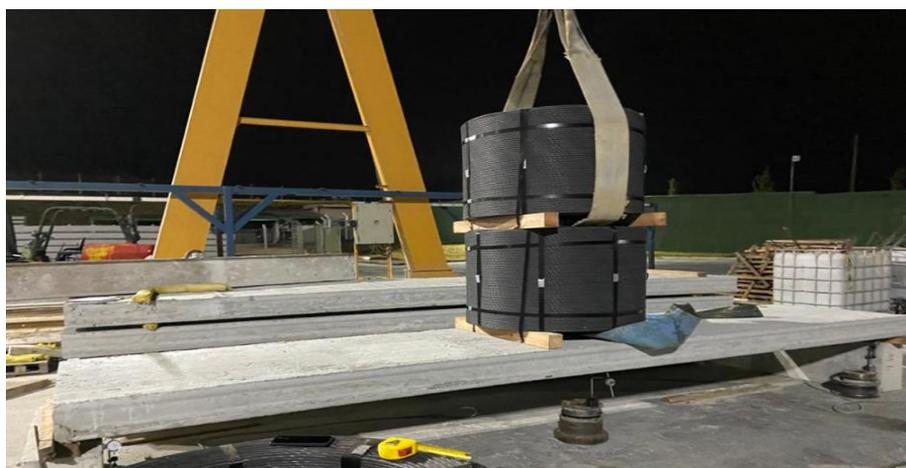
O mesmo processo ocorre para lajes com duas cargas pontuais, conforme Figura 8-13 e Figura 8-14.

Figura 8-13 Esquema de aplicação de carga em 2 pontos



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-14 Ensaio realizado com 2 apoios



Fonte: Próprio Autor (2021)

Um outro método, não tão preciso, utilizado para avaliar os deslocamentos é por meio do emprego de linha de náilon e trena (Figura 8-15). Uma vez esticada esta linha até o ponto de eliminação do efeito catenária, é medido o deslocamento da laje em vazio, ao passo que ocorre o incremento de carga, é realizado uma nova leitura, da mesma forma com que acontece com os relógios comparadores, este processo se repete até que a laje esteja em situação de “vazio” novamente para leitura dos deslocamentos residuais. É importante frisar que com a trena mede-se apenas os deslocamentos da seção central da peça.

Figura 8-15 Leitura do deslocamento por meio de linha e trena



Fonte: Próprio Autor (2021)

A primeira laje ensaiada no dia 18/05/2021 foi a (LJ 5), nesta aplicou-se uma carga em 4 pontos com o total de 8034 kg, utilizando 3 rolos de cordoalha, mostrado na Tabela 8-1. Em função da pouca idade do concreto e da deformação final, optou-se por utilizar nas demais lajes deste dia apenas dois rolos de cordoalha conforme mostra a Tabela 8-2.

Tabela 8-1 Peso das cordoalhas aplicados na laje 5 - 18/05/2021

Identificação das Cargas Aplicadas	Peso (KG)
Rolo 1	2924
Rolo 2	2924
Rolo 3	2186

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 8-2 Peso das cordoalhas aplicadas nas demais lajes - 18/05/2021

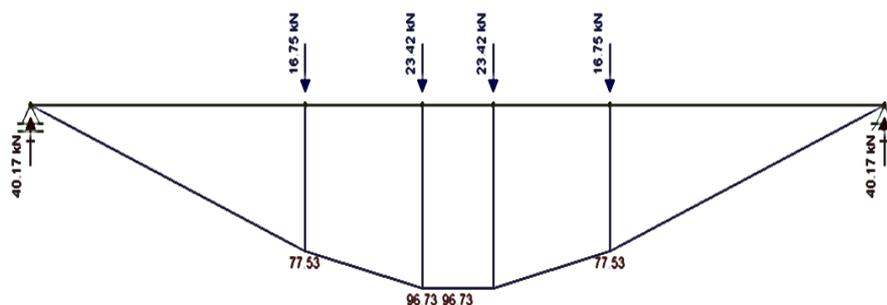
Identificação das Cargas Aplicadas	Peso (KG)
Rolo 1	2924
Rolo 2	2924

Fonte: Próprio Autor (2021)

Os valores de carregamento em cada ponto de aplicação de carga na laje foram determinados por meio da isostática, as forças aplicadas na LJ 5 podem ser observadas na

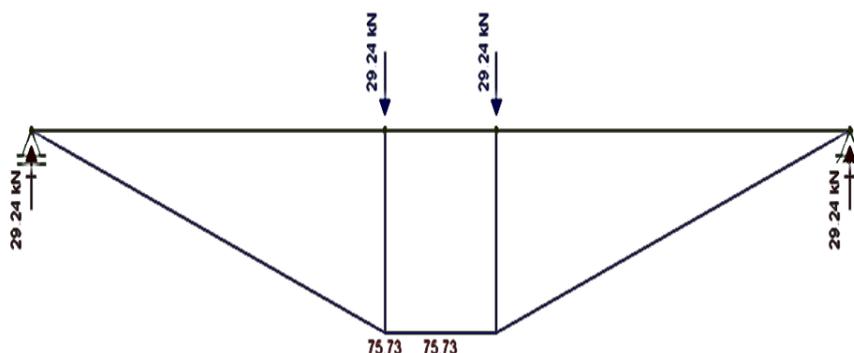
Figura 8-16, juntamente com o momento atuante na estrutura, sem a consideração do peso próprio. Já na Figura 8-17 é mostrado o esquema estático para as demais lajes ensaiadas no dia 18/05/2021.

Figura 8-16 Forças Atuantes LJ 5 18/05/2021



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-17 Forças Atuantes na LJ 1; LJ 2; LJ 3; LJ 4; LJ 6- 18/05/2021



Fonte: Próprio Autor (2021)

No segundo dia de ensaio, 24/05/2021, as lajes já estavam com 7 dias de idade e conseqüentemente em função do aumento de resistência do concreto, para todos os ensaios realizados nesta data optou-se pela aplicação de carga concentrada em 4 pontos, utilizando 3 rolos de cordoalha.

Foram utilizadas as mesmas cordoalhas no ensaio da LJ 5 do dia 18/05/2021 conforme mostra a Tabela 8-1, conseqüentemente o esquema estático é o mesmo da Figura 8-16.

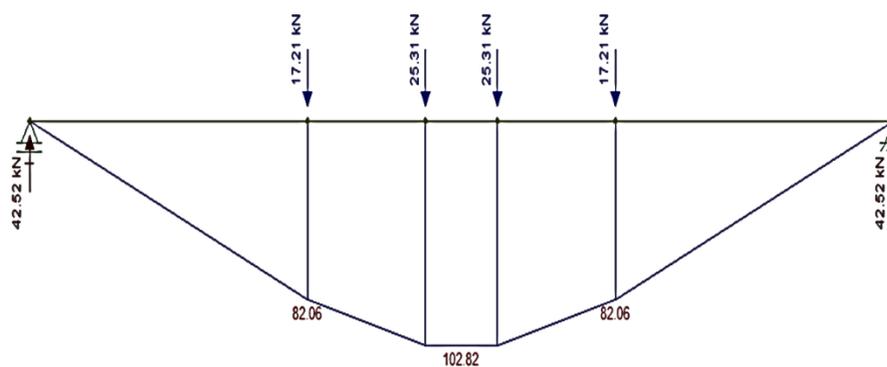
Para os testes realizados no dia 01/06/2021 e 14/06/2021, respectivamente com 15 e 28 dias de idade, a Tabela 8-3 mostra os pesos dos rolos de cordoalha utilizados. A Figura 8-18 ilustra o esquema estático das lajes usadas neste ensaio e o momento atuante sem a consideração do peso próprio.

Tabela 8- 1 Peso das cordoalhas aplicados nas lajes dos dias 01/06/2021 e 14/06/2021

Identificação das Cargas Aplicadas	Peso (KG)
Rolo 1	2922
Rolo 2	2922
Rolo 3	2656

Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 8-18 Forças atuantes nas lajes ensaidas no dia 01/06/2021 e 14/06/2021



Fonte: Próprio Autor (2021)

8.3 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISES DOS RESULTADOS

8.3.1 DESLOCAMENTOS

Os deslocamentos foram medidos primeiramente com o auxílio dos relógios comparadores e de forma secundária, a linha que foi esticada junto de uma trena, a princípio quando a laje ainda estava sem a ação de carregamentos externos, realizou-se a primeira leitura dos relógios e da trena. Assim como já explicado em “8.1 Esquema de ensaio”.

Para se determinar o deslocamento real da peça, após a aplicação de todas as cargas, realizou-se a leitura final nos relógios e subtraiu-se a leitura inicial dos relógios (leitura em vazio) para obtenção da variação dos deslocamentos em cada relógio comparador, então realiza-se a média dos deslocamentos dos apoios para subtrair do valor encontrado de deslocamento no meio do vão.

Estas medições são sempre conferidas por meio da linha e trena, porém este método é mais impreciso pois quando é realizada a leitura no meio do vão, não são considerados os deslocamentos médios dos apoios.

8.3.2 MOMENTO DE INÉRCIA DA PEÇA

O momento de inércia real do elemento é obtido por meio da caracterização das seções já apresentado anteriormente, e por meio de desenho em CAD da seção real, utilizando a metodologia apresentado em Carvalho (2017) para se encontrar as propriedades geométricas da seção.

Para se desenhar a seção real do elemento em CAD, foi utilizado papel manteiga e giz de cera posicionados em cada seção de laje alveolar, onde foi esticado o papel e desenhado em cada perímetro das peças (Figura 8-19), após confecção de todos os desenhos em papel manteiga, foram tiradas fotografias dos desenhos, inseridos em um programa CAD e ajustadas à escala correta com base em medidas reais. A seção real das lajes foi desenhada no CAD por cima das fotos tiradas dos desenhos em papel manteiga.

8.3.3 AVALIAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO REAL DAS PEÇAS

De posse dos deslocamentos reais da peça e da inércia real, à partir da equação da flecha é possível determinar o módulo de elasticidade (E) real do elemento e comparar com as equações teóricas da ABNT NBR 6118 (2014). Para o cálculo das lajes com duas cargas pontuais, conforme realizado no dia 18/05/2021 nas lajes LJ 1, LJ 2, LJ 3, LJ 4 e LJ 6, a equação da flecha é conhecida, como mostra a Equação 85. Isolando o E da equação, tem-se o módulo real elástico do concreto, demonstrado na Equação 86.

$$\delta = \frac{Pa}{24 EI} (3l^2 - 4a^2) \quad (85)$$

$$E = \frac{Pa}{24 I\delta} (3l^2 - 4a^2) \quad (86)$$

Onde:

δ - Medida da flecha máxima;

P – Carga concentrada;

a – Distância do ponto de aplicação da carga ao apoio;

l - Comprimento do elemento entre apoios;

E - Módulo de elasticidade;

I - Momento de inércia da seção.

Por sua vez, os ensaios realizados na laje LJ 5 no dia 18/05/2021 e em todas as lajes no dia 24/05/2021, o esquema estático contava com quatro cargas pontuais, para isso foi preciso determinar a equação da linha elástica partindo da metodologia apresentada em Hibbeler (2015). Onde os deslocamentos podem ser obtidos por meio da dupla integração da equação do momento fletor, conforme Equação 87.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (87)$$

A expressão da linha elástica para os ensaios realizados no dia 24/05/2021 e para a LJ 5 do dia 18/05/2021 pode ser observada na Equação 88, para um X variando de $2,75 < X < 3,25$, visto que a deflexão máxima ocorre na metade do vão onde $X = 3$. Isolando o E da expressão, temos a Equação 89.

$$EI \cdot \delta = 6,695x^3 - 2,79(x - 1,93)^3 - 3,9(x - 2,75)^3 - 170,5x \quad (88)$$

$$E = \frac{6,695x^3 - 2,79(x - 1,93)^3 - 3,9(x - 2,75)^3 - 170,5x}{I \cdot \delta} \quad (89)$$

As Equações 90 e 91 trazem respectivamente a equação da linha elástica e o módulo elástico real da peça, para as demais amostras ensaiadas nos dias 01/06/2021 e 14/06/2021.

$$I \cdot \delta = 7,086x^3 - 2,868(x - 1,93)^3 - 4,218(x - 2,75)^3 - 180,6805x \quad (90)$$

$$E = \frac{7,086x^3 - 2,868(x - 1,93)^3 - 4,218(x - 2,75)^3 - 180,6805x}{I \cdot \delta} \quad (91)$$

9. RESULTADOS

9.1 ESCORREGAMENTO DE CORDOALHA

A ABNT NBR 14861 (2011) prescreve que sejam realizadas medidas dos escorregamentos nas cordoalhas com paquímetro, para as lajes onde são identificados escorregamentos em zonas de ancoragem. Os escorregamentos de cordoalha podem ocorrer de modo sistemático (em todas ou quase todas as cordoalhas) ou em apenas algumas posições de cordoalha. Para os casos de forma sistemática, tem-se a suspeita de que a liberação da protensão ocorreu quando a resistência do concreto ainda não havia atingido a resistência mínima para a liberação da pista. Para casos em que o escorregamento ocorre em poucas cordoalhas, o problema localizado precisa ser melhor investigado.

A ABNT NBR 14861 (2011) define: “o valor representativo de escorregamento pode ser medido com a média dos valores em lados opostos da laje, dos dois fios mais externos”, sendo o valor representativo utilizado como referência para comparação com o escorregamento médio l_0 das cordoalhas nas extremidades das lajes.

Ferreira (2021) ressalta que o escorregamento médio é apenas um valor médio estimado com base em um comprimento de transferência teórico na região da extremidade da laje alveolar e não um limite de aceitabilidade para o escorregamento.

9.2 LIMITES DE ESCORREGAMENTOS EM CORDOALHA

O limite para escorregamento nas extremidades das lajes alveolares é definido no item 7.9 da ABNT NBR 14861 (2011) pela expressão $\Delta_{lim} = 1,3 \times \Delta_{l_0}$. Quando este limite é ultrapassado significa que a cordoalha perdeu parte considerável da ancoragem nas extremidades da laje, trazendo consequências diretas para a redução da contribuição da protensão no comprimento de transferência para o cálculo da resistência à força cortante, mesmo assim, segundo Ferreira (2021) este nem sempre é um critério absoluto para rejeição de uma laje.

Deve-se distinguir a ocorrência do escorregamento do cabo de protensão e a ocorrência do escorregamento na extremidade das cordoalhas, para o primeiro caso a laje deixa de atuar como um elemento protendido, já em casos de escorregamentos nas extremidades das cordoalhas, o maior prejuízo se dá em relação ao comportamento da laje na região do comprimento de transferência, afetando na grande maioria dos casos a resistência da laje à força cortante.

Neste trabalho foram avaliados os escorregamentos de cada cordoalha, para todas as lajes ensaiadas, em seus lados A e B. As leituras foram realizadas com base na face A de cada laje, sendo identificada a posição das cordoalhas com base nessa face, e as leituras realizadas pela face B são correspondentes ao mesmo cabo, visto pela face A, garantindo assim que os escorregamentos fossem verificados no mesmo cabo pelas duas extremidades das peças. A sequência de resultados podem ser observadas nas Tabelas de 9-1 a 9-6.

Tabela 9-1 Escorregamento de cordoalha - Laje 1

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 1	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,21	0,03	0,37	0,11	0,03	0	0,07	0,22
	B	0,9	0,09	0,25	0,73	0,25	0	0,53	0,8
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,26	0,03	0,27	0,11	0,03	0	0,07	0,26
	B	0,9	0,09	1,31	0,73	0,29	0	0,53	0,8
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,34	0,03	0,27	0,13	0,03	0	0,08	0,26
	B	1	0,09	1,31	0,73	0,29	0	0,77	0,82
3o Ensaio - 01/06/2021									
02/06/2021	A	0,34	0,03	0,43	0,13	0,03	0	0,08	0,37
	B	1,05	0,09	0,27	0,75	0,45	0	0,8	0,82
4o Ensaio - 14/06/2021									
15/06/2021	A	0,34	0,03	0,43	0,13	0,04	0	0,08	0,37
	B	1,05	0,09	0,27	0,75	0,45	0,01	0,8	0,82

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-2 Escorregamento de cordoalha - Laje 2

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 2	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,09	0	0,85	0,09	1,08	0,47	0,56	0,09
	B	0,37	0,24	1,42	0,03	1,01	0,07	0,33	2,21
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,09	0	0,85	0,09	2,06	0,47	0,58	0,09
	B	0,42	0,24	1,43	0,03	1,01	0,07	0,34	2,22
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,09	0	0,85	0,09	2,06	0,73	1,55	0,09
	B	0,42	0,24	1,43	0,03	1,02	0,07	0,34	2,22

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-3 Escorregamento de Cordoalha - Laje 3

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 3	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,35	0,98	0,55	0	0,03	0,11	0,06	0,12
	B	0,1	0	0,25	0,6	0,03	1,22	0,64	0,59
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,37	0,99	0,55	0	0,1	0,19	0,06	0,27
	B	0,34	0	0,99	0,6	0,03	1,28	0,65	0,6
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,37	1,16	0,73	0	0,1	0,19	0,23	0,27
	B	0,34	0,01	1,36	0,6	0,11	1,78	0,65	0,6
3o Ensaio - 01/06/2021									
02/06/2021	A	0,37	0,17	0,73	0	0,29	0,19	0,23	0,27
	B	0,34	0,01	1,36	0,6	0,11	1,79	0,65	0,6
4o Ensaio - 14/06/2021									
15/06/2021	A	0,37	1,17	0,75	0	0,3	0,19	0,24	0,42
	B	0,35	0,01	1,36	0,66	0,11	1,8	0,65	0,73

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-4 Escorregamento de Cordoalha - Laje 4

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 4	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,03	0,03	0,22	0,02	0,05	0,08	1,61	0,87
	B	S/N	0,18	0,53	2,26	1,23	0,56	1,04	0,16
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,03	0,05	0,22	0,03	0,05	0,08	1,61	0,87
	B	S/N	0,18	0,53	2,32	1,87	1,03	1,04	0,16
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,03	0,05	0,22	0,03	0,05	0,08	1,66	0,87
	B	S/N	0,18	0,54	2,32	2,33	1,03	1,04	0,16
3o Ensaio - 01/06/2021									
02/06/2021	A	0,03	0,05	0,22	0,03	0,06	0,08	1,66	0,88
	B	S/N	0,18	0,54	2,32	2,33	1,03	1,04	0,16
4o Ensaio - 14/06/2021									
15/06/2021	A	0,03	0,05	0,22	0,03	0,06	0,08	1,66	0,98
	B	S/N	0,18	0,54	2,53	2,33	1,03	1,04	0,16

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-5 Escorregamento de Cordoalha - Laje 5

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 5	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,09	0,1	0,78	0,03	0,03	0,47	0,19	0,24
	B	1,23	0,13	0,12	0,09	0,85	0,06	2,02	0,08
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,13	0,16	1,02	0,03	0,03	0,56	0,19	0,24
	B	1,45	0,13	0,12	0,1	0,94	0,09	2,22	0,08
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,13	0,16	1,05	0,04	0,03	0,56	0,19	0,24
	B	1,59	0,13	0,12	0,1	0,94	0,09	2,23	0,08
3o Ensaio - 01/06/2021									
02/06/2021	A	0,14	0,16	1,05	0,03	0,03	0,56	0,19	0,24
	B	1,6	0,13	0,12	0,1	0,96	0,09	2,23	0,08
4o Ensaio - 14/06/2021									
15/06/2021	A	0,14	0,16	1,05	0,03	0,04	0,56	0,19	0,57
	B	1,6	0,13	0,12	0,1	0,96	0,09	2,25	0,08

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-6 Escorregamento de Cordoalha - Laje 6

Escorregamento de cordoalhas (mm)									
Laje 6	Nome	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		Φ	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
18/05/2021	A	0,34	0,42	1,07	0,45	0,28	0,02	0,2	S/N
	B	1,43	0,03	0,56	0,37	0,04	1,21	1,21	0,77
1o Ensaio - 18/05/2021									
20/05/2021	A	0,48	0,42	1,13	0,58	0,28	0,03	0,41	S/N
	B	1,43	0,26	0,56	0,37	0,04	1,21	1,21	0,78
2o Ensaio - 24/05/2021									
27/05/2021	A	0,55	0,45	1,13	0,75	0,28	0,03	0,41	S/N
	B	1,43	0,26	0,88	0,37	0,12	1,23	1,21	0,78
3o Ensaio - 01/06/2021									
02/06/2021	A	0,55	0,45	1,13	0,75	0,37	0,03	0,49	S/N
	B	1,94	0,26	0,88	0,38	0,12	1,23	1,31	0,85
4o Ensaio - 14/06/2021									
15/06/2021	A	0,65	0,52	1,22	0,75	0,49	0,03	0,49	S/N
	B	2,21	0,26	0,89	0,42	0,29	1,23	1,35	0,86

Fonte: Próprio Autor (2021)

A primeira leitura dos escorregamentos de cordoalha ocorreu no dia 18/05/2021 antes da realização da primeira prova de carga, a segunda leitura ocorreu após a primeira prova de carga e antes da realização da segunda (sendo realizada a leitura no dia 20/05/2021), assim sucessivamente até o dia 15/06/2021. Com isso foi possível observar a evolução dos escorregamentos dos cabos entre os ensaios, verificando o quanto variou a cada novo ensaio realizado.

Nas células das tabelas em que foram utilizadas as nomenclaturas “S/N” significam que não foi possível a realização da leitura em função de algum reparo feito na laje que acabou cobrindo a cordoalha.

De acordo com a ABNT NBR 14861 (2011), tem-se para o limite de escorregamento de cordoalha o desenvolvimento dos cálculos nas Equações 92 e 93:

$$\Delta l_0(12,7) = 0,40 \cdot l_{pt2} \cdot \frac{\sigma_{cp0}}{E_p} = 0,40 \times 85 \times 12,7 \text{ mm} \times \frac{1,391 \frac{KN}{mm^2}}{195 \frac{KN}{mm^2}} = 3,08 \text{ mm} \quad (92)$$

$$1,3 \Delta l_0(12,7) = 1,3 \times 3,08 = 4,00 \text{ mm}$$

$$\Delta l_0(9,5) = 0,40 \cdot l_{pt2} \cdot \frac{\sigma_{cp0}}{E_p} = 0,40 \times 85 \times 9,5 \text{ mm} \times \frac{1,664 \frac{KN}{mm^2}}{195 \frac{KN}{mm^2}} = 2,75 \text{ mm} \quad (93)$$

$$1,3 \Delta l_0(9,5) = 1,3 \times 2,75 = 3,57 \text{ mm}$$

Sendo:

L_{pt2} = valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ);

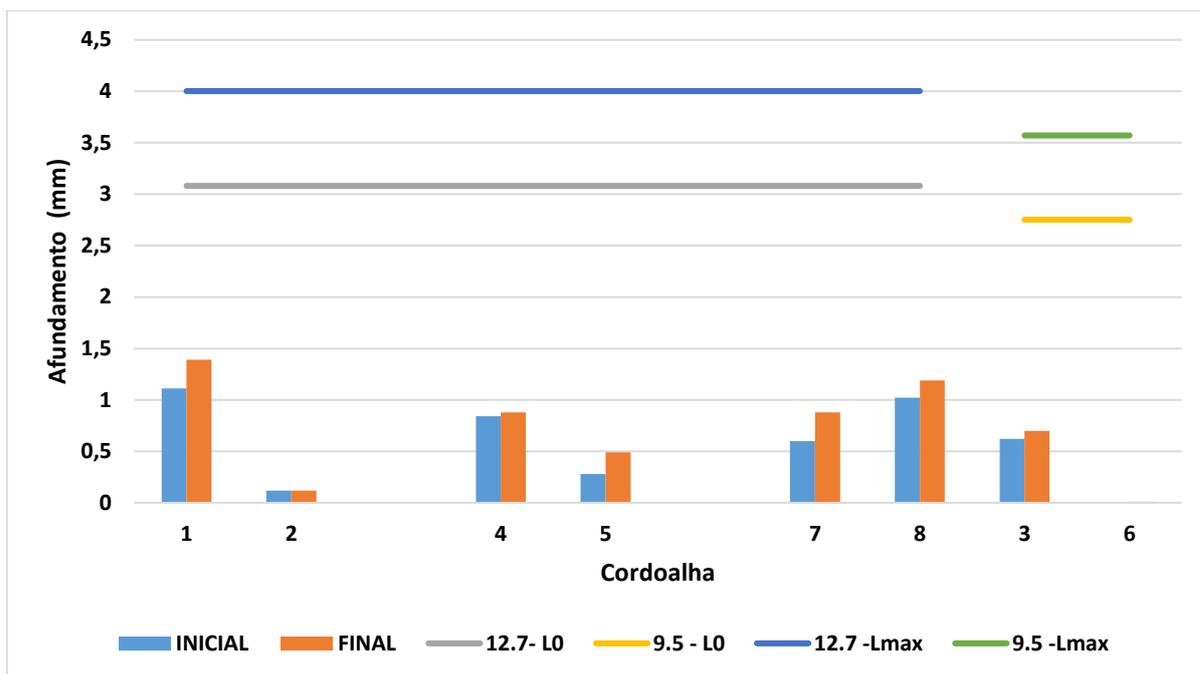
E_p = o módulo elástico da armadura;

σ_{cp0} = tensão no instante da liberação da protensão;

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \times \Delta l_0$$

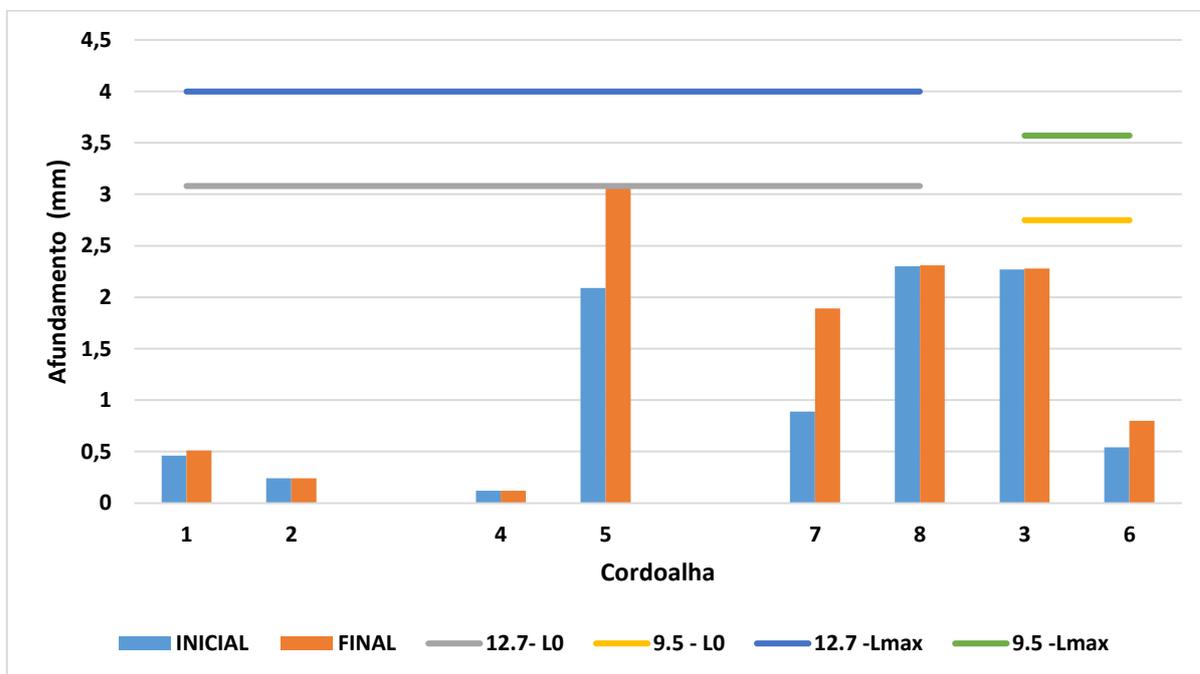
Pelo fato de a laje apresentar cordoalhas de 12,7 mm (c1, c2, c4, c5, c7 e c8) e 9,5 mm (c3 e c6), foram calculados os limites iniciais e máximos permitidos por norma para cada cabo de protensão, os resultados para a laje LJ 1 estão expressos no Gráfico 9-1, para laje LJ 2 no Gráfico 9-2 assim sucessivamente até o Gráfico 9-6 da laje LJ 6.

Gráfico 9-1 Evolução do escorregamento de cordoalha para Laje 1



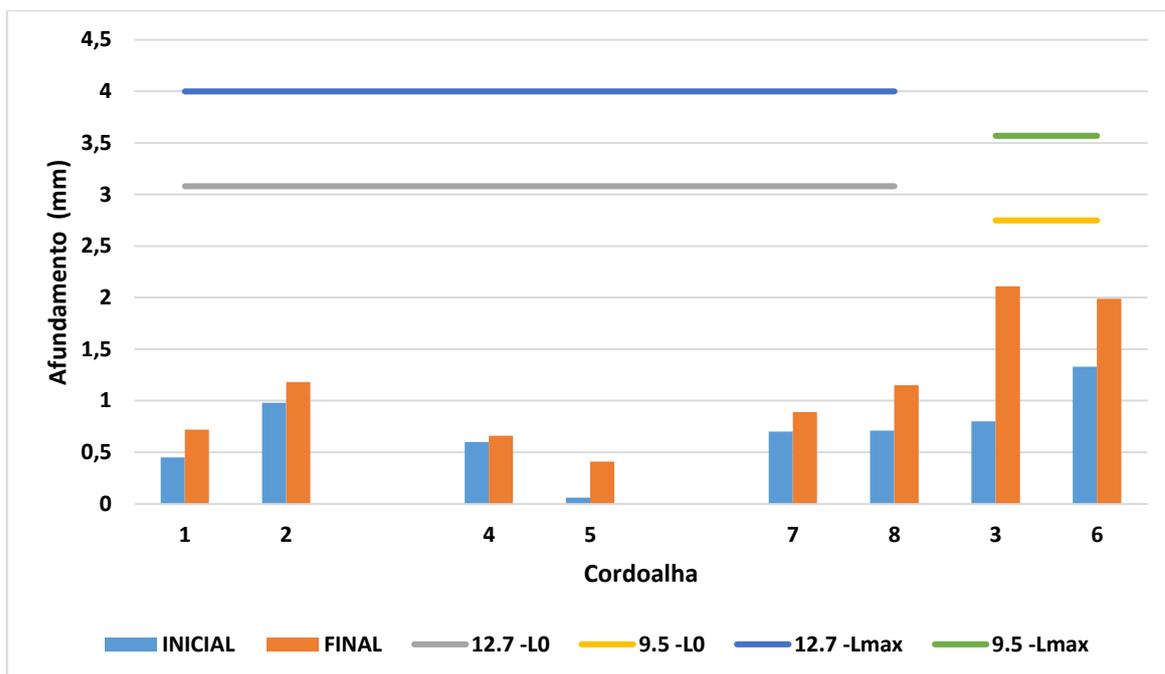
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-2 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 2



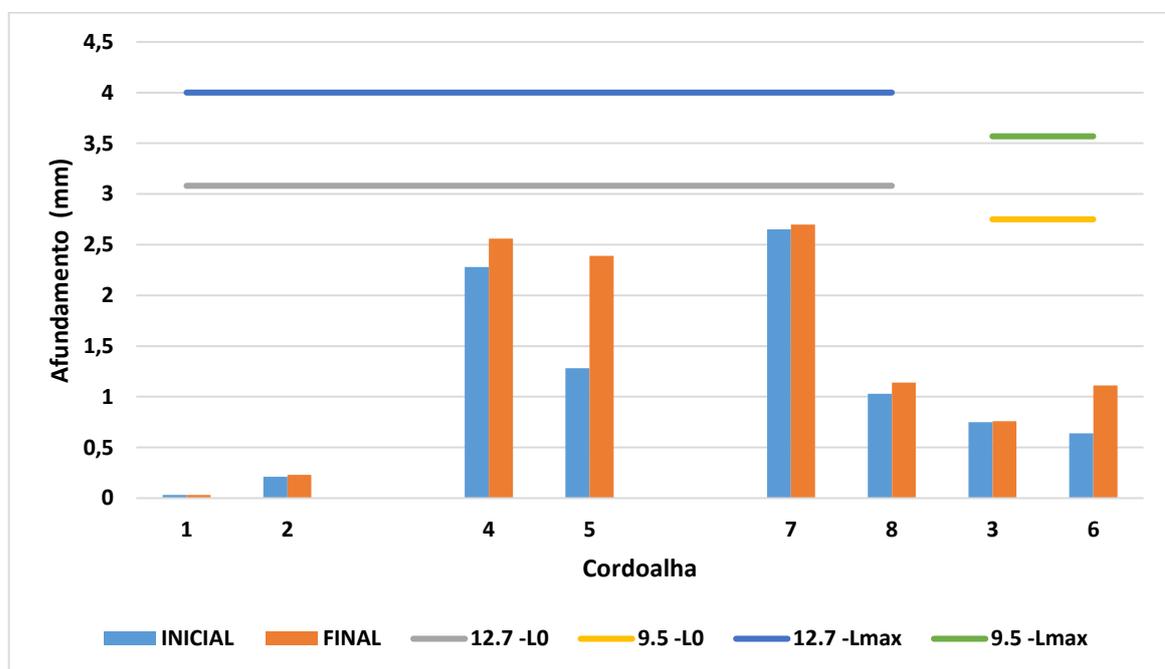
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-3 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 3



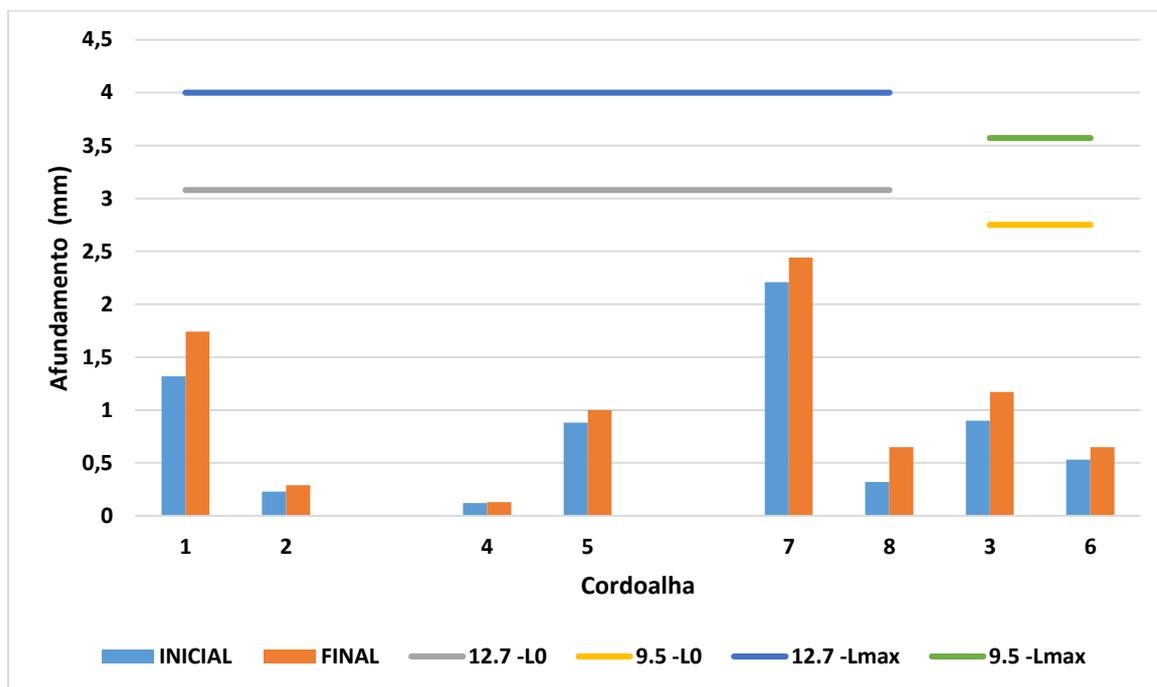
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-4 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 4



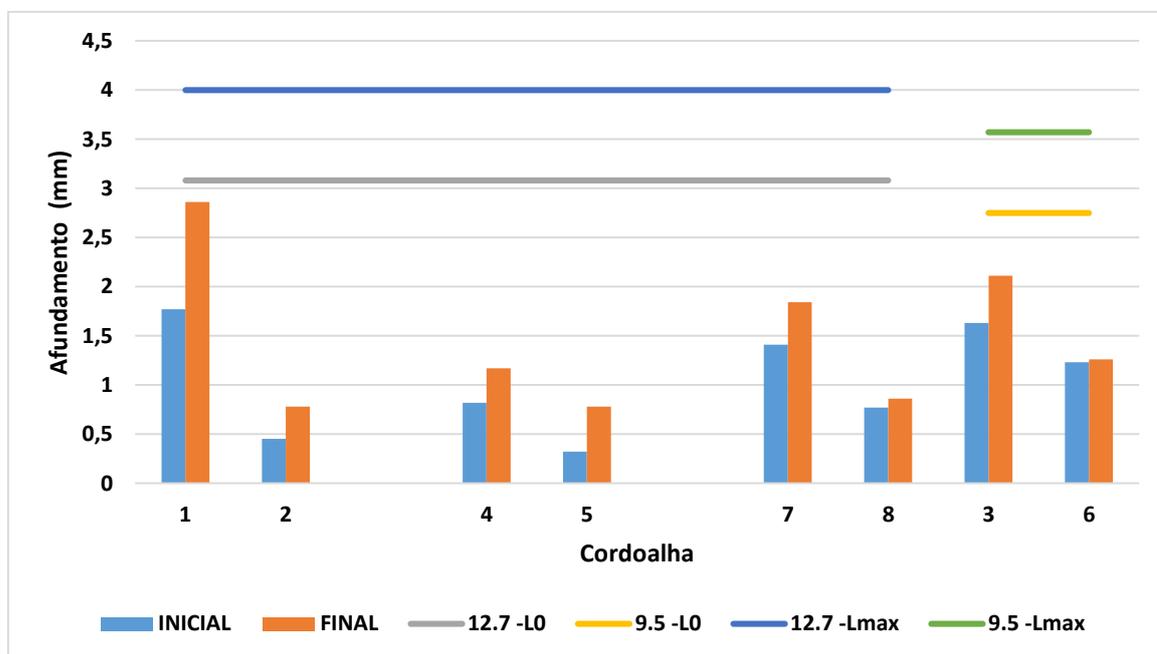
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-5 Escorregamento de cordoalha para a Laje 5



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-6 Evolução do escorregamento de cordoalha para a Laje 6



Fonte: Próprio Autor (2021)

Sendo as cordoalhas 1,2,4,5,7 e 8 de 12,7 mm e cordoalhas 3 e 6 de 9,5 mm, pode-se observar pelos Gráficos 9-1 a 9-6 que todos os escorregamentos foram menores que o mínimo (ΔL_0), tanto para a primeira leitura quanto para a leitura final após os ensaios serem realizados.

Na laje LJ 2, ao final do 2º ensaio em que rompeu por cisalhamento no apoio, o escorregamento final verificado na cordoalha 5 de 12,7 mm foi exatamente o ΔL_0 , ficando ainda dentro do Δ limite. De modo geral as lajes apresentaram escorregamentos mínimos muito abaixo do limite inferior da norma, apresentando desempenho satisfatório no quesito escorregamento de cordoalha, todos os cabos estão dentro do limite normativo.

9.3 ANÁLISE DOS CARREGAMENTOS E DESLOCAMENTOS

Nos ensaios realizados nas lajes foram realizadas as leituras dos relógios comparadores a cada incremento de carga, além das leituras inicial e final sem carga. Nas Tabelas de 9-7 à 9-29, é possível observar o comportamento dos deslocamentos por carga aplicada, sendo que a coluna “Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)” mostra o resultado do relógio comparador posicionado no meio do vão e já descontada a média dos resultados dos relógios posicionados próximos aos apoios.

Antes, ao longo e depois de cada ensaio também foram medidos os deslocamentos no meio do vão com trena e utilizando-se uma linha de náilon esticada de modo a eliminar o efeito de catenária. De modo geral a utilização dos relógios comparadores e da trena foi fundamental para verificação se o comportamento da leitura pelas duas maneiras estava de acordo. Pode-se notar que para cada idade da laje, a carga aplicada foi aumentada devido ao aumento de resistência à compressão do concreto.

9.3.1 LAJE 1

Para a Laje LJ 1 é possível verificar nas Tabelas 9-7, 9-8, 9-9 e 9-10, que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 11,35 mm e com 7 dias de idade deslocou 10,6 mm no meio do vão, é possível verificar também que para a idade de 15 dias com a carga de 5844 kg o deslocamento foi de 10,89 mm. Nos ensaios de 15 e 28 dias é possível observar que para a mesma carga aplicada, em todos os incrementos de carregamento, os deslocamentos foram relativamente menores.

A tabela também mostra que ao final do ensaio de 7 dias a contraflecha medida no meio do vão foi de 22,84 mm e antes de iniciar o ensaio da laje com 15 dias a contraflecha se encontrava em 25 mm e antes do ensaio da laje com 28 dias a contraflecha medida foi de 28 mm. Comparando-se ainda o ensaio de 7 dias, carga de 8034 kg o deslocamento foi de 15,93 mm enquanto no ensaio de 15 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento observado é 17,67 mm e no ensaio de 28 dias, o deslocamento foi de 16,71 mm. Mesmo com a carga máxima aplicada sendo maior no ensaio de 15 dias e 28 dias, o deslocamento residual observado foi menor, respectivamente de 1,03 mm e 0,82 mm contra 1,16 mm observado no ensaio de 7 dias.

Tabela 9-7 Laje LJ 1 - Com 1 dia de idade

LJ 1 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	15,00	15,00
2924,00	5,22	9,00	9,78
5848,00	11,35	0,00	3,64
0,00	0,58	15,00	14,41

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-8 Laje LJ 1 - Com 7 dias de idade

LJ 1 - Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43,95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	24,00	24,00
2924,00	4,92	18,00	19,07
5848,00	10,60	11,00	13,39
8034,00	15,93	6,00	8,07
0,00	1,16	22,00	22,84

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-9 Laje LJ 1 - Com 15 dias de idade

LJ 1 - Ensaio no dia 01/6/2021 - Laje com 15 dias ($F_{ck} = 47,15$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	25,00	25,00
2922,00	5,29	20,00	19,71
5844,00	10,89	14,00	14,11
8500,00	17,67	9,00	7,33
0,00	1,03	24,00	23,97

Fonte: Próprio Autor (2021)

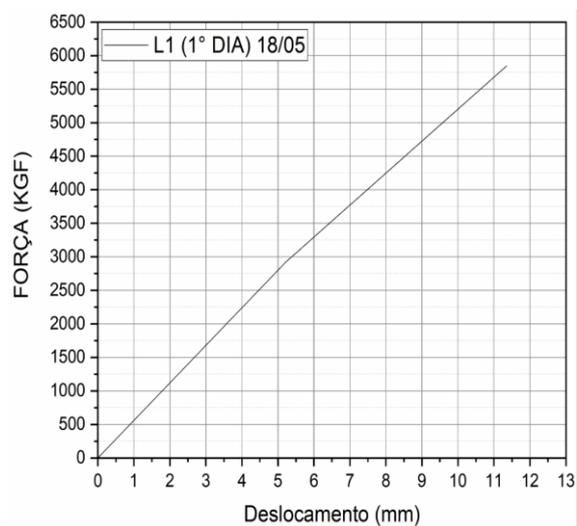
Tabela 9-10 Laje LJ 1 - Com 28 dias de idade

LJ 1 - Ensaio no dia 14/6/2021 - Laje com 28 dias ($F_{ck} = 52,25$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	28,00	28,00
2922,00	4,84	22,00	23,16
5844,00	10,31	17,00	17,69
8500,00	16,71	11,00	11,30
0,00	0,82	28,00	27,18

Fonte: Próprio Autor (2021)

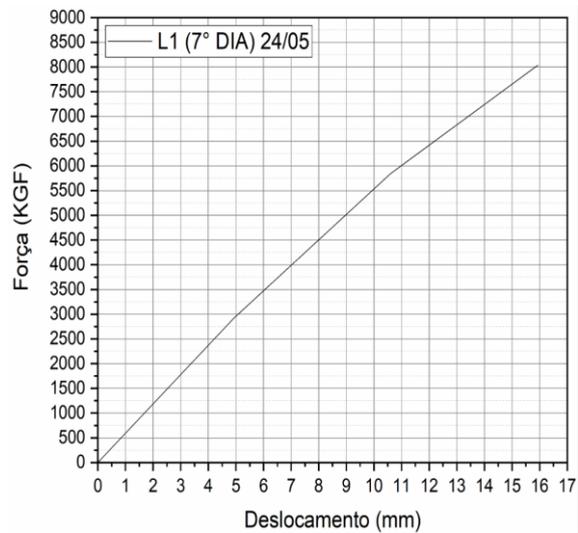
Os Gráficos 9-7 a 9-10 mostram as curvas de Força x Deslocamento para as cargas aplicadas na LJ 1 nas diferentes datas de ensaio, sendo possível observar uma linha de evolução próxima à uma reta.

Gráfico 9-7 Força x Deslocamento LJ 1 - 1o dia



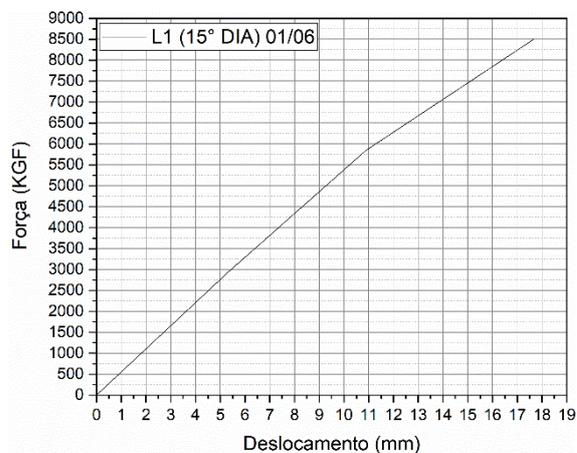
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-8 Força x Deslocamento LJ 1 - 7o dia



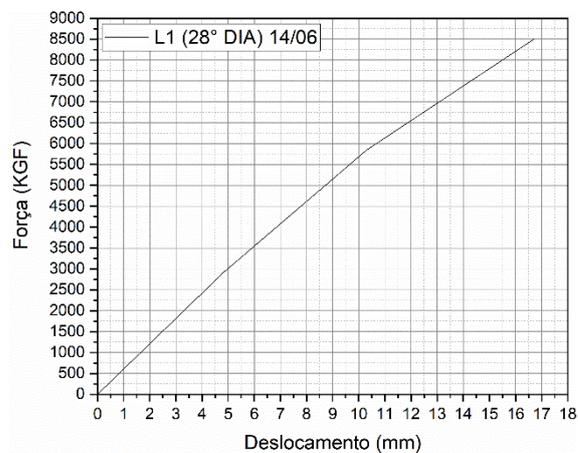
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-9 Força x Deslocamento LJ 1 - 15o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-10 Força x Deslocamento LJ 1 - 28o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

9.3.2 LAJE 2

Para a Laje LJ 2 é possível verificar nas Tabelas 9-11 e 9-12 que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 13,74 mm e com 7 dias de idade deslocou 11,28 mm no meio do vão. A tabela também mostra que ao final do ensaio de 1 dia a contraflecha medida no meio do vão foi de 17,73 mm e antes de iniciar o ensaio da laje com 7 dias a contraflecha se encontrava em 24 mm.

O ensaio da laje LJ 2 parou com 7 dias de idade, diferente dos demais, pois sofreu uma ruptura por cisalhamento do apoio até 56 cm ao longo do comprimento da laje, verificado nas nervuras 8, 9 e 10, esta é a laje que estava com o enchimento em concreto com compactação manual realizado na pista durante a concretagem, por ter sofrido um arraste no concreto devido ao travamento da máquina moldadora no bisotê. Essa ruptura ocorreu no momento em que foi colocado todo o peso de 8034 kg sobre a laje.

Tabela 9-11 Laje LJ 2 - Com 1 dia de idade

LJ 2 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	19,00	19,00
2924,00	6,32	13,00	12,67
5848,00	13,74	7,00	5,25
0,00	1,27	19,00	17,73

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-12 Laje LJ 2 - Com 7 dias de idade

LJ 2- Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43,95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	24,00	24,00
2924,00	4,37	19,00	19,62
5848,00	11,28	12,00	12,71
8034,00	16,69	6,00	7,31
0,00	0,32	21,00	23,68

Fonte: Próprio Autor (2021)

O deslocamento residual da laje pode ainda ser considerado mais alto do que deveria pois o relógio comparador A, posicionado no ponto em que ocorreu esta ruptura que passou para baixo da laje provavelmente fez com que essa região na laje deformasse e prejudicasse a leitura do relógio, embora a parcela do relógio comparador A para verificação da média de

deslocamento nos apoios tenha ficado menor que a parcela do relógio comparador C, conforme Tabela 9-13.

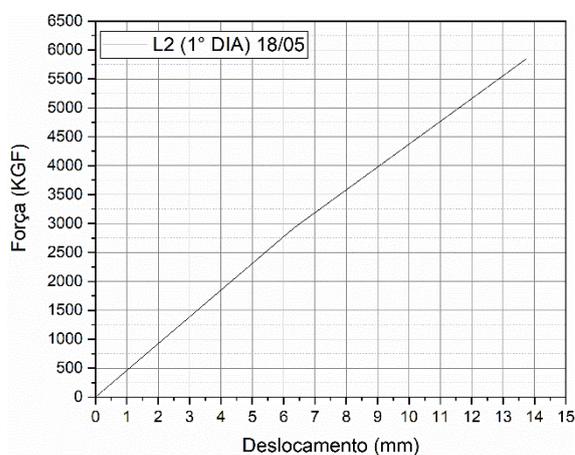
Tabela 9-13 Laje LJ 2 – Valores medidos nos relógios comparadores das extremidades

Carga Aplicada (Kg)	Relógio Comparador A (mm)	Relógio Comparador C (mm)
0,00	0,00	0,00
2924,00	1,40	3,85
5848,00	2,83	5,4
8034,00	4,20	7,66
0,00	1,52	3,64

Fonte: Próprio Autor (2021)

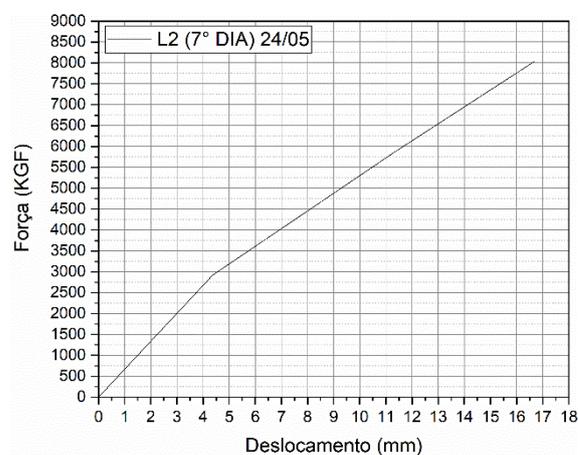
Nos Gráficos 9-11 e 9-12 é possível observar que para o ensaio de 1 dia a linha se comportou próximo à uma reta, enquanto no ensaio de 7 dias, para aplicação da 2ª carga houve um ponto de inflexão maior, que junto à aplicação da terceira carga mostrou um comportamento de reta, demonstrando que a fissura de cisalhamento pode ter começado a se originar no momento da aplicação da 2ª carga.

Gráfico 9-11 Força x Deslocamento LJ 2 - 1o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-12 Força x Deslocamento LJ 2 - 7o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

9.3.3 LAJE 3

Para a Laje LJ 3 é possível verificar nas Tabelas 9-14, 9-15, 9-16 e 9-17 que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 10,96 mm e com 7 dias de idade deslocou 10,14 mm no meio do vão, é possível verificar também que para a idade de 15 dias com a carga de 5844 kg o deslocamento foi de 9,95 mm enquanto para o ensaio de 28 dias o deslocamento com a mesma carga aplicada foi de 9,49 mm. A tabela também mostra que ao final do ensaio de 7 dias a contraflecha medida no meio do vão foi de 25,3 mm, antes de iniciar o ensaio da laje com 15 dias a contraflecha se encontrava em 28 mm e antes do ensaio com 28 dias se encontrava com 32 mm.

Comparando-se ainda o ensaio de 7 dias, carga de 8034 kg o deslocamento foi de 14,93 mm enquanto no ensaio de 15 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento observado é 14,04 mm e no ensaio de 28 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento foi de 15,12 mm, sendo este o único deslocamento que foi maior, comparado com o ensaio de 15 dias com mesmas cargas aplicadas. Observando-se os escorregamentos de cordoalha registrados antes e depois do ensaio de 28 dias, verificou-se poucos escorregamentos quase que insignificantes nas cordoalhas, medidos pelos dois fios mais externos.

Mesmo com a carga máxima aplicada sendo maior no ensaio de 15 dias e 28 dias, o deslocamento residual observado foi menor, de 0,85 mm (15 dias) e 0,73 mm (28 dias) contra 1,7 mm observado no ensaio de 7 dias.

Tabela 9-14 Laje LJ 3 – Com 1 dia de idade

LJ 3 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	18,00	18,00
2924,00	5,25	14,00	12,75
5848,00	10,96	4,00	7,04
0,00	0,77	17,00	17,23

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-15 Laje LJ 3 - Com 7 dias de idade

LJ 3 - Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43.95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	27,00	27,00
2924,00	4,92	21,00	22,08
5848,00	10,14	16,00	16,86
8034,00	14,93	11,00	12,07
0,00	1,70	24,00	25,3

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-16 Laje LJ 3 - Com 15 dias de idade

LJ 3 - Ensaio no dia 01/6/2021 - Laje com 15 dias ($F_{ck} = 47,15$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	28,00	28,00
2922,00	5,35	23,00	22,65
5844,00	9,95	17,00	18,05
8500,00	14,04	12,00	13,96
0,00	0,85	28,00	27,15

Fonte: Próprio Autor (2021)

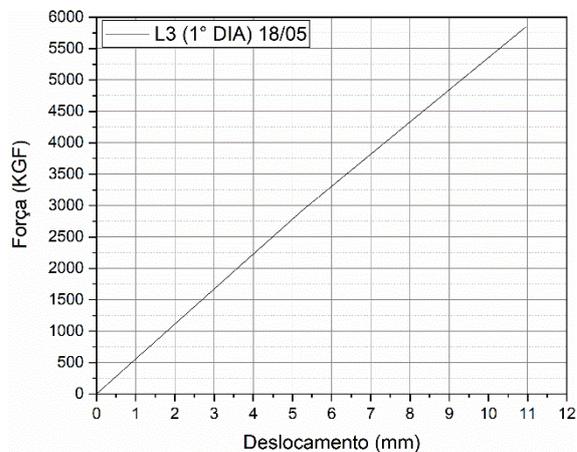
Tabela 9-17 Laje LJ 3 - Com 28 dias de idade

LJ 3 - Ensaio no dia 14/6/2021 - Laje com 28 dias ($F_{ck} = 52,25$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	32,00	32,00
2922,00	4,58	27,00	27,41
5844,00	9,49	22,00	22,50
8500,00	15,12	17,00	16,88
0,00	0,73	32,00	31,27

Fonte: Próprio Autor (2021)

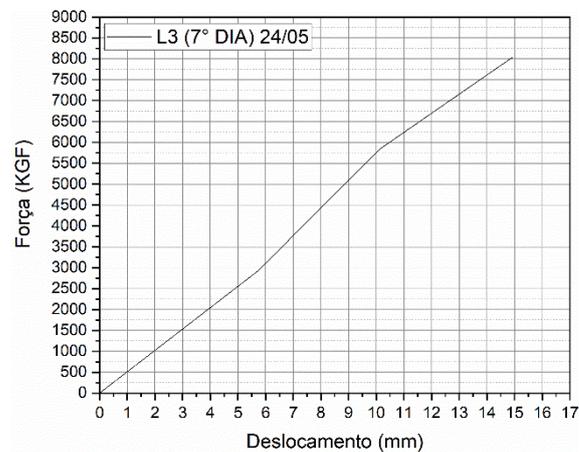
Nos Gráficos 9-13 a 9-16 é possível observar o comportamento da Força x Deslocamento na Laje LJ 3 para cada dia de ensaio, sendo que para o ensaio de 7 dias houve um menor deslocamento quando aplicada a 2ª carga e no ensaio de 15 dias houve um menor deslocamento quando aplicadas as 2ª e 3ª carga.

Gráfico 9-13 Força x Deslocamento LJ 3 - 10 dia



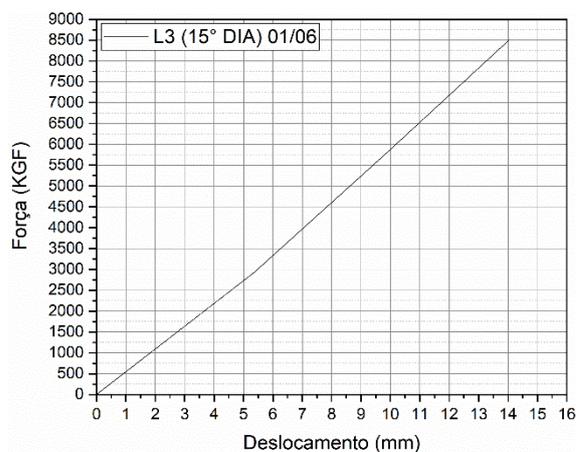
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-14 Força x Deslocamento LJ 3 - 7o dia



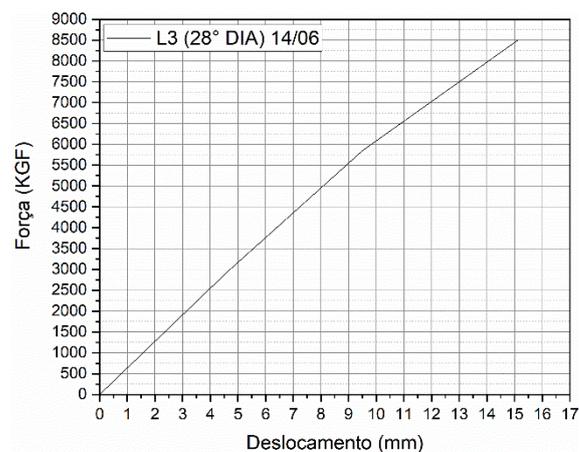
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-15 Força x Deslocamento LJ 3 - 15o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-16 Força x Deslocamento LJ 3 - 28o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

9.3.4 LAJE 4

Para a Laje LJ 4 é possível verificar nas Tabelas 9-18, 9-19, 9-20 e 9-21, que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 12,15 mm e com 7 dias de idade deslocou 10,60 mm no meio do vão, é possível verificar também que para a idade de 15 dias com a carga de 5844 kg o deslocamento foi de 9,51 mm e para 28 dias de idade e mesma carga aplicada o deslocamento foi de 8,73 mm.

A tabela também mostra que ao final do ensaio de 7 dias a contraflecha medida no meio do vão foi de 18,7 mm e antes de iniciar o ensaio da laje com 15 dias a contraflecha se encontrava em 29 mm, no final do ensaio foi registrada a contraflecha de 28,68 mm e no início do ensaio de 28 dias a contraflecha se manteve em 29 mm, sem evolução registrada.

Comparando-se ainda o ensaio de 7 dias, carga de 8034 kg o deslocamento foi de 14,40 mm enquanto no ensaio de 15 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento observado é 15,03 mm e no ensaio de 28 dias, com carregamento de 8500 kg, o deslocamento foi de 13,86 mm. Mesmo com a carga máxima aplicada sendo maior no ensaio de 15 dias e 28 dias, o deslocamento residual observado foi menor, respectivamente de 0,32 mm e 0,08 mm contra 1,3 mm observado no ensaio de 7 dias.

Tabela 9-18 Laje LJ 4 - Com 1 dia de idade

LJ 4 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	17,00	17,00
2924,00	5,74	11,5	11,26
5848,00	12,15	4,00	4,85
0,00	1,31	16,2	15,69

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-19 Laje LJ 4 - Com 7 dias de idade

LJ 4 - Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43,95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	20,00	20,00
2924,00	5,11	15,00	14,89
5848,00	10,60	10,00	9,39
8034,00	14,40	5,00	5,60
0,00	1,30	19,00	18,70

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-20 Laje LJ 4 - Com 15 dias de idade

LJ 4 - Ensaio no dia 01/6/2021 - Laje com 15 dias ($F_{ck} = 47,15$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	29,00	29,00
2922,00	4,24	24,00	24,76
5844,00	9,51	17,00	19,485
8500,00	15,03	11,00	13,97
0,00	0,32	28,00	28,68

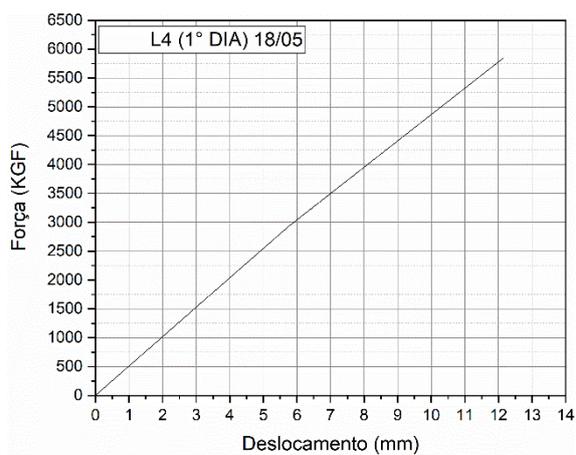
Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-21 Laje LJ 4 - Com 28 dias de idade

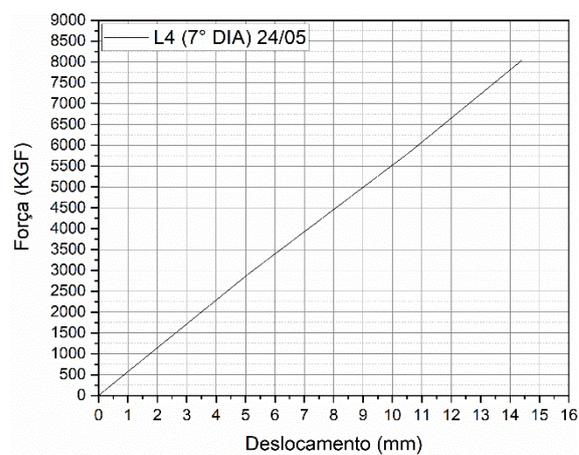
LJ 4 - Ensaio no dia 14/6/2021 - Laje com 28 dias ($F_{ck} = 52,25$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	29,00	29,00
2922,00	3,83	24,00	25,16
5844,00	8,73	17,00	20,27
8500,00	13,86	13,00	15,14
0,00	0,08	28,00	28,91

Fonte: Próprio Autor (2021)

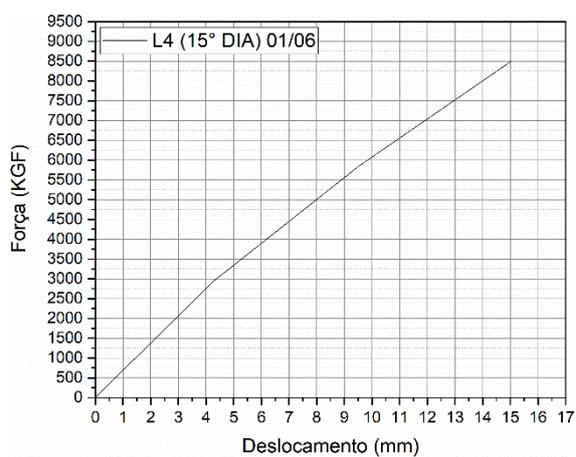
Os Gráficos 9-17 a 9-20 mostram que nos ensaios de 1 dia e 7 dias, a cada incremento de carga teve um o comportamento linear na laje. Já para as idades de 15 e 28 dias houve uma leve inflexão a cada incremento de carga, significando que a cada aumento na tensão, a deformação foi levemente maior do que o esperado.

Gráfico 9-17 Força x Deslocamento LJ 4 - 1o dia

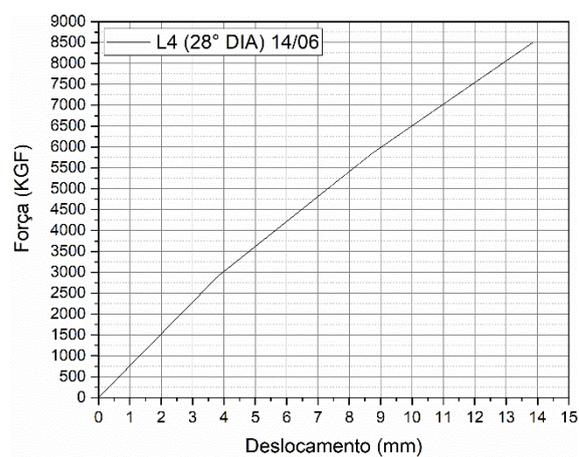
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-18 Força x Deslocamento LJ 4 - 7o dia

Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-19 Força x Deslocamento LJ 4 - 15o dia

Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-20 Força x Deslocamento LJ 4 - 28o dia

Fonte: Próprio Autor (2021)

9.3.5 LAJE 5

Para a Laje LJ 5 é possível verificar nas Tabelas 9-22, 9-23, 9-24 e 9-25, que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 10,97 mm e com 7 dias de idade deslocou 10 mm no meio do vão, é possível verificar também que para a idade de 15 dias com a carga de 5844 kg o deslocamento foi de 9,48 mm e com 28 dias de idade deslocou 9,08 mm. A tabela também mostra que ao final do ensaio de 7 dias a contraflecha medida no meio do vão foi de 22,61 mm, antes de iniciar o ensaio da laje com 15 dias a contraflecha se encontrava em 23 mm, ao final do ensaio com 22,37 mm e no início do ensaio de 28 dias com 29 mm. Comparando-se ainda o ensaio de 7 dias, carga de 8034 kg o deslocamento foi de 14,65 mm enquanto no ensaio de 15 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento observado é 14,54 mm e para o ensaio de 28 dias com 8500 kg o deslocamento verificado foi de 14,20 mm.

Para as cargas de 8500 kg e ensaios realizados nas idades de 15 e 28 dias, o deslocamento residual foi maior para a idade de 28 dias que na idade de 15 dias, respectivamente com 0,77 mm e 0,63 mm. Mesmo com a carga máxima aplicada sendo maior no ensaio de 15 dias e 28 dias, o deslocamento residual observado foi menor que o observado no ensaio de 7 dias, com 1,39 mm.

Tabela 9-22 Laje LJ 5 - Com 1 dia de idade

LJ 5 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	16,00	16,00
2924,00	5,02	11,00	10,98
5848,00	10,97	2,00	5,03
7648,00	16,45	0,00	-0,45
0,00	1,45	15,00	14,55

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-23 Laje LJ 5 - Com 7 dias de idade

LJ 5 - Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43,95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	24,00	24,00
2924,00	4,71	19,00	19,28
5848,00	10,00	13,00	14,00
8034,00	14,65	8,00	9,35
0,00	1,39	23,00	22,61

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-24 Laje LJ 5 - Com 15 dias de idade

LJ 5 - Ensaio no dia 01/6/2021 - Laje com 15 dias ($F_{ck} = 47,15$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	23,00	23,00
2922,00	4,55	18,00	18,45
5844,00	9,48	13,00	13,52
8500,00	14,54	7,00	8,46
0,00	0,63	22,00	22,37

Fonte: Próprio Autor (2021)

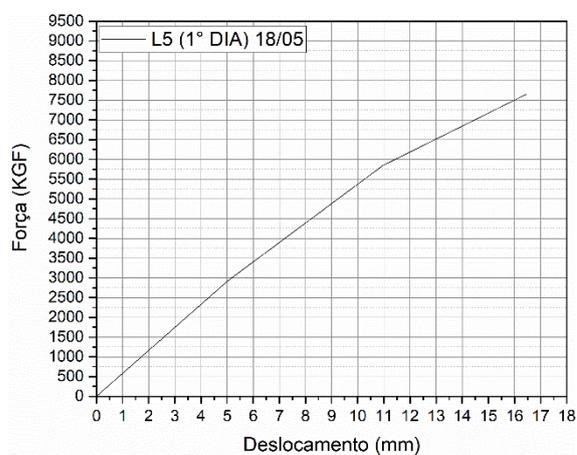
Tabela 9-25 Laje LJ 5 - Com 28 dias de idade

LJ 5 - Ensaio no dia 14/6/2021 - Laje com 28 dias ($F_{ck} = 52,25$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	29,00	29,00
2922,00	4,47	24,00	24,53
5844,00	9,08	18,00	19,92
8500,00	14,20	12,00	14,80
0,00	0,77	27,00	28,23

Fonte: Próprio Autor (2021)

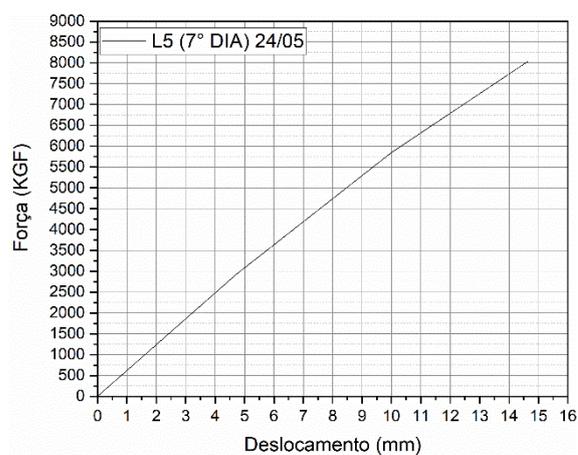
Nos Gráficos 9-21 a 9-24 é possível observar o comportamento da laje bem similar para todas as idades ensaiadas, sendo que para a idade de 1 dia houve um ponto de inflexão no terceiro ponto de carregamento, identificando que a tensão aplicada se aproximou mais do momento de fissuração quando comparado aos ensaios realizados demais idades.

Gráfico 9-21 Força x Deslocamento LJ 5 - 1o dia



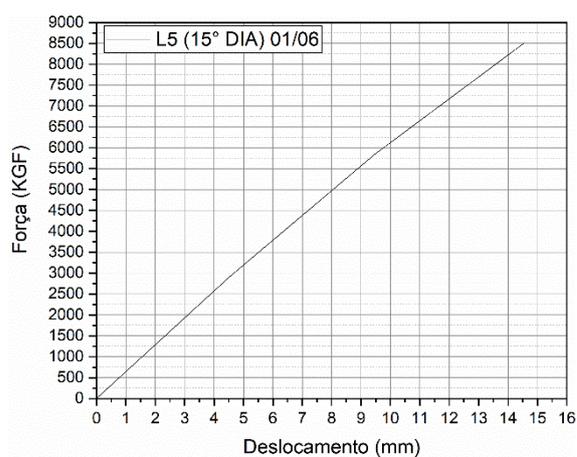
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-22 Força x Deslocamento LJ 5 - 7o dia



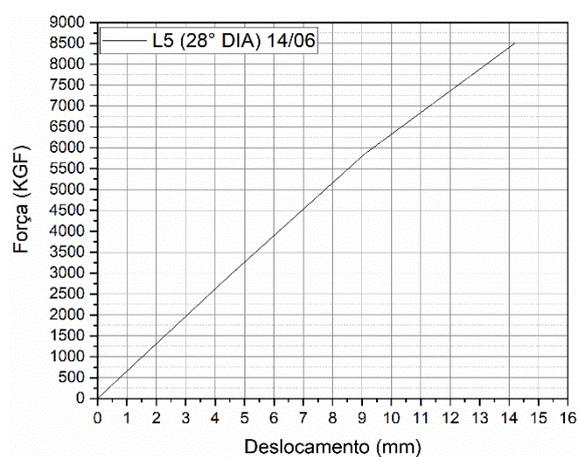
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-23 Força x Deslocamento LJ 5 - 15o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-24 Força x Deslocamento LJ 5 - 28o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

9.3.6 LAJE 6

Para a Laje LJ 6 é possível verificar nas Tabelas 9-26, 9-27, 9-28 e 9-29 que para a carga de 5848 kg com a laje com 1 dia de idade deslocou 12,55 mm e com 7 dias de idade deslocou 9,23 mm no meio do vão, é possível verificar também que para a idade de 15 dias com a carga de 5844 kg o deslocamento foi de 9,8 mm e com 28 dias deslocou 9,46 mm.

A Tabela 9-23 também mostra que ao final do ensaio de 7 dias a contraflecha medida no meio do vão foi de 17,83 mm, antes de iniciar o ensaio da laje com 15 dias a contraflecha se encontrava em 19 mm, ao final estava com 18,25 mm e antes do início do ensaio de 28 dias foi verificada a contraflecha de 25 mm. Comparando-se o ensaio de 7 dias, carga de 8034 kg o deslocamento foi de 13,61 mm enquanto no ensaio de 15 dias para a carga de 8500 kg o deslocamento observado é 15,24 mm e com 28 dias o deslocamento foi de 14,58 mm. Mesmo com a carga máxima aplicada sendo maior nos ensaios de 15 dias e 28 dias, o deslocamento residual observado foi menor, de 0,75 mm e 0,58 mm respectivamente, contra 1,17 mm observado no ensaio de 7 dias.

Tabela 9-26 Laje LJ 6 - Com 1 dia de idade

LJ 6 - Ensaio no dia 18/5/2021 - Laje com 1 dia ($F_{ck} = 28,55$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	16,00	16,00
2924,00	6,18	10,00	9,82
5848,00	12,55	2,00	3,45
0,00	1,74	15,00	14,26

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-27 Laje LJ 6 - Com 7 dias de idade

LJ 6 - Ensaio no dia 24/5/2021 - Laje com 7 dias ($F_{ck} = 43,95$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	19,00	19,00
2924,00	3,96	15,00	15,04
5848,00	9,23	9,00	9,77
8034,00	13,61	5,00	5,39
0,00	1,17	19,00	17,83

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-28 Laje LJ 6 - Com 15 dias de idade

LJ 6 - Ensaio no dia 01/6/2021 - Laje com 15 dias ($F_{ck} = 47,15$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	19,00	19,00
2922,00	4,82	15,00	14,18
5844,00	9,80	9,00	9,20
8500,00	15,24	5,00	3,76
0,00	0,75	19,00	18,25

Fonte: Próprio Autor (2021)

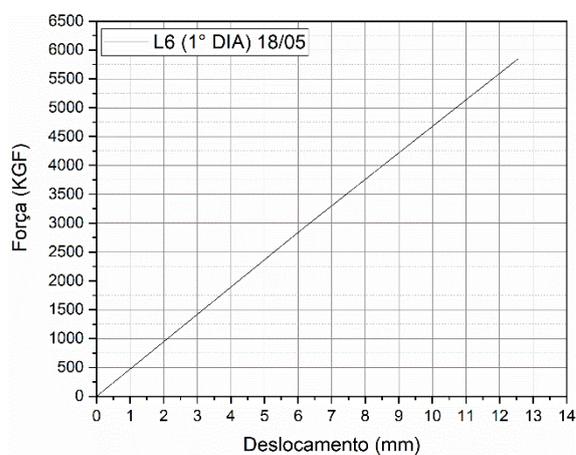
Tabela 9-29 Laje LJ 6 - Com 28 dias de idade

LJ 6 - Ensaio no dia 14/6/2021 - Laje com 28 dias ($F_{ck} = 52,25$ MPa)			
Carga Aplicada (Kg)	Deslocamento medido nos relógios comparadores (mm)	Contraflecha medido na trena (mm)	Conferência contraflecha inicial - deslocamentos medidos no relógio (mm)
0,00	0,00	25,00	25,00
2922,00	4,46	20,00	20,54
5844,00	9,46	15,00	15,54
8500,00	14,58	9,00	10,41
0,00	0,58	24,00	24,41

Fonte: Próprio Autor (2021)

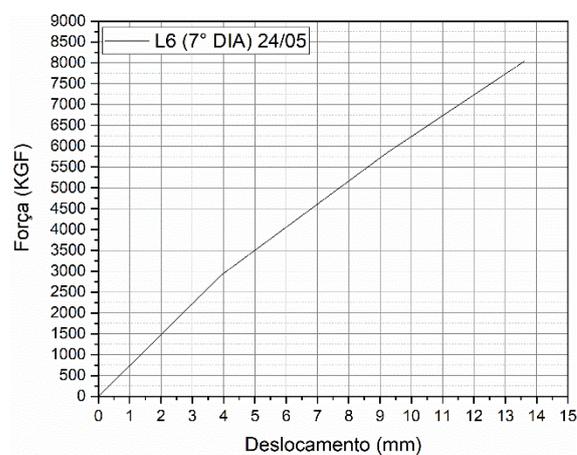
Os Gráficos 9-25 a 9-28 mostram uma tensão x deformação quase que linear, tendendo à um deslocamento levemente maior com as cargas mais altas.

Gráfico 9-25 Força x Deslocamento LJ 6 - 1o dia



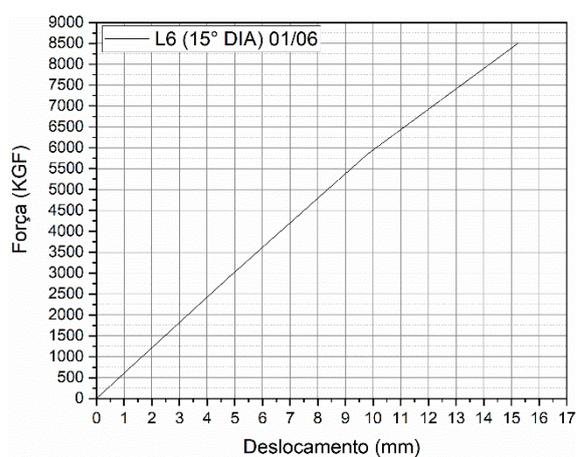
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-26 Força x Deslocamento LJ 6 - 7o dia



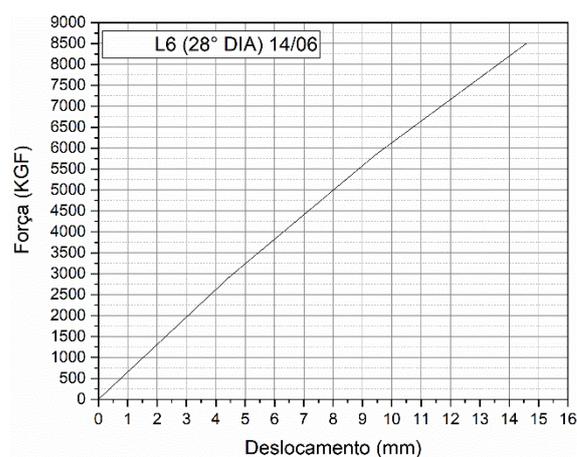
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-27 Força x Deslocamento LJ 6 - 15o dia



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-28 Força x Deslocamento LJ 6 - 28o dia

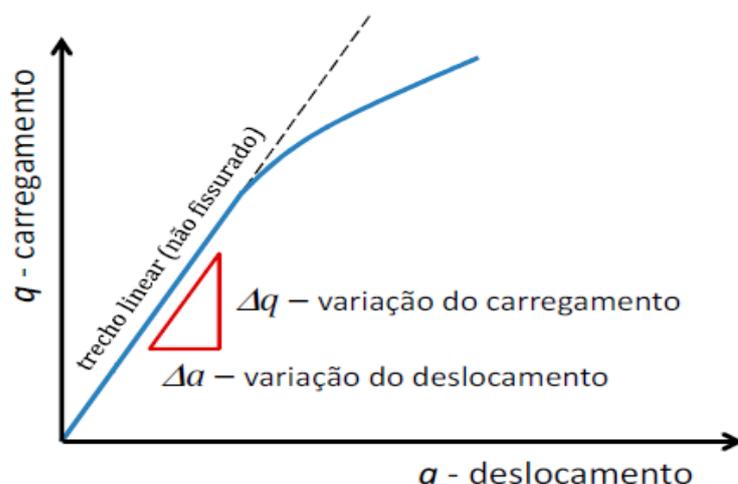


Fonte: Próprio Autor (2021)

9.4 OBTENÇÃO DA RIGIDEZ – MÓDULO ELÁSTICO (E)

A partir da análise da deformação da laje, tomando como base a curva força x deslocamento ($P \times \delta$) resultante dos ensaios não destrutivos à flexão em ambiente de fábrica, ainda no regime elástico da peça (trecho linear do gráfico) de acordo com a Figura 9.4.1, sendo F e δ valores conhecidos, determinado o momento de inércia da seção, pode-se determinar o módulo elástico real do concreto.

Figura 9-1 Gráfico Tensão x Deformação



Fonte: Ferreira (2013)

Como apresentado anteriormente o momento de inércia foi determinado a partir do desenho da seção real da peça em papel manteiga, passado as fotos para arquivo CAD, e posteriormente determinadas as propriedades geométricas da seção de acordo com a metodologia apresentada em Carvalho (2017). A Tabela 9-30 apresenta os valores reais de momento de inércia para as seções das lajes, para o lado A e lado B com suas respectivas médias.

Tabela 9-30 Valores reais do momento de inércia para seção lado A e lado B

LAJE	M ⁴
LJ 1A	0,000777578875
LJ 1B	0,000704021211
MÉDIA LJ 1	0,000740800043
LJ 2A	0,000811095279
LJ 2B	S/N
MÉDIA LJ 2	0,000811095279
LJ 3A	0,000720574298
LJ 3B	0,000699159757
MÉDIA LJ 3	0,0007098670275

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9-30 Valores reais do momento de inércia para seção lado A e lado B (continuação)

LJ 4A	0,000745835794
LJ 4B	0,0007057347
MÉDIA LJ 4	0,000725785247
LJ 5A	0,0006829779
LJ 5B	0,0006993881
MÉDIA LJ 5	0,000691183
LJ 6A	0,0007615127
LJ 6B	0,0006865221
MÉDIA LJ 6	0,0007240174

Fonte: Próprio Autor (2021)

Na laje LJ 2 lado B não foi possível determinar a inércia da peça, visto que esta apresentava muitos reparos na extremidade. O mesmo ocorreu com algumas outras lajes, pelo desenho ficaram com uma seção maior que a real, tal comportamento não representava a seção verdadeira no interior da laje. Em função disso, para determinar o momento de inércia real da peça, optou-se por utilizar as geometrias com menor interferência, onde as seções não passaram por reparos e sendo elas expressas na Tabela 9-31 com seus respectivos valores de inércia.

Tabela 9-31 Lajes utilizadas para obtenção da inércia real média

LAJE	Inércia m ⁴
LJ 1 B	0,000704021211
LJ 3 B	0,000699159757
LJ 5 A	0,0006829779
LJ 5 B	0,0006993881
LJ 6 B	0,0006865221
MÉDIA	0,0006944138136

Fonte: Próprio Autor (2021)

O Módulo de Elasticidade E_c foi obtido com base na resistência do concreto, de $E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$, em MPa. Na Tabela 9-32 são apresentados os valores para o módulo E_c em cada idade do concreto em que foram realizados os ensaios.

Tabela 9-32 E_c Teórico para cada idade do concreto

Idade (dias)	F_{ck} (MPa)	E_c (MPa)
1	27,10	29152
7	43,94	37120
15	47,14	38449
28	52,25	39598

Fonte: Próprio Autor (2021)

Já nas Tabelas de 9-33 à 9-36 são apresentados os módulos E estimados com base nas curvas força x deslocamento e comparados com seus respectivos valores teóricos.

Tabela 9-33 Comparação entre (E) teórico e experimental - Ensaio com 1 dia

Modelo	δ (m)	EC, estimado	EC, teórico	EC, est. / EC, teo.
LJ 1	11.36	32468	29152	1,11
LJ 2	13.75	26824		0,92
LJ 3	10.96	30325		1,04
LJ 4	12.15	30357		1,04
LJ 5	16.45	29258		1,00
LJ 6	12.55	29389		1,00
Média		29770		1,02

Fonte: Autor Próprio (2021)

Tabela 9-34 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 7 dias

Modelo	δ (m)	EC, estimado	EC, teórico	EC, est. / EC, teo.
LJ 1	15.93	30213	37120	0,81
LJ 2	16.69	28837		0,77
LJ 3	14.93	32236		0,86
LJ 4	14.4	33423		0,91
LJ 5	14.65	32852		0,87
LJ 6	13.61	35363		0,95
Média		32154		0,86

Fonte: Autor Próprio (2021)

Tabela 9-35 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 15 dias

Modelo	δ (m)	EC, estimado	EC, teórico	EC, est. / EC, teo.
LJ 1	17.67	28875	38449	0,75
LJ 2	-	-		-
LJ 3	14.04	36340		0,94
LJ 4	15.03	33946		0,88
LJ 5	14.54	35102		0,91
LJ 6	15.24	33479		0,87
Média		33548		0,87

Fonte: Autor Próprio (2021)

Tabela 9-36 Comparação entre o (E) Teórico e Experimental - Ensaio com 28 dias

Modelo	δ (m)	Ec, estimado	Ec, teórico	Ec, est. / Ec, teo.
LJ 1	16,71	30533	39598	0,77
LJ 2	-	-		-
LJ 3	15,12	33744		0,85
LJ 4	13,86	36812		0,93
LJ 5	14,20	35930		0,90
LJ 6	14,58	34994		0,88
Média		34403		0,87

Fonte: Autor Próprio (2021)

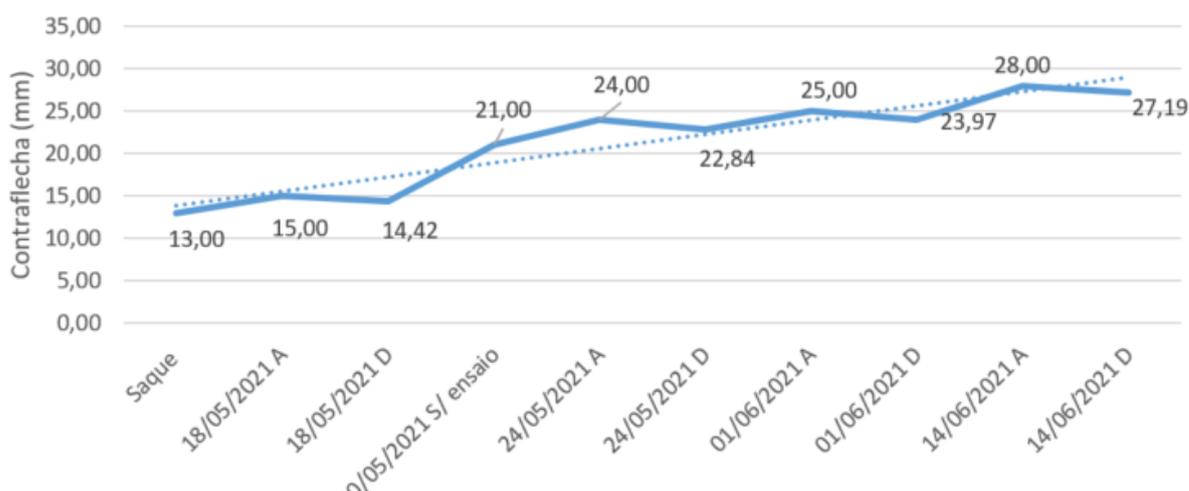
Como observado para todos os casos, a relação E_c , est médio / E_c teórico variou entre 0,86 (mínimo) até 1,02 (máximo), acredita-se que a relação E_c , est/ E_c teórico = 0,86 ou 0,87 é resultado de um comportamento não linear da peça, ou seja, passando do estado limite de serviço, mesmo a peça não apresentando fissuras externas durante o carregamento e com todas fissuras fechadas após descarregamentos.

Os resultados apresentados não significam que houve perdas de protensão ou variações significativas na resistência característica do concreto, mas apenas demonstra o que já é considerado normalmente em projeto com a redução da rigidez inicial em torno de $0,85E_c$ para a fase em serviço, em decorrência de efeitos de fissuração e deformações ao longo do tempo. Uma outra possível explicação, para esta redução no módulo do concreto é que se foi adotado o momento de inércia médio, e as lajes apresentam pequenas variações de seção em relação ao projeto e ao longo de seu comprimento.

9.5 EVOLUÇÃO DA CONTRAFLECHA

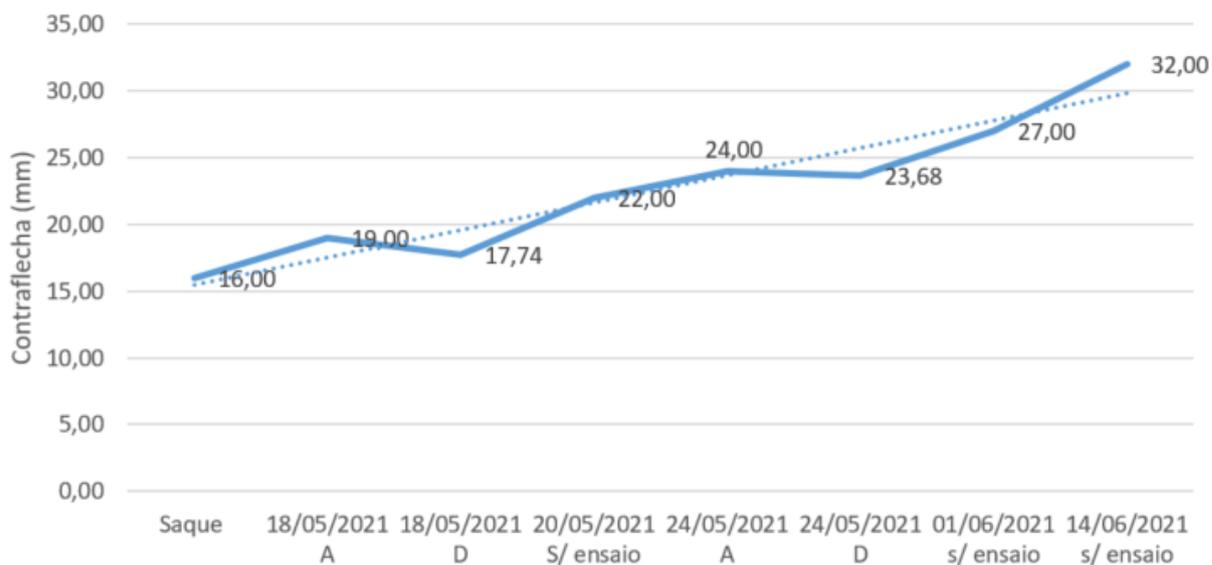
Um dos fatores que mais contribuem para o aumento da contraflecha é o coeficiente de fluência, que aumenta conforme se avança a idade do concreto. Pode-se observar nos Gráficos de 9-29 a 9-34, a evolução da contraflecha em cada laje, sendo as medidas realizadas antes e após os ensaios, além da contraflecha inicial no saque das lajes, com medida retirada 5 minutos após o corte na pista. As nomenclaturas no eixo X são as datas de medição da contraflecha, acompanhado da sigla “A” (antes da realização do ensaio), “D” (depois da realização do ensaio) e “s/ ensaio” (data em que foi verificada apenas a contraflecha, sem realização do ensaio não destrutivo).

Gráfico 9-29 Evolução da contraflecha em LJ 1



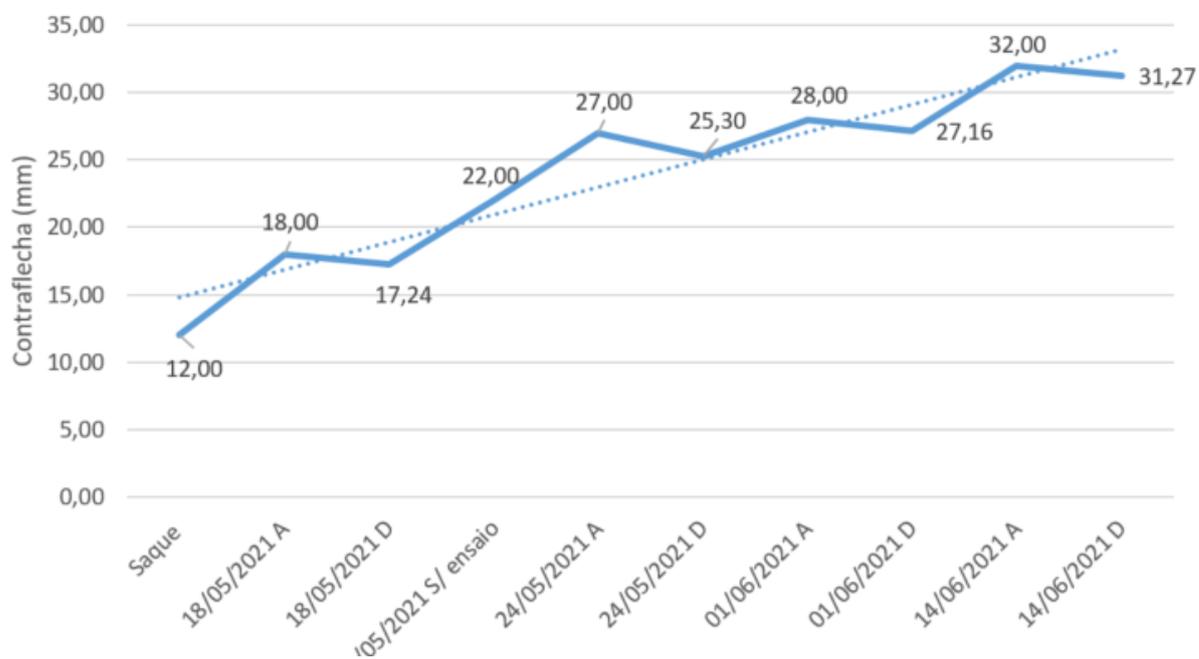
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-30 Evolução da Contraflecha em LJ 2



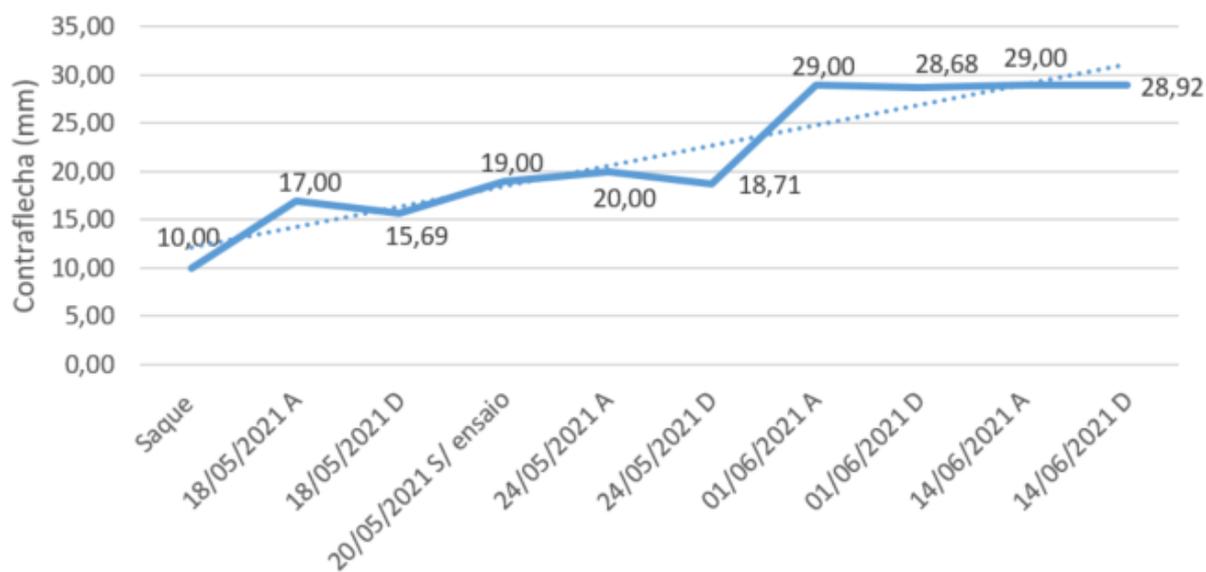
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-31 Evolução da Contraflecha em LJ 3

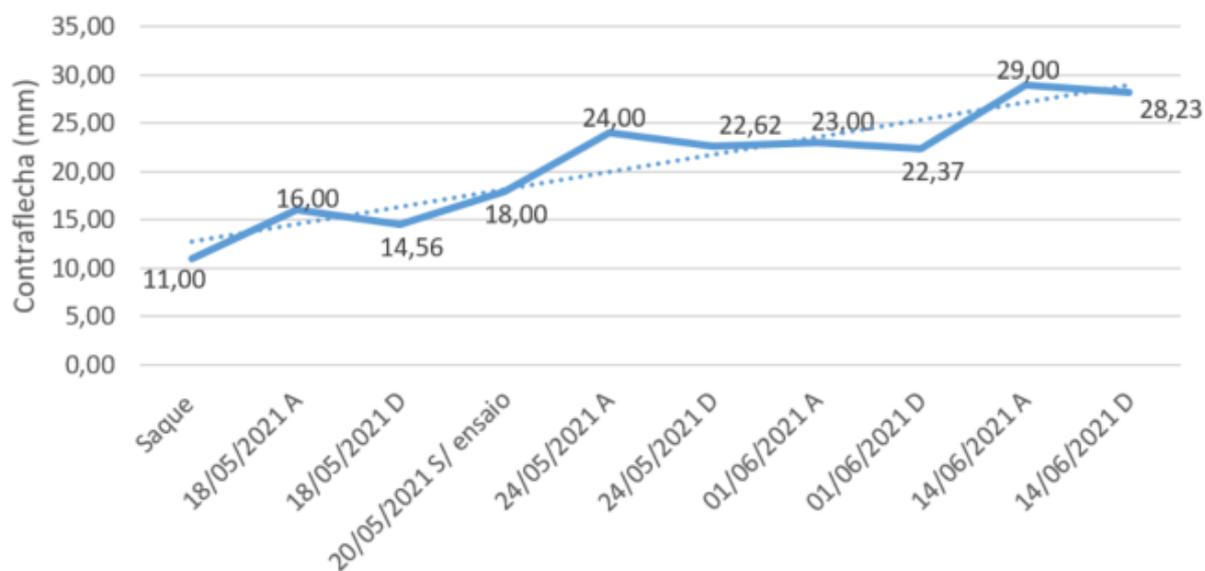


Fonte: Próprio Autor (2021)

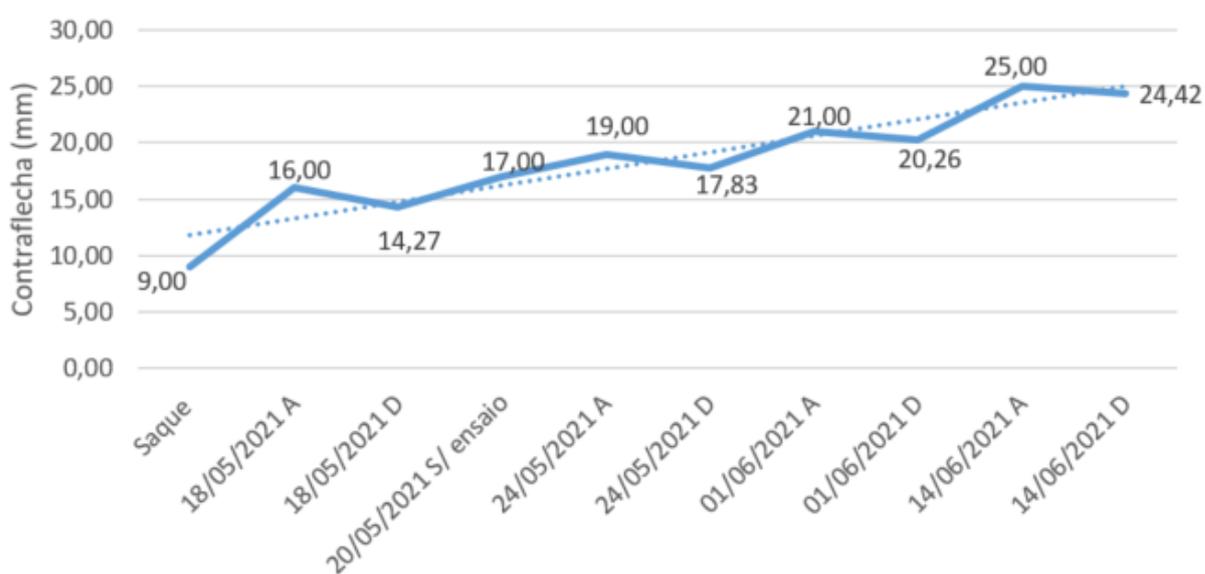
Gráfico 9-32 Evolução da Contraflecha em LJ 4



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-33 Evolução da Contraflecha em LJ 5

Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 9-34 Evolução da Contraflecha em LJ 6

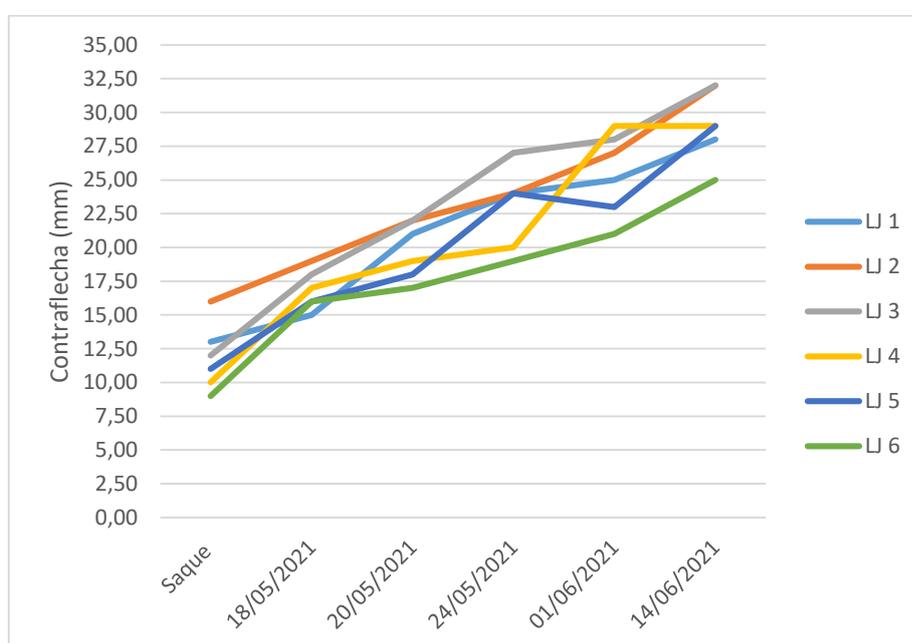
Fonte: Próprio Autor (2021)

Analisando os gráficos individualmente, todos apresentaram comportamentos semelhantes. Após a realização dos ensaios foram observados deslocamentos residuais, também se observou que no período entre o final de um ensaio e o início do próximo, sempre ocorreu um acréscimo na contraflecha como é observado na linha de tendência gerada em cada gráfico.

De forma análoga, é possível observar no Gráfico 9-13 a evolução da contraflecha medida antes dos ensaios realizados em cada dia. De modo geral todas as lajes apresentaram

comportamento semelhante, sendo que todas tiveram um aumento de contraflecha ao longo do tempo. A laje LJ 2 apresentou uma maior contraflecha no saque porém rompeu por cisalhamento no 2º ensaio, com idade de 7 dias (24/05/2021) e não foram mais realizados ensaios nela, porém a laje foi mantida estocada até a idade de 28 dias, chegando à um resultado final de maior contraflecha, junto com a LJ 3. A laje LJ 4 apresentou a segunda menor contraflecha no saque porém apresentou um aumento significativo da contraflecha verificado em 01/06/2021 e mantendo o mesmo valor de contraflecha para a idade de 28 dias, registrado em 14/06/2021. A laje LJ 6 possuiu o menor valor de contraflecha no saque e manteve a tendência, sendo o menor valor de contraflecha registrado em 14/06/2021.

Gráfico 9-35 Evolução da Contraflecha



Fonte: Próprio Autor (2021)

10. Conclusão

10.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente momento em que foi elaborado este trabalho, a norma brasileira para lajes a ABNT NBR 14861 (2011) está passando por revisão já se encontra em consulta nacional. Os estudos têm mostrado que a utilização de lajes alveolares no Brasil tem aumentado de forma significativa.

Este trabalho se justifica pelo fato de a atual norma vigente ABNT NBR 14861 (2011) não permitir a realização de ensaios na fábrica para verificação da conformidade das lajes com o projeto em função da escassez de informações técnicas disponíveis na literatura a respeito do assunto, sendo necessária a realização dos ensaios em laboratório conforme as prescrições contidas nos boletins FIB (1992), FIP (2002), EN 1168 (2005) e a própria ABNT NBR 14861 (2011).

Para a verificação de conformidade de projeto em lajes alveolares, é necessário a cada lote pré-determinado a realização de ensaios de cisalhamento e flexão para averiguação da resistência última do elemento, da qual, esta resistência pode ser influenciada por parâmetros como, características geométricas, força de protensão aplicada, o próprio concreto empregado, dentre outros.

Diante do exposto esta pesquisa abordou uma vertente para realização de ensaios em ambiente fabril, com o intuito de reduzir o desperdício de materiais, ocasionados em função dos ensaios destrutivos em laboratório, e conseqüentemente a redução do custo e tempo envolvidos com transporte até o laboratório.

Sendo o objetivo principal desta pesquisa a elaboração de um procedimento para controle de qualidade de lajes alveolares protendidas, e com base nos resultados obtidos e na metodologia apresentada nesta pesquisa, os objetivos deste trabalho foram alcançados no decorrer da elaboração do mesmo.

Nas lajes estudadas verificou-se que há uma variação da altura das cordoalhas, sendo essa variação observada através das medidas realizadas para caracterização das lajes e podendo-se induzir que dentro de cada laje também existe uma variação nesta altura das cordoalhas, acarretando em variações maiores na contraflecha e resistência observados no decorrer dos ensaios.

Foi possível observar em todos os ensaios que as lajes tiveram um comportamento semelhante ao previsto em cálculo quanto a carga aplicada x variação da altura da contraflecha, mostrando que a equação da flecha utilizada estava de acordo com a realidade.

Após cada ensaio foram observados deslocamentos residuais nas lajes e pequena ou nenhuma variação de escorregamentos de cordoalha medidos nas extremidades das lajes que não impactaram que a laje perdesse sua resistência ou deixasse de continuar ganhando contraflecha ao longo do tempo, significando que os ensaios foram realizados dentro do regime elástico, não havendo deformações permanentes e mantendo uma proporcionalidade entre tensões e deslocamentos.

O cálculo para descobrir qual a carga a aplicar nos ensaios foi realizado à partir da equação do momento de fissuração. Na realização dos ensaios foi utilizada uma carga abaixo da carga calculada, afim de garantir de que as lajes não atingissem o momento de fissuração e pudesse ser calculado o módulo de elasticidade de forma mais precisa. Foi observado que em todos os ensaios não se abriram fissuras de flexão, induzindo que o momento de fissuração das lajes ensaiadas estava de acordo com o calculado.

Foi possível observar a influência da resistência à compressão do concreto no aumento da capacidade de carga das lajes através da observação dos deslocamentos medidos nos relógios comparadores, que tenderam a serem menores nos ensaios realizados à medida que se aumentava a idade do concreto.

Ao avaliar do módulo de elasticidade do concreto de maneira indireta através da proporcionalidade entre tensões e deslocamentos, observou-se o valor na ordem de 0,87, valor muito próximo ao valor utilizado para cálculo de $E_{cs} = 0,85 E_{ci}$ previsto na ABNT NBR 6118 (2014).

Apesar de serem preliminares, a pesquisa apresentou resultados promissores, sugere-se que para confirmação do método proposto sejam realizados:

- Verificação em laboratório de resistências à flexão e ao cisalhamento, por meio de instrumentação adequada, até o estado limite último (ELU) em intervalo de no máximo 3 dias após a realização do ensaio não destrutivo utilizando esta metodologia, sendo realizados todos os ensaios na mesma laje para validação; e
- Uma análise com maior número de exemplares, com uma amostragem maior, variando a seção dos elementos a fim de avaliar a tendência destes resultados.

10.2 PROCEDIMENTO PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS ENVOLVENDO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO EM FÁBRICA

O procedimento apresentado pode ser utilizado para verificação do comportamento da laje alveolar quando submetido à uma carga conhecida e abaixo do momento de fissuração para aceitabilidade da laje alveolar e verificação se a mesma está de acordo com o projeto.

1. Inspeção dos materiais utilizados para fabricação do concreto

Deve-se realizar a caracterização dos materiais componentes da laje alveolar, como agregados miúdos, graúdos, aditivos, aço e água de amassamento, analisando a presença de materiais nocivos que possam afetar a reação química com o cimento.

2. Inspeção visual na laje

Deve-se realizar a inspeção visual para identificação de inconformidades na laje, que podem ser: falhas de moldagem, má compactação do concreto, fissuras pré-existentes e provenientes de diversos mecanismos, quebras na peça, escorregamentos de cordoalha, posicionamento de cordoalha para verificação dos cobrimentos mínimos por questões de durabilidade e para evitar o fendilhamento, verificação do distanciamento mínimo entre cordoalhas, posicionamento efetivo do centro de gravidade da cordoalha em relação a face inferior da laje, verificação das variações geométricas na seção da laje alveolar (incluindo espessura de nervuras e mesas superiores e inferiores) e verificação da contraflecha da laje de acordo com o projeto.

3. Verificação da carga a aplicar

Para a identificação da carga a ser aplicada no ensaio não destrutivo, deve-se ter em mente que a peça deve trabalhar no Estado Limite de Serviço (ELS), no regime elástico. Calcula-se o momento de fissuração da laje de acordo com o f_{ck} do concreto, quantidade e bitola de cordoalhas, força de protensão nas cordoalhas (descontada a perda de protensão inicial ou ao longo do tempo) e descontar o momento do peso próprio, para então utilizar o momento resultante na equação da flecha (para carga concentrada ou para carga distribuída), isolando-se o valor do carregamento na equação e utilizando valores de E e I de projeto.

4. Realização do ensaio não destrutivo

1. Posicionamento da laje: utilizar vigas ou pontaletes de madeira de dimensões suficientes para simulação de condição "montada na obra", posicionadas nas extremidades da laje, à uma distância de $h/2$ (sendo h a altura da laje);
2. Medição de contraflecha: Estica-se um fio de náilon de uma extremidade à outra da laje, aplicando força necessária para eliminar o efeito catenária. Marca-se o meio do vão com marcador industrial e realiza-se a medição da

contraflecha inicial com o auxílio de uma trena ou relógio comparador, sendo este um instrumento mais apropriado;

3. Carregamento da laje: Tanto para carga concentrada quanto para carga distribuída, recomenda-se aplicar a carga em estágios para verificar a contraflecha a cada incremento de carga. Para o valor máximo de carregamento devem ser consideradas a capacidade resistente da laje e o momento de fissuração;
4. Alívio de carga na laje: Realizar o descarregamento da laje a fim de retomar a condição inicial do ensaio e proceder com a medição da contraflecha residual.

5. Avaliação do módulo de elasticidade

A avaliação do módulo de elasticidade do concreto é feita de maneira indireta por meio da realização do ensaio não destrutivo, quando conhecido o momento de inércia da seção transversal, o carregamento, o vão da laje ensaiada e a flecha aferida. No ensaio não se deve atingir o momento de fissuração do elemento para determinação do módulo de elasticidade correto.

Todas as medições devem ser realizadas 5 minutos após o carregamento ou descarregamento, para estabilização da laje. Para consideração dos deslocamentos residuais, deve-se seguir os requisitos, critérios e limites da ABNT NBR 9607 (2019) - Prova de carga estática em estruturas de concreto – Requisitos e procedimentos.

Deve-se trabalhar com carregamento abaixo do necessário para atingir o momento de fissuração, portanto após aplicar a carga sobre a laje, verifica-se se abriram fissuras de flexão como condição de não aceitabilidade do ensaio. Para o caso de deformação excessiva ou abertura de fissuras de flexão, pode-se verificar com o projetista quais critérios foram utilizados para o cálculo (se foi projetada com engastamento por exemplo).

Para aceitação do ensaio, o deslocamento máximo determinado durante o ensaio deve satisfazer o deslocamento teórico, e o deslocamento residual medido deve ser inferior ao deslocamento máximo medido dividido por 4.

10.3 AVALIAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO DAS LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS EM AMBIENTE FABRIL

No que diz respeito a avaliação de desempenho estrutural das peças à flexão, para esta pesquisa foram realizados uma série de ensaios não destrutíveis ainda dentro do regime elástico da peça como mostrado em “8. Ensaios”.

Com base na metodologia apresentada, os resultados tenderam a mostrar que este procedimento de análise de desempenho estrutural é confiável quando se conhece a força de protensão empregada e a geometria da peça. Podendo estimar com precisão a qualidade do concreto utilizado, fator este influenciado diretamente pela compactação da máquina utilizada na produção das lajes.

Tal análise é feita por meio da avaliação dos deslocamentos da peça provocado por meio de ações externas, sendo estas de valores conhecidos, basta isolar o módulo elástico da equação da flecha (determinada com base na teoria da linha elástica para cada tipo de carregamento, ou a partir de formulações já existentes).

A deformação elástica do concreto depende da composição, em especial os agregados, sendo o módulo de elasticidade do concreto controlado pelo módulo de elasticidade dos componentes. A norma define valores de dados para aplicações gerais que devem ser verificados por ensaios específicos em estruturas especiais.

De acordo com a ABNT NBR 9062 (2017), quando se tratar de protensão com armadura aderente, deve-se adotar a seção homogeneizada calculada com relação de equivalência α_p determinada à partir do módulo secante do concreto, podendo ser adotado 85% do módulo tangente na origem e devendo ser considerado o valor correspondente à sua idade. As perdas de protensão imediatas e ao longo do tempo devem levar em conta o módulo de elasticidade do concreto na idade da análise e a deformação da seção homogeneizada, sendo que a resistência do concreto e o módulo de elasticidade influenciam na liberação e transferência da protensão, e no içamento e manuseio das lajes.

O módulo de elasticidade pode ser obtido segundo ensaio descrito na ABNT NBR 8522, onde é considerado o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% f_c ou outra tensão especificada em projeto, e quando não forem feitos ensaios ou não existirem dados mais precisos sobre o concreto na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade pela expressão $E_{ci} = 5600 \sqrt{f_{ck}}$. O módulo secante a ser utilizado nas análises elásticas de projetos e para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviços deve ser calculado pela expressão $E_{cs} = 0,85 E_{ci}$, ambas equações descritas na ABNT NBR 6118 (2014).

10.4 VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA REAL DO ELEMENTO

Sabe-se que conforme a utilização dos equipamentos de moldagem de lajes e com o passar do tempo, ocorrem desgastes nos tubos e facas que por ficarem com uma seção menor, fecham os alvéolos, tornando-os menores e conseqüentemente a área de concreto aumenta. Além disso, dependendo do fabricante da máquina moldadora, deve-se utilizar um concreto com abatimento entre 0 e 2 cm, podendo acarretar em uma seção diferente da utilizada em projeto, por isso neste trabalho, conforme apresentado em “8”, foi possível obter uma seção da laje o mais próximo da real.

Nesta pesquisa empregou-se o uso de papel manteiga e giz de cera, da qual traçou-se todo o contorno de todos os modelos, então foi posicionado um tripé para se manter a mesma distância e foram tiradas fotografias dos desenhos, tomando o máximo cuidado possível para que a imagem ficasse sempre reta, não formando ângulos.

A partir das imagens geradas, com o auxílio de um programa CAD ajustou-se as fotografias para ficar na escala exata, através de medidas conhecidas e utilizando a metodologia apresentada em Carvalho (2017) determinou-se as propriedades geométricas para cada modelo de laje.

10.5 INSPEÇÃO VISUAL

Este trabalho apresenta no Capítulo “7” as etapas para inspeção visual, sendo fundamental que todas as lajes passem por essa inspeção com o objetivo de identificar:

- Falhas de concretagem, com atenção especial nas nervuras;
- Identificação de fissuras causadas por tensões superiores à resistência de tração do concreto na data da liberação da protensão, fissura de fendilhamento horizontal na nervura (spalling ou boca de jacaré) na extremidade da laje e fissuras de fendilhamento na posição das cordoalhas (bursting ou splitting);
- Identificação visual de problemas de tolerâncias dimensionais na produção;
- Identificação visual de problemas de deformações excessivas, como a contraflecha muito superior ao limite de deslocamento normativo ($L/300$ com tolerância $\pm L/1000$), ou mesmo observação da ausência de contraflecha, que pode indicar que o momento de protensão não ultrapassou com folga o momento fletor devido ao peso próprio da laje;
- Identificação visual de escorregamentos nas cordoalhas pré-tracionadas, na zona de ancoragem nas extremidades das lajes alveolares.

Conforme apresentado em Ferreira (2021), a ocorrência simultânea dos itens acima podem sugerir evidências da ocorrência de algum problema no processo de produção da laje alveolar, e de que o concreto da laje não atendeu aos critérios de cálculo adotados em projeto.

10.6 ESCORREGAMENTO DE CORDOALHAS

Outro fator importante que deve ser analisado é o escorregamento de cordoalhas, a Norma Brasileira ABNT NBR 14861 (2011) prescreve que sejam realizadas medidas dos escorregamentos nas cordoalhas com paquímetro, para as lajes onde são identificados escorregamentos em zonas de ancoragem.

Neste trabalho em “9.1” e “9.2”, foram analisados os escorregamentos de cordoalhas das lajes, sendo que eles podem ocorrer de forma sistêmica (em todas ou quase todas as cordoalhas) ou em apenas algumas posições de cordoalha.

Caso ocorra de forma sistêmica, pode-se presumir que a liberação da protensão ocorreu quando a resistência do concreto ainda não havia atingido a resistência mínima para a liberação da pista, caso contrário o problema deve ser melhor investigado.

Na presente pesquisa, pode-se observar que os escorregamentos foram menores que o mínimo valor normativo (ΔL_0), podendo presumir que houve um rigor no controle de qualidade para produção das peças, liberando a protensão apenas quando o concreto garantisse a resistência mínima de projeto.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9479 – **Argamassa e concreto** – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7480 – **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado** – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15900 – **Água para amassamento do concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 14861 – **Lajes Alveolares pré-moldadas de Concreto Protendido** – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7222 – **Concreto e argamassa** – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738 – **Concreto** – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015 Versão corrigida:2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9062 – **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 – **Concreto** – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16697 – **Cimento Portland** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211 – **Agregados para concreto** – Especificação. Rio de Janeiro, 2009 Versão corrigida:2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11768-1 – **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland**. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9607 – **Prova de carga estática em estruturas de concreto** – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522-1 – **Concreto endurecido** – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL. **Manual do concreto dosado em central**. São Paulo, 2007.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS – ASSAP. **The hollow core floor design and applications**. Verona – Italy. 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI Committee 318, **Building Code Requirements for Structural Concrete** (ACI 318-19) and Commentary, Farmington Hills, MI. 2019

BARBIERI R.A.; GASTAL, F.P.S.L. **Avaliação de Desempenho de Lajes Alveolares Pré-moldadas Protendidas com Continuidade Posterior por Adição de Armadura**. Jubileo: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. Punta Del Este, Uruguai, 2000.

BRUNESI, E; BOLOGNINI, D; NASCIMBENE, R. **Evaluation of the shear capacity of precast prestressed hollow core slabs numerical and experimental**. Materials and Structures. 2015.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido: Pré-tração. Pós-tração. Cálculo e detalhamento**. 2ed. São Paulo: PINI, 2017.

CATOIA, B. **Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão**. Tese de Doutorado, EESC-USP, 2011.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN 1992-1-1 – Eurocode 2 – **Projeto de estruturas de betão** – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Brussels: CEN, 2004.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN 1168 – **Precast concrete products – Hollow core slabs**. (English version). Brussels: CEN, 2005.

COSTA. O. O. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. Dissertação de Mestrado, UFSCar, 2009.

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

ELLIOTT, K.S. **Precast concrete structures**. 2.ed. London, England. 2002.

EUROCODE 2 COMENTARY. **European Concrete Platform ASBL**. 2008.

FERNANDES, N. S. **Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: ensaio padrão de apoio para controle de qualidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FERREIRA, M. A. **Manual de sistemas pré -fabricados de concreto (tradução)**. Autor do texto original: Arnold Van Acker (**FIP-2002**). Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto – ABCIC: São Paulo, 2003.

FERREIRA, M.A.; FERNANDES, N.S.; CARVALHO, R.C.; ORTENZI, A. **Avaliação de desempenho da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido**. Revista Concreto e Construções, São Paulo, n.48, p.46-51, out./dez, 2007.

FERREIRA, M.A.; FERNANDES, N.S.; CARVALHO, R.C.; ORTENZI, A.; COSTA, O.O.; FILHO, F.M.A.; DONIAK, I.L.O.; LIVI, L.O.B. **Avaliação teórico experimental da capacidade resistente ao cisalhamento e a flexão em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido**. Revista Concreto e Construções, São Paulo, n.50, p.85-95, abr./jun., 2008.

FERREIRA, M.A. **Procedimento NETPRE para testes com carga distribuída em lajes alveolares para controle tecnológico na fábrica**. NETPRE – UFSCar. São Carlos, 2013.

FERREIRA, M.A. **Considerações sobre inspeção para controle da qualidade da produção em lajes alveolares protendidas**. NETPRE – UFSCar. São Carlos, 2021.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAİNTE - FIP. **Guide to Good Practice - Shear at the Interface of Precast and In-situ Concrete**. Wrexham Springs. 1982.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB (CEB-FIP). **Guide to Good Practice: Quality Assurance of Hollow core Slab**. London: Published by Seto Ltd., 1992.

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

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

GIRHAMMAR, U. A; PAJARI, M. **Tests and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units and concrete topping**. Construction and Building Materials. Elsevier. 2008.

HEDMAN, O.; LOSBERG, A. **Design of concrete structures with regard to shear forces, in shear and torsion**. CEB Bulletin d' Information n.126. Paris. 1978.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7.ed. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

- KONG, F.K.; EVANS, R.H. **Reinforced and Prestressed Concrete**. Spon Press, UK. 2001.
- MIZUMOTO, C., MARIN, M.C., MOREIRA, K.A.W. **O controle tecnológico na indústria de concreto pré-fabricado**. 54º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Maceió-Al. 2012.
- MIZUMOTO, C; MARIN, M.C; SILVA, M.C. **Aspectos técnicos referente a sistemática de controle e produção da laje alveolar de concreto pré-fabricado**. 3º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos-SP. 2013.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- RIBEIRO, C. C. **Materiais de construção civil**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.
- PAJARI, M. **Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure**. VTT Technical Research Centre of Finland. Research Notes 2292. 2005.
- PETRUCCELLI, N.S. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. Dissertação de Mestrado, UFSCar, 2009.
- SALGADO, J. **Técnicas e práticas construtivas para edificações**. 3. ed. São Paulo: Érica 2014.
- TKALČIĆ, D.; BANIĆ D.; ZUPČIĆ M.; PERIĆ, Z. (2007). **Prestressed hollow core slabs - shear resistance test according to HRN EN 1168:2005**. In: FIB SYMPOSIUM, 2007, Dubrovnik. Proceedings... Dubrovnik, Croacia: FIB.
- YANG, L. **Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure**. ASCE Journal of Structural Engineering. v. 120, n. 9, September, pp. 2675-2696. 1994.

ANEXO I

Análise da água



Relatório de Ensaio 23564/2021.0-A

Proposta Comercial PC1761/2020



Dados do Cliente	
Contratante: Jundsondas Poços Artesianais Ltda	
Solicitante: Puma Lajes Alveolares Ltda.	CNPJ/CPF: 48.747.174/0001-49
Endereço: Estrada Municipal Giacobe Burigo, 1300 - Bafo - Rio Abaixo - Atibala - São Paulo - CEP: 12.952-823	

Dados da Amostra	
Identificação da Amostra: Salda do Tratamento	
Data de Amostragem: 06/05/2021 16:00	Data Recebimento: 07/05/2021 09:56
Matriz: Água para Consumo Humano	Plano de Amostragem: NA
Método de Referência Amostragem: NA	Chuvac nas últimas 24 horas: Não
Procedimento de Amostragem: NA	Responsável Amostragem: Johnny Luis Marquesim - CRQ 04.486.227 - Jundsondas
pH: 7,0	Cloro Residual Livre: 1,70 mg/L

Físico-Químicos									
Análise	CA# Number	Resultado	Unidade	VMP PRC nº 6 - Anexo XX	Diluição	LD	LQ	Incerteza	ID Método
Cor Aparente	—	< 5	mg/L	15	1	2	5	NA	1006
Fluoreto	7782-41-4	< 0,100	mg/L	1,5	1	0,0300	0,100	NA	1045
Turbidez	—	< 0,50	UNT	5	1	—	0,50	NA	1008

Microbiológicos									
Análise	CA# Number	Resultado	Unidade	VMP PRC nº 6 - Anexo XX	Diluição	LD	LQ	Incerteza	ID Método
Coliformes Totais	—	Ausente	P/A	Ausente	—	—	NA	NA	1009
Contagem Padrão de Bactérias Heterotróficas	—	< 1	UFC/mL	500	1	—	1	NA	1083
Escherichia coli	—	Ausente	P/A	Ausente	—	—	NA	NA	1009

Legendas	
CA# Number: Número de referência de compostos e substâncias químicas adotado pelo Chemical Abstract Service	
LD: Limite de Detecção	LQ: Limite de Quantificação da Amostra
NA: Não Se Aplica	ND: Não Detectado (Resultado <LD)
VMP: Valor Máximo Permitido	
Coliformes Totais e E. coli (P/A): P/A - Presente/Ausente em 100 mL	
UNT: Unidade Nefelométrica de Turbidez	

Referências			
ID Método	Método de Referência	Data de Preparo	Data de Análise
1006	SM 2120 C	—	07/05/2021
1008	SM 2130 B	—	07/05/2021
1009	SM 9223 B	—	08/05/2021
1045	SM 4500-F C	—	11/05/2021
1083	SM 9215 B	—	10/05/2021

Observações / Não conformidade / Desvios do Método
→ Quando a coleta é realizada pelo cliente, se as condições da amostra apresentam algum desvio, o cliente é avisado e os ensaios são realizados somente com autorização.

Os resultados referem-se somente à amostra analisada.

O Relatório de Ensaio deve ser reproduzido por completo. Reprodução em partes requer aprovação do laboratório.

FRM-LAB-086 Rev.07

Acqualab Laboratório e Consultoria Ambiental S/S Ltda - CNPJ: 01.863.201/0001-31
Rua Carlos Gomes, 074 - CEP: 13218-005 - Jundiaí - SP - 011 4888-4170
www.aqualab.com.br - e-mail: atendimento@aqualab.com.br

Pag 12

Anexo I – Análise da água (continuação)


Relatório de Ensaio
23564/2021.0-A

Proposta Comercial PC1761/2020



→ A Incerteza Expandida (U) relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

→ Os resultados se referem à amostra conforme recebida.

Os ensaios foram realizados por Acqualab Laboratório, registrada no CRQ 4ª Região sob nº 17020-F e responsabilidade técnica do profissional Bárbara Chiesse Alvares Nogueira, CRQ nº 04282874, 4ª Região

Data da Emissão do Relatório: 12/06/2021

Barbara
 Assinado de forma digital por:
 Barbara Chiesse Alvares Nogueira:
 Química - Gerente Técnica
 CRQ: 4.262.874

Chave de Validação: d86ccbeabd6242989705d791952b3f64

Os resultados referem-se somente à amostra analisada.

O Relatório de Ensaio deve ser reproduzido por completo. Reprodução em partes requer aprovação do laboratório.

FRM-LAB-086 Rev.07

Acqualab Laboratório e Consultoria Ambiental S/S Ltda - CNPJ: 01.663.201/0001-31
 Rua Carlos Gomes, 974 - CEP: 13218-005 - Jundiaí - SP - 011 4588-4170
 www.alab.com.br - e-mail: atendimento@alab.com.br

Pag.22

Anexo I – Análise da água (continuação)



acqualab

Interpretação de Resultados

Relatórios de Ensaio N°. 23564/2021.0-A

Segue abaixo interpretação de resultados conforme legislações comparativas, referente aos parâmetros analisados nos relatórios de ensaio citados acima.

Vale ressaltar que, além desta interpretação, deve-se levar em consideração as observações da legislação apresentadas nos referidos relatórios.

A incerteza não está sendo considerada para interpretar os resultados da medição.

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.

Observações da Legislação

OBS1: Alterações bruscas ou acima do usual na contagem de bactérias heterotróficas devem ser investigadas para identificação de irregularidade e providências devem ser adotadas para o restabelecimento da integridade do sistema de distribuição (reservatório e rede), recomendando-se que não se ultrapasse o limite de 500 UFC/mL.

Interpretação de Resultados

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 - Anexo XX, que dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, o(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

Anexo I – Análise da água (continuação)


Relatório de Ensaio
23565/2021.0-A

Proposta Comercial PC1761/2020



Dados do Cliente	
Contratante: Jundsondas Poços Artesianais Ltda	
Solicitante: Fuma Lajes Alveolares Ltda.	CNPJ/CPF: 48.747.174/0001-49
Endereço: Estrada Municipal Jacobbe Burigo, 1300 - Bafo - Rio Abaixo - Atibala - São Paulo - CEP: 12.952-823	

Dados da Amostra	
Identificação da Amostra: Rede de Distribuição - Banheiro	
Data de Amostragem: 06/05/2021 16:00	Data Recebimento: 07/05/2021 09:56
Matriz: Água para Consumo Humano	Plano de Amostragem: NA
Método de Referência Amostragem: NA	Chuvvas nas últimas 24 horas: Não
Procedimento de Amostragem: NA	Responsável Amostragem: Johnny Luis Marquesim - CRQ 04.486.227 - Jundsondas
pH: 7,0	Cloro Residual Livre: 1,50 mg/L

Físico-Químicos									
Análise	CAS Number	Resultado	Unidade	VMP PRC nº 6 - Anexo XX	Diluição	LD	LQ	Incerteza	ID Método
Cor Aparente	—	< 5	mg/L	15	1	2	5	NA	1006
Fluoreto	7782-41-4	< 0,100	mg/L	1,5	1	0,0300	0,100	NA	1045
Turbidez	—	< 0,50	UNT	5	1	—	0,50	NA	1008

Microbiológicos									
Análise	CAS Number	Resultado	Unidade	VMP PRC nº 6 - Anexo XX	Diluição	LD	LQ	Incerteza	ID Método
Coliformes Totais	—	Ausente	P/A	Ausente	—	—	NA	NA	1009
Contagem Padrão de Bactérias Heterotróficas	—	< 1	UFC/mL	500	1	—	1	NA	1083
Escherichia coli	—	Ausente	P/A	Ausente	—	—	NA	NA	1009

Legendas	
CAS Number: Número de referência de compostos e substâncias químicas adotado pelo Chemical Abstract Service	
LD: Limite de Detecção	LQ: Limite de Quantificação da Amostra
NA: Não Se Aplica	ND: Não Detectado (Resultado <LD)
VMP: Valor Máximo Permitido	
Coliformes Totais e E. coli (P/A): P/A - Presente/Ausente em 100 mL	
UNT: Unidade Nefelométrica de Turbidez	

Referências			
ID Método	Método de Referência	Data de Preparo	Data de Análise
1006	SM 2120 C	—	07/05/2021
1008	SM 2130 B	—	07/05/2021
1009	SM 9223 B	—	08/05/2021
1045	SM 4500-F C	—	11/05/2021
1083	SM 9215 B	—	10/05/2021

Observações / Não conformidade / Desvios do Método
→ Quando a coleta é realizada pelo cliente, se as condições da amostra apresentam algum desvio, o cliente é avisado e os ensaios são realizados somente com autorização.

Os resultados referem-se somente à amostra analisada.

O Relatório de Ensaio deve ser reproduzido por completo. Reprodução em partes requer aprovação do laboratório.

FRM-LAB-086 Rev.07

Acqualab Laboratório e Consultoria Ambiental S/S Ltda - CNPJ: 01.693.201/0001-31
Rua Carlos Gomes, 974 - CEP: 13218-005 - Jundiaí - SP - 011 4588-4170
www.alab.com.br - e-mail: atendimento@alab.com.br

Pag 1/2

Anexo I – Análise da água (continuação)


Relatório de Ensaio
23565/2021.0-A

Proposta Comercial PC1761/2020



→ A Incerteza Expandida (U) relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

→ Os resultados se referem à amostra conforme recebida.

Os ensaios foram realizados por Acqualab Laboratório, registrada no CRQ 4ª Região sob nº 17020-F e responsabilidade técnica do profissional Bárbara Chiesse Alvares Nogueira, CRQ nº 04282874, 4ª Região

Data da Emissão do Relatório: 12/06/2021

Assinado de forma digital por:
 Bárbara Chiesse Alvares Nogueira:
 Química - Gerente Técnica
 CRQ: 4.262.874

Chave de Validação: ca2cc0cf870646fa910c154c0c6499f6

Os resultados referem-se somente à amostra analisada.

O Relatório de Ensaio deve ser reproduzido por completo. Reprodução em partes requer aprovação do laboratório.

FRM-LAB-086 Rev.07

Acqualab Laboratório e Consultoria Ambiental S/S Ltda - CNPJ: 01.663.201/0001-31
 Rua Cafos Gomes, 074 - CEP: 13218-005 - Jundiaí - SP - 011 4588-4170
 www.alab.com.br - e-mail: atendimento@alab.com.br

Pag.2/2

Anexo I – Análise da água (continuação)



acqualab

Interpretação de Resultados

Relatórios de Ensaio N°. 23565/2021.0-A

Segue abaixo interpretação de resultados conforme legislações comparativas, referente aos parâmetros analisados nos relatórios de ensaio citados acima.

Vale ressaltar que, além desta interpretação, deve-se levar em consideração as observações da legislação apresentadas nos referidos relatórios.

A incerteza não está sendo considerada para interpretar os resultados da medição.

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.

Observações da Legislação

OBS1: Alterações bruscas ou acima do usual na contagem de bactérias heterotróficas devem ser investigadas para identificação de irregularidade e providências devem ser adotadas para o restabelecimento da integridade do sistema de distribuição (reservatório e rede), recomendando-se que não se ultrapasse o limite de 500 UFC/mL.

Interpretação de Resultados

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 - Anexo XX, que dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, o(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

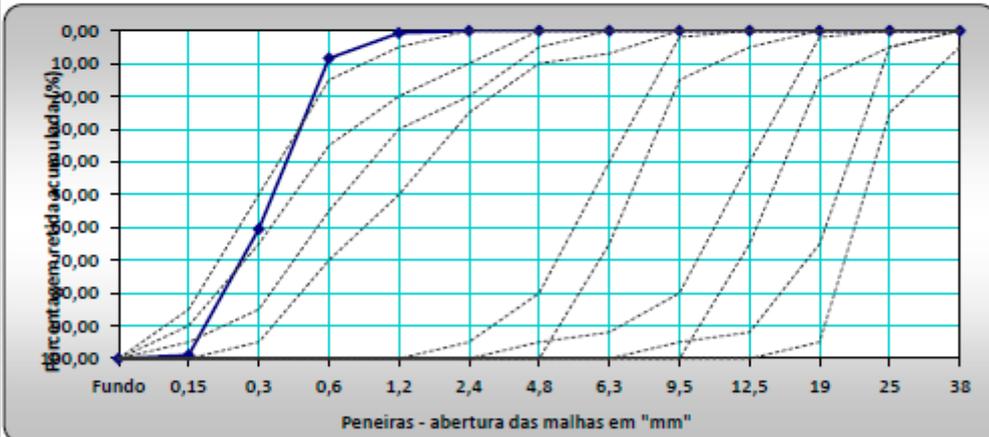
ANEXO II

Anexo II - Análise dos agregados – granulometria

Interessado:	Ensaio Mensal dos agregados		
Endereço:			
Obra:	Uidade Atibaia		
			
Relatório de Ensaio			
ENSAIOS FÍSICOS EM AGREGADOS - NBR 7211/05			
Material:	Areia		Cliente:
Fornecedor:			Data de Coleta:
Nota Fiscal n°:			Data de Ensaio:
Local da Coleta:	Amostra		Data de Aprovação:

PENEIRA	MASSA (g)	% RETIDA	% ACUM.
38	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
12,5	0,09	0,01	0,01
9,5	0,00	0,00	0,01
6,3	0,00	0,00	0,01
4,8	0,00	0,00	0,01
2,4	0,37	0,04	0,05
1,2	6,38	0,67	0,72
0,6	73,67	7,75	8,46
0,3	494,64	52,00	60,47
0,15	365,74	38,45	98,92
Fundo	10,30	1,08	100,00
	951,19	100,00	168,63

Módulo de Finura	1,69	
Dimensão Máx. Caracter.	4,8	mm
Massa Específica	NBR-9776	2,63 g/cm ³
Massa Unitária	-	Kg/m ³
Material Pulverulento	1,08	%
Torrões de Argila	-	%
Absorção	-	%
Impurezas Orgânicas	<input type="checkbox"/> MAIS CLARA	
	<input checked="" type="checkbox"/> IGUAL	
	<input type="checkbox"/> MAIS ESCURA	



Peneiras - abertura das malhas em "mm"

Observações:

Gustavo Sensineli de Moraes - Laboratorista

Anexo II - Análise dos agregados – granulometria (continuação)

RELATORIO DE ENSAIOS GRANULOMETRICOS			
IDENTIFICAÇÃO CLIENTE E OBRA			
ENSAIOS FÍSICOS EM AGREGADOS - NBR 7211/05			
Material: PÓ DE PEDRA			
Fornecedor:		Data de Coleta:	16/05/2021
Nota Fiscal nº: ---		Data de Ensaio:	17/05/2021
Local da Coleta: CLIENTE		Data de Aprovação:	17/05/2021
PENEIRA	MASSA (g)	% RETIDA	% ACUM.
38	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
12,5	0,00	0,00	0,00
9,5	1,39	0,13	0,13
6,3	11,50	1,05	1,18
4,8	2,74	0,25	1,43
2,4	312,59	28,67	30,10
1,2	186,51	17,10	47,20
0,6	146,77	13,46	60,66
0,3	119,33	10,94	71,60
0,15	88,96	8,16	79,76
0,075	189,46	17,37	97,14
Fundo	31,23	2,86	100,00
	1090,48	100,00	290,89
Módulo de Finura		2,91	
Dimensão Máx. Caracter.		2,4 mm	
Massa Específica - NBR-9776		2,71 g/cm ³	
Massa Unitária		- Kg/m ³	
Material Pulverulento		2,86 %	
Torrões de Argila		- %	
Absorção		- %	
Impurezas Orgânicas		<input type="checkbox"/> MAIS CLARA	
		<input checked="" type="checkbox"/> IQUAL	
		<input type="checkbox"/> MAIS ESCURA	

Peneiras - abertura das malhas em "mm"

Observações:

Anexo II - Análise dos agregados – granulometria (continuação)

Interessado:	Ensaio Mensal dos agregados	
Endereço:		
Obra:	Unidade Atibaia	Lajes Alveolares DUMA
Relatório de Ensaio		
ENSAIOS FÍSICOS EM AGREGADOS - NBR 7211/05		
Material:	Pedrisco	Cliente:
Fornecedor:		Data de Coleta:
Nota Fiscal nº:		Data de Ensaio:
Local da Coleta:	amostra	Data de Aprovação:

PENEIRA	MASSA (g)	% RETIDA	% ACUM.
38		0,00	0,00
25		0,00	0,00
19		0,00	0,00
12,5	0,00	0,00	0,00
9,5	1,39	0,14	0,14
6,3	11,50	1,18	1,33
4,8	2,74	0,28	1,61
2,4	312,61	32,20	33,81
1,2	186,52	19,21	53,02
0,6	145,46	14,98	68,00
0,3	125,29	12,90	80,91
0,15	153,76	15,84	96,74
Fundo	31,62	3,26	100,00
	970,89	100,00	334,23

Módulo de Finura	3,34	
Dimensão Máx. Caracter.	12,5	mm
Massa Específica	NBR-9776	2,66 g/cm ³
Massa Unitária	-	Kg/m ³
Material Pulverulento	3,26	%
Torrões de Argila	-	%
Absorção	-	%
Impurezas Orgânicas	<input type="checkbox"/>	MAIS CLARA
	<input checked="" type="checkbox"/>	IGUAL
	<input type="checkbox"/>	MAIS ESCURA

Peneiras - abertura das malhas em "mm"

Observações:

Gustavo Sensineli de Moraes - Laboratorista

APÊNDICE A

A 1 - Exemplo de cálculo do momento de fissuração para o vão central das lajes, considerando o primeiro dia do ensaio.

Cálculo do momento de fissuração segundo exemplos apresentados por Catoia (2011), sendo a tensão de tração na borda inferior dada por:

$$\sigma_i = \frac{Np}{A} + \frac{Mp.Yt}{I} - \frac{Mr.Yt}{I}$$

E igualando a expressão ao valor de tensão responsável por provocar a primeira fissura no concreto, obtém-se a seguinte expressão:

$$-\alpha F_{ctm} = \frac{N}{A} + \frac{Mp.Yt}{I} - \frac{Mr.Yt}{I}$$

Conseqüentemente o momento de fissuração (considerando a seção homogeneizada) pode ser obtido por:

$$Mr = \left(\alpha.F_{ctm} + \frac{Np}{A_{hom}} \right) \frac{I_{hom}}{Y_{t,hom}} + Np.ep$$

Sendo :

Np a força normal de protensão considerada na seção, a Tabela A1 traz consigo os valores da força de protensão aplicada em cada cordoalha.

Tabela A1 – Força de Protensão aplicada por cordoalha

Cordoalha	Pi (KN)	Po (KN)
12,7 mm	140,00	133,00
12,7 mm	138,00	131,10
12,7 mm	140,00	133,00
12,7 mm	142,00	134,90
12,7 mm	140,00	133,00
12,7 mm	143,00	135,85
Média	140,50	133,48
9,5 mm	91,00	86,45
9,5 mm	92,00	87,40
Média	91,50	86,92

Fonte: Próprio Autor (2021)

Para as lajes ensaiadas, foram utilizadas 06 cordoalhas de 12,7 mm e 02 cordoalhas de 9,5 mm, utilizando o valor da média da tensão aplicada para cada cabo, tem-se a força normal atuante na seção.

$$\sum P_0 = 6 \text{ cabos} \times 133,48 + 2 \text{ cabos} \times 86,92 = 974,72 \text{ KN}$$

Com e_p sendo a excentricidade da armadura ativa determinada por:

$$e_p = Y_t - Y_{\text{cabo}}$$

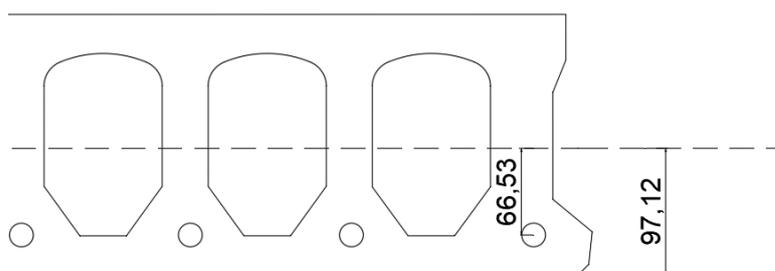
Ou pode ser obtido diretamente em arquivo CAD, traçando uma linha no CG da peça e cotando a distância até o CG da cordoalha. Figura A1. $e_p = 66,53 \text{ mm} = 6,65 \text{ cm}$.

Com $\alpha = 1,5$ para seção retangular, conforme ABNT NBR 6118.

F_{ctm} calculado à partir da média da resistência à compressão dos CP's, no dia do ensaio.

$$F_{ctm} = 0,3 \cdot F_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 27,10^{2/3} = 2,076 \text{ MPa } 2076 \text{ KN/m}^2$$

Figura A1 Determinação de e_p



Fonte: Próprio Autor (2021)

Y_{hom} é a distância do centro de gravidade até a fibra superior da seção, sendo determinado por:

$$Y_{, hom} = \frac{A \cdot Y_{cg} + A_p \cdot (\alpha p - 1) d}{A_{, hom, inicial}}$$

$$Y_{, hom} = \frac{0,140196 \times 0,10288 + 0,000716(7,67 - 1) \times 0,169}{0,14497172} = 0,1050$$

Onde o Y_{cg} é a distância do centro de gravidade da seção até a fibra superior = 0,1028 m.

$$A = 0,140196 \text{ m}^2$$

$$I = 0,0006719091529536 \text{ m}^4$$

$$A_p = 6 \times 1,01 + 2 \times 0,55 = 7,16 \text{ cm}^2$$

αp é a relação entre o módulo de deformação longitudinal do aço (CP 190) e do concreto, dado por:

$$\alpha p = \frac{E_p}{E_c} = \frac{190}{\frac{0,85 \times 5600 \sqrt{27,10}}{1000}} = 7,67$$

A_{hom} é a área da seção homogeneizada dada por:

$$A_{hom} = A + A_p(\alpha p - 1) = 0,140196 + 0,000716(7,67 - 1) = 0,14497172 \text{ m}^2$$

I_{hom} é o momento de inércia da seção geométrica homogeneizada, dada por:

$$I_{hom} = I + A(Y_{cg} - Y_{hom})^2 + A_p(\alpha p - 1) \cdot (d - Y_{hom})^2$$

$$I_{hom} = 0,0006719091529536 + 0,140196(0,1028 - 0,1050)^2 \\ + 0,000716(7,67 - 1) \cdot (0,169 - 0,1050)^2 = 0,000692157 \text{ m}^4$$

$Y_{t, hom}$ é a distância do centro de gravidade da seção homogeneizada até a fibra mais tracionada, dada por:

$$Y_{t, hom} = h - Y_{hom} = 0,20 - 0,1050 = 0,095 \text{ m}$$

Por fim o momento de fissuração é dado por:

$$M_r = \left(1,50 \times 2076 + \frac{974,72}{0,14497172} \right) \frac{0,000692157}{0,095} + 947,72 \times 0,0665 = 133,75 \text{ KN.m}$$

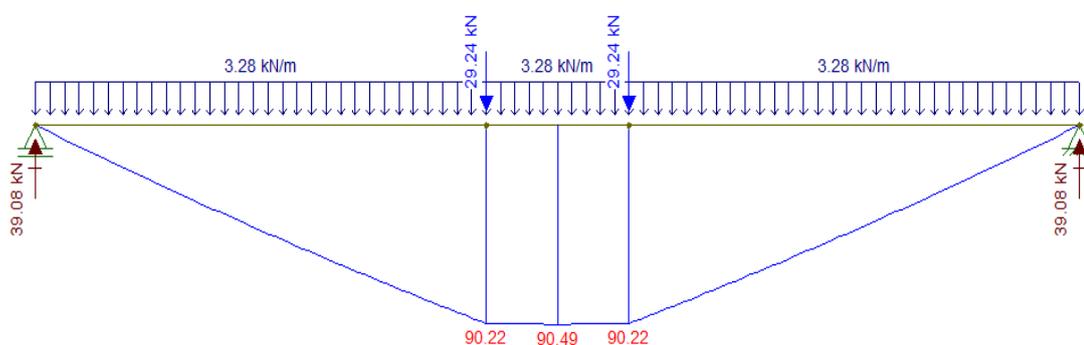
A 2 - Exemplo de verificação das cargas aplicadas na estrutura, para a LJ 3

A laje alveolar 3, foi ensaiada com duas cargas pontuais, para isso foi preciso verificar se o momento solicitante é menor que o momento de fissuração $M_{sd} < M_r$.

Considerando o peso próprio de projeto como 3,28 kN/m, para o esquema de aplicação de carga utilizado na LJ 3, o momento solicitante obtido com o auxílio do software livre Ftool, foi de 90,49 kN.m (Figura A2).

Sendo $M_r = 133,75$ kN.m e $M_s = 90,49$ kN.m, a condição é atendida.

Figura A 2 Verificação do esforço solicitante na seção



Fonte: Próprio Autor (2021)

A 3 – Exemplo de verificação do módulo de deformação do concreto, para a LJ 3

Sendo o momento de inércia geométrico de projeto igual a 0,000615933 m⁴, o vão utilizado para o cálculo de 6 m, o módulo de deformação do concreto pode ser determinado da seguinte maneira:

Laje posicionada para ensaio, sem carregamento externo:

Leitura no relógio A (analógico da extremidade esquerda) = 11,05 mm

Leitura no relógio C (digital extremidade direita) = 0,00 mm

Leitura no relógio B (digital central) = 0,00 mm

Laje posicionada para ensaio, com carregamento externo:

Leitura no relógio A (analógico da extremidade esquerda) = 13,18 mm

Leitura no relógio C (digital extremidade direita) = 1,73 mm

Leitura no relógio B (digital central) = 12,89 mm

Contabilizando as variações dos relógios:

$$\Delta A = 13,18 - 11,05 = 2,13 \text{ mm}$$

$$\Delta C = 1,73 - 0,00 = 1,73 \text{ mm}$$

$$\Delta B = 12,89 - 0,00 = 12,89 \text{ mm}$$

Agora faz-se o delta médio dos apoios:

$$\Delta_{MÉDIO, APOIO} = \frac{\Delta A + \Delta C}{2} = \frac{2,13 + 1,73}{2} = 1,93 \text{ mm}$$

Para o cálculo do deslocamento real da peça:

$$\delta = \Delta B - \Delta_{MÉDIO, APOIO} = 12,89 - 1,93 = 10,96 \text{ mm}$$

Sendo a expressão para o cálculo da deflexão com duas cargas pontuais de mesma intensidade conhecida pela resistência dos materiais, tem-se:

$$\delta = \frac{Pa}{24.EI} (3l^2 - 4a^2)$$

Com a= 2,59 m

L = 6m

I = 0,000615933 m⁴

Isolando E temos:

$$E = \frac{Pa}{24 \cdot \delta \cdot I} (3l^2 - 4a^2)$$

$$E = \frac{29,24 \times 2,59}{24 \times \frac{10,96}{1000} \times 0,000615933} (3 \times 6^2 - 4 \times 2,59^2) = 37.940.632,64 \frac{KN}{m^2} = 37.940,6 MPa$$

A 4 – Exemplo de validação da equação da linha elástica.

Conhecendo a primeira equação da linha elástica temos:

$$EI \cdot \delta = 6,695x^3 - 2,79(x - 1,93)^3 - 3,9(x - 2,75)^3 - 170,5x$$

Imaginando uma seção retangular de 20 cm de base por 30 cm de altura, temos a seguinte inércia:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,20 \times 0,30^3}{12} = 0,00045 \text{ m}^4$$

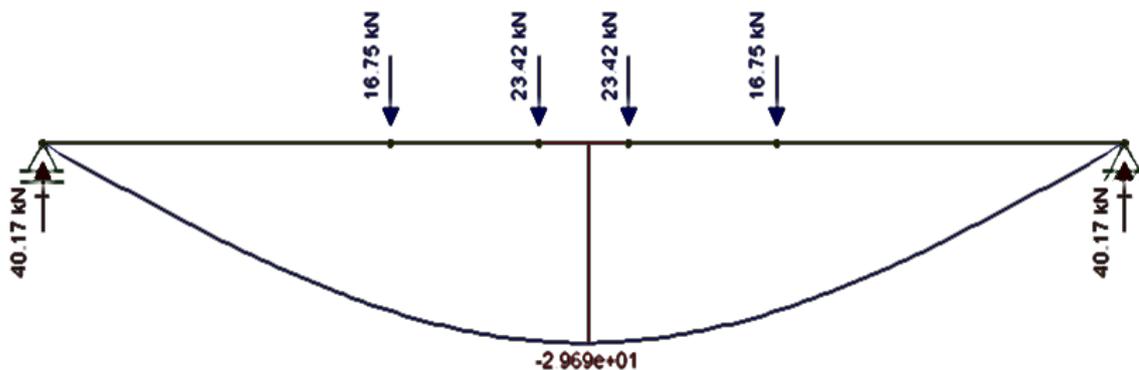
Imaginando um módulo elástico de 25.000 MPa (25 000 000 KN/m²), aplicando a equação da linha elástica temos, para L=3 metros:

$$25\,000\,000 \times 0,00045 \times \delta = 6,695(3)^3 - 2,79(3 - 1,93)^3 - 3,9(3 - 2,75)^3 - 170,5(3)$$

$$\delta = -0,0297 \text{ m} = -29,7 \text{ mm}$$

Comparando com os resultados obtidos pelo Ftool, $\delta = -2,969 \cdot 10^1 = -29,69 \text{ mm}$ (Figura A3), pode-se dizer que a equação convergiu, mostrando-se válida.

Figura A 3 Validação da equação da linha elástica pelo FTOOL



Fonte: Próprio Autor (2021)