

UNIS – CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

ENGENHARIA CIVIL

YAGO PETRIM CRUZ

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES NERVURADAS PRÉ-FABRICADAS
TRELIÇADAS UNIDIRECIONAIS.**

“Análise de dimensionamento e verificação do “ELS” em lajes treliçadas pré-fabricadas, utilizando método de cálculo sem considerações construtivas e considerando etapas construtivas, segundo ABNT NBR 6118 abril:2014”.

**VARGINHA/MG
2015**

YAGO PETRIM CRUZ

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES NERVURADAS PRÉ-FABRICADAS
TRELIÇADAS UNIDIRECIONAIS.**

“Análise de dimensionamento e verificação do “ELS” em lajes treliçadas pré-fabricadas, utilizando método de cálculo sem considerações construtivas e considerando etapas construtivas, segundo ABNT NBR 6118 Abril:2014”.

Trabalho de conclusão de curso apresentado por **Yago Petrim Cruz** como exigência do curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas sob a orientação do professor M.Sc. Antônio de Faria.

**VARGINHA/MG
2015**

YAGO PETRIM CRUZ

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES NERVURADAS PRÉ-FABRICADAS
TRELIÇADAS UNIDIRECIONAIS:**

“Análise de dimensionamento e verificação do “ELS” em lajes treliçadas pré-fabricadas, utilizando método de cálculo sem considerações construtivas e considerando etapas construtivas, segundo ABNT NBR 6118 abril:2014”.

Trabalho de conclusão de curso apresentado por **Yago Petrim Cruz** como exigência do curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do título de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: ___/___/___

Prof. M.Sc. Antônio de Faria
(Orientador)

Prof. Armando Belato Pereira

Prof. Elker Lucas Garroni

Dedico este trabalho a todos que participaram diariamente da minha formação acadêmica e principalmente aos meus pais que sempre incentivaram a busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder vocação para realizar este trabalho. Aos meus pais pela minha criação. À minha noiva, irmão, avós e primos que vivenciaram e incentivaram esta jornada. A todos os professores que participaram de minha graduação na Universidade do Sul de Minas – UNIS-MG, em especial o orientador M.Sc. Antônio de Faria. A todos os meus amigos que estarão sempre nas boas lembranças do curso de graduação em Engenharia Civil.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso
sem perder o entusiasmo.”

Winston Churchill

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade desenvolver uma análise dos métodos de cálculo que podem ser utilizados durante o dimensionamento de lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas, consiste na utilização de um modelo de laje e avaliação do mesmo considerando no processo de cálculo do ELU aspectos normativos e o método de vigas isoladas, já no processo de verificação do ELS serão abordados diferentes modelos apresentados em norma, desde os processos simplificados até os mais detalhados conforme cita o anexo A da ABNT NBR 6118:2014. Resume-se basicamente em mostrar que a análise simplificada de elementos estruturais como a laje pode levar a conclusões que nem sempre são as mais viáveis, assim como definir padrões, ou seja, tabelar condições de maneira genérica conforme alguns fabricantes fazem, também não é uma boa solução, sendo necessário avaliar cada obra de maneira singular.

Palavras Chave: Dimensionamento, Verificação, Lajes pré-fabricadas treliçadas.

ABSTRACT

This work aims to develop an analysis of the calculation methods that can be used during the sizing ribbed lattice prefabricated slabs, consists of using a slab model and evaluation of it considering the calculation process ELU regulatory aspects and method of isolated beams, already in ELS verification process will be discussed different models presented in standard, from the simplified procedures to the most detailed quotes as Annex A to NBR 6118: 2014. Boils down basically to show that the simplified analysis of structural elements such as the slab can lead to conclusions that are not always the most feasible as well as set standards, ie tabular conditions generically as some manufacturers do, is also not a good solution, is necessary to evaluate each work in a unique way.

Keywords: *Design, Verification, prefabricated truss slabs.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dimensões padronizadas dos enchimentos para laje (cm)	25
Tabela 2: Peso próprio de laje em EPS x Peso próprio de laje em cerâmica.	26
Tabela 3: Altura das lajes em função dos enchimentos (cm).	27
Tabela 4: Espessura mínima da capa para as alturas totais padronizadas (cm).....	27
Tabela 5: Intereixos mínimos padronizados (cm).	28
Tabela 6: Aços que podem ser utilizados em lajes pré-fabricadas.	28
Tabela 7: Tabela do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$	35
Tabela 8: Tabela do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f2}$	36
Tabela 9: Classe de agressividade ambiental (CAA).	37
Tabela 10: Tabela de correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $c=10\text{mm}$ - resumida para uso em lajes.	38
Tabela 11: Tabelas de deslocamentos limites - resumida para o uso em lajes.....	39
Tabela 12: Tabela de exigências de durabilidade relacionada à fissuração e à proteção da armadura em função da classe de agressividade ambiental - resumida para o uso em lajes.....	40
Tabela 13: Características da seção utilizada para o cálculo $A_{s,\text{mín}}$	42
Tabela 14: Tabela de armadura mínima para seção “T” – Linha Neutra na Mesa.....	42
Tabela 15: Cronograma de execução 1.....	57
Tabela 16: Cronograma de execução 2.....	57
Tabela 17: Cronograma de execução 3.....	58
Tabela 18: Cronograma de execução 4.....	58
Tabela 19: Distância de Varginha em relação a Lavras e Machado.....	60
Tabela 20: Umidade relativa do ar para a cidade de Lavras - MG.....	61
Tabela 21: Umidade relativa do ar para a cidade de Machado - MG.....	61
Tabela 22: Umidade relativa média para as cidades de Lavras e Machado - MG.	61
Tabela 23: Temperatura média para a cidade de Lavras - MG.	61
Tabela 24: Temperatura média para a cidade de Machado - MG.	62
Tabela 25: Temperatura média para as cidades de Lavras e Machado - MG.....	62
Tabela 26: Coeficiente de fluência para temperatura de $20,22^\circ$ (média anual).....	63
Tabela 27: Coeficiente de fluência para temperatura de $17,07^\circ$ (Inverno).....	63
Tabela 28: Peso específico aparente da laje.	67
Tabela 29: Verificação do adicional para a laje treliça.	70

Tabela 30: Verificação de flechas máximas.....	78
Tabela 31: Coeficiente α_f para retirada de escoramento aos 28 dias.....	79
Tabela 32: Coeficiente de fluência $\phi(t_\infty, t_0)$, para retirada de escoramento aos 28 dias, considerando Umidade média de Varginha-MG.....	80
Tabela 33: Determinação do coeficiente de fluência do concreto – NBR6118:2014	80
Tabela 34: Aplicação dos diferentes coeficientes de fluência determinados.	82
Tabela 35: Resumo final das flechas para combinação quase permanente imediata e somados a aplicação dos coeficientes de fluência comparados aos limites de aceitação definidos por norma.....	83
Tabela 36: Resumo final para flecha devido a vibração e limite máximo permitido por norma.....	83
Tabela 37: Cronograma para verificação considerando etapas construtivas.....	85
Tabela 38: Seção simples e seção composta - características	86
Tabela 39: Flechas de acordo com etapas construtivas.....	98
Tabela 40: Verificação de flechas máximas.....	98
Tabela 41: Coeficiente α_f para retirada de escoramento de acordo com cronograma construtivo 1.	100
Tabela 42: Coeficiente de fluência $\phi(t_\infty, t_0)$, para retirada de escoramento de acordo com cronograma construtivo 1, considerando Umidade média de Varginha-MG.....	100
Tabela 43: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 2 – NBR6118:2014.....	102
Tabela 44: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 3 – NBR6118:2014.....	103
Tabela 45: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 4 – NBR6118:2014.....	104
Tabela 46: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 5 – NBR6118:2014.....	105
Tabela 47: Aplicação dos diferentes coeficientes de fluência determinados considerando etapas construtivas.....	106
Tabela 48: Resumo final das flechas para combinação quase permanente imediata e somados a aplicação dos coeficientes de fluência comparados aos limites de aceitação definidos por norma.....	107
Tabela 49: Resumo final para flecha devido a vibração e limite máximo permitido por norma.....	107

Tabela 50: Dados de entrada para cálculo do ELU.	110
Tabela 51: Resultados obtidos para laje 1 - vão eixo a eixo apoio 2,50m – ELU.....	111
Tabela 52: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 2,50m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha accidental.	112
Tabela 53: Resultados obtidos para laje 2 - vão eixo a eixo apoio 3,00m – ELU.....	116
Tabela 54: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 3,00m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha accidental.	117
Tabela 55: Resultados obtidos para laje 3 - vão eixo a eixo apoio 3,50m – ELU.....	121
Tabela 56: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 3,50m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha accidental.	122
Tabela 57: Resultados obtidos para laje 4 - vão eixo a eixo apoio 4,00m – ELU.....	126
Tabela 58: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 4,00m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha accidental.	127
Tabela 59: Verificação considerando vãos adotados no item 5 e fluência de acordo com anexo 2 – flechas em cm.....	134
Tabela 1. 1: Valores para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até a classe C50.	148
Tabela 2. 1: Valores do coeficiente ξ em função do tempo.....	152
Tabela 3. 1: Valores característicos superiores da deformação específica de retração ϵ_{cs} (t_{∞} , t_0) e do coeficiente de fluência ϕ (t_{∞} , t_0).....	154
Tabela 4. 1: Valores numéricos usuais para determinação da fluência e da retração...	162
Tabela 5. 1: Dados históricos de temperatura e umidade relativa da cidade de Lavras - MG.....	167

Tabela 5. 2: Dados históricos de temperatura e umidade relativa da cidade de Machado - MG.....	175
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trilhos e lajotas utilizados para lajes.	20
Figura 2: Modelo esquemático de treliça eletrossoldada.	21
Figura 3: Modelo esquemático de laje treliça.....	21
Figura 4: Elementos de enchimento.	25
Figura 5: Seção "T" considerada para cálculo de valores mínimos.	42
Figura 6: Montagem do escoramento.	44
Figura 7: Posicionamento e montagem das vigotas e enchimento.	45
Figura 8: Colocação de armadura de distribuição e elementos de enchimento.....	45
Figura 9: Tubulação e caixa de passagem elétrica em lajes.	46
Figura 10: Armadura de distribuição.....	46
Figura 11: Armadura de borda.	47
Figura 12: Armadura negativa.....	47
Figura 13: Concretagem da laje.....	48
Figura 14: Retirada do escoramento.....	49
Figura 15: Concreto de envolvimento da armadura.	50
Figura 16: Seção após concretagem – Considerações do perímetro em contato com atmosfera.	54
Figura 17: Seção após execução do contrapiso e revestimento inferior da laje - Considerações do perímetro em contato com atmosfera.	54
Figura 18: Seção após execução do revestimento superior - Considerações do perímetro em contato com atmosfera.....	55
Figura 19: Distância entre varginha e Machado.....	60
Figura 20: Distância entre Varginha e Lavras.	60
Figura 21: Seção "T" da laje - simples	64
Figura 22: Seção "T" da laje - composta.	65
Figura 23: Seção considerada para Estádio I.....	72
Figura 24: Consideração da área de envolvimento em relação a barra mais tracionada na nervura.	75
Figura 25: Consideração da área de envolvimento em relação a barra mais tracionada na nervura.	76
Figura 26: Diagrama de análise das flechas imediatas de acordo com Verificação I - tabela 30.....	79

Figura 27: Diagrama de análise das flechas imediatas e com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação I - tabelas 35 e 36.	84
Figura 28: 1ª etapa – Montagem da laje	87
Figura 29: 2ª etapa – Retirada do escoramento	87
Figura 30: 3ª etapa - Após execução da parede do nível superior e durante execução do contrapiso e revestimento inferior.	88
Figura 31: 4ª etapa – Após execução do contrapiso, executa-se o revestimento final (considerando contribuição do contrapiso).....	88
Figura 32: 5ª etapa – Etapa onde se dá início a utilização final da edificação (considera contribuição do contrapiso).	89
Figura 33: Considerações da seção para determinar momento resistente no apoio (cm).	89
Figura 34: Modelagem de cálculo para 2ª etapa.....	90
Figura 35: Seção simples (1), considerada para o cálculo da 2ª etapa.	91
Figura 36: Modelagem de cálculo para 3ª etapa.....	92
Figura 37: Seção simples (1), considerada para o cálculo de 3ª etapa.	92
Figura 38: Modelagem de cálculo para 4ª etapa.....	94
Figura 39: Seção composta (2), considerada para o cálculo da 4ª etapa.	94
Figura 40: Seção composta (2), considerada para o cálculo da 5ª etapa	96
Figura 41: Modelagem para o cálculo devido à carga q - primeira etapa.	96
Figura 42: Modelagem para o cálculo devido a carga q – segunda etapa	97
Figura 43: Diagrama de análise das flechas imediatas de acordo com Verificação II e cronograma construtivo 1 - tabelas 39 e 40.....	99
Figura 44: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II - tabelas 48 e 49.	108
Figura 45: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II e fluência do anexo 2 – laje com vão de 3,00m - tabela 59.....	135
Figura 46: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II e fluência do anexo 2 – laje com vão de 4,00m - tabela 59.....	136
Figura 4.1: Variação de $e_{ccf}(t)$	157
Figura 4.2: Variação de $\beta_f(t)$	160

Figura 4.3: Variação de $\beta_S(t)$	163
Figura 4.4: Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento.	164

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 2,50m.	113
Gráfico 2: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 2,50m.	113
Gráfico 3: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 2,50m.	114
Gráfico 4: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 2,50m.	114
Gráfico 5: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 3,00m.	118
Gráfico 6: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 3,00m.	118
Gráfico 7: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,00m.	119
Gráfico 8: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 3,00m.	119
Gráfico 9: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 3,50m.	123
Gráfico 10: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 3,50m.	123
Gráfico 11: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,50m.	124
Gráfico 12: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,50m.	124
Gráfico 13: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 4,00m.	128
Gráfico 14: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 4,00m.	128
Gráfico 15: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 4,00m.	129

Gráfico 16: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 4,00m.	129
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

BDMEP - Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa

C - Classes de concreto

CA - Concreto armado

CAA - Classe de agressividade ambiental

CP - Cimento Portland

ELS - Estado limite de Serviço

ELS-W - Estado limite de abertura das fissuras

ELU - Estado limite último de ruína

EPS - Sigla internacional do material poliestireno expandido

INMET - Instituto nacional de meteorologia

LC - Laje de concreto armado

LP - Laje de concreto protendido

LT - Laje trilho ou treliçada

MG - Minas Gerais - Brasil

NBR - Norma brasileira regulamentadora

NL - Nervuras principais Longitudinais

NP - Nervuras transversais perpendiculares

TCC - Trabalho de conclusão de curso

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

UR - Umidade relativa

UTC - Tempo coordenado universal

VC - Vigota de laje em concreto armado

VP - Vigota de laje em concreto protendido

VT - Vigota de laje treliçada

cm - centímetro

I_m - Inércia média de Branson

km - quilômetro

ℓ - Comprimento

$M_{máx F}$ - Momento máximo para combinação frequente

MPa - Megapascal – unidade de medida da resistência à compressão do concreto

M_r - Momento de fissuração

a_{cf} - Contra flecha

a_f - Coeficiente de fluência

A_{cri} - área da região de envolvimento protegida pela barra ϕ_i ;

A_s - Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração

$A_{s\ min}$ - Área mínima da seção transversal da armadura longitudinal de tração

$A_{seção}$ - Área bruta de concreto da seção transversal

b_f - Espaçamento entre eixos das nervuras

c - cobrimento nominal da armadura

E_{ci} - Modulo de elasticidade tangente inicial do concreto

E_{cs} - Modulo de elasticidade secante do concreto

E_{si} - Módulo de elasticidade do aço da barra ϕ_i considerada;

f_{cd} - Resistência de cálculo à compressão do concreto

F_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto

f_{ct} - Resistência à tração direta

$f_{ct,f}$ - Resistência à tração na flexão

$f_{ctk,inf}$ - Resistência característica inferior do concreto à tração

$f_{ctk,sup}$ - Resistência característica superior do concreto à tração

f_{ctm} - Resistência característica média do concreto à tração

f_s - Resistência ao escoamento do aço

$f_{ct,sp}$ - Resistência à tração indireta

f_{yd} - Resistência de cálculo do aço

f_{yk} - Resistência ao escoamento do aço

h - Altura da seção

h_f - Espessura da capa de concreto

I - Momento de inércia em relação a seção bruta de concreto

I_{II0} - Momento de inércia do estágio II puro

$w_{mín}$ - Limite de abertura de fissuras

T - Temperatura

ϵ_s - Deformação no aço

ϵ_c - Deformação no concreto

ρ_{ri} - Taxa de armadura passiva ou ativa aderente em relação à área da região de envolvimento (A_{cri})

$\rho_{mín}$ - taxa geométrica mínima da armadura longitudinal

η_i - Coeficiente de conformação superficial da armadura considerada;

σ_{si} - Tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no estágio II.

γ_c - Coeficiente de ponderação da resistência do concreto

γ_f - coeficiente de ajuste de γ_f , que considera o aumento de probabilidade de desvios na construção.

γ_{f1} - parte do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera as variabilidades das ações.

γ_{f2} - parte do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera a simultaneidade de atuação das ações.

γ_{f3} - parte do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera os desvios gerados nas construções e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das solicitações.

γ_s - Coeficiente de ponderação da resistência do aço

ψ_0 - Fator de redução de combinação para ELU

ψ_1 - Fator de redução de combinação frequente para ELS

ψ_2 - Fator de redução de combinação quase permanente para ELS

ϕ_i - Diâmetro da barra que protege a região considerada;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	24
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Metodologia	17
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS.	19
2.1 Lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas unidirecionais.	19
2.2 Vantagens.	21
2.3 Concreto:	22
2.3.1 Resistência à compressão dos concretos utilizados:	22
2.3.2 Resistência à tração:	22
2.4 Elementos de enchimento.....	24
2.5 Aços utilizados:	28
2.6 Tipos de cimento.	29
2.6.1 Cimento Portland comum (CP-I).	29
2.6.2 Cimento Portland composto com escória (CP II-E).	30
2.6.3 Cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z).	30
2.6.4 Cimento Portland composto com filler (CP II-F).	30
2.6.5 Cimento Portland de alto-forno (CP III).	30
2.6.6 Cimento Portland Pozolânico (CP IV).	31
2.6.7 Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).	31
2.7 Critérios de cálculo.	31
2.8 Ações a serem consideradas.	32
2.8.1 Ações permanentes.	33
2.8.2 Ações variáveis.	33
2.8.2.1 Ações variáveis diretas.	33
2.8.2.2 Ações variáveis indiretas.	34
2.8.3 Ações excepcionais.	34
2.9 Valores de cálculo e coeficientes de ponderação.	34
2.9.1 Coeficientes de ponderação para o estado limite último.	35
2.9.2 Coeficientes de ponderação para os estados limites de serviço.	36
2.10 Durabilidade.....	36
2.11 Fluência do concreto.....	38
2.12 Limites para as deformações.	39

3. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	41
3.1 Critérios para o cálculo da armadura Longitudinal.....	41
3.2 Critério para verificação do Estado limite de Serviço.....	43
3.2.1 Etapas construtivas das lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas.....	43
3.3 Critério para verificação do Estado limite de fissuração.....	49
3.4 Critérios para verificação ao cisalhamento.....	51
3.5 Condições de apoio.....	52
3.5.1 Condições de apoio - simples.....	52
3.5.2 Condições de apoio - engaste.....	52
3.6 Perímetro da seção em contato com a atmosfera.....	53
3.7 Cronogramas de execução de obras - lajes.....	55
3.8 Temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Varginha-MG.	59
3.9 Consistência do concreto.....	64
3.10 Seção simples e seção composta - considerações.....	64
4. METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA O ESTUDO DE CASO.....	66
4.1 Ações atuantes:.....	67
4.1.1 Peso próprio da laje:	67
4.1.2 Revestimento inferior da laje:.....	67
4.1.3 Camada de regularização superior da laje:	68
4.1.4 Revestimento superior da laje:.....	68
4.1.5 Edifício multifamiliar de pavimentos múltiplos – Ação variável:.....	68
4.1.6 Ação total por m ² e ação atuante por nervura:.....	68
4.2 Verificação da seção:	68
4.2.1 Altura útil da seção:	69
4.2.2 Verificação:.....	69
4.3 Cálculo da armadura de acordo com o ELU – Considerando anexo 1:	69
4.4 Verificação do ELS-W:	71
4.5 Verificação da necessidade de armadura de cisalhamento (Item 3.4 deste material) – lajes sem armadura para força cortante:	77
4.6 Verificação da Flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo – Verif. I:	78
4.6.1 Flecha para combinação quase permanente e acidental:	78
4.6.2 Coeficiente α_f de acordo com Anexo 2:.....	79
4.6.3 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 3:.....	80
4.6.4 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 4:.....	80
4.6.5 Aplicação dos coeficientes de fluência:.....	82
4.6.6 Resumo da verificação I:	82

4.7 Verificação da Flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo – Verif. II:.....	84
4.7.1 Flecha para combinação quase permanente e acidental:	84
4.7.1.1 1ª Etapa construtiva:	86
4.7.1.2 2ª Etapa construtiva:	87
4.7.1.3 3ª Etapa construtiva:	88
4.7.1.4 4ª Etapa construtiva:	88
4.7.1.5 5ª Etapa construtiva:	89
4.7.1.6 Determinação do momento M1 (momento negativo resistente no apoio):.....	89
4.7.1.7 Cálculo da flecha devido a $g_{11} + g_{12} = 0,6192$ kN/m (seção simples) – imediatamente após retirada do escoramento, 2ª etapa construtiva.....	90
4.7.1.8 Cálculo da flecha devido a $g_{21} = 0,3032$ kN/m (seção simples) – após execução das paredes e do revestimento inferior e superior da laje, 3ª etapa construtiva.	92
4.7.1.9 Cálculo da flecha devido a $g_{22} = 0,1204$ kN/m (seção composta) – após execução do revestimento superior, 4ª etapa construtiva.	94
4.7.1.10 Cálculo da flecha devido a $q = 0,645$ kN/m (seção composta) – Referente à utilização da edificação, 5ª etapa construtiva.	95
4.7.1.11 Flecha total acumulada.	98
4.7.2 Coeficiente α_f de acordo com Anexo 2:.....	99
4.7.3 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 3:.....	100
4.7.4 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 4:.....	101
4.7.5 Aplicação dos coeficientes de fluência:.....	106
4.7.6 Resumo da verificação II:	106
4.7.6 Considerações sobre o exemplo e método de cálculo adotado:.....	108
5. DIAGNÓSTICO E RESULTADOS OBTIDOS.....	109
6. DISCUSSÃO.....	132
7. CONCLUSÃO.....	137
8. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS E PESQUISAS.	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXOS	143

1. INTRODUÇÃO

A utilização de lajes pré-fabricadas, nomenclatura dada para lajes com vigotas parcialmente pré-moldadas pela ABNT NBR 14859-1:2002, é uma realidade presente em muitos canteiros de obra no Brasil, pois além de atender pequenas obras com custo acessível também se apresenta como uma boa solução para lajes de edifícios de característica multifamiliar e comerciais de médio porte.

O processo de dimensionamento deste elemento estrutural pode ser feito de diversas maneiras de acordo com bibliografias existentes, dependendo principalmente da análise e considerações estabelecidas pelo engenheiro calculista.

O desenvolvimento de estudos voltados para lajes nervuradas pré-moldadas basicamente teve início com Di Pietro (1993), passou por diversos autores e dentre os principais desenvolvedores do tema encontra-se o grupo de estudos de estruturas de concreto da UFSCar que, desenvolveram inúmeros trabalhos voltados para melhorias na análise de lajes nervuradas pré-fabricadas durante as últimas décadas.

Devido há necessidade de avaliar os estados limites de acordo com ABNT NBR 6118:2014, ou seja, verificar o ELU e o ELS do elemento laje, muitas tabelas e outros métodos resumidos de determinação do tipo de laje se mostram ultrapassados quando se deseja atender os estados limites exigidos em norma.

Apesar de reconhecer que grandes avanços foram feitos desde o início dos estudos elaborados, ainda existem vários métodos de análise estrutural que podem ser adotados pelo profissional de engenharia, sendo este um dos principais fatores para a ocorrência de infinitas soluções estruturais. A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 apresenta o método de cálculo de estados limites, e para avaliação de estados limites de deformação excessiva e fluência apresenta um processo mais detalhado no anexo A, presente neste trabalho como anexo 4. Avaliar estes aspectos de dimensionamento levando em consideração além das determinações normativas os aspectos construtivos que englobam o processo, pode se tornar uma boa solução para que as lajes nervuradas pré-fabricadas atendam às necessidades primordiais dos usuários, ou seja, economia, segurança e durabilidade.

1.1 Justificativa

Quando falamos em lajes com vigotas pré-moldadas de concreto, segundo Carvalho, R.C; Figueiredo Filho, J. R. (2014), podemos citar alguns tópicos relevantes:

Redução de custo, devido a não utilização de formas e a facilidade de manuseio, diminuindo o nível de qualificação exigida para execução de tais elementos;

A existência de um grande número de fabricantes de tal elemento, influenciados principalmente pelos fabricantes de treliças no Brasil.

Porém segundo Magalhães, F.L. (2001), as lajes formadas por vigotas pré-fabricadas treliçadas foram disseminadas no Brasil por inúmeras pequenas empresas produtoras, das quais muitas delas não possuem capacitação técnica para projetar, produzir e prestar assistência técnica aos seus clientes. Causando em muitos casos problemas estruturais nas obras, como por exemplo, flechas excessivas, infiltrações, fissurações e até desabamentos.

As lajes são elementos estruturais que compõem a estrutura de vários tipos de edificações, apresentando uma dimensão preponderante sobre as demais e, Segundo Carvalho, R.C; Figueiredo Filho, J. R. (2014) o cálculo ou dimensionamento de uma estrutura deve garantir que ela resista, de maneira segura, estável e com deformações que atendam aos limites normativos, todas as solicitações a que será submetida durante a sua execução e utilização.

De acordo com Magalhães, F.L. (2001), as lajes nervuradas treliçadas são elementos muito esbeltos, ou seja, estão suscetíveis a maiores deformações, tornando necessária uma avaliação mais criteriosa para o estado limite de deformações excessivas.

A apresentação de soluções imediatas apresentadas em forma de tabelas sem levar em consideração o processo construtivo, a localidade onde a laje será executada, as condições de construção, entre outros aspectos, podem causar nas obras que utilizam de lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas patologias futuras, tais como as citadas anteriormente por Magalhães F.L. (2001).

Este trabalho visa estabelecer cronogramas de execução que podem ser adotados para lajes pré-fabricadas treliçadas e posteriormente utilizando procedimentos e análises distintas, avaliar e mostrar comparativamente resultados obtidos, procurando demonstrar que é possível atender as normas vigentes com considerações e métodos de análise diferentes, visando orientar o profissional de engenharia calculista estrutural.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o dimensionamento de lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas, considerando processos construtivos distintos e avaliar a capacidade em atender ao estado limite de serviço. Seus principais tópicos são:

- Identificar aspectos a serem adotados referentes às lajes a serem estudadas, como, tipo de armação treliçada, classe de concreto, tipos de enchimento, inteiros, recobrimentos;
- Definição das ações atuantes na estrutura;
- Apresentar etapas de execução e algumas considerações inerentes nas principais etapas, como por exemplo, o escoramento;
- Apresentar métodos de verificação para o ELS;
- Buscar junto às normas e entidades competentes, dados para o dimensionamento e análise dos estados limites de serviço, considerando a cidade de Varginha, sul de Minas Gerais.
- Apresentar os resultados obtidos, ou seja, problema e possíveis soluções.
- Estabelecer características da laje a ser analisada;
- Definir diferentes procedimentos de execução;
- Dimensionar as lajes utilizando os diferentes métodos citados;
- Apresentar uma análise referente a abordagem dos métodos de cálculo do ELS;
- Apresentar os resultados obtidos.

1.3 Metodologia

Trata-se de um estudo de referência bibliográfica, onde toda fundamentação teórica partiu da consulta técnica a NBR's, trabalhos acadêmicos, revistas, livros e sites relacionados ao assunto.

Para elaboração do estudo de caso foram utilizadas ferramentas computacionais como o Excel, Word (Microsoft Office), Auto Cad – Auto desk e materiais oriundos de pesquisas, além dos itens citados anteriormente, foi feita análise de um modelo de laje específico, onde os resultados foram comparados entre si, para esta análise foram

utilizados os dados de temperatura média e umidade relativa, além dos anexos 2, 3 e 4 deste material.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Para análise das lajes nervuradas pré-fabricadas, faz-se necessário conhecer a respeito da mesma, saber quais são suas definições e o que autores relatam, a seguir serão descritas informações embasadas em diversos autores com a finalidade de evidenciar o que é a laje nervurada pré-fabricada treliçada.

2.1 Lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas unidirecionais.

A ABNT NBR 14859-1:2002 define laje unidirecional, como sendo aquela constituída por nervuras principais longitudinais (NL) locadas e espaçadas em um único sentido, podendo ser empregadas algumas nervuras transversais perpendiculares (NP) às nervuras principais (NL). As vigotas pré-fabricadas, peças que dão formato às nervuras são constituídas por concreto estrutural, executadas industrialmente fora do alcance de utilização, ou mesmo em canteiros de obra, seguindo rigorosas condições de controle de qualidade, elas podem ou não possuir uma camada de concreto que engloba total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando parcialmente a seção de concreto de nervura longitudinal. Podendo ser fornecidas da seguinte maneira:

- Vigota de concreto armado com seção de concreto usual formando um “T” invertido, com armadura totalmente envolvida pelo concreto da vigota, é geralmente utilizada para compor laje de concreto armado (LC);
- Vigota de concreto protendido com seção de concreto formando um “T” invertido, com armadura ativa pré-tensionada totalmente englobada pelo concreto da vigota; utilizadas para compor as lajes de concreto protendido (LP);
- Vigotas treliçadas com seção de concreto formando uma placa, com armadura treliçada, conforme ABNT NBR 14862:2002, parcialmente englobada pelo concreto da vigota. Quando necessário pode apresentar armadura passiva inferior complementar totalmente englobada pelo concreto da nervura, estes tipos de nervuras são utilizados para compor lajes treliçadas (LT).

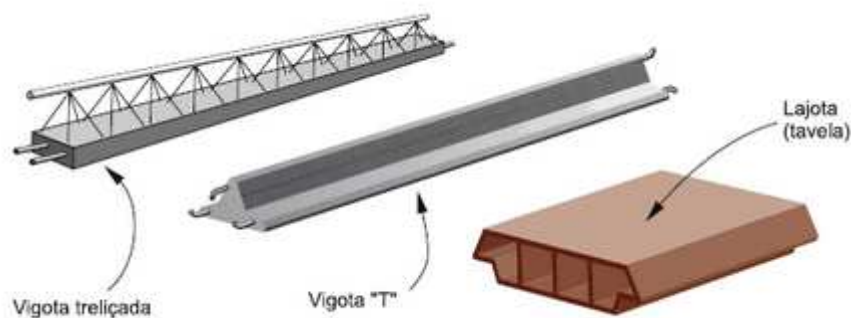


Figura 1: Trilhos e lajotas utilizados para lajes.
Fonte: www.ebah.com.br.

No presente estudo, serão abordadas somente as lajes utilizadas para compor lajes treliçadas (LT) material de utilização expressiva em obras da cidade de Varginha, sul de Minas Gerais.

A ABNT NBR 6118:2014, descreve as lajes como sendo placas, e as placas como “elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais a seu plano”.

As lajes treliçadas podem ser tratadas como estruturas monolíticas, devido à grande solidarização da armadura com o concreto executado em obra. A princípio, estas lajes têm o mesmo funcionamento estrutural de uma laje projetada de forma convencional, mais conhecida como laje maciça, sendo estes elementos pré-moldados responsáveis pela racionalização na execução, proporcionando a obra rigidez e economia (DROPPA Jr. 1999).

As vigotas treliçadas são formadas por base de concreto com espessura variável entre 2,5cm e 3,0cm e largura entre 12cm e 13cm, a treliça é constituída por aço CA60, sendo dois fios de aço paralelo na região inferior (banzo inferior), um fio de aço no topo (banzo superior), interligados por eletrofusão a dois fios de aço diagonais (sinusóides), conforme figura 2. (SILVA, 2005).

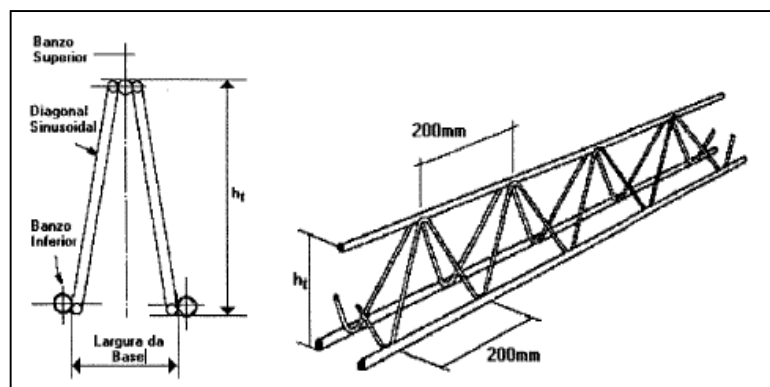


Figura 2: Modelo esquemático de treliça eletrossoldada.
Fonte: (CAIXETA, 1998).

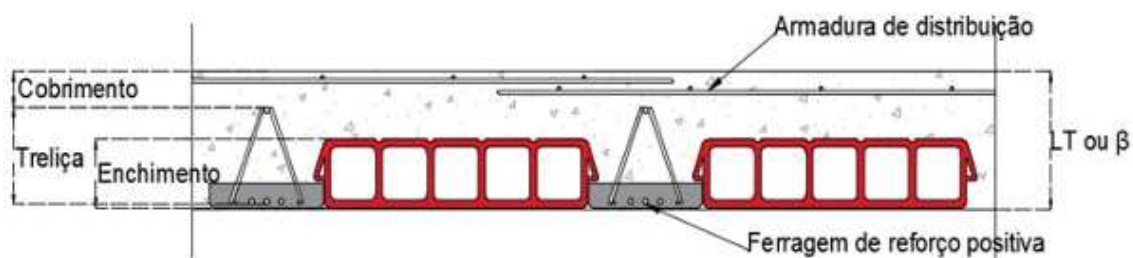


Figura 3: Modelo esquemático de laje treliça.
Fonte: lajesreal.com.

2.2 Vantagens.

De acordo com Muniz, C.E (1991) e Droppa Jr. A. (1999), algumas das principais vantagens das lajes nervuradas treliçadas são:

- Redução significativa de fôrmas;
- Durante a fase de cura da laje, pode-se ocorrer a redução de escoramento;
- Regularização inferior da laje com camadas mais finas, devido ao bom acabamento das mesmas;
- Instalações embutidas na capa da laje;
- Peso consideravelmente inferior às lajes maciças;
- Diminui mão de obra de armadores e carpinteiros nos canteiros de obra;
- Fácil manuseio no transporte, tanto horizontal quanto vertical;
- Oferece maior resistência ao cisalhamento devido à presença de armaduras nas diagonais das treliças.

2.3 Concreto:

O concreto que compõe as vigotas e o concreto moldado no local de acordo com a ABNT NBR 14859-1:2002 item 4.3.1, devem atender às especificações da ABNT NBR 6118: 2014, NBR 8953:2015 e a NBR 12655:2015 (versão corrigida 2015).

2.3.1 Resistência à compressão dos concretos utilizados:

A resistência à compressão geralmente é caracterizada pelo projeto, porém deve atender às especificações da NBR 6118: 2014, onde a partir da resistência característica (f_{ck}), definiram-se classes para os concretos, no item 8.2.1 da mesma, de acordo com a ABNT NBR 8953:2015, da seguinte maneira:

Grupo I são os concretos da classe C20 até C50, em se tratando de concretos estruturais, e o grupo II os concretos C55 até C90, sendo os números indicadores representantes da resistência característica à compressão especificada em MPa para a idade de 28 dias. Sendo caracterizado como resistência à compressão mínima para lajes o concreto C20.

Como descrito no Anexo A (efeito do tempo no concreto estrutural) da ABNT NBR 6118:2014, contido neste trabalho como anexo D, que as condições que constam no mesmo atendem somente para análise de concretos do grupo I, e que para grupo II deveriam ser efetuados ensaios, ou análise de normas internacionais, optou-se por utilizar para verificação somente os concretos do grupo I.

2.3.2 Resistência à tração:

Segundo ABNT NBR 6118:2014, item 8.2.5, a resistência à tração indireta $f_{ct,sp}$ e a resistência à tração na flexão $f_{ct,f}$ devem ser obtidos através de ensaios realizados segundo ABNT NBR 7222:2011. Neste mesmo item também define que a resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9 \cdot f_{ct,sp}$ ou $0,7f_{ct,f}$. Na falta de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, podendo ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das seguintes equações:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ct}, \quad \text{Eq.(2)}$$

- Para concretos da classe até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{Eq.(3)}$$

- Para concretos da classe C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1 + 0,11 f_{ck}) \quad \text{Eq.(4)}$$

2.3.3 Módulo de deformação tangente inicial do concreto:

Segundo ABNT NBR 6118:2014, item 8.2.8, o módulo de deformação tangente inicial do concreto, deve ser determinado pelo método de ensaio constante na ABNT NBR 8522:2008, e considerando o valor obtido aos 28 dias de idade. Quando não forem realizados ensaios, ele pode ser estimado por meio das seguintes expressões:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{- para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa.} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{- para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Para a cidade de Varginha-MG, de acordo com relatório fornecido pelo Grupo pedreira Santo Antônio, o material fornecido é o Gnaiss.

O módulo de deformação secante deve ser estabelecido pelo método de ensaio constante na ABNT NBR 8522:2008, ou também pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad \text{Eq.(7)}$$

$$\text{Sendo, } \alpha_i = \left(0,80 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1,0 \quad \text{Eq.(8)}$$

$$\text{Simplificando, } E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \leq E_{ci} \quad \text{Eq.(9)}$$

Através da ABNT NBR 6118:2014 permite-se, na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal, que seja adotado módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de deformação secante (E_{cs}), e que o módulo de elasticidade numa idade menor que 28 dias, deva ser avaliado com as seguintes expressões:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_c} \right]^{0,5} \cdot E_{ci} \text{ para concreto com } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa} \quad \text{Eq.(10)}$$

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_c} \right]^{0,3} \cdot E_{ci} \text{ para concreto com } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa} \quad \text{Eq.(11)}$$

Onde:

$E_{ci}(t)$ é a estimativa do módulo de elasticidade do concreto em uma idade entre 7 e 28 dias;

f_{ckj} é a resistência à compressão característica do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade em MPa.

2.4 Elementos de enchimento.

De acordo com ABNT NBR 14859-1:2002, os elementos de enchimento são componentes pré-fabricados com materiais inertes de diversas naturezas, podendo ser maciços ou vazados, utilizados entre os trilhos ou vigotas longitudinais das lajes nervuradas, com função de reduzir o consumo de concreto, o peso próprio da laje e

servir como forma para o concreto de enchimento, sendo desconsiderados nos cálculos de rigidez da laje.

As dimensões destes elementos são padronizadas e, compostos de materiais leves, suficientemente rígidos e que não produzam danos ao concreto e às armaduras.

Tabela 1: Dimensões padronizadas dos enchimentos para laje (cm)

Altura (h_e) nominal		7,0 (mínima); 8,0; 9,5; 11,5; 15,5; 19,5; 23,5; 28,5
Largura (b_e) nominal		25,0 (mínima); 30,0; 32,0; 37,0; 39,0; 40,0; 47,0; 50,0
Comprimento (c) nominal		20,0 (mínimo); 25,0
Abas de encaixe	(a_v)	3,0
	(a_h)	1,5

Fonte: ABNT NBR 14859-1: 2002

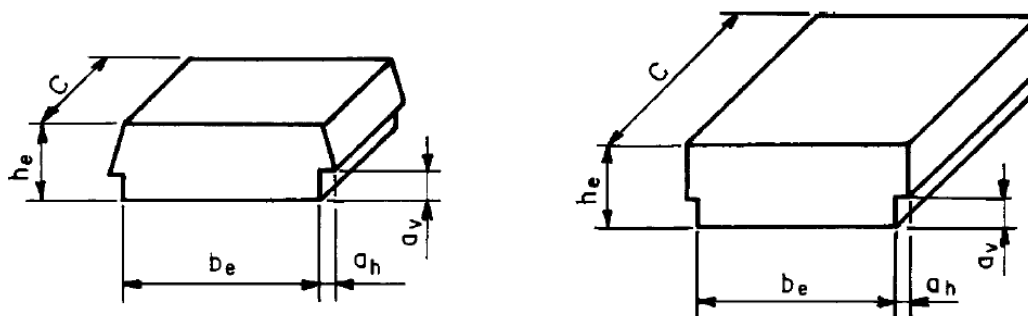


Figura 4: Elementos de enchimento.

Fonte: ABNT NBR 14859-1:2002

Estes elementos não são utilizados após o processo de cura do concreto, porém devem apresentar o mínimo possível de qualidade, pois são de grande importância no processo de montagem e concretagem da laje.

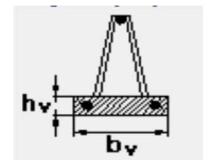
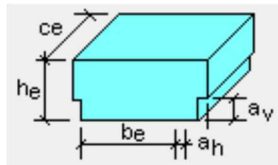
São responsáveis pela definição da geometria das lajes, suas dimensões definem a altura total da laje e o entreixo, conforme tabelas a seguir, além de seu peso interferir diretamente no peso próprio da laje, que conseqüentemente interfere nas deformações sofridas pelo elemento como um todo.

Os mais utilizados são os de cerâmica e EPS e, quando comparamos ambos podemos perceber que o EPS apresenta vantagens em relação ao cerâmico, pois é um elemento mais leve, permite recortes e modulações nas dimensões desejadas na obra facilitando o manuseio, não prejudica a cura do concreto por não absorver água com

facilidade, e apresenta bom conforto acústico, não propaga chamas em caso de incêndio, entre outras.

Tabela 2: Peso próprio de laje em EPS x Peso próprio de laje em cerâmica.

PESO ESPECÍFICO APARENTE - LAJES



Nº	DESCRIÇÃO	MASSA kg	DIMENSÕES (m)					TRILHO (m)			γ aparente laje KN/m ²
	TIPO ENCHIMENTO		be	he	av	ah	ce	capa	bv	hv	
1	EPS	0,272	0,25	0,06	0,03	0,02	1,20	0,04	0,13	0,03	1,44
2	CERÂMICO	1,956	0,25	0,06	0,03	0,02	0,20	0,04	0,13	0,03	1,73

Fonte: Autor.

Conforme visto na tabela anterior é possível notar que mantidas as características dimensionais da laje a alterando-se o elemento de enchimento é possível reduzir o peso próprio da laje em até 16,76% para o caso avaliado, obviamente que o resultado obtido não pode ser adotado para as diferentes lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas disponíveis, sendo necessária a avaliação de cada caso específico, porém mostra porque a utilização do EPS pode ser mais vantajosa.

Portanto, visando atender às novas tendências construtivas, serão abordadas neste trabalho somente lajes que utilizam do EPS como elemento de enchimento.

Tabela 3: Altura das lajes em função dos enchimentos (cm).

Altura do elemento de enchimento (h_e)	Altura total da laje (h)
7,0	10,0; 11,0; 12,0
8,0	11,0; 12,0; 13,0
10,0	14,0; 15,0
12,0	16,0; 17,0
16,0	20,0; 21,0
20,0	24,0; 25,0
24,0	29,0; 30,0
29,0	34,0; 35,0

Fonte: ABNT NBR 14859-1: 2002

Os valores da capa de concreto adotados para determinação das alturas das lajes acima são de no mínimo 3,0cm e, no caso da existência de tubulações a espessura da capa acima desta mesma tubulação deverá ser de no mínimo 2,0cm. Sendo importante destacar a ABNT NBR 6118:2014, item 13.2.4.2, que trata de lajes nervuradas, a indicação da espessura da mesa, quando não existir tubulações horizontais embutidas, devendo ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras e não menor que 4 cm. O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5cm quando existir tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10mm.

Tabela 4: Espessura mínima da capa para as alturas totais padronizadas (cm).

Altura total da laje	10	11	12	13	14	16	17	20	21	24	25	29	30	34
Espessura mínima da capa resistente	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5

Fonte: ABNT NBR 14859-1:2002

Os intereixos mínimos variam em função das vigotas ou trilhos e das dimensões do elemento de enchimento utilizados.

Tabela 5: Intereixos mínimos padronizados (cm).

Tipo de vigota	Intereixos mínimos padronizados (cm)
VC	33
VP	40
VT	42

Fonte: ABNT NBR 14859-1:2002

2.5 Aços utilizados:

Os aços para fins de utilização em lajes pré-moldadas devem atender ao disposto na tabela 4 da ABNT NBR 14859-1:2002 e especificada na tabela a seguir, sendo possível também a utilização de outras dimensões de aço, porém deve ser observado dispostos da referida norma.

Tabela 6: Aços que podem ser utilizados em lajes pré-fabricadas.

Produto	Norma	Diâmetro nominal mínimo mm	Diâmetro nominal máximo mm
Barras / fios de aço CA50 / CA60	NBR 7480	6,3 (CA50)	20,0 (CA50)
		4,2 (CA60)	10,0 (CA60)
Tela de aço eletrossoldada	NBR 7481	3,4	-
Fios de aço para protensão	NBR 7482	3,0	-
Cordoalhas de aço para protensão	NBR 7483	3 x 3,0	-
Armadura treliçada eletrossoldada	NBR 14862	Diagonal (sinusóide): 3,4 Banzo superior: 6,0 Banzo inferior: 4,2	Diagonal (sinusóide): 7,0 Banzo superior: 12,5 Banzo inferior: 12,5

Fonte: ABNT NBR 14859-1:2002

Os tipos de aços especificados acima estão apresentados de maneira genérica, sendo de responsabilidade do profissional de engenharia definir quantidades máximas e mínimas de aço, bem como armaduras construtivas, adicionais e de distribuição conforme prescrições normativas.

2.6 Tipos de cimento.

Na análise de fluência, conhecer o tipo de cimento é essencial, conforme tabela 4.2 no anexo 4 podemos ver que a classificação do cimento interfere na influência do mesmo na avaliação da fluência. A seguir serão descritas algumas características dos diversos tipos de cimento encontrados no mercado.

As definições a seguir não abordam características físico-químicas dos cimentos descritos, mas abordam quais as melhores formas de utilizar cada classificação, para as lajes não existem restrições quanto ao uso de qualquer tipo de cimento, o principal problema está na hora da execução, onde dependendo do cimento pode-se ganhar ou perder durabilidade da estrutura. A restrição do uso do cimento utilizado na execução das lajes geralmente está relacionada a classe de agressividade ambiental.

Alguns tipos de cimento:

- CP I – Cimento Portland comum;
- CP II-E – Cimento Portland composto com escória;
- CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana;
- CP II-F – Cimento Portland composto com fíler;
- CP III – Cimento Portland de alto-forno;
- CP IV – Cimento Portland Pozolânico;
- CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial.

2.6.1 Cimento Portland comum (CP-I).

O cimento CP-I é o tipo mais básico de cimento Portland, indicado para o uso em construções que não necessitam de condições especiais e não apresentem ambientes desfavoráveis como exposição a esgotos e água do mar por exemplo. A única adição presente no CP-I é o gesso, que atua como um retardador de pega, evitando a reação imediata da hidratação do cimento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 5732:1991.

2.6.2 Cimento Portland composto com escória (CP II-E).

O cimento CP II é composto, porque além da sua composição básica (clínquer + gesso), existe adição de outro material. O CP II-E, contém adição de escória granulada de alto-forno que dá a este tipo de cimento baixo calor de hidratação. O CP II-E, é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 11578:1991 – versão corrigida 1997.

2.6.3 Cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z).

O cimento CP II-Z contém em sua formulação adição de material pozolânico, o que proporciona a este cimento maior estanqueidade, tornando-se ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 11578:1991 – versão corrigida 1997.

2.6.4 Cimento Portland composto com filler (CP II-F).

O cimento CP II-F contém material carbonático. Este tipo de cimento é recomendado para estruturas em concreto armado e até mesmo para preparação de argamassas de assentamento e revestimento, porém não é indicado para aplicação em meios muito agressivos. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 11578:1991 – versão corrigida 1997.

2.6.5 Cimento Portland de alto-forno (CP III).

O cimento Portland de alto-forno contém adição de escória, que lhe proporciona propriedades como: baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividades ambientais mais acentuadas como (barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, entre outros), como também é indicado para aplicação geral em estruturas de concreto armado ou protendido

de natureza e agressividade ambiental mais simples. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 5735:1991.

2.6.6 Cimento Portland Pozolânico (CP IV).

O cimento Portland Pozolânico contém adição de pozolana. A pozolana propicia a este cimento uma alta impermeabilidade e conseqüentemente maior durabilidade. O concreto confeccionado com o CP IV apresenta resistência mecânica à compressão superior ao concreto de cimento Portland comum quando comparado em longo prazo. É especialmente indicado para obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 5736:1991 - versão corrigida 1999.

2.6.7 Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

O CP V-ARI, muito parecido com o CP-I, não contém adições. O que o diferencia do CP-I é o processo de dosagem e produção do clínquer. O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila quando comparado aos demais tipos de cimento, além de ser feito com moagem mais fina. É recomendado o seu uso, em obras onde seja necessário a desforma rápida de peças de concreto armado. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 5733:1991.

2.7 Critérios de cálculo.

Segundo Santine, C.R. (2005 apud SANTOS, 1983), pode se dizer que uma estrutura oferece segurança quando ao longo da vida útil para a qual foi projetado, possuir condições de suportar todas as ações, com as intensidades e combinações mais desfavoráveis de atuação possível, sem atingir um estado limite, imediato ou em longo prazo, e ainda, em condições não precárias de funcionalidade.

Ações são consideradas como as causas que provocam tensões, como por exemplo: esforços externos, temperatura, retração, deformação lenta, recalque de apoio, entre outras.

Para uma estrutura chegar ao estado limite último ela perde a estabilidade ou, em um de seus pontos, um dos materiais que a compõem atinge a tensão de ruptura ou uma deformação excessiva.

Portanto, os conceitos de segurança se tornam bastante abrangentes, por exemplo, não são aceitáveis estruturas com vibrações ou deformações excessivas, ainda que sem perigo de colapso; são também inaceitáveis estruturas com aberturas excessivas de fissuras, mesmo não havendo perigo imediato de corrosão do aço.

Ainda, segundo Santine, C.R. (2005 apud SANTOS, 1983), a definição de segurança, embora ampla, é meramente qualitativa. A dificuldade está em quantificá-la. Uma segurança exagerada tem em contrapartida o inconveniente sério de tornar a estrutura antieconômica. Principalmente com o uso do conceito probabilístico de segurança como método de quantificá-la, que se baseia na ideia de que nenhuma estrutura pode ter segurança durante toda sua vida útil, isto é, por maiores que sejam os cuidados tomados, existe sempre a probabilidade de insucesso. O risco só pode ser minimizado, nunca anulado; e a minimização a ser perseguida será tanto mais rigorosa quanto maior for à responsabilidade e interesses humanos e econômicos envolvidos.

Para se garantir a segurança de uma estrutura como um todo ou de cada uma de suas partes, em relação aos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), é necessário cumprir três etapas primordiais, são elas: dimensionamento, verificação e detalhamento.

Em relação aos ELU, além de se procurar garantir a segurança adequada, ou seja, probabilidade pequena de ruína é necessária garantir uma boa ductilidade, de forma que em caso de uma eventual ruína, a mesma ocorra de forma avisada, alertando os usuários.

Na verificação de segurança em relação aos ELS, devem ser satisfeitas também, expressões analíticas de segurança e de processos construtivos. Os modelos usados nesta verificação de ELS são diferentes daqueles usados nos ELU e serão apresentados durante o desenvolvimento deste trabalho.

2.8 Ações a serem consideradas.

De acordo com ABNT NBR 6118:2014 na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos

para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados-limites últimos e os de serviço.

As ações a considerar classificam-se, de acordo com a ABNT NBR 8681:2003 (versão corrigida 2004), em permanentes, variáveis e excepcionais e para cada tipo de obra devem ser avaliadas as características envolvidas.

Resumindo os dados a seguir descritos, podemos dizer que as ações permanentes estão ligadas ao peso próprio, retração, protensão, fluência e recalque e as ações variáveis relacionadas a cargas acidentais de uso, cargas verticais, vento e temperatura.

2.8.1 Ações permanentes.

Ações permanentes segundo ABNT NBR 6118:2014, item 11.3, são as ações que atuam com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção, sendo as que devem ser consideradas com seus valores representativos mais desfavoráveis para a segurança. Por exemplo, podemos citar o peso próprio da estrutura, instalações permanentes, pesos de elementos construtivos, entre outros.

Vale ressaltar que para avaliação destas cargas devem-se utilizar as massas específicas dos materiais de construção correntes, ou avaliar com base nos valores indicados na ABNT NBR 6120:1980 (versão corrigida 2000).

Outras ações que podem ser consideradas permanentes são as ações oriundas de deformações que ocorrem devido à fluência e retração do concreto, por exemplo, imperfeições geométricas causadas pela execução incorreta e a própria protensão (quando utilizada).

2.8.2 Ações variáveis.

Pela ABNT NBR 6118:2014, ela se divide em ações variáveis diretas e indiretas, conforme a seguir.

2.8.2.1 Ações variáveis diretas.

São constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da água, devendo-se respeitar as prescrições feitas por normas brasileiras específicas.

As cargas acidentais correspondem normalmente a:

- Cargas verticais de uso da construção (pessoas, mobiliário, veículos, materiais depositados no local, etc.);
- Cargas móveis, considerando o impacto vertical;
- Impacto lateral;
- Força longitudinal de frenagem ou aceleração;
- Força centrífuga.

Essas cargas devem ser dispostas nas posições mais desfavoráveis para o elemento estudado, exceto quando utilizadas as simplificações permitidas em norma.

2.8.2.2 Ações variáveis indiretas.

Segundo ABNT NBR 6118:2014 item 11.4.2, estas ações são as ações ocasionadas por variações de temperatura e ações dinâmicas exercidas na estrutura.

A variação da temperatura da estrutura, causada globalmente pela variação da temperatura da atmosfera e pela insolação direta, é considerada uniforme. Ela depende do local de implantação da construção e das dimensões dos elementos estruturais que a compõem.

2.8.3 Ações excepcionais.

São ações que não podem ser controladas por outros meios, ou seja, são ações excepcionais com os valores definidos, em cada caso particular, por normas brasileiras específicas.

2.9 Valores de cálculo e coeficientes de ponderação.

Para atender às necessidades humanas com segurança, aceitabilidade sensorial e visual, de maneira durável e também suprir possíveis deficiências de execução e qualidade dos materiais utilizados nas estruturas faz-se necessário utilizar alguns coeficientes de cálculo em cada caso estudado pelo engenheiro projetista.

2.9.1 Coeficientes de ponderação para o estado limite último.

De acordo com ABNT NBR 6118:2014, os valores de cálculo f_d das ações são obtidos através da majoração pelo coeficiente de ponderação γ_f definidos no item 11.7 da mesma. O coeficiente γ_f é obtido pelo produto de três variáveis, são elas:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad \text{Eq.(12)}$$

Os valores dos coeficientes apresentam-se nas tabelas 7 e 8, respectivamente:

Tabela 7: Tabela do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$.

Combinações de ações	Ações							
	Permanente (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4*	1	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1	1,2	1	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1	1	0	1,2	0,9	0	0

Onde:

* Cargas permanentes de pequena variabilidade, como peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

D - Desfavorável; F – Favorável; G – Geral; T- Temperatura.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 8: Tabela do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f2}$.

Ações		γ_{f2}		
		Ψ_0	Ψ_1^*	Ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas, como é o caso de edifícios residenciais.	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas, como é o caso de edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens.	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.9.2 Coeficientes de ponderação para os estados limites de serviço.

Os coeficientes de ponderação das ações utilizados na avaliação dos estados limites de serviço são tomados igual a γ_{f2} , sendo que este coeficiente tem valor variável conforme a verificação desejada, sendo os valores dos fatores de redução Ψ_1 e Ψ_2 referentes às combinações de serviços presentes na tabela 8 citada anteriormente. Lembrando que:

$\gamma_{f2} - 1$ para combinações raras;

$\gamma_{f2} - \Psi_1$ para combinações frequentes;

$\gamma_{f2} - \Psi_2$ para combinações quase permanentes.

2.10 Durabilidade.

Segundo Carvalho, R.C.; Figueiredo filho, J.R. (2014), um dos principais fatores pela perda de qualidade e durabilidade das estruturas de concreto é a agressividade do meio ambiente, descritas conforme quadro a seguir.

Tabela 9: Classe de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	
1)	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos: salas, dormitórios, banheiros, cozinhas, áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.		
2)	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde chove raramente.		
3)	Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.		

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Após conhecer a classe de agressividade ambiental da estrutura analisada, podemos definir o cobrimento da armadura do elemento estrutural, a seguir são apresentados os dados contidos na ABNT NBR 6118:2014 para uso específico em lajes.

Tabela 10: Tabela de correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $c=10\text{mm}$ - resumida para uso em lajes.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (CAA) - tabela 8			
		I	II	II	IV ^a
		Cobrimento nominal em (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
a	Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes químicos e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.				
b	Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelo item 7.4.7.5 da ABNT NBR 6118:2014, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15\text{ mm}$.				

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.11 Fluência do concreto.

A fluência do concreto é ocasionada pelo aumento da deformação ao longo do tempo, devida à ação de cargas ou tensões permanentes. É separada em fluência básica e fluência por secagem.

A fluência básica é a que se desenvolve sem transferência de água entre o concreto e o meio ambiente em condições de elevada umidade em torno 100%.

A fluência por secagem é a que sofre transferência de água do concreto com meio externo. A umidade do ar é predominante neste tipo de fluência, pois quanto mais seco for ambiente, maior será seu coeficiente de fluência.

Na prática se considera a fluência total, que é a soma das fluências básicas e por secagem.

Vários fatores fazem com que concreto sofra fluência, entre eles podemos citar os tipos de materiais que o constitui e a dosagem do concreto, o tempo de cura, o fator água cimento (a/c), a composição química do cimento; pois a utilização de cimentos mais resistentes e de secagem mais rápidas ocasiona diminuição da fluência, as condições ambientais de umidade e de temperatura e a geometria do elemento.

2.12 Limites para as deformações.

A verificação quanto ao estado limite de serviço para estruturas em concreto armado se limitam ao ESL-W. Além disso, deve se verificar a flecha para a combinação quase permanente e a vibração por meio da limitação da flecha para a carga acidental. (FARIA, 2014).

Para atender aos limites de deformação excessiva são apresentados limites máximos pela ABNT NBR 6118:2014, estes limites estão descritos na tabela 11 resumidamente para o uso específico nas lajes estudadas neste trabalho, para outros tipos de análise ou condições devem ser verificadas demais limites constantes no item 13.3 da referida norma.

Tabela 11: Tabelas de deslocamentos limites - resumida para o uso em lajes.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamento visível em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contra flecha}^a$

a - Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada de contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $l/350$.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 12: Tabela de exigências de durabilidade relacionada à fissuração e à proteção da armadura em função da classe de agressividade ambiental - resumida para o uso em lajes.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Para atender à verificação do ELS-W serão adotados os limites contidos na tabela 12.

3. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.

Nos tópicos a seguir serão apresentados os materiais constituintes, as prescrições normativas e os métodos para a elaboração do dimensionamento de lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas unidirecionais de modo que se consiga familiarizar melhor com os parâmetros que serão considerados na hora da apresentação dos resultados.

3.1 Critérios para o cálculo da armadura Longitudinal.

Os métodos de cálculo de armadura longitudinal de lajes treliçadas que podem ser adotados pelos projetistas e, que auxiliam na determinação e verificação do estado limite de serviço são de grande importância para a correta avaliação das mesmas, sendo adotado neste trabalho para determinação do Estado limite último os critérios e métodos apresentados no anexo 1.

Os principais métodos de cálculo que podem ser utilizados são os de vigas isoladas, nervuras com mesa e grelha equivalente, este sem a consideração de fissuração do concreto, porém utilizando como método de correção para o Estado limite de serviço o modelo de BRANSON proposto pela ABNT NBR 6118:2014.

O método utilizado para o dimensionamento deste TCC é o de vigas isoladas, utilizando para o desenvolvimento dos cálculos o método adimensional para concretos até C50, (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014) conforme anexo 1.

Lembrando que de acordo com Carvalho, R.C. e Figueiredo Filho, J.R. (2014, p.52), para obras usuais e situações normais em geral, têm-se, para concreto e aço no estado limite último, os valores respectivos de resistência de cálculo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad \text{Eq.(13)}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad \text{Eq.(14)}$$

Segue tabela com verificação de área de aço mínima para seção “T” com linha neutra na alma.

A tabela presente na ABNT NBR 6118:2003 foi modificada e os valores para seção “T” deixaram de existir na atualização do ano de 2014, lembrando que a armadura

máxima não pode ser superior a 4% da área de concreto da seção transversal conforme ABNT NBR 6118:2014.

A verificação a seguir é feita para as características da seção pré-determinada, portanto com as considerações da ABNT NBR 6118:2014 deve-se verificar cada seção a ser utilizada.

Tabela 13: Características da seção utilizada para o cálculo $A_{s,min}$.

b_w (cm)	9,0	A (cm²)	235,00	Aço CA-60
h (cm)	11,0	y_{cg} (cm)	7,53	
b_f (cm)	43,0	I_z (cm⁴)	1881,43	$g_s = 1,15$
h_f (cm)	4,0	W_0 (cm³)	250,01	$g_c = 1,40$
d/h	0,82			

Fonte: Faria (2014), adaptada pelo autor.

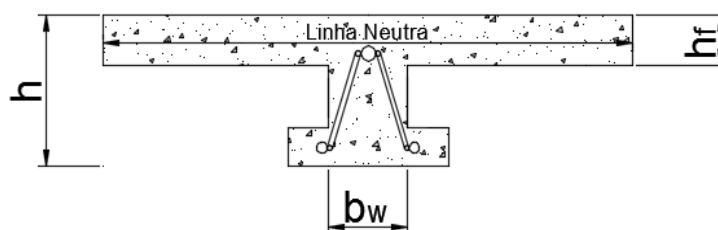


Figura 5: Seção "T" considerada para cálculo de valores mínimos.

Fonte: Autor.

Tabela 14: Tabela de armadura mínima para seção "T" – Linha Neutra na Mesa

f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
$r_{min} = A_s/A_c$ (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Fonte: Faria (2014), adaptada pelo autor.

A tabela 14 está de acordo com considerações da ABNT NBR 6118:2014, e adaptada para as classes de concreto que serão utilizadas neste trabalho. Diferente da ABNT NBR 6118:2003 que apresentava esta mesma tabela para seções "T" a ABNT NBR 6118:2014 possui apenas para seções retangulares, lembrando que neste trabalho foram adotados para os cálculos o aço CA60 e seção tipo "T" para verificação das lajes.

3.2 Critério para verificação do Estado limite de Serviço.

Este trabalho tem como objetivo reproduzir métodos de cálculo que podem ser adotados pelos projetistas e, que vão auxiliá-los na determinação e verificação do estado limite de serviço, para tanto serão utilizadas considerações do item 17.3.2.1.2, 17.3.2.1.3, 8.2.11 e anexo A da ABNT NBR 6118:2014 contidas nos anexos 2, 3 e 4 deste trabalho.

Além das informações contidas nestes anexos é importante a avaliação dos processos construtivos e determinação das ações consideradas durante a análise dos estados limites últimos de ruína e deformação.

3.2.1 Etapas construtivas das lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas.

A seguir serão descritas as etapas de execução de lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas utilizando algumas considerações de (CARVALHO E FIGUEIREDO, 2014).

Etapa 1: Após respaldo da alvenaria ou locação final das vigas para recebimento das lajes, é feito o nivelamento e acerto do piso e posterior execução do escoramento, normalmente composto por pontaletes e “guias mestres” (tabuas), as quais devem ser colocadas em espelho; nessa etapa, ainda deverão ser executadas as contraflechas, quando necessárias e respeitado os limites máximos de espaçamento entre escoras;

Segundo Florio, M.C. (2004, p.47) para as vigotas do tipo treliçada, um banzo superior não exatamente retilíneo reduz a resistência dos trilhos durante a etapa de escoramento, portanto, se torna muito importante que a desforma dos trilhos dentro da indústria de pré-moldados e o transporte das vigotas até o local de utilização seja feito com cuidado e evite-se ao máximo o amassamento ou encurvamento do banzo superior durante a montagem.

Em ensaios realizados pelo Grupo de Estudos em Sistemas Construtivos em Concreto da UFSCar, para as vigotas treliçadas, as rupturas ocorreram sempre por instabilidade do banzo superior e quando se usou carga distribuída, ocorriam de forma brusca, sem que houvesse grande deformação que pudesse alertar para o problema.

Os mesmos ensaios citados anteriormente mostraram que o espaçamento entre escoras que pode ser usado para a laje tipo trilho com a condição determinante de ruína é de 2,15m para as cargas usuais e para a condição determinante do estado de deformação excessiva é de 1,5m.

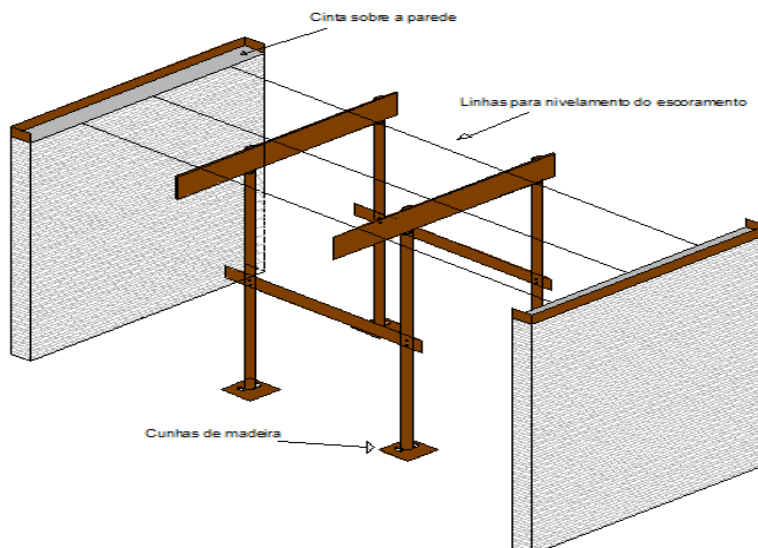


Figura 6: Montagem do escoramento.
Fonte: (REIS,2014)

Etapa 2: Colocação das vigotas, posicionando lajotas (ou outro material de enchimento) nas extremidades como gabarito do espaçamento entre vigotas; são duas situações possíveis:

Apoio das vigotas sobre a estrutura de concreto armado: geralmente utilizados em edifícios que utilizam o concreto armado como estrutura principal, as vigotas devem apoiar-se sobre as fôrmas, após estas estarem alinhadas, niveladas, escoradas e com a armadura colocada e posicionada; devem penetrar nos apoios pelo menos 5cm e no máximo igual a metade da largura da viga; a concretagem das vigas deve ser simultânea à execução da capa;

Apoio das vigotas diretamente sobre alvenaria: geralmente utilizado em edifícios residenciais térreos, neste caso, deve-se respaldar a alvenaria e distribuir uma ferragem sobre ela para se formar uma cinta; as vigotas devem penetrar nos apoios de modo semelhante ao anterior, e a concretagem da cinta também deve ser feita de forma simultânea à da capa.

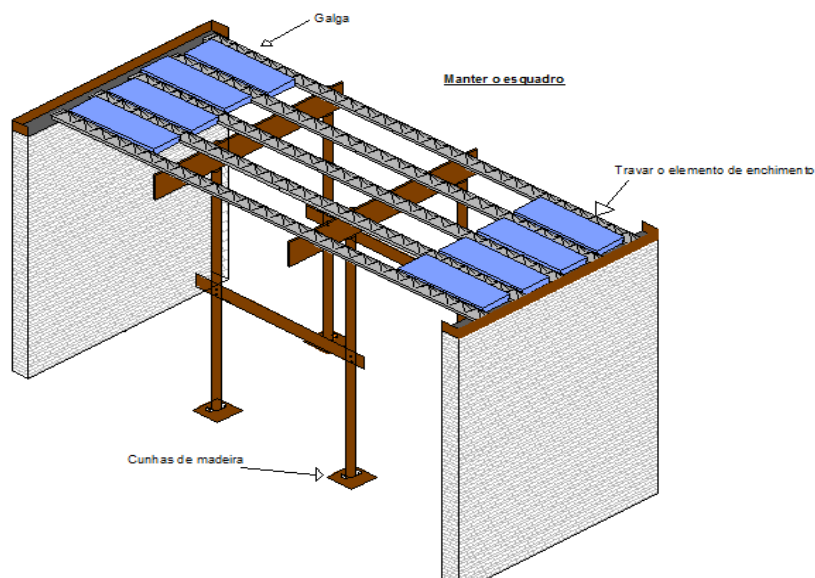


Figura 7: Posicionamento e montagem das vigotas e enchimento.
Fonte: (REIS,2014)

Etapa 3: colocação dos elementos de enchimento, passagem de tubulação elétrica e demais componentes, lembrando que os enchimentos paralelos às paredes podem ser apoiados sobre as mesmas, facilitando a passagens de descida das tubulações elétricas e hidráulicas quando houver;

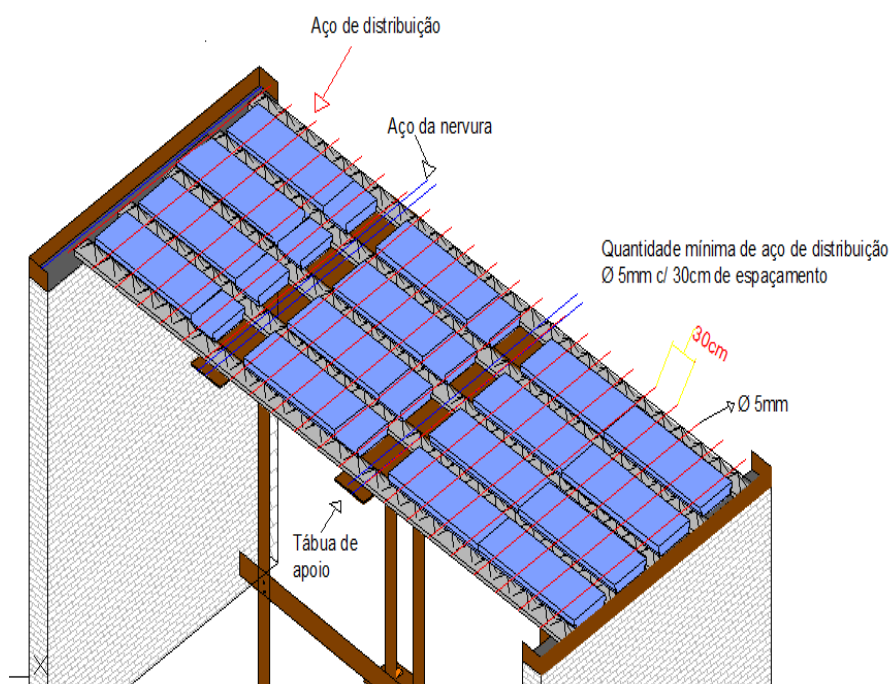


Figura 8: Colocação de armadura de distribuição e elementos de enchimento.
Fonte: (REIS,2014)

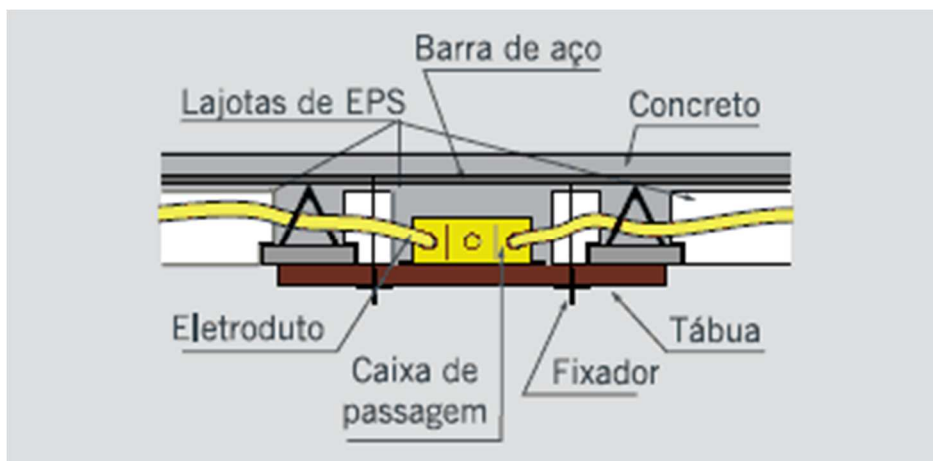


Figura 9: Tubulação e caixa de passagem elétrica em lajes.
Fonte: www.fazfacil.com.br

Etapa 4: Execução das armaduras de distribuição, armadura de borda e construtiva, de acordo com o projeto fornecido pelo projetista e/ou fabricante e especificados em norma.

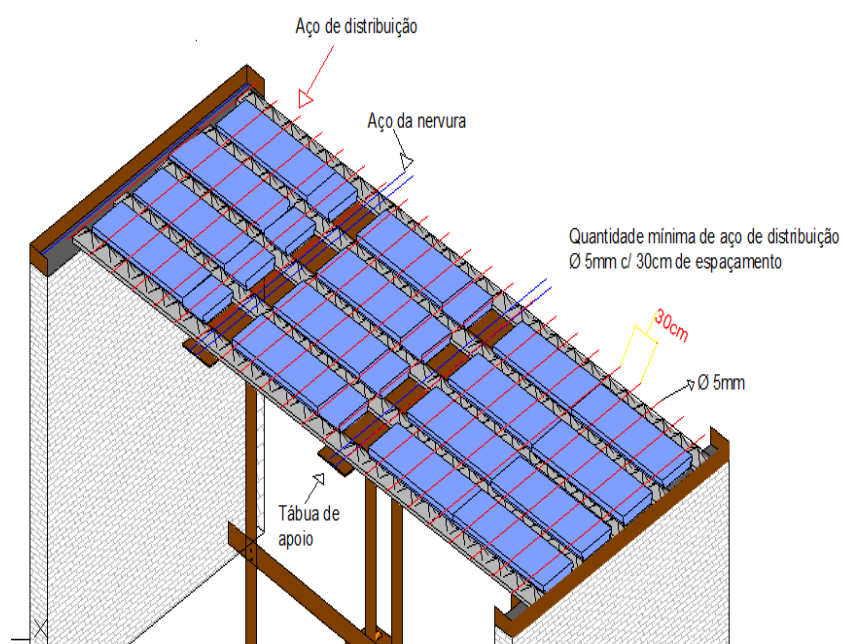


Figura 10: Armadura de distribuição.
Fonte: (REIS,2014)

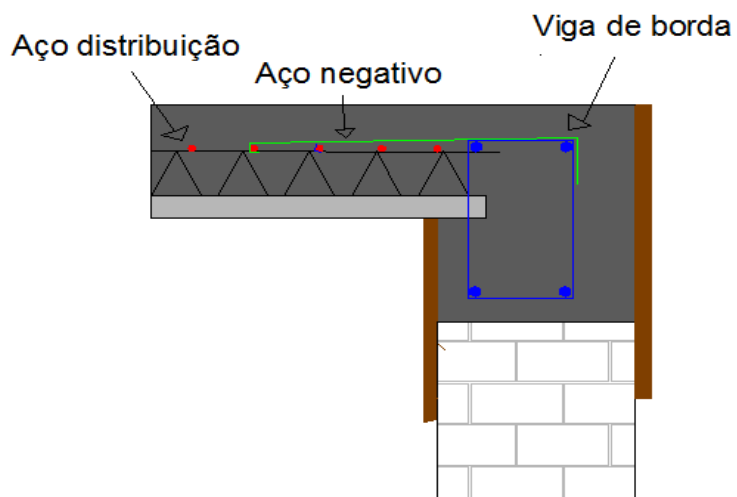


Figura 11: Armadura de borda.
Fonte: (REIS,2014)

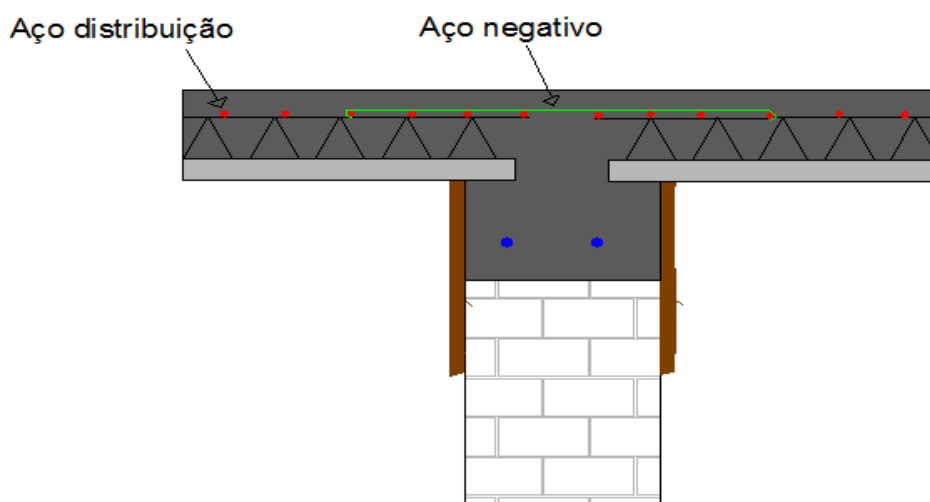


Figura 12: Armadura negativa.
Fonte: (REIS,2014)

Etapa 5: Limpeza da laje para preparo do recebimento do concreto a ser lançado sobre os trilhos e preenchimento da capa, esta limpeza é muito importante para garantir a correta aderência entre o concreto do trilho pré-moldado e o concreto executado in-loco.

Etapa 6: Concretagem da capa de concreto:

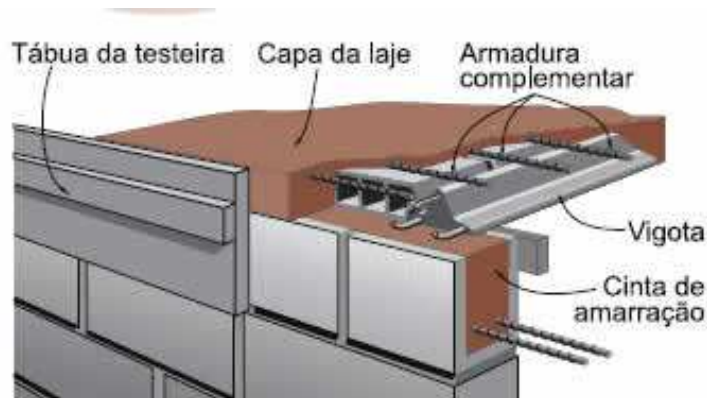


Figura 13: Concretagem da laje.
Fonte: www.fazfacil.com.br

Etapa 7: Retirada do escoramento, deve ocorrer preferencialmente aos 28 dias, porém pode ocorrer em prazos menores desde que verificado a resistência do concreto na data da retirada conforme a expressão dada pela ABNT NBR 6118:2014, item 12.3.3:

- Quando a verificação se faz em data j igual ou superior a 28 dias de idade:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{Eq.(15)}$$

Neste caso, o controle da resistência do concreto à compressão do concreto deve ser feito aos 28 dias, de maneira que confirme o valor de f_{ck} adotado no projeto.

- Quando a verificação se faz em data j inferior a 28 dias de idade:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck,j}}{\gamma_c} \approx \beta_1 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{Eq.(16)}$$

Em que β_1 é a relação $\frac{f_{ck,j}}{f_{ck}}$, que pode ser obtida expressão:

$$\beta_1 = \exp \{ s [1 - (28/t)^{1/2}] \} \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde:

$s = 0,38$ para concreto de cimento CPIII e IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CPI e II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI;

t é a idade efetiva do concreto, expressa em dias.

Essa verificação deve ser feita aos t dias, para as cargas aplicadas até a mesma data t dias.

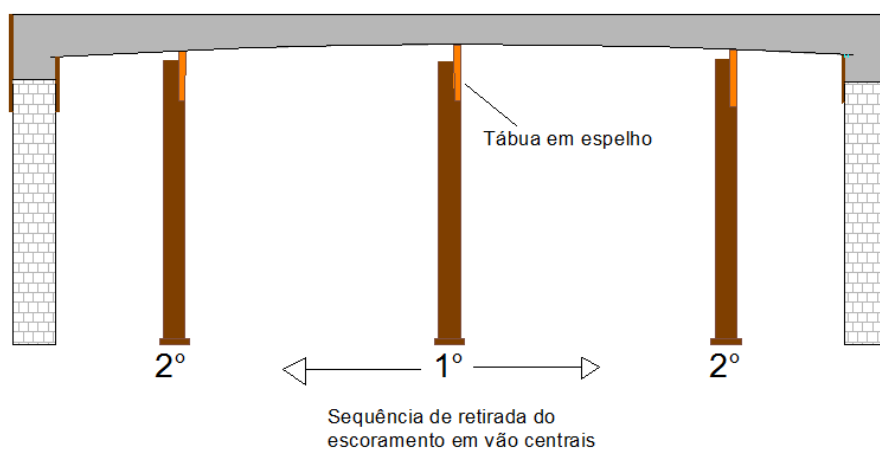


Figura 14: Retirada do escoramento.
Fonte: (REIS,2014)

A respeito das etapas construtivas, deve-se avaliar cada obra de maneira específica, nem sempre as etapas descritas anteriormente serão fielmente executadas.

As etapas construtivas são de essencial importância para se determinar as deformações estruturais em lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas, onde os limites estabelecidos para deformações não são atendidos.

As estruturas em que todas as fases construtivas não tenham sua segurança garantida pela verificação da obra pronta devem ter incluídas no projeto as verificações das fases construtivas mais significativas e sua influência na fase final.

3.3 Critério para verificação do Estado limite de fissuração.

A ABNT NBR 6118:2014 n item 17.3.3 estabelece os critérios de verificação

dos limites de abertura de fissuras, estabelecidos na tabela 11 deste material, para peças lineares, analisadas isoladamente, e submetidas à condição de ações frequente para edifícios residenciais:

$$F_{d,\text{serviço}} = \sum F_{gk} + 0,4 \cdot F_{qk} \quad \text{Eq.(18)}$$

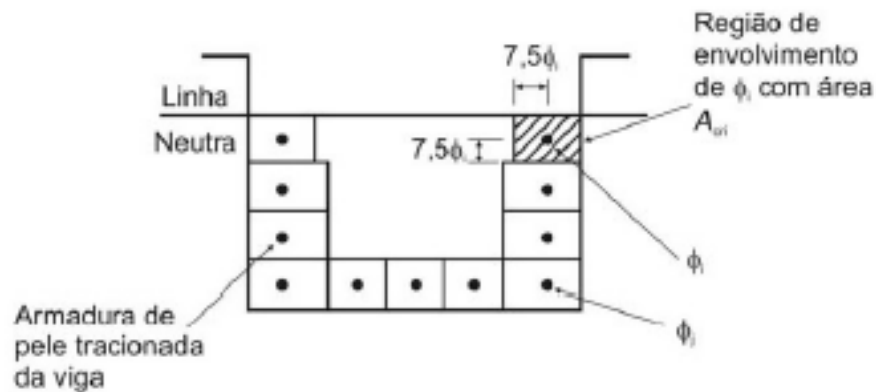


Figura 15: Concreto de envolvimento da armadura.
Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

O tamanho da abertura de fissuras (w) é determinado pelas seguintes expressões:

W = menor entre:

$$\left\{ \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \eta_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ct,m}} \right. \quad \text{Eq.(19)}$$

$$\left\{ \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \eta_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right. \quad \text{Eq.(20)}$$

A_{cri} = área da região de envolvimento protegida pela barra ϕ_i ;

E_{si} = módulo de elasticidade do aço da barra ϕ_i considerada;

ϕ_i = diâmetro da barra que protege a região considerada;

ρ_{ri} = taxa de armadura passiva ou ativa aderente em relação a área da região de envolvimento (A_{cri});

η_i = coeficiente de conformação superficial da armadura considerada;

O coeficiente de conformação pode ter os seguintes valores:

1,0 para barras lisas (CA25);

1,4 para barras entalhadas (CA60);

2,25 para barras nervuradas de alta aderência (CA50).

$f_{ct, m}$ = resistência média do concreto à tração (conforme seção 2.3.2 deste material);

σ_{si} = tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no estágio II.

3.4 Critérios para verificação ao cisalhamento.

As recomendações para este item encontram-se no item 19.4.1 da ABNT NBR 6118:2014, lajes sem armadura para força cortante e, permite a não utilização de armadura para resistir aos esforços cortantes no elemento estrutural, desde que os requisitos de ancoragem conforme item 9.4.5 da referida norma sejam satisfeitos, ou seja:

$$V_{sd} \leq V_{rd1} = [\tau_{Rd1} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq.(21)}$$

Onde:

$$\tau_{Rd1} = 0,25 \cdot \left(\frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Eq.(22)}$$

$$k = (1,6 - d) \geq 1 \quad \text{Eq.(23)}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \quad \text{Eq.(24)}$$

É importante citar que as lajes conseguem resistir bem ao esforço cortante, fazendo com que este tipo de efeito não seja crítico, sendo geralmente o concreto o responsável por absorver tais esforços.

3.5 Condições de apoio.

Devido às condições de execução não se pode afirmar que existe engaste perfeito, muito menos apoio perfeito, o que existe são situações que se aproximam de apoios e engastes.

3.5.1 Condições de apoio - simples.

Apoio simples é resumidamente definido quando existe ausência de momento fletor, mas não se pode afirmar que isso ocorre, a literatura recomenda trabalhar com momento no apoio de no mínimo $\frac{1}{4}$ do máximo momento positivo. Esta situação se faz presente quando a laje é posicionada sobre as fôrmas das vigas ou cinta de amarração da alvenaria, principalmente nas bordas da edificação onde não existe a condição de continuidade.

Se as vigotas forem apoiadas diretamente sobre paredes de alvenaria, suas armaduras devem estar interligadas por intermédio de uma cinta de amarração. Elas devem penetrar nos apoios pelo menos 5 cm e no máximo igual à metade da largura da viga. A concretagem das vigas deve ser simultânea a execução da capa (CARVALHO E FIGUEIREDO, 2007).

As ancoragens das armaduras das vigotas devem seguir as determinações da ABNT NBR 6118:2014, em casos de lajes com rebaixos, as vigotas devem estar apoiadas sobre as armaduras positivas das vigas e em todos os casos se faz a necessidade de colocar armaduras negativas nas bordas para evitar fissuras nas extremidades das lajes. (GASPAR, 1997).

3.5.2 Condições de apoio - engaste.

O engaste se caracteriza por presença de momento negativo nos apoios. Para que o engaste seja realmente consolidado as nervuras devem ser ligadas as vigas de três formas: a primeira com penetração das nervuras na viga de apoio, a segunda pela penetração da armadura inferior das nervuras dentro da viga de apoio e a terceira pela colocação de armadura adicional. É necessário também garantir os comprimentos

necessários para ancoragem suportar um esforço de tração igual ao esforço cortante para os apoios externos e metade desse valor para apoios internos.

O engaste também está ligado à presença de cargas verticais nos apoios, (exemplo: paredes). Quando é executada parede sobre os apoios das lajes estas influenciam no engastamento da mesma.

Segundo Kataoka, L.T. (2004), a existência de paredes sobre os apoios pode evitar o giro dos mesmos, a contribuição da armadura do banzo superior da treliça combate o momento negativo sobre os apoios extremos e a existência e funcionamento do contrapiso de regularização atuam como parte da seção transversal ajudando a absorver cargas de utilização da estrutura.

3.6 Perímetro da seção em contato com a atmosfera.

Quando realizamos os cálculos para determinar os coeficientes de fluência de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 devemos ter conhecimento, além dos dados utilizados para dimensionamento no ELU, basicamente de dados como temperatura, umidade relativa do ar, tipo de cimento, Slump do concreto, área da seção de concreto e perímetro em contato com a atmosfera. Este último é verificado de acordo com as etapas de execução do elemento ou de maneira simplificada em uma única etapa.

Uma maneira de demonstrar as considerações está evidenciada a seguir, sendo este um tema muito controverso dentre os engenheiros, a seguir apresenta-se algumas considerações adotadas.

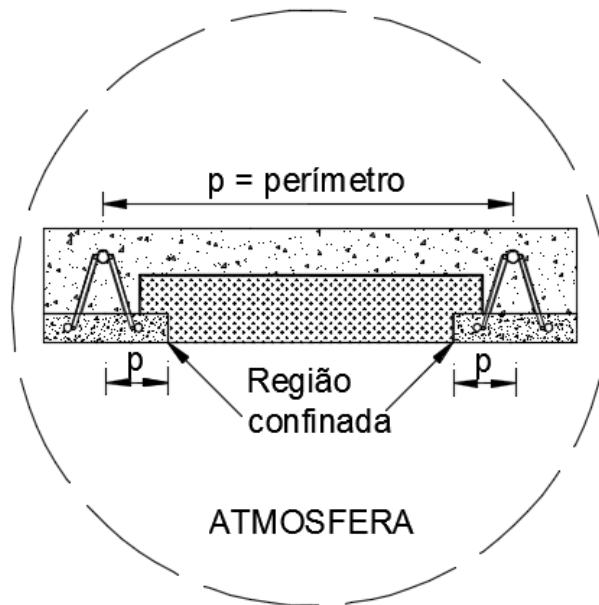


Figura 16: Seção após concretagem – Considerações do perímetro em contato com atmosfera.
Fonte: Autor.

O perímetro em contato com o ar é dado pelo somatório de “p”, sendo que na etapa após execução da concretagem da laje, considera-se geralmente a largura b_f mais b_w .

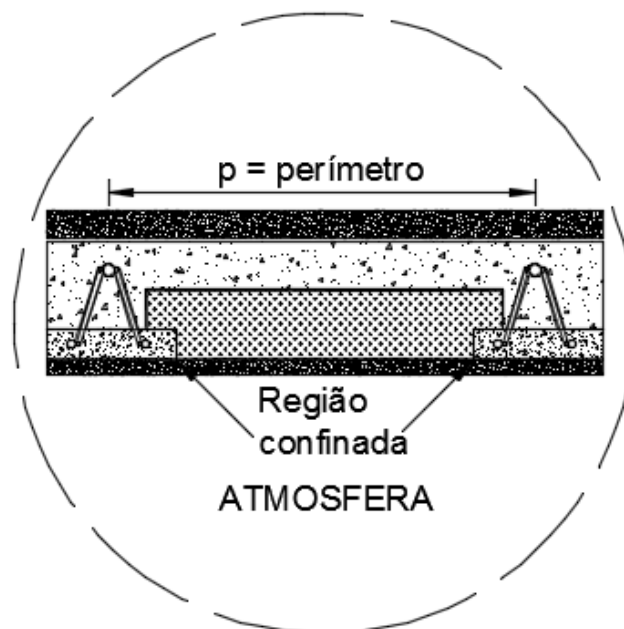


Figura 17: Seção após execução do contrapiso e revestimento inferior da laje - Considerações do perímetro em contato com atmosfera.
Fonte: Autor.

Na segunda etapa pode-se considerar como perímetro em contato com o ar a largura colaborante b_f , devido ao fato de considerar que a camada de regularização superior atua como colaborante à resistência da seção. Caso não haja consideração da colaboração do revestimento com a inércia da seção, pode-se determinar que não há contato com o ar, sendo o coeficiente de fluência reduzido, pois quanto mais próximo de “0” o perímetro em contato com o ar, se mantidos as demais variáveis, teremos o coeficiente de fluência mais próximo do mínimo.

Deve-se atentar para as etapas construtivas, por exemplo, neste material considera-se que o revestimento inferior é executado simultaneamente ao superior, caso contrário, deve ser feita análise pelo engenheiro da situação em que se encontra.

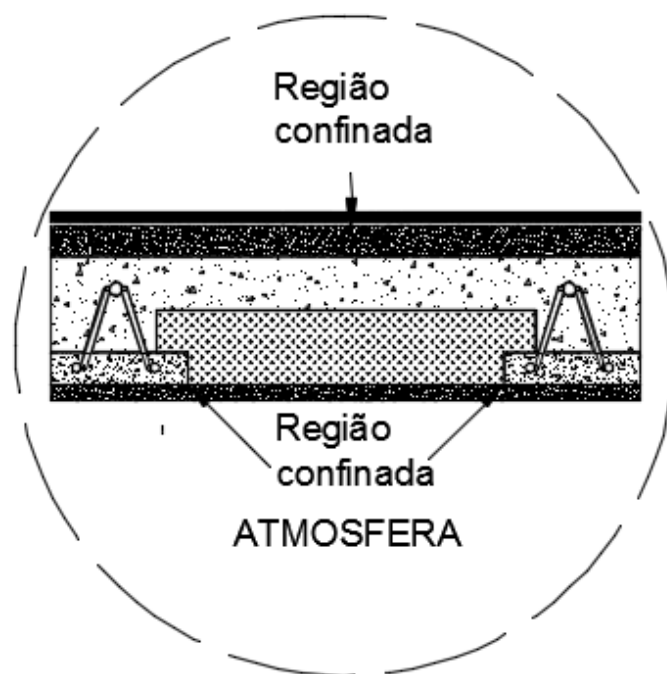


Figura 18: Seção após execução do revestimento superior - Considerações do perímetro em contato com atmosfera.

Fonte: Autor.

Nesta etapa foi considerado o valor mais próximo de “0” como perímetro em contato com o ar, portanto, teremos o coeficiente de fluência mais próximo do mínimo.

3.7 Cronogramas de execução de obras - lajes.

Quando falamos em execução de obras, entramos em um tema muito complexo, pois o mesmo depende desde condições climáticas, disponibilidade de mão de obra,

disponibilidade de materiais, tipo de processo executivo, entre outras variáveis, tornando possível somente estipular um cronograma que pode ou não ser alterado durante o decorrer da construção da obra.

A elaboração de um cronograma físico-financeiro é o ponto de partida para elaboração das etapas construtivas, uma vez que velocidade da obra vai depender da disponibilidade de recursos que se tem para empregar no empreendimento.

Quando levamos em conta as cargas atuantes nas estruturas aplicadas de maneira simultânea em uma mesma data, estamos agindo a favor da segurança, porém podemos em contrapartida realizar dimensionamentos incoerentes com a realidade da estrutura.

A disponibilidade de mão de obra e recursos permitem que uma obra seja executada com diferentes prazos, para o projeto proposto neste trabalho será adotado 4 cronogramas construtivos, sendo basicamente definidos da seguinte maneira.

1º cronograma: prazo máximo para término da obra 3 meses;

2º cronograma: prazo máximo para término da obra 6 meses;

3º cronograma: prazo máximo para término da obra 9 meses;

3º cronograma: prazo máximo para término da obra 12 meses.

Segue cronogramas adotados para execução do estudo:

Tabela 15: Cronograma de execução 1.

Etapa	Período (dias)	Ações	Perímetro	Observação	Carregamento (kN/m)	Seção
1	0-15	-	-	Montagem, escoramento e concretagem da laje. (Neste período não há flecha considerada)	0,59	Simple
2	15 - ∞	$g_{11}+g_{12}$	56	Retirada de escoramento	0,59	Simple
3	45 - ∞	g_{21}	56	Após a execução das paredes sobre os apoios, proporcionando uma situação de semi-engaste nas vigotas de laje, e execução do contrapiso. (Regularização do nível Superior e reboco inferior)	0,15	Composta
4	75 - ∞	g_{22}	43	Execução do revestimento superior.	0,30	Composta
5	120 - ∞	q	0	Início da utilização de lajes. Sobrecarga de utilização	0,65	Composta

Fonte: o autor.

Tabela 16: Cronograma de execução 2.

Etapa	Período (dias)	Ações	Perímetro	Observação	Carregamento (kN/m)	Seção
1	0-28	-	-	Montagem, escoramento e concretagem da laje. (Neste período não há flecha considerada)	0,59	Simple
2	28 - ∞	$g_{11}+g_{12}$	56	Retirada de escoramento	0,59	Simple
3	90 - ∞	g_{21}	56	Após a execução das paredes sobre os apoios, proporcionando uma situação de semi-engaste nas vigotas de laje, e execução do contrapiso. (Regularização do nível Superior e reboco inferior)	0,15	Composta
4	120 - ∞	g_{22}	43	Execução do revestimento superior.	0,30	Composta
5	180 - ∞	q	0	Início da utilização de lajes. Sobrecarga de utilização	0,65	Composta

Fonte: o autor.

Tabela 17: Cronograma de execução 3.

Etapa	Período (dias)	Ações	Perímetro	Observação	Carregamento (kN/m)	Seção
1	0-45	-	-	Montagem, escoramento e concretagem da laje. (Neste período não há flecha considerada)	0,59	Simplex
2	45 - ∞	g ₁₁ +g ₁₂	56	Retirada de escoramento	0,59	Simplex
3	90 - ∞	g ₂₁	56	Após a execução das paredes sobre os apoios, proporcionando uma situação de semi-engaste nas vigotas de laje, e execução do contrapiso. (Regularização do nível Superior e reboco inferior)	0,15	Composta
4	180 - ∞	g ₂₂	43	Execução do revestimento superior.	0,30	Composta
5	270 - ∞	q	0	Início da utilização de lajes. Sobrecarga de utilização	0,65	Composta

Fonte: o autor.

Tabela 18: Cronograma de execução 4.

Etapa	Período (dias)	Ações	Perímetro	Observação	Carregamento (kN/m)	Seção
1	0-60	-	-	Montagem, escoramento e concretagem da laje. (Neste período não há flecha considerada)	0,59	Simplex
2	60 - ∞	g ₁₁ +g ₁₂	56	Retirada de escoramento	0,59	Simplex
3	120 - ∞	g ₂₁	56	Após a execução das paredes sobre os apoios, proporcionando uma situação de semi-engaste nas vigotas de laje, e execução do contrapiso. (Regularização do nível Superior e reboco inferior)	0,15	Composta
4	240 - ∞	g ₂₂	43	Execução do revestimento superior.	0,30	Composta
5	360 - ∞	q	0	Início da utilização de lajes. Sobrecarga de utilização	0,65	Composta

Fonte: o autor.

3.8 Temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Varginha-MG.

Para avaliação da fluência conforme anexo 3 e 4, faz-se necessário conhecer a umidade e a temperatura do ar do local onde a laje será executada.

As coletas de dados nas estações meteorológicas convencionais do INMET são realizadas nos horários de 12, 18 e 24 UTC. Algumas estações, contudo, têm observações em apenas dois horários, normalmente, 12 e 24 UTC.

Os valores diários X_{kij} utilizados nos cálculos pelo INMET, resultam dessas observações, conforme formulações contidas em seu próprio manual.

As temperaturas mínimas e máximas diárias são registradas em termômetros especiais (termômetro de mínima e termômetro de máxima) e lidas pelo observador, usualmente, nos horários de 12 UTC e 24 UTC, respectivamente. A temperatura média compensada, utilizada na publicação dos resultados junto ao BDMEP, é calculada pela fórmula:

$$T = (T_{\max, kij} + T_{\min, kij} + T_{12, kij} + 2T_{24, kij})/5 \quad \text{Eq.(25)}$$

Para o valor diário da umidade relativa do ar, o INMET utiliza, também, o valor de média compensada, dado por:

$$UR_{C, kij} = (UR_{12, kij} + UR_{18, kij} + 2UR_{24, kij})/4 \quad \text{Eq.(26)}$$

Para análise de temperatura e umidade media para a cidade de Varginha-MG, foram colhidas duas séries históricas de dados junto ao INMET, as séries utilizadas encontram-se no anexo “E” deste trabalho, sendo diagnosticado o inconveniente que a cidade estudada não possui dados históricos com mais de 30 anos junto à entidade, portanto foram adotados dados de duas cidades próximas (Machado-MG e Lavras-MG).

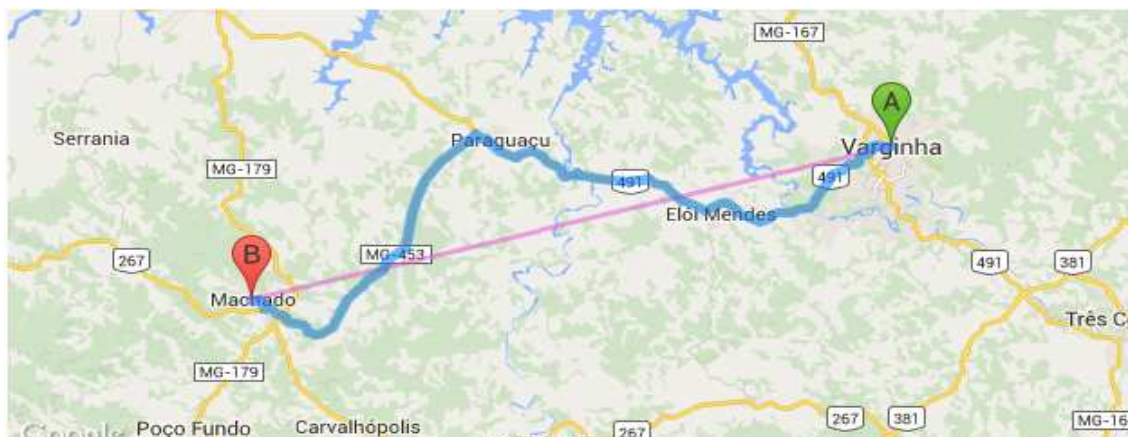


Figura 19: Distância entre varginha e Machado.

Fonte: www.distanciacidades.com

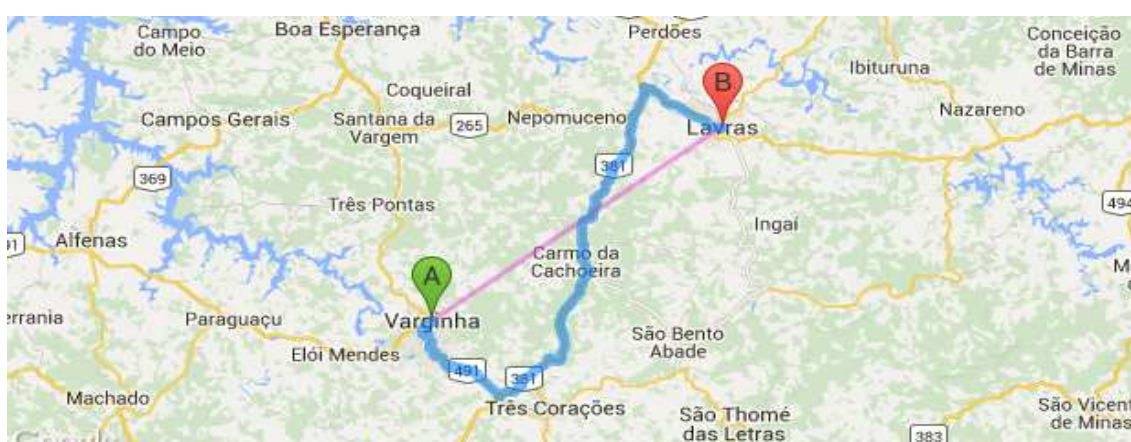


Figura 20: Distância entre Varginha e Lavras.

Fonte: www.distanciacidades.com

Tabela 19: Distância de Varginha em relação a Lavras e Machado.

DISTÂNCIA ENTRE CIDADES (km)	
MACHADO – MG	52,44
LAVRAS – MG	55,86

Fonte: www.distanciacidades.com, adaptado pelo autor.

A seguir serão apresentadas as médias de umidade relativa do ar para as duas cidades, de acordo com os dados obtidos foram levantadas as médias para cada estação do ano e comparadas com a média geral dos anos analisados.

Na determinação das estações para análise trimestral, como o Brasil está quase totalmente no hemisfério sul, a primavera inicia-se em setembro, o verão em dezembro, o outono em março e o inverno em junho.

Tabela 20: Umidade relativa do ar para a cidade de Lavras - MG.

UMIDADE RELATIVA DO AR EM (%) - LAVRAS – MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	78,19%	76,14%	68,42%	69,94%	73,17%
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	6,86% (+)	4,06% (+)	6,49% (-)	4,41% (-)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 21: Umidade relativa do ar para a cidade de Machado - MG.

UMIDADE RELATIVA DO AR EM (%) - MACHADO – MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	79,84%	78,68%	73,00%	71,64%	75,79%
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	5,34% (+)	3,81% (+)	3,68% (-)	5,48% (-)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 22: Umidade relativa média para as cidades de Lavras e Machado - MG.

MÉDIAS DE UMIDADE RELATIVA DO AR (%) - MACHADO E LAVRAS- MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	79,02%	77,41%	70,71%	70,79%	74,28%
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	6,38% (+)	4,21% (+)	4,81% (-)	4,70% (-)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 23: Temperatura média para a cidade de Lavras - MG.

TEMPERATURA MEDIA (°C) - LAVRAS – MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	22,39	20,24	17,43	20,86	20,23
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	10,68% (+)	0,05% (+)	13,84% (-)	3,11% (+)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 24: Temperatura média para a cidade de Machado - MG.

TEMPERATURA MÉDIA (°C) - MACHADO – MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	22,57	20,12	16,71	20,96	20,09
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	12,34% (+)	0,15% (+)	16,82% (-)	4,33% (+)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 25: Temperatura média para as cidades de Lavras e Machado - MG.

TEMPERATURA MÉDIA (°C) - MACHADO E LAVRAS - MG					
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	MÉDIA ANUAL
MÉDIA TRIMESTRAL	22,48	20,18	17,07	20,91	20,22
DESVIO DA MÉDIA ANUAL	11,18% (+)	0,99% (+)	15,58% (-)	3,41% (+)	

Fonte: Dados do INMET, adaptado pelo autor.

Considerando os dados obtidos neste levantamento serão utilizados os valores médios encontrados nas tabelas 22 e 25 respectivamente, lembrando que estes valores serão usuais principalmente para os modelos de cálculo presente nos anexos 3 e 4.

Com relação a umidade relativa do ar, observamos que as alterações médias não variam 6,38%, portanto é razoável adotar o valor médio anual, já que a alteração final no coeficiente de fluência é pequena.

Com relação à temperatura observamos que no verão teremos um valor médio 11,18% maior, se olharmos a favor da segurança podemos desprezar esta consideração e adotar o valor médio anual, já que o aumento de temperatura ocasiona a diminuição no coeficiente de fluência, desde que mantidas as demais variáveis. Porém vale salientar que ao determinar um cronograma de execução nesta estação do ano, cabe ao engenheiro adotar ou não tais valores e avaliar a retração (concreto protendido) que é prejudicada nesta situação, porém de maneira geral como pretende-se trabalhar com concreto armado e verificação da fluência será adotado o valor médio.

Ainda com relação à temperatura observa-se que no Inverno a temperatura reduz o que prejudica a fluência, sendo necessária avaliação do caso.

Considerando método do anexo 4, e dados dos itens 3 e 4 deste trabalho, segue verificação para temperatura de 20,22° (média anual) e 17,07° (inverno).

Tabela 26: Coeficiente de fluência para temperatura de 20,22° (média anual).

DADOS DE ENTRADA		Etapa única	
		D _{tef,i} (dias)	T _i (°C)
Temperatura Média (°C)		28	20,22
		0	0
		0	0
		0	0
f _{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		28	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - α = 1,0	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - α = 2,0	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - α = 3,0		
Umidade Relativa do Ar U _{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm ²)		235	
Perímetro em contato com ar (cm)		56	
COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DO CONCRETO			
φ(t,t₀) - Coeficiente de fluência entre os instantes t₀ e t		2,187	

Fonte – Faria (2014).

Tabela 27: Coeficiente de fluência para temperatura de 17,07° (Inverno).

DADOS DE ENTRADA		Etapa única	
		D _{tef,i} (dias)	T _i (°C)
Temperatura Média (°C)		28	17,07
		0	0
		0	0
		0	0
f _{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		28	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - α = 1,0	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - α = 2,0	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - α = 3,0		
Umidade Relativa do Ar U _{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm ²)		235	
Perímetro em contato com ar (cm)		56	
COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DO CONCRETO			
φ(t,t₀) - Coeficiente de fluência entre os instantes t₀ e t		2,237	

Fonte: Faria (2014).

Com os valores obtidos notou-se que o acréscimo no valor do coeficiente de fluência foi de 2,28%, portanto é razoável também adotar temperatura média anual para a cidade de Varginha já que a variável analisada influenciou muito pouco no valor final do coeficiente de fluência.

3.9 Consistência do concreto.

Uma das principais propriedades do concreto fresco é a sua consistência, capacidade do concreto de se deformar, esta consistência é definida de acordo com cada projeto devido às suas características de transporte do concreto, lançamento do concreto, adensamento do concreto.

A produção do concreto mais ou menos consistente pode ser determinada basicamente pelo fator água cimento, granulometria dos agregados e presença de aditivos. A utilização de concretos com característica mais ou menos consistente pode ser definida pelo tipo de elemento estrutural a ser concretado, quantidade de armadura das peças, entre outras características.

A maneira mais comum de medir esta característica é o ensaio de abatimento do tronco de cone presente na ABNT NBR 7223:1998, ele mede o “Slump” do concreto.

Na análise dos coeficientes de fluência, a utilização de abatimentos maiores, ou seja, concretos menos consistentes influenciam negativamente nos valores finais obtidos.

3.10 Seção simples e seção composta - considerações.

Durante análise dos processos construtivos são consideradas: seção simples e composta. A seção simples nada mais é que a consideração da seção transversal da laje sem a contribuição do revestimento como colaborante, segue exemplo:

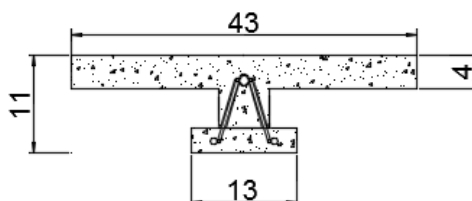


Figura 21: Seção "T" da laje - simples
Fonte: Autor.

Conforme visto na figura 21, a seção simples consiste na seção após a concretagem, porém ao considerarmos, por exemplo, 2cm de contrapiso executados durante o processo de construção a seção passa a ter as dimensões que se seguem:

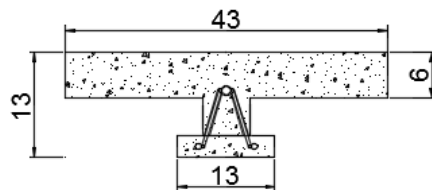


Figura 22: Seção "T" da laje - composta.
Fonte: Autor.

Enfim, considerando este procedimento conseguimos chegar à valores de inércia maiores, aumentado a rigidez do elemento estrutural e conseqüentemente diminuindo a deformação do mesmo.

É importante lembrar que o revestimento (camada de regularização) considerado pode ter variações em sua resistência, questão não abordada neste trabalho, porém de grande importância devendo ser avaliado ou definido f_{ck} em projeto sempre que for utilizar desta metodologia.

4. METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA O ESTUDO DE CASO.

Como procedimento de cálculo adotado para dimensionamento da laje nervurada pré-fabricada treliçada foi adotado o mesmo modelo de laje utilizado mais adiante na análise dos resultados, ou seja, um sistema de lajes, com altura total de 11 cm, incluindo a altura da capa de concreto, de 4,0 cm, utilizada para se executar uma laje com vão teórico igual a 3,85m simplesmente apoiada nas extremidades em vigas de 15 cm de largura. A utilização do pavimento foi para fins residenciais (dormitório) e recebeu um piso natural (granito). O teto foi revestido com argamassa convencional. Para tanto será calculado a armadura utilizada em cada elemento da seção transversal, supondo que a laje foi armada em apenas uma direção e posteriormente será avaliado o estado limite de serviço considerando diferentes aspectos construtivos.

Demais dados:

Concreto $f_{ck} = 20$ MPa

Aço CA60;

Vão livre laje = 3,85m;

Cidade de execução da laje: Varginha-MG

Classe de agressividade ambiental II – com considerações normativas CAA - I;

Cobrimento para armadura inferior do trilho igual a 1,5 cm, controle rígido.

Intereixo mínimo proposto pela ABNT NBR 14859-1: 2002 = 42cm, utilizado 43cm.

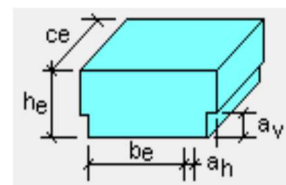
4.1 Ações atuantes:

4.1.1 Peso próprio da laje:

Tabela 28: Peso específico aparente da laje.

PESO ESPECÍFICO APARENTE – LAJE

DESCRIÇÃO	MASSA	G
TIPO ENCHIMENTO	kg	m/s²
LAJE EPS	0,278	9,81

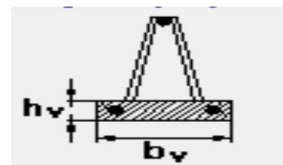


DIMENSÕES (m)

b_e	h_e	a_v	a_h	c_e
0,30	0,07	0,03	0,02	1,20

TRELIÇA (m)

Capa de concreto sobre a laje	b_v	h_v
0,04	0,13	0,03



V bloco	γ apar.bloco	γ concreto armado	γ aparente laje
m³	kN/m³	NBR 6120 kN/m³	kN/m²
0,0271	0,1006	25,0000	1,44

Fonte: autor.

$$g_1 = 1,44 \text{ kN/m}^2$$

4.1.2 Revestimento inferior da laje:

1,5cm espessura

Argamassa de cimento, cal e areia (19 kN/m³ - ABNT NBR 6120:1980)

$$g_{21} = (0,015 \times 19) = 0,285 \text{ kN/m}^2$$

4.1.3 Camada de regularização superior da laje:

2,0cm espessura

Argamassa de cimento e areia (21 kN/m³ - ABNT NBR 6120:1980)

$$g_{21} = (0,02 \times 21) = 0,420 \text{ kN/m}^2$$

4.1.4 Revestimento superior da laje:

Piso natural com 1,0cm de espessura (28 kN/m³ - ABNT NBR 6120:1980)

$$g_2 = (0,01 \times 28) = 0,28 \text{ kN/m}^2$$

4.1.5 Edifício multifamiliar de pavimentos múltiplos – Ação variável:

$$q = 1,5 \text{ kN/m}^2 \text{ (ABNT NBR 6120:1983)}$$

4.1.6 Ação total por m² e ação atuante por nervura:

Ação total por m²: 3,925 kN/m²

Ação atuante em uma nervura: 3,925 x 0,43 (via de regra a largura colaborante é o intereixo ou quando necessário o cálculo usar largura colaborante conforme ABNT NBR 6118:2014 item 14.6.2.2) = 1,69 kN/m/nervura

4.2 Verificação da seção:

Como a seção da laje é uma seção “T” temos inicialmente de supor que a mesma tenha sua linha neutra passando pela mesa, de maneira que o método constante no anexo A deste trabalho seja válido e possa ser utilizado nos cálculos. Vale salientar que via de regra as lajes nervuradas treliçadas apresentam esta característica podendo ser calculada como seção retangular.

$$M_{\text{máx}} = \frac{q \cdot \ell^2}{8} = \frac{1,69 \cdot 4,00^2}{8} = 3,38 \text{ kN.m / nervura} \quad \text{Eq.(27)}$$

4.2.1 Altura útil da seção:

De acordo com considerações normativas da ABNT NBR 6118:2014, elementos que possuem controle rigoroso de produção, como é o caso dos trilhos utilizados na laje, podem ter cobrimento reduzido em até 5mm. Portanto o valor d' considerando a laje executada em região Urbana classe CAA-II, porém para uso residencial que conforme consideração 1 da tabela 8 descrita anteriormente, pode ser enquadrada como CAA-I com espessura mínima de cobrimento 20mm.

Desta maneira para a laje deste exemplo adotou-se $d' = 2\text{cm}$, que é igual a 15mm de cobrimento devido à condição de execução do trilho + metade da bitola inferior de tração = $1,5 + 0,6/2 = 1,8\text{cm} \approx 2,0\text{cm}$.

4.2.2 Verificação:

$$K_{MD} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 3,38}{0,43 \cdot 0,09^2 \cdot \frac{20000}{1,4}} = 0,095 \quad \text{Eq.(28)}$$

Pela tabela 1.1 – anexo 1 (tomando $K_{MD} = 0,095$) $\Rightarrow K_X = 0,148 < 0,45$ para concretos até C50. \rightarrow ok!

$$x = (K_X) \cdot d = 0,148 \cdot 9,0 = 1,33\text{cm} < h_f = 4,0\text{cm} \quad \text{Eq.(29)}$$

A hipótese de que a linha neutra passa pela mesa é válida, assim como a utilização do anexo 1 para cálculo como seção retangular também. Apesar de ser comum às lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas a linha neutra passar pela mesa, é essencial a verificação desta condição.

4.3 Cálculo da armadura de acordo com o ELU – Considerando anexo 1:

Pela tabela 1.1 – anexo 1, tomando $K_{MD} = 0,095 \Rightarrow K_X=0,148$; $K_Z=0,941$; $\epsilon_c=1,74\text{‰}$; $\epsilon_s=10,00\text{‰}$.

Como $\epsilon_c=1,74\text{‰}$ e $\epsilon_s=10,00\text{‰}$, a peça está trabalhando no domínio 2 (deformação no aço de 10 ‰, e no concreto, menor que 3,5 ‰, e $f_s = f_{yk} = 60 \text{ KN/cm}^2$ (aço CA60).

$$A_s = \frac{M_d}{(kZ) \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 3,38}{(0,941) \cdot 0,09 \cdot \frac{60}{1,15}} = 1,07 \text{ cm}^2/\text{nervura} \quad \text{Eq.(30)}$$

Tabela 29: Verificação do adicional para a laje treliça.

Aseção (cm²)	A_s (cm²)	TRELIÇA	A_s Treliça (cm²)	
235	1,07	TB 8M	0,392	

A_s Complementar (cm²)	Bitola da barra adicional (mm)	Quantidade de barras adicionais	A_s total das barras adicionais (cm²)	Verificação
0,678	7.0	2	0,77	OK

Fonte: autor.

A_s adotadas devido a bitolas disponíveis = 1,16cm²

De acordo com modelo apresentado no item 3.1 neste material, para a seção considerada A_{s, min} é de 0,15%. A_c.

Portanto:

$$A_{s,\text{mín}} = \frac{0,15}{100} \cdot A_c \quad \text{Eq.(31)}$$

$$A_{s,\text{mín}} = \frac{0,15}{100} \cdot 235 = 0,35 \text{ cm}^2/\text{nervura} \quad \text{Eq.(32)}$$

$$A_{s,\text{máx}} = \frac{4}{100} \cdot A_c \quad \text{Eq.(33)}$$

$$A_{s,\text{máx}} = \frac{4}{100} \cdot 235 = 9,4 \text{ cm}^2/\text{nervura} \quad \text{Eq.(34)}$$

Verificação:

$$A_{s,\text{mín}} \leq A_{s,\text{adotado}} \leq A_{s,\text{máx}} \quad \text{Eq.(35)}$$

$$0,35 \leq 1,16 \leq 9,4 - \text{verificação ok!} \quad \text{Eq.(36)}$$

4.4 Verificação do ELS-W:

$$g = 1,043 \text{ kN/m/nervura}$$

$$q = 0,645 \text{ kN/m/nervura}$$

$$\ell = 4,00\text{m (considerando apoio de eixo a eixo)}$$

$$f_{ck} = 20\text{MPa}$$

$$d' = 2,0\text{cm}$$

$$d = 9,0\text{cm}$$

$$A_s = 1,16\text{cm}^2$$

CAA – I

Combinação frequente:

$$p = g + \Psi_1 \cdot q \quad \text{Eq.(37)}$$

Ψ_1 para combinações frequentes e obra residencial = 0,4

$$p = 1,043 + 0,4 \cdot 0,645 = 1,30 \text{ kN/m/nervura} = 0,013 \text{ kN/cm/nervura} \quad \text{Eq.(38)}$$

$$M_{\text{máx}F} = \frac{p \cdot \ell^2}{8} = \frac{0,01303 \cdot 400^2}{8} = 260,60 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(39)}$$

Tipo de agregado:

Onde:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Concreto com f_{ck} de 20MPa e o material agregado para o concreto granito ou gnaisse, segue:

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} = 25.043,96 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(40)}$$

Para concreto C20,

$$\alpha_i = \left(0,80 + 0,2 \cdot \frac{20}{80} \right) \leq 1,0 \Rightarrow \alpha_i = 0,85 \leq 1,0 \rightarrow \text{OK!} \quad \text{Eq.(41)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 25.043,96135 = 21.287,37 \text{ MPa} = 2128,74 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(42)}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot 20^{2/3} = 2,21 \text{ MPa} = 0,221 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(43)}$$

Considerando somente o peso próprio da laje, a carga é: $p=0,6192 \text{ kN.m/nervura}$ e o momento fletor atuante M_{g1} , fica:

$$M_{g1} = \frac{p \cdot \ell^2}{8} = \frac{0,006192 \cdot 400^2}{8} = 123,84 \text{ kN.cm/nervura} \quad \text{Eq.(44)}$$

Momento de inércia da nervura (considerada como viga T), em relação a um eixo horizontal no centro de gravidade da seção (Estádio I, seção bruta);

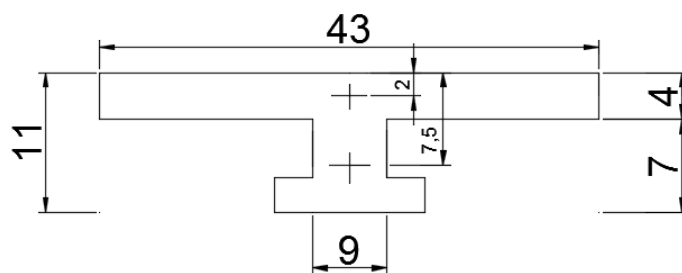


Figura 23: Seção considerada para Estádio I.
Fonte: Autor.

$$y_{cg} = \frac{43.4 \cdot 2 + 9.7 \cdot 7,5}{43.4 + 9.7} = 3,47 \text{ cm} \quad \Rightarrow \text{medindo a partir da borda superior.} \quad \text{Eq.(45)}$$

$$I_I = \frac{43.4^3}{12} + 43.4 \cdot (3,47 - 2)^2 + \frac{9.7^3}{12} + 9.7 \cdot (7,5 - 3,47)^2 = 1881,43 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(46)}$$

Determinação do momento de fissuração e comparação com o momento atuante devido ao peso próprio:

Sendo:

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;

$\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido;

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

Para determinar M_r :

$$y_t = 11 - 3,47 = 7,53 \text{ cm (tração na borda inferior)} \quad \text{Eq.(47)}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot 20^{2/3} = 2,21 \text{ MPa} = 0,221 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(48)}$$

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;

$$M_r = \frac{1,2 \cdot 0,221 \cdot 1881,43}{7,53} = 66,31 \text{ kN.cm/nervura} \quad \text{Eq.(49)}$$

Como $M_{g1} > M_r$, conclui-se que já após a retirada do escoramento a seção no meio do vão estará trabalhando no estágio II, sendo necessário calcular a inércia no estágio II puro e utilizar a expressão para cálculo da inércia equivalente da ABNT NBR 6118:2014, definida no anexo 1 deste trabalho.

$$x_{II} = \frac{-a_2 \mp \sqrt{(a_2)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad \text{Eq.(50)}$$

$$a_1 = \frac{b_f}{2} = \frac{43}{2} = 21,5\text{cm} \quad \text{Eq.(51)}$$

Coeficiente de homogeneização da seção:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210000}{21287} = 9,865 \quad \text{Eq.(52)}$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 9,865 \cdot 1,16 = 11,44\text{cm}^2 \quad \text{Eq.(53)}$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -9 \cdot 9,865 \cdot 1,16 = -102,99\text{cm}^3 \quad \text{Eq.(54)}$$

$$x_{II} = \frac{-11,44 \mp \sqrt{(11,44)^2 - 4 \cdot 21,5 \cdot (-102,99)}}{2 \cdot 21,5} = 1,94\text{cm} \quad \text{Eq.(55)}$$

Como $x_{II} = 1,94\text{cm} < h_f = 4,0\text{cm}$, a linha neutra passa pela mesa, assim o momento de inércia no estágio II puro vale:

$$I_{II0} = \frac{b_f \cdot (x_{II})^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{II})^2 \quad \text{Eq.(56)}$$

$$I_{II0} = \frac{43 \cdot 1,94^3}{3} + 9,865 \cdot 1,16 \cdot (9 - 1,94)^2 = 675,03\text{cm}^4 \quad \text{Eq.(57)}$$

Utilizando os parâmetros do estágio II puro e momento de inércia considerando combinação frequente pela fórmula de Branson conforme equação 39.

Utilizando novamente o momento de inércia da nervura (considerada como viga T), em relação a um eixo horizontal no centro de gravidade da seção (Estádio I, seção bruta) e momento de fissuração M_r .

Como $M_{g1} > M_r$, conclui-se que após a retirada do escoramento a seção no meio do vão estará trabalhando no estágio II, sendo necessário calcular a inércia no estágio I considerando a contribuição da armadura.

$$A_h = A_g + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \quad \text{Eq.(58)}$$

$$A_h = 235 + 1,16 \cdot (9,865 - 1) = 245,28\text{cm}^2 \quad \text{Eq.(59)}$$

$$y_h = 3,71\text{cm} \quad \text{Eq.(60)}$$

$$I_h = \frac{43.4^3}{12} + 43.4 \cdot (3,71 - 2)^2 + \frac{9.7^3}{12} + 9.7 \cdot (7,5 - 3,71)^2 + 1,16 \cdot (9,865 - 1) \cdot (3,71 - 9)^2 = 2182,24\text{cm}^4 \quad \text{Eq.(61)}$$

Inércia média pelo método de Branson:

$$I_m = \left\{ 2182,82 \cdot \left(\frac{66,31}{260,60} \right)^3 + 675,03 \cdot \left[1 - \left(\frac{66,31}{260,60} \right)^3 \right] \right\} = 700,00 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(62)}$$

$$\sigma_{si} = \frac{260,16}{2128,74 \cdot 700,00} \cdot (9 - 1,94) \cdot 21000 = 25,89 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(63)}$$

Área de envolvimento:

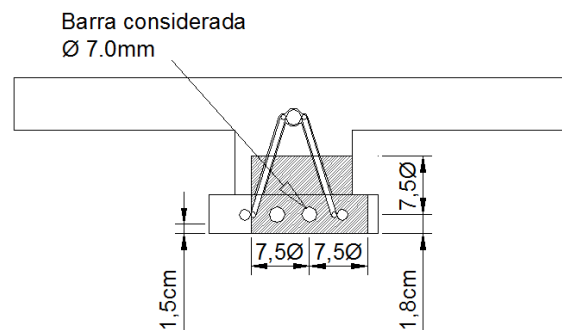


Figura 24: Consideração da área de envolvimento em relação a barra mais tracionada na nervura.
Fonte: Autor.

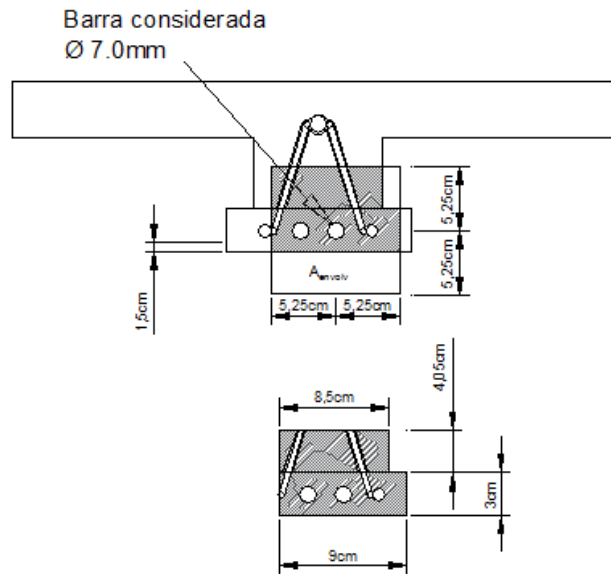


Figura 25: Consideração da área de envolvimento em relação a barra mais tracionada na nervura.
Fonte: Autor.

Área de envolvimento: $9 \cdot 3 + 8,50 \cdot 3 = 52,50\text{cm}$.

CAA I – $w_K \leq 0,4\text{mm}$

$\rho_{ri} = A_s / \text{Área de envolvimento}$

$$\rho_{ri} = \frac{1,16}{52,50} = 0,02321 = 2,21\% \quad \text{Eq.(64)}$$

Valor de W é o menor entre:

O diâmetro adotado foi o mais crítico, no caso deste exemplo o 7mm.

$$\left\{ \frac{3 \cdot 7}{12,5 \cdot 1,4} \cdot \frac{25,89^2}{21000 \cdot 0,22} = 0,173 \text{ mm} \right. \quad \text{Eq.(65)}$$

$$\left\{ \frac{7}{12,5 \cdot 1,4} \cdot \frac{25,89}{21000} \cdot \left(\frac{4}{0,02321} + 45 \right) = 0,111\text{mm} \right. \quad \text{Eq.(66)}$$

Portanto, como $0,111 \leq 0,4$, a verificação em relação ao ELS-W foi atendida.

4.5 Verificação da necessidade de armadura de cisalhamento (Item 3.4 deste material) – lajes sem armadura para força cortante:

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot \left(\frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Eq.(67)}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad \text{Eq.(68)}$$

$$k = (1,6 - d) \geq 1 \quad \text{Eq.(69)}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad \text{Eq.(70)}$$

$$V_{rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq.(71)}$$

$$V_{sd} = \frac{1,4 \cdot (g_{11} + g_{12} + g_{21} + g_{22} + q) \cdot \ell}{2} \quad \text{Eq.(72)}$$

$$b_{w,mín} = \frac{V_{rd1}}{[\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot d} \quad \text{Eq.(73)}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot \frac{1,547}{1,40} = 0,276 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(74)}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot 20^{\frac{2}{3}} = 1,54729 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(75)}$$

$$k = (1,6 - 0,09) = 1,51 \geq 1 \cdot \text{ok} \quad \text{Eq.(76)}$$

$$\rho_1 = \frac{1,16}{9 \cdot 9} = 0,014 \quad \text{Eq.(77)}$$

$$V_{rd1} = [0,276 \cdot 1,51 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,014)] \cdot 9 \cdot 9 = 5,99 \text{ kN} \quad \text{Eq.(78)}$$

$$V_{sd} = \frac{1,4 \cdot 1,69 \cdot 400}{2} = 4,726 \text{ kN} \quad \text{Eq.(79)}$$

Portanto $V_{sd} < V_{rd1}$, pode-se dispensar o uso de armadura de cisalhamento.

$$b_{w,\text{mín}} = \frac{4,726}{[0,0276 \cdot 1,51 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,014)] \cdot 9} = 7,10\text{cm} \quad \text{Eq.(80)}$$

Portanto $b_{w,\text{mín}} < b_{w,\text{adotado}}$, podemos considerar como verificação “ok”.

4.6 Verificação da Flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo – Verificação I:

4.6.1 Flecha para combinação quase permanente e acidental:

A seguir será verificada a flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo, considerando inicialmente o carregamento aplicado simultaneamente de uma única vez junto à data de retirada das escoras prevista para os 28 dias após a concretagem. Também para estas primeiras verificações serão utilizados os anexos 2, 3 e 4 para determinação da flecha diferida no tempo.

De acordo com o item 2.12 deste material e cálculos realizados neste diagnóstico, segue abaixo tabela com resultados de verificação.

Tabela 30: Verificação de flechas máximas.

	Carga (kN/m)	MF (kN.cm)	Ieq (cm⁴)	a (cm)	aLimite (cm)	Verificação
Carga Permanente	1,04	208,56	723,49	2,26	1,60	Alterar Seção
Quase Permanente	1,30	260,16	700,00	2,91	1,60	Alterar Seção
Rara	1,69	337,56	686,46	3,85	x-x-x	x-x-x
Acidental				1,59	1,14	Alterar Seção

Fonte: Material curso de graduação Unis-MG, Faria (2014).

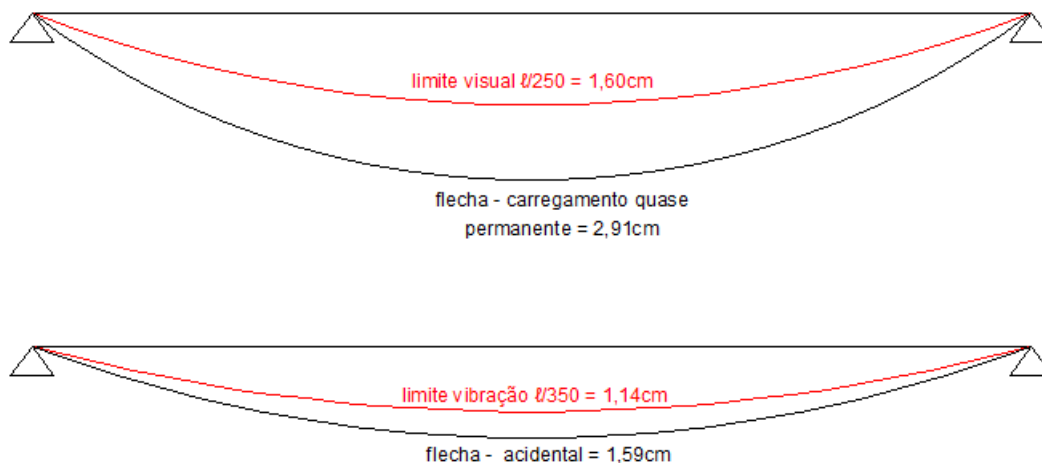


Figura 26: Diagrama de análise das flechas imediatas de acordo com Verificação I - tabela 30.
Fonte: Autor.

A flecha definida como acidental é dada pela diferença entre a flecha rara e a flecha referente ao carregamento permanente, sendo a mesma utilizada para verificação quanto aos limites de vibração impostos pela ABNT NBR 6118:2014.

Conforme dados apresentados acima, é possível concluir que o caso específico não atende aos deslocamentos limites, uma solução de maneira simplificada e rápida seria aumentar a altura da laje.

Outra possível solução para o caso anterior seria a utilização de um cronograma conforme item 3.7, para determinação das flechas considerando carregamento incremental.

Além da determinação da flecha imediata ainda é necessário definir os coeficientes de fluência para análise da flecha no tempo infinito.

4.6.2 Coeficiente α_f de acordo com Anexo 2:

$$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32}, \text{ para } t \leq 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(81)}$$

$$\xi(t) = 2, \text{ para } t > 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(82)}$$

$$\rho' = \frac{A_{st}}{b \cdot d} \quad \text{Eq.(83)}$$

Tabela 31: Coeficiente α_f para retirada de escoramento aos 28 dias.

$\xi(t_0)$	0,66
$\xi(\infty)$	2
ρ'	0
α_f	1,34

Fonte: Autor.

4.6.3 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 3:

Utilizando o método do anexo 3, considerando a umidade relativa do ar para a cidade de Varginha com média anual de 75%, concreto da classe C20, cimento Portland comum e a retirada de escoramento aos 28 dias, teremos coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0) = 2,25$ de acordo com tabela 3.1 apresentada no anexo 3.

Tabela 32: Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0)$, para retirada de escoramento aos 28 dias, considerando Umidade média de Varginha-MG.

Umidade média do ambiente %	75
Área de concreto da peça (cm²)	235
μ - Perímetro em contato com o ar (cm)	56
Espessura Fictícia ($2.A_c / \mu$)	8,39
Classe de Concreto (Mpa)	20
Retirada do escoramento (dias)	28
$\varphi(t_\infty, t_0)$ – interpolado através da tabela 3.1	2,25

Fonte: Autor.

4.6.4 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 4:

Utilizando dados colhidos durante pesquisa e formulações apresentadas no anexo 4 deste material foi possível determinar outro coeficiente de fluência, conforme tabela a seguir.

DADOS DE ENTRADA		Etapa única
		$D_{\text{def},i}$ (dias)
		T_i ($^{\circ}\text{C}$)
		28
		20,22
	Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	0
		0
		0
		0
	f_{ck} (MPa)	20
	Idade Inicial (dias)	28
	Idade Final (dias)	10000
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - $\alpha = 1,0$	Fluência
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - $\alpha = 2,0$	2,0
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - $\alpha = 3,0$	
	Umidade Relativa do Ar U_{ar} (%)	75
	Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)	8,0
	Área da Seção Transversal (cm^2)	235
	Perímetro em contato com ar (cm)	56
COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DO CONCRETO		
	t_0 - (Idade fictícia do concreto, em dias)	56,411
	s - (coeficiente em função do tipo de cimento)	0,250
	$\beta_{1(t)}$ - relação entre $f_{\text{ckj}}/f_{\text{ck}}$	1,000
	$\beta_{1(\infty)}$ - relação entre $f_{\text{ckj}}/f_{\text{ck}}$	1,284
	ϕ_a - Coeficiente de fluência rápida	0,177
	γ - coeficiente para determinação da espessura fictícia	1,741
	h_{fic} (m) - espessura fictícia da peça	0,146
	ϕ_{1c} - coeficiente que depende de U_{ar} e consistência do concreto	1,825
	ϕ_{2c} - coeficiente que depende de espessura fictícia da peça	1,636
	$\phi_{f\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível	2,985
	A	191,57
	B	386,5766
	C	341,9075
	D	6437,110
	$\beta_d(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo (t- t_0) decorrido após o carregamento	0,995
	$\beta_r(t_0)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto	0,497
	$\beta_r(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto	0,985
	$\phi_{d\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4	0,400
	$\phi(t, t_0)$ - Coeficiente de fluência entre os instantes t_0 e t	2,032

Fonte: Material desenvolvido por Antônio de Faria, Faria (2014).

4.6.5 Aplicação dos coeficientes de fluência:

Tabela 34: Aplicação dos diferentes coeficientes de fluência determinados.

Verificação da fluência pelo método anexo 2			
$\xi(t_0)$	0,66	$a_{total,\infty}$ (cm)	6,80
$\xi(\infty)$	2	a_{cf} (cm)	-1,14
ρ'	0	$a_{total,\infty}$ (cm)	5,66
α_f	1,34	Verificação ($l/250$)	Alterar Seção
Verificação da fluência pelo método anexo 3			
$\varphi(t,t_0)$	2,25	$a_{total,\infty}$ (cm)	9,46
		a_{cf} (cm)	-1,14
		$a_{total,\infty}$ (cm)	8,31
		Verificação ($l/250$)	Alterar Seção
Verificação da fluência pelo método anexo 4			
$\varphi(t,t_0)$	2,44	$a_{total,\infty}$ (cm)	8,82
		a_{cf} (cm)	-1,14
		$a_{total,\infty}$ (cm)	7,68
		Verificação ($l/250$)	Alterar Seção

Fonte: Autor.

4.6.6 Resumo da verificação I:

A seguir estão os dados obtidos para a verificação do ELS considerando atuação dos carregamentos em uma única etapa e 3 métodos de verificação da fluência.

Tabela 35: Resumo final das flechas para combinação quase permanente imediata e somada a aplicação dos coeficientes de fluência comparados aos limites de aceitação definidos por norma.

	Flecha imediata (comb. Quase permanente) (cm)	Valor da Flecha com a contraflecha limite de ($\ell/350$)	Aceitabilidade sensorial, visual ($\ell/250$)	Verificação
Verificação I	2,91	1,77	1,60	Não ok
Verificação I + fluência anexo 2	5,66	4,52	1,60	Não ok
Verificação I + fluência anexo 3	8,31	7,17	1,60	Não ok
Verificação I + fluência anexo 4	7,68	6,54	1,60	Não ok

Fonte: Autor.

Tabela 36: Resumo final para flecha devido a vibração e limite máximo permitido por norma

Flecha imediata - Acidental (cm)	Aceitabilidade Sensorial, vibrações ($\ell/350$)	Verificação
1,59	1,14	Não ok

Fonte: Autor.

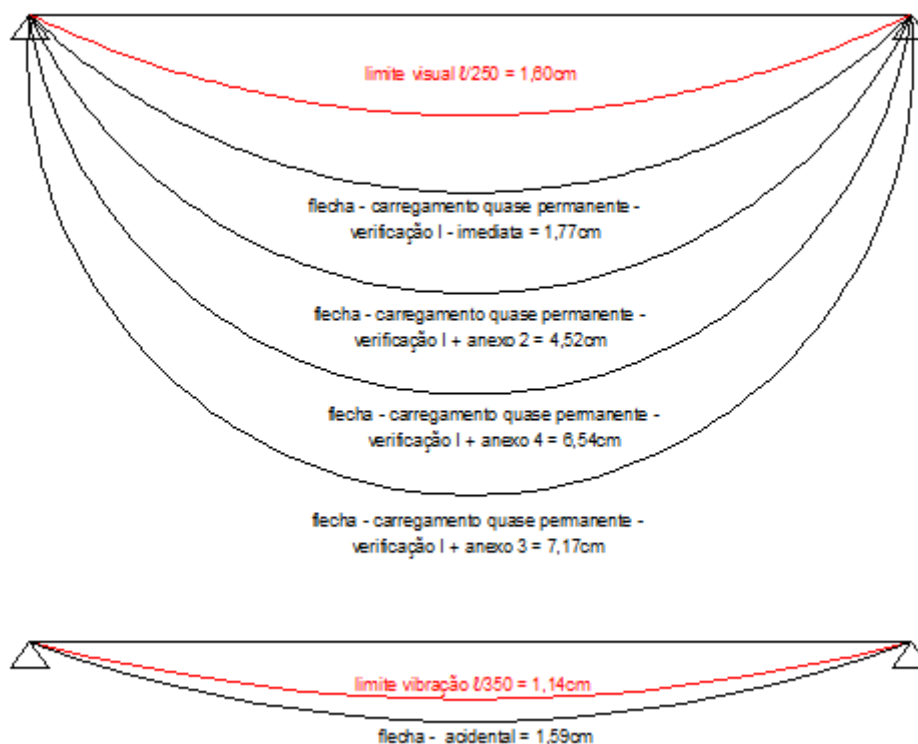


Figura 27: Diagrama de análise das flechas imediatas e com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação I - tabelas 35 e 36.

Fonte: Autor.

Conforme verificação I proposta anteriormente, não foi possível atender aos limites normativos.

Outra condição que também não foi atendida é a flecha devido à vibração limitada pela flecha acidental ($l/350$).

Com os dados obtidos também foi possível observar que quanto mais completo o método de avaliação dos coeficientes de fluência adotados para a cidade de Varginha-MG maiores são os valores da flecha ao longo do tempo, sendo fato que ao utilizarmos o anexo 2 (método simplificado proposto pela ABNT NBR 6118:2014) podemos estar subdimensionando o elemento quanto ao estado limite de serviço.

4.7 Verificação da Flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo – Verificação II:

4.7.1 Flecha para combinação quase permanente e acidental:

A seguir será verificada a flecha para combinação quase permanente, limitação da flecha acidental aos limites de vibração e flecha diferida no tempo, considerando o carregamento aplicado de maneira incremental. Também para estas verificações serão utilizados os anexos 2, 3 e 4 para determinação da flecha diferida no tempo.

Uma possível solução para o caso anterior seria a utilização de um cronograma conforme a seguir, para determinação das flechas considerando carregamento incremental.

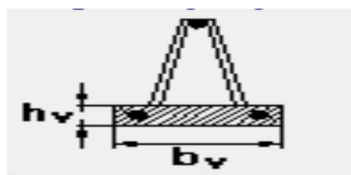
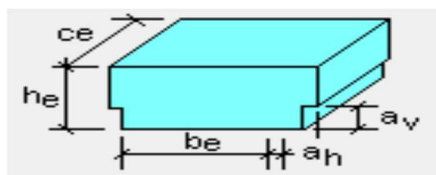
Tabela 37: Cronograma para verificação considerando etapas construtivas

CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO 1					
Etapa	Período (dias)	Ações	Observação	Carregamento (kN/m)	Seção
1	0-15	-	Montagem, escoramento e concretagem da laje. (Neste período não há flecha considerada)	0,6192	simples
2	15 - ∞	$g_{11}+g_{12}$	Retirada de escoramento	0,6192	simples
3	45 - ∞	g_{21}	Após a execuções das paredes sobre os apoios, proporcionando uma situação de semi-engaste nas vigotas de laje, e execução do contrapiso. (Regularização do nível Superior e reboco inferior)	0,3032	composta
4	75 - ∞	g_{22}	Execução do revestimento superior.	0,1204	composta
5	120 - ∞	q	Início da utilização de lajes. Sobrecarga de utilização	0,645	composta

Fonte: Autor.

Segue características consideradas para seção simples e seção composta, sendo que a única dimensão que se altera é h_f , no caso de seção composta foi considerada a espessura de regularização superior como parte colaborante à seção da laje.

Tabela 38: Seção simples e seção composta - características



SEÇÃO SIMPLES		CARACTERÍSTICAS	SEÇÃO COMPOSTA		CARACTERÍSTICAS
		AS			AS
b_f (cm)	43	y_{cg} (cm)	b_f (cm)	43	y_{cg} (cm)
b_w (cm)	9	3,47	b_w (cm)	9	4,28
h_f (cm)	4	I_g (cm⁴)	h_f (cm)	6	I_g (cm⁴)
h_e (cm)	7	1881,43	h_e (cm)	7	3170,60
h total da laje (cm)	11	Mr (kN.cm/nervura)	h total da laje (cm)	13	Mr (kN.cm/nervura)
d' (cm)	2	66,31	d' (cm)	2	96,40
b_e (cm)	30	y_h (cm)	b_e (cm)	30	y_h (cm)
b₂ (cm)	34	3,71	b₂ (cm)	34	4,48
a_v (cm)	3	I_h (cm⁴)	a_v (cm)	3	I_h (cm⁴)
a_h (cm)	2	2182,24	a_h (cm)	2	3621,14
h_v (cm)	3	I_x, I_o (cm⁴)	h_v (cm)	3	I_x, I_o (cm⁴)
b_v (cm)	13	675,03	b_v (cm)	13	1038,69

Fonte: Autor.

4.7.1.1 1ª Etapa construtiva:

A primeira situação a ocorrer em uma laje pré-fabricada treliçada, quando se avalia o processo construtivo na análise do ELS é a sua montagem para posterior concretagem. Conforme citado nos tópicos anteriores alguns autores apresentam as distâncias mínimas de espaçamento entre escoras que devem ser respeitadas para que a seção não sofra fissuração durante esta fase, porém sempre que possível deve-se fazer este estudo de maneira a evitar tal condição, pois caso ocorra fissuração durante esta etapa pode-se dizer também que o elemento estrutural já está sujeito a deformações imediatas e fluência.

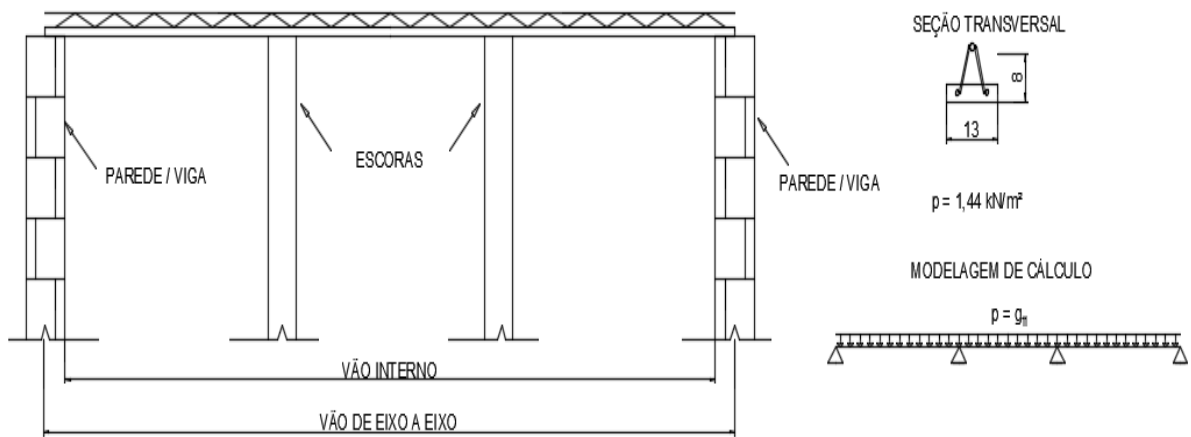


Figura 28: 1ª etapa – Montagem da laje
Fonte: Autor.

4.7.1.2 2ª Etapa construtiva:

Nesta etapa é feita a retirada do escoramento, a seção fissura e tem-se o início do processo de fluência, porém são considerados somente os carregamentos g_{11} e g_{12} , referentes ao peso próprio.

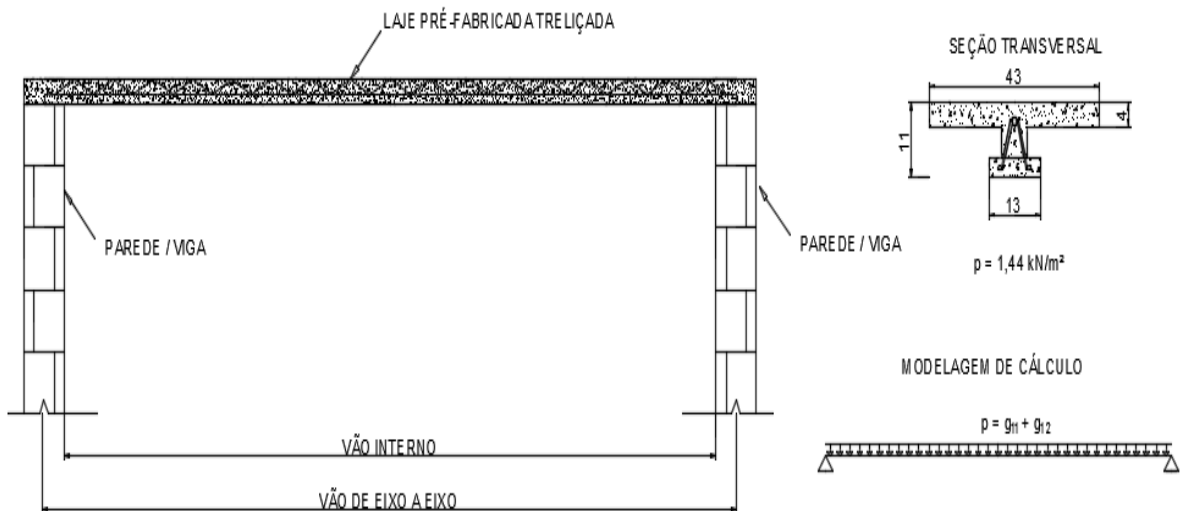


Figura 29: 2ª etapa – Retirada do escoramento
Fonte: Autor.

4.7.1.3 3ª Etapa construtiva:

Para verificação desta etapa, considera-se inicialmente que as paredes do nível superior são executadas, impedindo o giro no apoio e tornando possível avaliar como um engaste ou semi-engaste conforme cálculos a seguir.

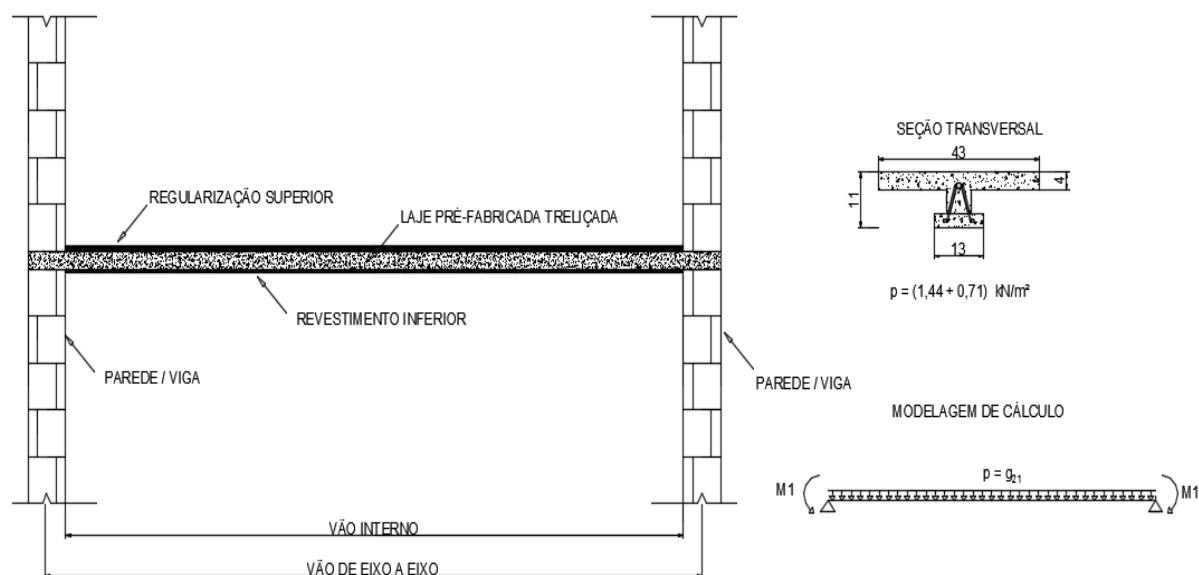


Figura 30: 3ª etapa - Após execução da parede do nível superior e durante execução do contrapiso e revestimento inferior.

Fonte: Autor.

4.7.1.4 4ª Etapa construtiva:

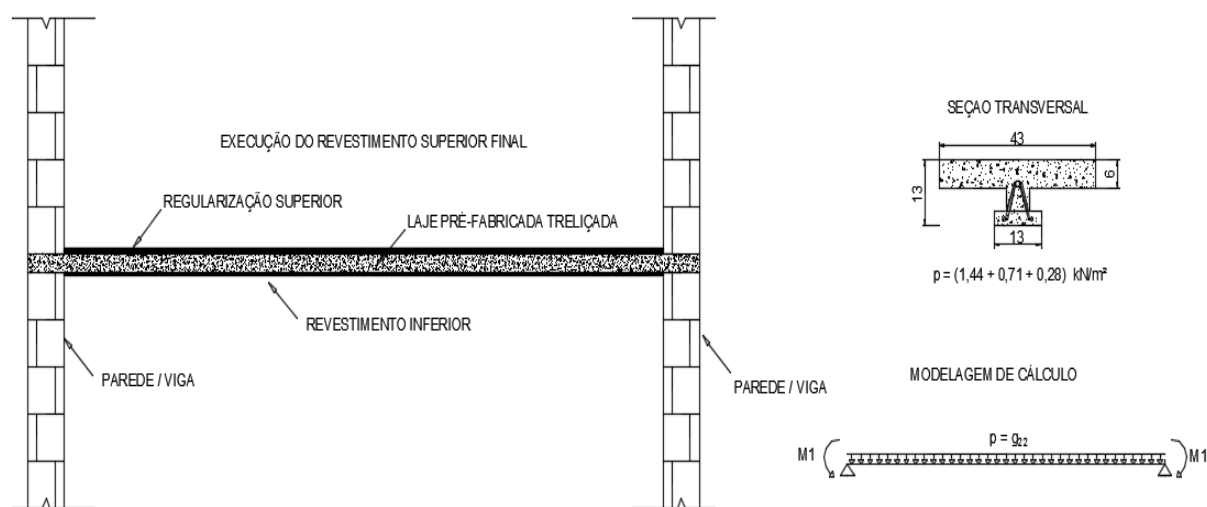


Figura 31: 4ª etapa – Após execução do contrapiso, executa-se o revestimento final (considerando contribuição do contrapiso).

Fonte: Autor.

4.7.1.5 5ª Etapa construtiva:

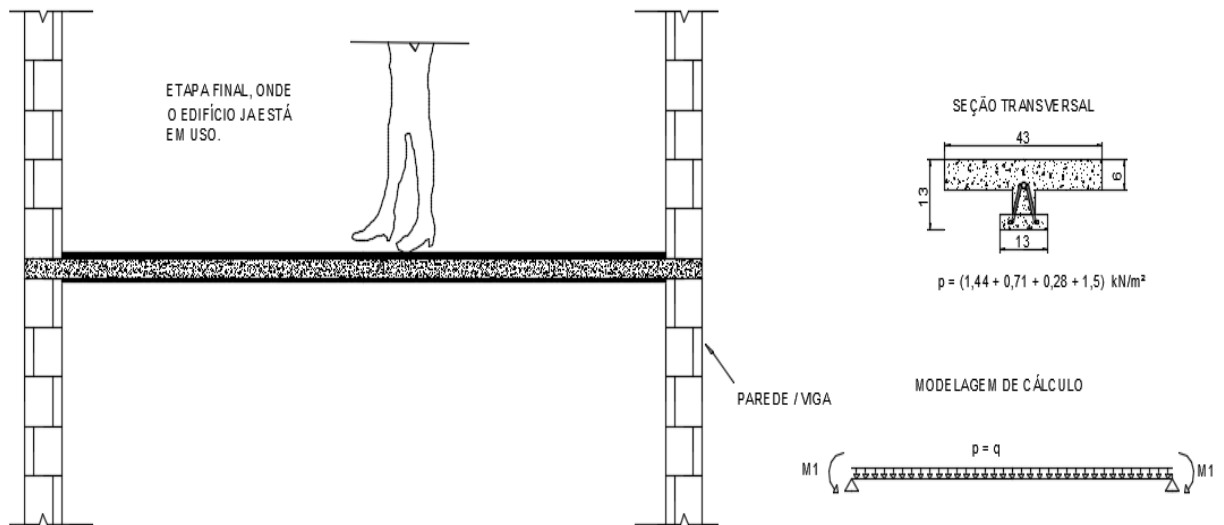


Figura 32: 5ª etapa – Etapa onde se dá início a utilização final da edificação (considera contribuição do contrapiso).
Fonte: Autor.

4.7.1.6 Determinação do momento M_1 (momento negativo resistente no apoio):

$$f_t = A_{\text{strelça}} \cdot f_{yd} \quad \text{Eq. (84)}$$

$$f_c = b_w \cdot x \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \quad \text{Eq. (85)}$$

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad \text{Eq. (86)}$$

$$M_1 = f_t \cdot z \quad \text{Eq. (87)}$$

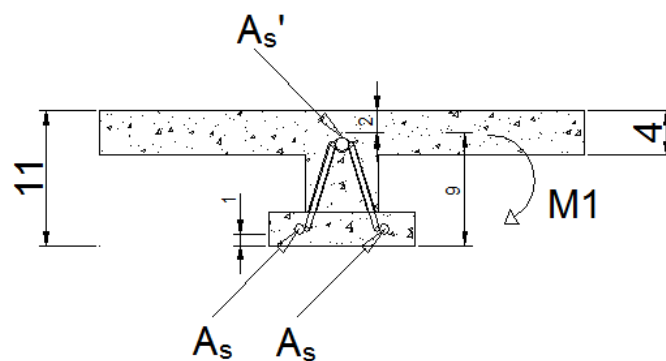


Figura 33: Considerações da seção para determinar momento resistente no apoio (cm).
Fonte: Autor.

$A_{s' \text{ treliça}} = 1\phi 6.0\text{mm}$ (diâmetro do banzo superior da treliça) = 0,283 cm²

$f_{yd} = \text{aço CA60}$

$$f_t = \frac{0,283 \cdot 60}{1,15} = 14,77 \text{ kN} \quad \text{Eq.(88)}$$

$$b_w \cdot x \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = 14,77 \text{ kN} \quad \text{Eq.(89)}$$

$$9 \cdot x \cdot 0,85 \cdot \frac{2,0}{1,4} = 14,77 \text{ kN} \quad \text{Eq.(90)}$$

$$x = 1,35 \text{ cm} \quad \text{Eq.(91)}$$

$$z = 9 - 0,4 \cdot 1,35 = 8,46 \text{ cm} \quad \text{Eq.(92)}$$

$$M_1 = 14,77 \cdot 8,46 = 124,91 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(93)}$$

4.7.1.7 Cálculo da flecha devido a $g_{11} + g_{12} = 0,6192 \text{ kN/m}$ (seção simples) – imediatamente após retirada do escoramento, 2^a etapa construtiva.

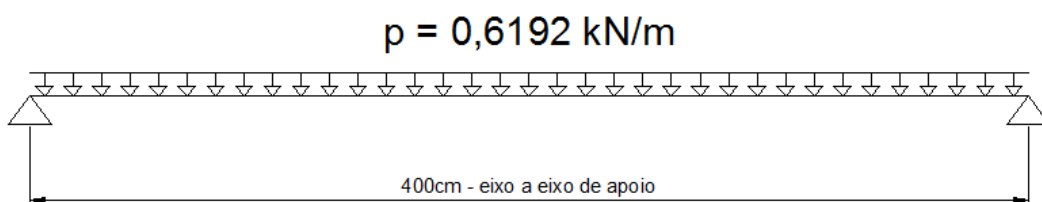


Figura 34: Modelagem de cálculo para 2^a etapa.
Fonte: Autor.

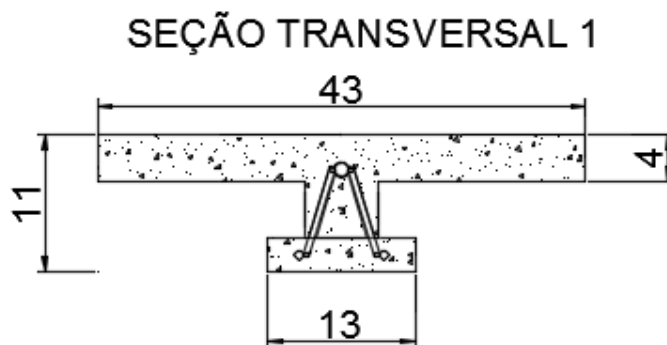


Figura 35: Seção simples (1), considerada para o cálculo da 2ª etapa.

Fonte: Autor.

$$M_{\text{máx1}} = \frac{p \cdot l^2}{8} \quad \text{Eq.(94)}$$

$$I_m = \left\{ I_c \cdot \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 + I_{II} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \right\} \quad \text{Eq.(95)}$$

$$a = \frac{5 \cdot p \cdot l^4}{384 \cdot E_c \cdot I_m} \quad \text{Eq.(96)}$$

$$M_{\text{máx1}} = \frac{0,6192 \cdot 400^2}{8} = 123,85 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(97)}$$

$$I_m = \left\{ 2182,24 \cdot \left(\frac{66,31}{123,85} \right)^3 + 675,03 \cdot \left[1 - \left(\frac{66,31}{123,85} \right)^3 \right] \right\} = 906,41 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(98)}$$

Para concretos com idade inferior a 28 dias:

Idade do concreto na data de verificação para esta etapa: 15 dias

Cimento utilizado é do tipo comum CP-I ou CP-II

$$\beta_1 = \exp \{ s [1 - (28/t)^{1/2}] \} \quad \text{Eq.(99)}$$

Onde:

$s = 0,38$ para concreto de cimento CIII e IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CI e II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI;

t é a idade efetiva do concreto, expressa em dias.

$$\beta_1 = \exp \{ 0,25 \cdot [1 - (28/15)^{1/2}] \} = 0,913 \quad \text{Eq.(100)}$$

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} \cdot 0,913 = 23929,76 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(101)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 22865,14 = 20334,75 \text{ MPa} = 2033,48 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(102)}$$

$$a = \frac{5 \cdot 0,006192 \cdot 400^4}{384 \cdot 2033,48 \cdot 906,41} = 1,12 \text{ cm} \quad \text{Eq.(103)}$$

4.7.1.8 Cálculo da flecha devido a $g_{21} = 0,3032 \text{ kN/m}$ (seção simples) – após execução das paredes e do revestimento inferior e superior da laje, 3ª etapa construtiva.

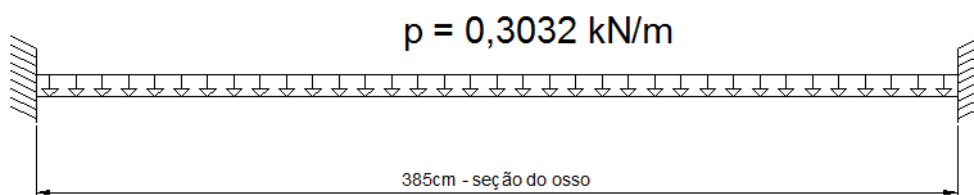


Figura 36: Modelagem de cálculo para 3ª etapa.
Fonte: Autor.

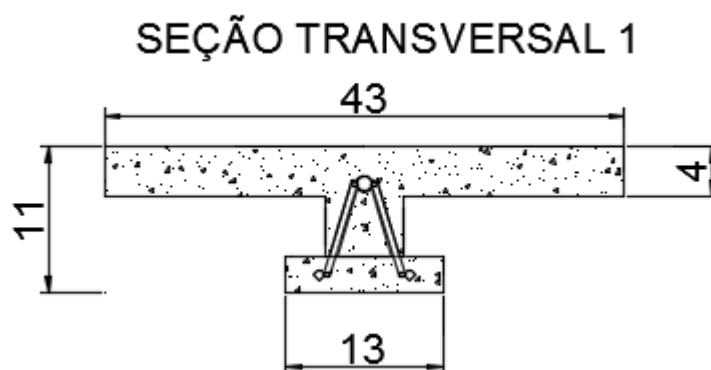


Figura 37: Seção simples (1), considerada para o cálculo de 3ª etapa.
Fonte: Autor.

$$M_a = M_b = \frac{p \cdot l^2}{12} \quad \text{Eq.(104)}$$

$$M_{\text{máx}2} = \frac{p \cdot l^2}{24} \quad \text{Eq.(105)}$$

$$M_{\text{atuante}2} = M_{\text{máx}1} + M_{\text{máx}2} \quad \text{Eq.(106)}$$

$$a = \frac{p \cdot l^4}{384 \cdot E_c \cdot I_m} \quad \text{Eq.(107)}$$

$$M_a = M_b = \frac{0,003032 \cdot 385^2}{12} = 37,45 \text{ kN} \quad \text{Eq.(108)}$$

$$M_{\text{máx}2} = \frac{0,003032 \cdot 385^2}{24} = 18,72 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(109)}$$

$$M_{\text{atuante}2} = 123,85 + 18,72 = 142,57 \text{ kN} \quad \text{Eq.(110)}$$

$$I_m = \left\{ 2182,24 \cdot \left(\frac{66,31}{142,57} \right)^3 + 675,03 \cdot \left[1 - \left(\frac{66,31}{142,57} \right)^3 \right] \right\} = 826,70 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(111)}$$

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} = 25043,96 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(112)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 25043,96 = 21287,37 \text{ MPa} = 2128,74 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(113)}$$

$$a = \frac{0,003032 \cdot 385^4}{384 \cdot 2128,74 \cdot 826,70} = 0,10 \text{ cm} \quad \text{Eq.(114)}$$

4.7.1.9 Cálculo da flecha devido a $g_{22} = 0,1204 \text{ kN/m}$ (seção composta) – após execução do revestimento superior, 4ª etapa construtiva.

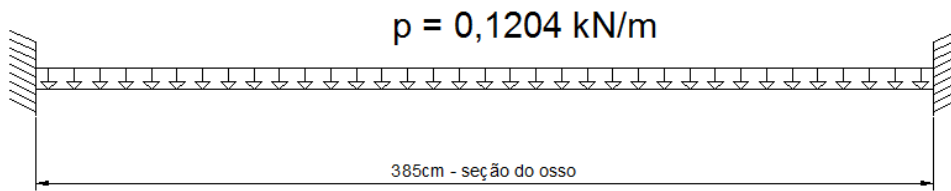


Figura 38: Modelagem de cálculo para 4ª etapa.
Fonte: Autor.

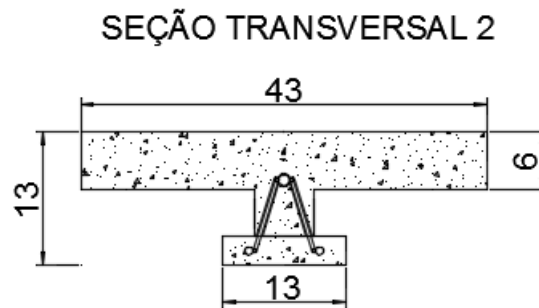


Figura 39: Seção composta (2), considerada para o cálculo da 4ª etapa.
Fonte: Autor.

$$M_a = M_b = \frac{p \cdot l^2}{12} \quad \text{Eq.(115)}$$

$$M_{\text{máx}3} = \frac{p \cdot l^2}{24} \quad \text{Eq.(116)}$$

$$M_{\text{atuante}3} = M_{\text{máx}1} + M_{\text{máx}2} + M_{\text{máx}3} \quad \text{Eq.(117)}$$

$$a = \frac{p \cdot l^4}{384 \cdot E_c \cdot I_m} \quad \text{Eq.(118)}$$

$$M_a = M_b = \frac{(0,001204 + 0,003032) \cdot 385^2}{12} = 52,32 \text{ kN} \quad \text{Eq.(119)}$$

$$M_{\text{máx}3} = \frac{0,001204 \cdot 385^2}{24} = 7,44 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(120)}$$

$$M_{\text{atuante3}} = 123,85 + 18,72 + 7,44 = 150,01 \text{ kN} \quad \text{Eq.(121)}$$

$$I_m = \left\{ 3621,214 \cdot \left(\frac{96,40}{150,01} \right)^3 + 1038,69 \cdot \left[1 - \left(\frac{96,40}{150,01} \right)^3 \right] \right\} = 1724,02 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(122)}$$

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} = 25043,96 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(123)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 25043,96 = 21287,37 \text{ MPa} = 2128,74 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(124)}$$

$$a = \frac{0,001204 \cdot 385^4}{384 \cdot 2128,74 \cdot 1724,02} = 0,02 \text{ cm} \quad \text{Eq.(125)}$$

4.7.1.10 Cálculo da flecha devido a $q = 0,645 \text{ kN/m}$ (seção composta) – Referente à utilização da edificação, 5ª etapa construtiva.

Para verificação final, deve-se comparar o momento gerado no apoio com o momento que o mesmo resiste:

$$M_a = M_b = \frac{p \cdot l^2}{12} \quad \text{Eq.(126)}$$

$$M_a = M_b = \frac{(0,003032 + 0,001204 + 0,00645) \cdot 385^2}{12} = 131,99 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(127)}$$

Como $M_a = M_b = 131,99 \text{ kN.cm} > M_1 = 124,91 \text{ kN.cm}$, a flecha referente ao carregamento “q” deve ser calculada uma primeira etapa com momento máximo igual e M_1 , e uma segunda parte relativa ao carregamento restante (considerando apoio simples). Caso isto não ocorra todo o momento é resistido pelo fio superior da treliça e considera-se somente situação de engaste.

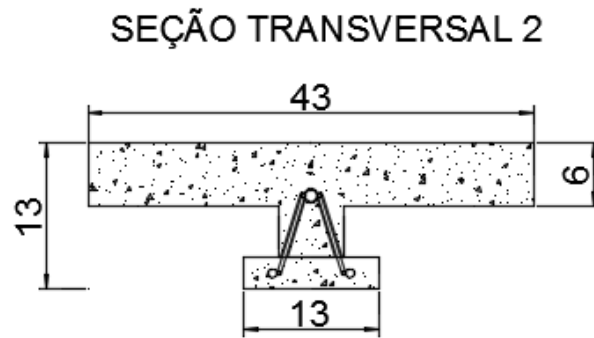


Figura 40: Seção composta (2), considerada para o cálculo da 5ª etapa
Fonte: Autor.

$$M_1 = \frac{p \cdot l^2}{12} \quad \text{Eq.(128)}$$

$$p^* = \frac{1,249 \cdot 12}{4^2} = 1,01 \text{ kN/m} \quad \text{Eq.(129)}$$

$$p_1^* = 1,01 - 0,3032 - 0,1204 = 0,59 \text{ kN/m (engastada)}$$

$$p_2^* = 1,07 - 1,01 = 0,06 \text{ kN/m (apoiada)}$$

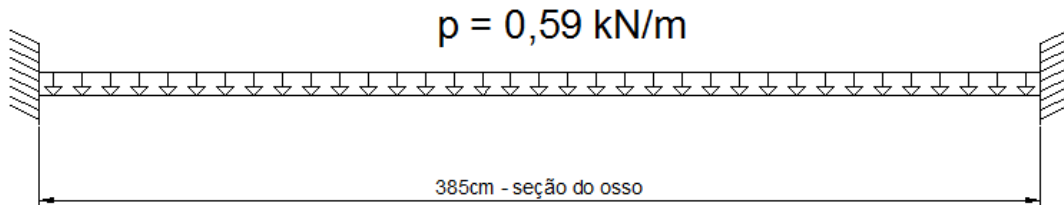


Figura 41: Modelagem para o cálculo devido à carga q - primeira etapa.
Fonte: Autor.

$$M_{\text{máx4}} = \frac{p \cdot l^2}{24} \quad \text{Eq.(130)}$$

$$M_{\text{atuante4}} = M_{\text{máx1}} + M_{\text{máx2}} + M_{\text{máx3}} + M_{\text{máx4}} \quad \text{Eq.(131)}$$

$$a = \frac{p \cdot l^4}{384 \cdot E_c \cdot I_m} \quad \text{Eq.(132)}$$

$$M_{\text{máx4}} = \frac{0,0059 \cdot 385^2}{24} = 36,30 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(133)}$$

$$M_{\text{atuante2}} = 124,91 + 18,72 + 7,44 + 36,30 = 187,37 \text{ kN} \quad \text{Eq.(134)}$$

$$I_m = \left\{ 3621,14 \cdot \left(\frac{96,40}{187,37} \right)^3 + 1038,69 \cdot \left[1 - \left(\frac{96,40}{187,37} \right)^3 \right] \right\} = 1396,44 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(135)}$$

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} = 25043,96 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(136)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 25043,96 = 21287,37 \text{ MPa} = 2128,74 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(137)}$$

$$a = \frac{0,0059 \cdot 385^4}{384 \cdot 2128,74 \cdot 1396,44} = 0,13 \text{ cm} \quad \text{Eq.(138)}$$

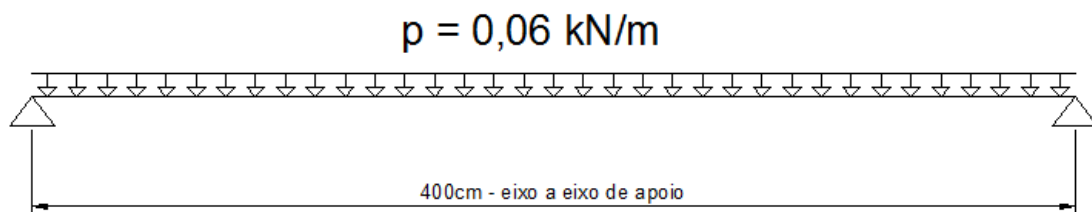


Figura 42: Modelagem para o cálculo devido a carga q – segunda etapa
Fonte: Autor

$$M_{\text{máx4}} = \frac{p \cdot l^2}{8} \quad \text{Eq.(139)}$$

$$M_{\text{atuante4}} = M_{\text{máx1}} + M_{\text{máx2}} + M_{\text{máx3}} + M_{\text{máx4}} + M_{\text{máx5}} \quad \text{Eq.(140)}$$

$$a = \frac{5 \cdot p \cdot l^4}{384 \cdot E_c \cdot I_m} \quad \text{Eq.(141)}$$

$$M_{\text{máx4}} = \frac{0,0006 \cdot 400^2}{8} = 10,62 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq.(142)}$$

$$M_{\text{atuante2}} = 124,91 + 18,72 + 7,44 + 36,30 + 10,62 = 197,99 \text{ kN} \quad \text{Eq.(143)}$$

$$I_m = \left\{ 3621,14 \cdot \left(\frac{96,40}{197,99} \right)^3 + 1038,69 \cdot \left[1 - \left(\frac{96,40}{197,99} \right)^3 \right] \right\} = 1341,62 \text{ cm}^4 \quad \text{Eq.(144)}$$

$$E_{ci} = 1,0 \cdot 5600 \sqrt{20} = 25043,96 \text{ MPa} \quad \text{Eq.(145)}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 25043,96 = 21287,37 \text{ MPa} = 2128,74 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Eq.(146)}$$

$$a = \frac{5 \cdot 0,0006 \cdot 400^4}{384 \cdot 2128,74 \cdot 1341,62} = 0,07 \text{ cm} \quad \text{Eq.(147)}$$

4.7.1.11 Flecha total acumulada.

Tabela 39: Flechas de acordo com etapas construtivas.

Flecha 2ª etapa (cm)	Flecha 3ª etapa (cm)	Flecha 4ª etapa (cm)	Flecha 5ª etapa (cm)	Total (cm)
1,12	0,10	0,02	0,20	1,44

Fonte: Autor.

Tabela 40: Verificação de flechas máximas.

	a (cm)	aLimite (cm)	Verificação
Carga Permanente	1,24	1,54	Ok
Quase permanente	1,32	1,54	Ok
Rara	1,44	x-x-x	x-x-x
Acidental	0,20	1,10	Ok

Fonte: Autor.

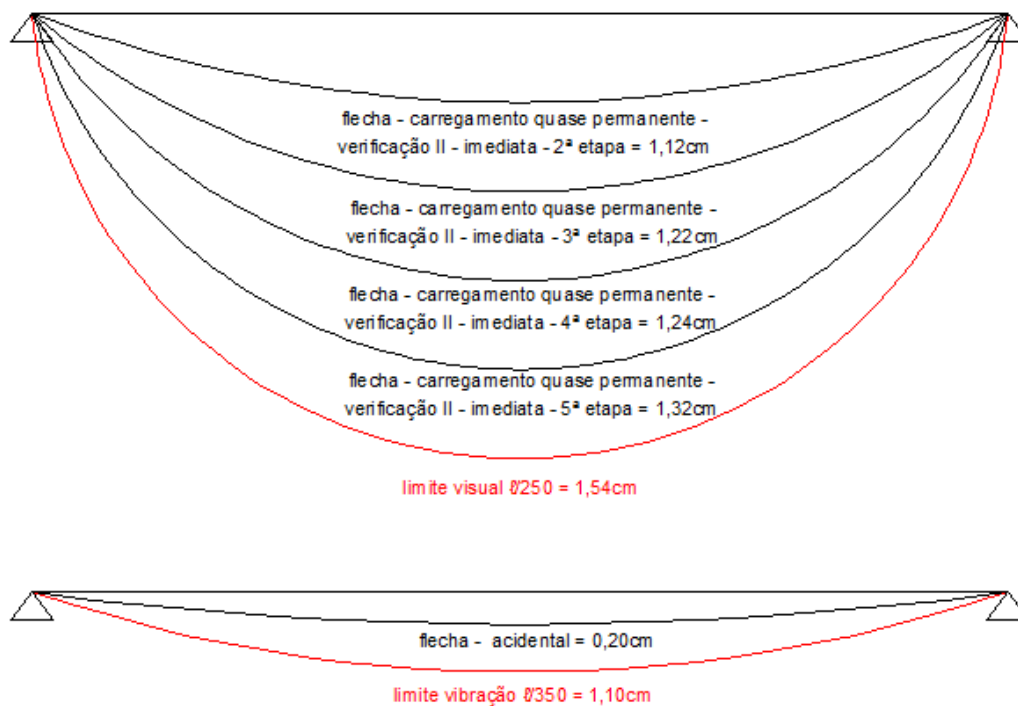


Figura 43: Diagrama de análise das flechas imediatas de acordo com Verificação II e cronograma construtivo 1 - tabelas 39 e 40.

Fonte: Autor.

Conforme dados apresentados acima, é possível concluir que o caso específico atende aos deslocamentos limites quando considerado etapas construtivas, porém além da determinação da flecha imediata ainda é necessário definir os coeficientes de fluência para análise da flecha no tempo infinito.

4.7.2 Coeficiente α_f de acordo com Anexo 2:

$$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32}, \text{ para } t \leq 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(148)}$$

$$\xi(t) = 2, \text{ para } t > 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(149)}$$

$$\rho' = \frac{A_{sI}}{b \cdot d} \quad \text{Eq.(150)}$$

Tabela 41: Coeficiente α_f para retirada de escoramento de acordo com cronograma construtivo 1.

2ª Etapa		3ª Etapa		4ª Etapa		5ª Etapa	
$\xi(t_0)$	0,54	$\xi(t_0)$	0,77	$\xi(t_0)$	0,90	$\xi(t_0)$	1,04
$\xi(\infty)$	2	$\xi(\infty)$	2	$\xi(\infty)$	2	$\xi(\infty)$	2
ρ'	0	ρ'	0	ρ'	0	ρ'	0
α_f	1,46	α_f	1,23	α_f	1,10	α_f	0,96

Fonte: Autor.

4.7.3 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 3:

Utilizando o método do anexo 3, considerando a umidade relativa do ar para a cidade de Varginha com média anual de 75%, concreto da classe C20, cimento Portland comum e a retirada de escoramento de acordo com cada etapa construtiva, teremos coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0)$ de acordo com tabela 3.1 apresentada no anexo 3.

Tabela 42: Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0)$, para retirada de escoramento de acordo com cronograma construtivo 1, considerando Umidade média de Varginha-MG.

Dados para avaliação considerando cronograma construtivo - Etapa 2		Dados para avaliação considerando cronograma construtivo Etapa 3	
Umidade média do ambiente %	75	Umidade média do ambiente %	75
Área de concreto da peça (cm ²)	235	Área de concreto da peça (cm ²)	235
μ - Perímetro em contato com o ar (cm)	56	μ - Perímetro em contato com o ar (cm)	56
Espessura Fictícia ($2.A_c / \mu$)	8,39	Espessura Fictícia ($2.A_c / \mu$)	8,39
Classe de Concreto (Mpa)	20	Classe de Concreto (Mpa)	20
Retirada do escoramento (dias)	15	Retirada do escoramento (dias)	45
$\varphi(t_\infty, t_0)$ – interpolado através da tabela 3.1	2,56	$\varphi(t_\infty, t_0)$ – interpolado através da tabela 3.1	2,05

Dados para avaliação considerando cronograma construtivo - Etapa 4		Dados para avaliação considerando cronograma construtivo - Etapa 5	
Umidade média do ambiente %	75	Umidade média do ambiente %	75
Área de concreto da peça (cm ²)	321	Área de concreto da peça (cm ²)	321
μ - Perímetro em contato com o ar (cm)	43	μ - Perímetro em contato com o ar (cm)	0
Espessura Fictícia ($2.A_c / \mu$)	14,9	Espessura Fictícia ($2.A_c / \mu$)	642000,00
Classe de Concreto (Mpa)	3	Classe de Concreto (Mpa)	20
Retirada do escoramento (dias)	20	Retirada do escoramento (dias)	120
$\varphi(t_\infty, t_0)$ – interpolado através da tabela 3.1	75	$\varphi(t_\infty, t_0)$ – interpolado através da tabela 3.1	1,80
	1,90		

Fonte: Autor.

4.7.4 Coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t)$ de acordo com Anexo 4:

Utilizando dados colhidos durante pesquisa e formulações apresentadas no anexo 4 deste material foi possível determinar o coeficiente de fluência, conforme tabelas a seguir.

Tabela 43: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 2 –
NBR6118:2014

DADOS DE ENTRADA		Etapa 02	
		$D_{\text{tef},i}$ (dias)	T_i ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)		15	20,22
		0	0
		0	0
		0	0
f_{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		15	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - $\alpha = 1,0$	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - $\alpha = 2,0$	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - $\alpha = 3,0$		
Umidade Relativa do Ar U_{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm^2)		235	
Perímetro em contato com ar (cm)		56	
COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DO CONCRETO			
t_0 - (Idade fictícia do concreto, em dias)		30,22	
s - (coeficiente em função do tipo de cimento)		0,250	
$\beta_{1(t)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		0,913	
$\beta_{1(\infty)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		1,284	
ϕ_a - Coeficiente de fluência rápida		0,231	
γ - coeficiente para determinação da espessura fictícia		1,741	
h_{fic} (m) - espessura fictícia da peça		0,146	
ϕ_{1c} - coeficiente que depende de U_{ar} e consistência do concreto		1,825	
ϕ_{2c} - coeficiente que depende de espessura fictícia da peça		1,636	
$\phi_{f\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível		2,985	
A		191,57	
B		386,57	
C		341,91	
D		6437,11	
$\beta_d(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo ($t-t_0$) decorrido após o carregamento		0,995	
$\beta_f(t_0)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,401	
$\beta_f(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,98	
$\phi_{d\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4		0,400	
$\phi(t,t_0)$ - Coeficiente de fluência entre os instantes t_0 e t		2,374	

Fonte: Material desenvolvido por Antônio de Faria, Faria (2014).

Tabela 44: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 3 –
NBR6118:2014

DADOS DE ENTRADA		Etapa 03	
		$D_{\text{def},i}$ (dias)	T_i (°C)
Temperatura Média (°C)		45	20,22
		0	0
		0	0
		0	0
f_{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		45	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - $\alpha = 1,0$	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - $\alpha = 2,0$	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - $\alpha = 3,0$		
Umidade Relativa do Ar U_{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm ²)		235	
Perímetro em contato com ar (cm)		56	
COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DO CONCRETO			
t_0 - (Idade fictícia do concreto, em dias)		90,66	
s - (coeficiente em função do tipo de cimento)		0,250	
$\beta_{1(t)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		1,054	
$\beta_{1(\infty)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		1,284	
ϕ_a - Coeficiente de fluência rápida		0,143	
γ - coeficiente para determinação da espessura fictícia		1,741	
h_{fic} (m) - espessura fictícia da peça		0,146	
ϕ_{1c} - coeficiente que depende de U_{ar} e consistência do concreto		1,825	
ϕ_{2c} - coeficiente que depende de espessura fictícia da peça		1,636	
$\phi_{f_{\infty}}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível		2,985	
A		191,57	
B		386,58	
C		341,91	
D		6437,11	
$\beta_d(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo $(t-t_0)$ decorrido após o carregamento		0,995	
$\beta_f(t_0)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,569	
$\beta_f(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,985	
$\phi_{d\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4		0,400	
$\phi(t, t_0)$ - Coeficiente de fluência entre os instantes t_0 e t		1,784	

Fonte: Material desenvolvido por Antônio de Faria, Faria (2014).

Tabela 45: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 4 –
NBR6118:2014

DADOS DE ENTRADA		Etapa 04	
		$D_{\text{tef},i}$ (dias)	T_i ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)		75	20,22
		0	0
		0	0
		0	0
f_{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		75	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - $\alpha = 1,0$	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - $\alpha = 2,0$	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - $\alpha = 3,0$		
Umidade Relativa do Ar U_{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm^2)		321,00	
Perímetro em contato com ar (cm)		43	
t_0 - (Idade fictícia do concreto, em dias)		151,10	
s - (coeficiente em função do tipo de cimento)		0,250	
$\beta_{1(t)}$ - relação entre $f_{\text{ckj}}/f_{\text{ck}}$		1,102	
$\beta_{1(\infty)}$ - relação entre $f_{\text{ckj}}/f_{\text{ck}}$		1,284	
ϕ_a - Coeficiente de fluência rápida		0,113	
γ - coeficiente para determinação da espessura fictícia		1,741	
h_{fic} (m) - espessura fictícia da peça		0,260	
ϕ_{1c} - coeficiente que depende de U_{ar} e consistência do concreto		1,825	
ϕ_{2c} - coeficiente que depende de espessura fictícia da peça		1,478	
$\phi_{f\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível		2,698	
A		242,92	
B		624,3173	
C		463,6666	
D		9094,005	
$\beta_d(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo ($t-t_0$) decorrido após o carregamento		0,995	
$\beta_r(t_0)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,59	
$\beta_f(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,979	
$\phi_{d\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4		0,400	
$\phi(t,t_0)$ - Coeficiente de fluência entre os instantes t_0 e t		1,561	

Fonte: Material desenvolvido por Antônio de Faria, Faria (2014).

Tabela 46: Determinação do coeficiente de fluência do concreto para etapa construtiva 5 –
NBR6118:2014

DADOS DE ENTRADA		Etapa 05	
		$D_{tef,i}$ (dias)	T_i ($^{\circ}C$)
Temperatura Média ($^{\circ}C$)		120	20,22
		0	0
		0	0
		0	0
f_{ck} (MPa)		20	
Idade Inicial (dias)		120	
Idade Final (dias)		10000	
Tipo de Cimento - α	Endurecimento Lento (CPIII e CP IV) - $\alpha = 1,0$	Fluência	
	Endurecimento Normal (CPI e CP II) - $\alpha = 2,0$	2,0	
	Endurecimento Rápido (CP V-ARI) - $\alpha = 3,0$		
Umidade Relativa do Ar U_{ar} (%)		75	
Abatimento do Tronco de Cone - Slump Test - (cm)		8,0	
Área da Seção Transversal (cm^2)		321,00	
Perímetro em contato com ar (cm)		0	
t_0 - (Idade fictícia do concreto, em dias)		241,76	
s - (coeficiente em função do tipo de cimento)		0,250	
$\beta_{1(t)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		1,138	
$\beta_{1(\infty)}$ - relação entre f_{ckj}/f_{ck}		1,284	
ϕ_a - Coeficiente de fluência rápida		0,091	
γ - coeficiente para determinação da espessura fictícia		1,741	
h_{fic} (m) - espessura fictícia da peça		1,60	
ϕ_{1c} - coeficiente que depende de U_{ar} e consistência do concreto		1,825	
ϕ_{2c} - coeficiente que depende de espessura fictícia da peça		1,122	
$\phi_{f\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível		2,048	
A		329,83	
B		463,528	
C		1141,08	
D		7818,424	
$\beta_d(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo (t-t ₀) decorrido após o carregamento		0,995	
$\beta_f(t_0)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,405	
$\beta_f(t)$ - coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto		0,927	
$\phi_{d\infty}$ - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4		0,400	
$\phi(t, t_0)$ - Coeficiente de fluência entre os instantes t_0 e t		1,558	

Fonte: Material desenvolvido por Antônio de Faria, Faria (2014).

4.7.5 Aplicação dos coeficientes de fluência:

Tabela 47: Aplicação dos diferentes coeficientes de fluência determinados considerando etapas construtivas.

Verificação da fluência pelo método anexo 2			
α_f 1ª etapa	1,46	$a_{total,\infty}$ (cm)	3,17
α_f 2ª etapa	1,23	a_{cf} (cm)	-1,10
α_f 3ª etapa	1,10	$a_{total,\infty}$ (cm)	2,07
α_f 4ª etapa	0,96	Verificação ($l/250$)	Alterar Seção

Verificação da fluência pelo método anexo 3			
$\varphi(t,t_0)$ 1ª etapa	2,56	$a_{total,\infty}$ (cm)	4,56
$\varphi(t,t_0)$ 2ª etapa	2,05	a_{cf} (cm)	-1,10
$\varphi(t,t_0)$ 3ª etapa	1,90	$a_{total,\infty}$ (cm)	3,46
$\varphi(t,t_0)$ 4ª etapa	1,80	Verificação ($l/250$)	Alterar Seção

Verificação da fluência pelo método anexo 4			
$\varphi(t,t_0)$ 1ª etapa	2,37	$a_{total,\infty}$ (cm)	4,30
$\varphi(t,t_0)$ 2ª etapa	1,78	a_{cf} (cm)	1,10
$\varphi(t,t_0)$ 3ª etapa	1,56	$a_{total,\infty}$ (cm)	3,20
$\varphi(t,t_0)$ 4ª etapa	1,56	Verificação ($l/250$)	Alterar Seção

Fonte: Autor.

4.7.6 Resumo da verificação II:

A seguir estão os dados obtidos para a verificação do ELS considerando atuação dos carregamentos de acordo com cronograma de execução 1.

Tabela 48: Resumo final das flechas para combinação quase permanente imediata e somados a aplicação dos coeficientes de fluência comparados aos limites de aceitação definidos por norma.

	Flecha imediata (comb. Quase permanente) (cm)	Valor da Flecha com a contraflecha limite de (ℓ/350)	Aceitabilidade sensorial, visual (ℓ/250)	Verificação
Verificação II - Considerando etapas Construtivas	1,32	0,22	1,54	ok
Verificação II + fluência anexo 2	3,17	2,07	1,54	Não ok
Verificação II + fluência anexo 3	4,56	3,46	1,54	Não ok
Verificação II + fluência anexo 4	4,30	3,20	1,54	Não ok

Fonte: Autor.

Tabela 49: Resumo final para flecha devido à vibração e limite máximo permitido por norma

Flecha imediata - Acidental (cm)	Aceitabilidade Sensorial, vibrações (ℓ/350)	Verificação
0,20	1,10	ok

Fonte: Autor.

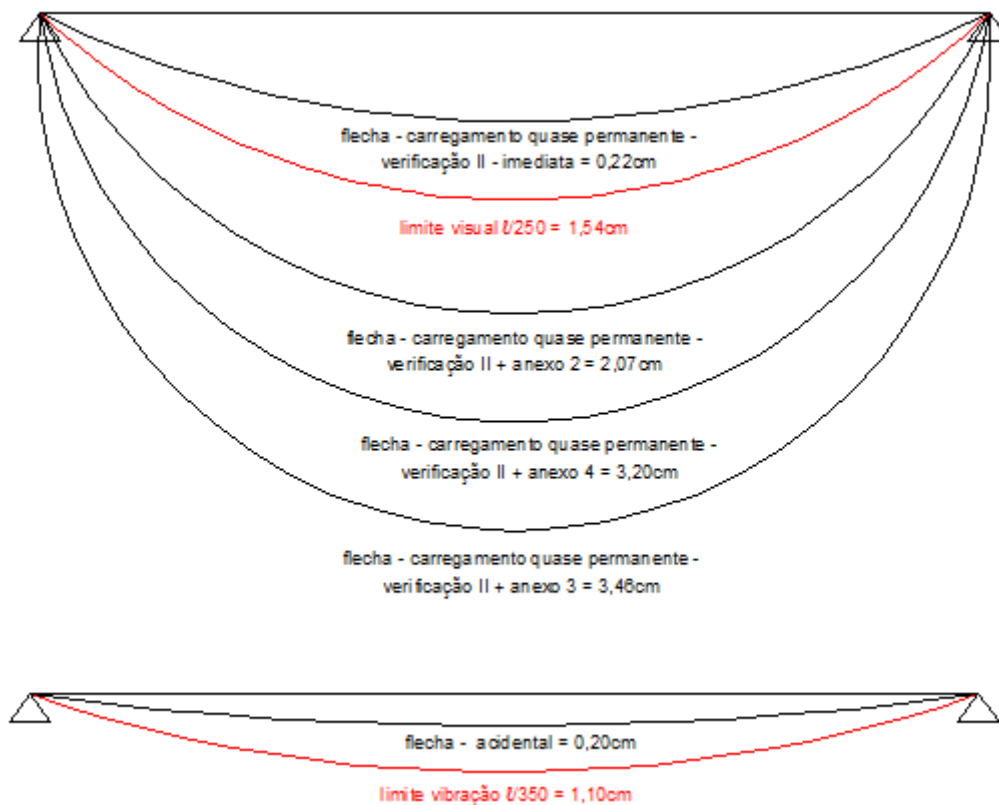


Figura 44: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II - tabelas 48 e 49.

Fonte: Autor.

4.7.6 Considerações sobre o exemplo e método de cálculo adotado:

De acordo com exemplo apresentado foi possível notar que a utilização de um cronograma construtivo pode resolver problemas de verificação quanto ao ELS dos elementos estruturais (laje), mesmo não atendendo a norma foi possível notar a redução expressiva nos valores finais obtidos.

A seguir serão apresentados dados para vãos de lajes de 2,50m, 3,00m, 3,50m e 4,00m conforme este exemplo, que é parte constituinte dos resultados para laje com vãos de 4,00m, utilizando 4 cronogramas construtivos e 3 métodos de aplicação da fluência.

5. DIAGNÓSTICO E RESULTADOS OBTIDOS.

Para a verificação do modelo de laje definido no item 4 deste trabalho serão seguidas as seguintes definições:

Tipo de cimento: Para verificação do projeto será admitido a utilização de cimento Portland comum CP-I ou CP-II, para que seja mantida a condição de comparação entre os valores obtidos, já que o anexo 3 deste trabalho e proposto pela NBR 6118:2014 são apresentados valores para este tipo de cimento;

Slump: $\pm 0,8$ (cm);

Laje apoiada nas extremidades em vigas ou paredes de 15 cm de largura;

A utilização do pavimento foi para fins residenciais (dormitório) e recebeu um piso natural (granito);

O teto foi revestido com argamassa convencional;

Demais dados:

Concreto $f_{ck} = 20$ Mpa;

Aço CA60;

Vão livre laje 1 = 2,50m;

Vão livre laje 2 = 3,00m;

Vão livre laje 3 = 3,50m;

Vão livre laje 4 = 4,00m;

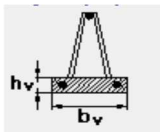
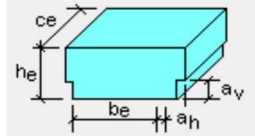
Cidade de execução da laje: Varginha-MG;

Classe de agressividade ambiental II – com considerações normativas CAA - I;

Cobrimento para armadura inferior do trilha igual a 1,5 cm, controle rígido;

Intereixo mínimo proposto pela ABNT NBR 14859-1: 2002 = 42cm, utilizado 43cm;

Tabela 50: Dados de entrada para cálculo do ELU.

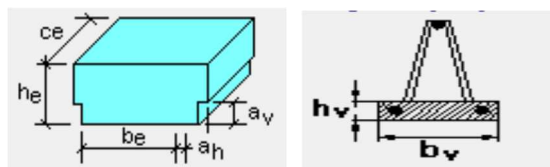
LAJE NERVURADA PRÉ-FABRICADA TRELIÇADA UNIDIRECIONAL - concreto até C50 – ELU			
b_f (cm)	43	g_{11} (kN/m/nervura) - peso próprio	0,5875
b_w (cm)	9	g_{12} (kN/m/nervura) – enchimento	0,0317
h_f (cm)	4	g_{21} (kN/m/nervura) - regularização sup/inf	0,3032
h_e (cm)	7	g_{22} (kN/m/nervura) – revestimento	0,1204
h total da laje (cm)	11	q (kN/m/nervura) – sobrecarga	0,6450
d' (cm)	2	p (kN/m/nervura)	1,69
b_e (cm)	30	M (kN.cm/nerv)	84,39
b_2 (cm)	34	k_{md}	0,024
a_v (cm)	3	k_x	0,035
a_h (cm)	2	k_z	0,986
h_v (cm)	3	y - (linha neutra - cm)	0,32
b_v (cm)	13	Verificação LN	ok
Vão da Laje-Direção Nervuras (cm) eixo a eixo	200	Verificação k_x	ok
f_{ck} (MPa)	20	A_s (cm ² /nervura)	0,26
Aço CA (kN/cm ²)	60	A_s adotado (cm ² /nervura)	0,28
$g_{concreto}$ (kN/m ³)	25,00		
$g_{enchimento}$ (kN/m ³)	1,40		
g_{21} (kN/m ²) - regularização sup/inf	0,71		
g_{22} (kN/m ²) - revestimento	0,28	Armadura adicional	XXXX
q (kN/m ²) - sobrecarga	1,50	Espessura das vigas ou paredes de apoio da laje	15

Fonte: Autor.

A tabela 50 apresenta dados de entrada para o cálculo do estado limite último dos modelos de laje adotados e demais considerações.

Durante o processo de elaboração deste trabalho foi feita pesquisa utilizando modelo de laje descrito anteriormente. A laje foi verificada conforme dados presentes no exemplo numérico e procedimento de cálculo apresentado, sendo os resultados apresentados a seguir referentes aos valores finais obtidos para cada situação.

Tabela 51: Resultados obtidos para laje 1 - vão eixo a eixo apoio 2,50m – ELU.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA LAJE

b_v (cm)	13	h_e (cm)	7	a_v (cm)	3
h_v (cm)	3	b_e (cm)	30	a_h (cm)	2
f_{ck} (MPa)	20	h total da laje (cm)	11	c_e (cm)	120
Aço CA (kN/cm²)	60	Espessura capeamento de concreto h_f (cm)		4	

DIMENSIONAMENTO ELU

A_s (cm²/nervura)	0,42	Treliça adotada	TB 8L	Armadura Adicional	1ø4.2mm
---	------	------------------------	-------	---------------------------	---------

DESCRIPTIVO:

Laje treliçada pré-fabricada TB8L com enchimento em Eps (120x34x7) - ADICIONAL 1ø4.2mm

VERIFICAÇÃO DO ELS-W

ELS-W atendido

VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO

Sem Arm.Transv.

Fonte: Autor.

Tabela 52: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 2,50m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha acidental.

Verificação I							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
Verificação em única etapa	-0,30	0,25	0,63	0,54	1,00	0,71	0,61
Verificação II							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
1º cronograma	-0,63	-0,58	-0,54	-0,55	0,94	0,67	0,00
2º cronograma		-0,59	-0,55	-0,55			
3º cronograma		-0,59	-0,56	-0,55			
4º cronograma		-0,59	-0,56	-0,55			

Fonte: Autor.

Legenda para os gráficos a seguir:

Verificação I – Verificação onde se considera a entrada de cargas em uma única data, não leva em consideração os aspectos construtivos.

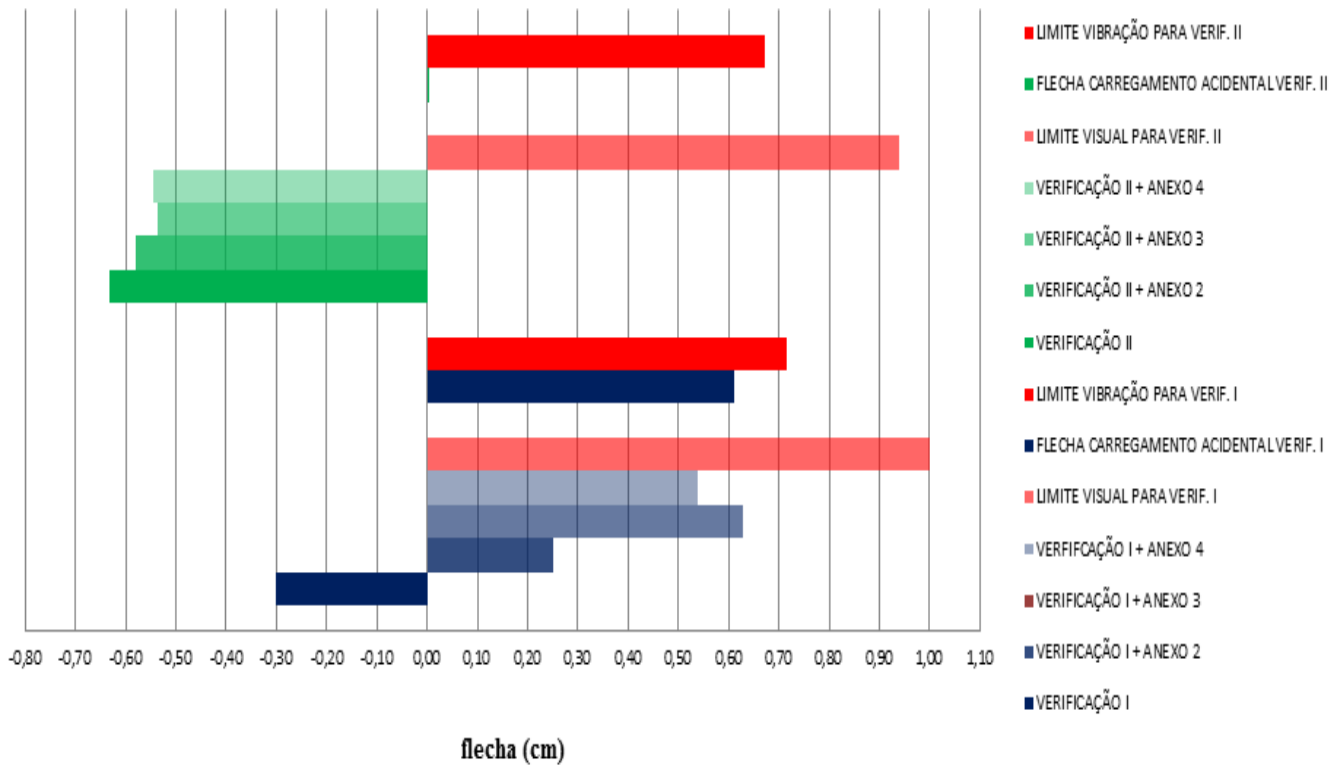
Verificação II – Verificação onde se considera a entrada de cargas na estrutura de maneira incremental, ou seja, leva em consideração os aspectos construtivos.

Anexo 2 – Anexo que apresenta informações para definir o valor de a_f , utilizados para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014.

Anexo 3 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 8.2.1 tabela 8.2 da ABNT NBR 6118:2014.

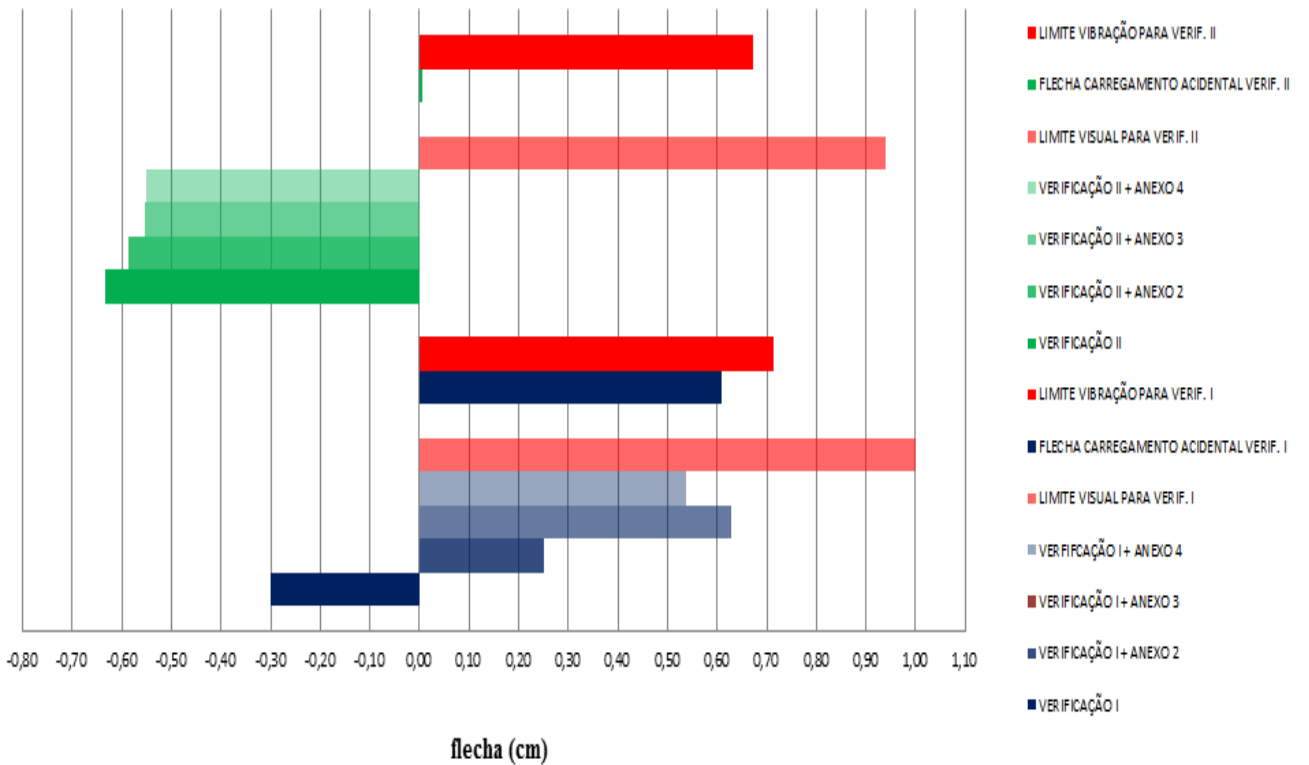
Anexo 4 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com anexo A – Efeito do tempo no concreto estrutural - ABNT NBR 6118:2014.

Gráfico 1: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 2,50m.



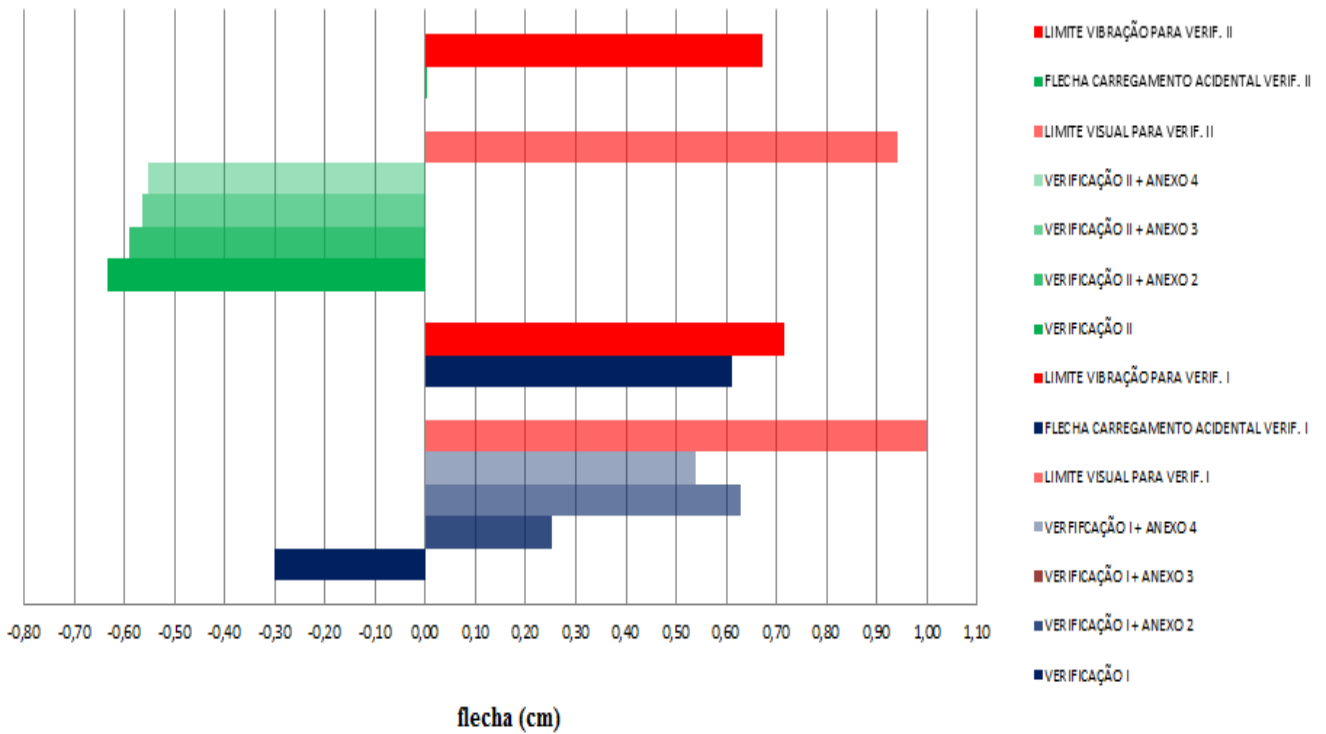
Fonte: Autor.

Gráfico 2: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 2,50m.



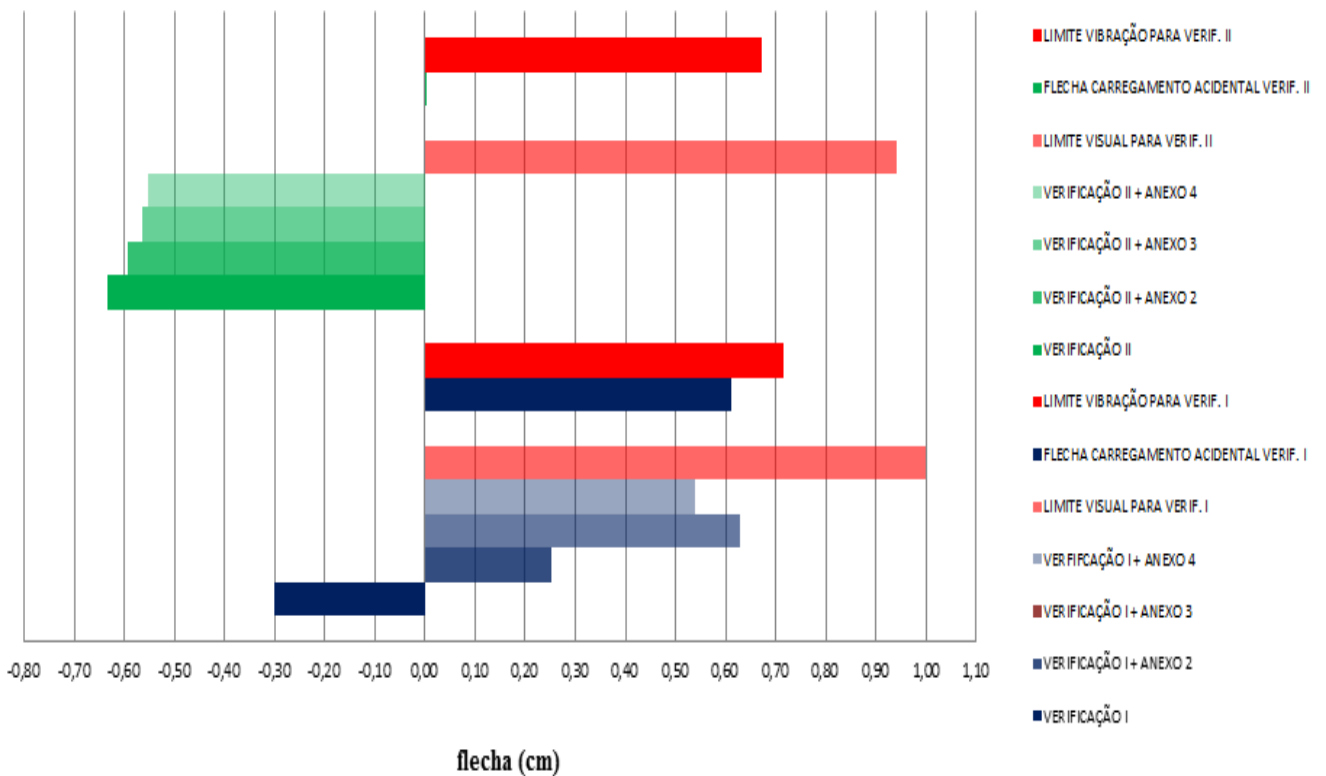
Fonte: Autor.

Gráfico 3: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 2,50m



Fonte: Autor.

Gráfico 4: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 2,50m



Fonte: Autor

Analisando a tabela 52 e os gráficos oriundos da mesma é possível notar:

Considerações sobre a Verificação I:

Laje com vãos menores de 2,50m atendem aos limites de serviço com verificações simples, como é o caso da verificação I, onde se considera entrada simultânea dos carregamentos em uma única data e utilizando qualquer um dos três métodos de determinação de fluência (anexos 2,3 e 4).

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) = 116% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) = 152% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Verificando a flecha imediata para esta mesma situação percebe-se que inicialmente o valor obtido é negativo, portanto se torna necessário avaliar a utilização ou não de contra flecha em lajes de pequenos vãos.

Limites para vibrações foram atendidos.

Considerações sobre a Verificação II:

Laje com vãos menores de 2,50m apresentam flechas negativas, portanto se torna necessário avaliar a utilização de contra flecha.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) está entre 5,17% e 6,17% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

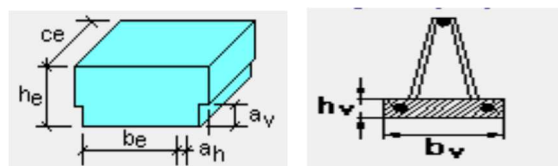
Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) está entre 5,08% e 6,90% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Com relação aos aspectos construtivos (cronogramas), foram utilizados cronogramas com prazos máximos de 3,6,9 e 12 meses de execução da obra respectivamente. A utilização deste processo de cálculo conseguiu reduzir consideravelmente os valores das flechas finais.

A variação das flechas ocorridas entre os cronogramas 4 (12 meses) e cronograma 1 (3 meses) foram de 1,7%, 3,7% e 0% respectivamente.

Tabela 53: Resultados obtidos para laje 2 - vão eixo a eixo apoio 3,00m – ELU.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA LAJE



b_v (cm)	13	h_e (cm)	7	a_v (cm)	3
h_v (cm)	3	b_e (cm)	30	a_h (cm)	2
f_{ck} (MPa)	20	h total da laje (cm)	11	c_e (cm)	120
Aço CA (kN/cm²)	60	Espessura capeamento de concreto h_f (cm)			4

DIMENSIONAMENTO ELU

A_s (cm ² /nervura)	0,59	Treliça adotada	TB 8M	Armadura Adicional	1ø5.0mm
----------------------------------	------	------------------------	-------	---------------------------	---------

DESCRIPTIVO:

Laje treliçada pré-fabricada TB8M com enchimento em Eps (120x34x7) - ADICIONAL 1ø5.0mm

VERIFICAÇÃO DO ELS-W

ELS-W atendido

VERIFICAÇÃO AO CISCALHAMENTO

Sem Arm. Transv.

Fonte: Autor.

Tabela 54: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 3,00m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha accidental.

Verificação I							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha accidental
Verificação em única etapa	0,36	1,13	2,24	1,97	1,20	0,86	1,11

Verificação II							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha accidental
1º cronograma	-0,61	-0,31	-0,09	-0,13	1,14	0,81	0,02
2º cronograma		-0,36	-0,18	-0,17			
3º cronograma		-0,38	-0,24	-0,18			
4º cronograma		-0,39	-0,24	-0,18			

Fonte: Autor.

Legenda para os gráficos a seguir:

Verificação I – Verificação onde se considera a entrada de cargas em uma única data, não leva em consideração os aspectos construtivos.

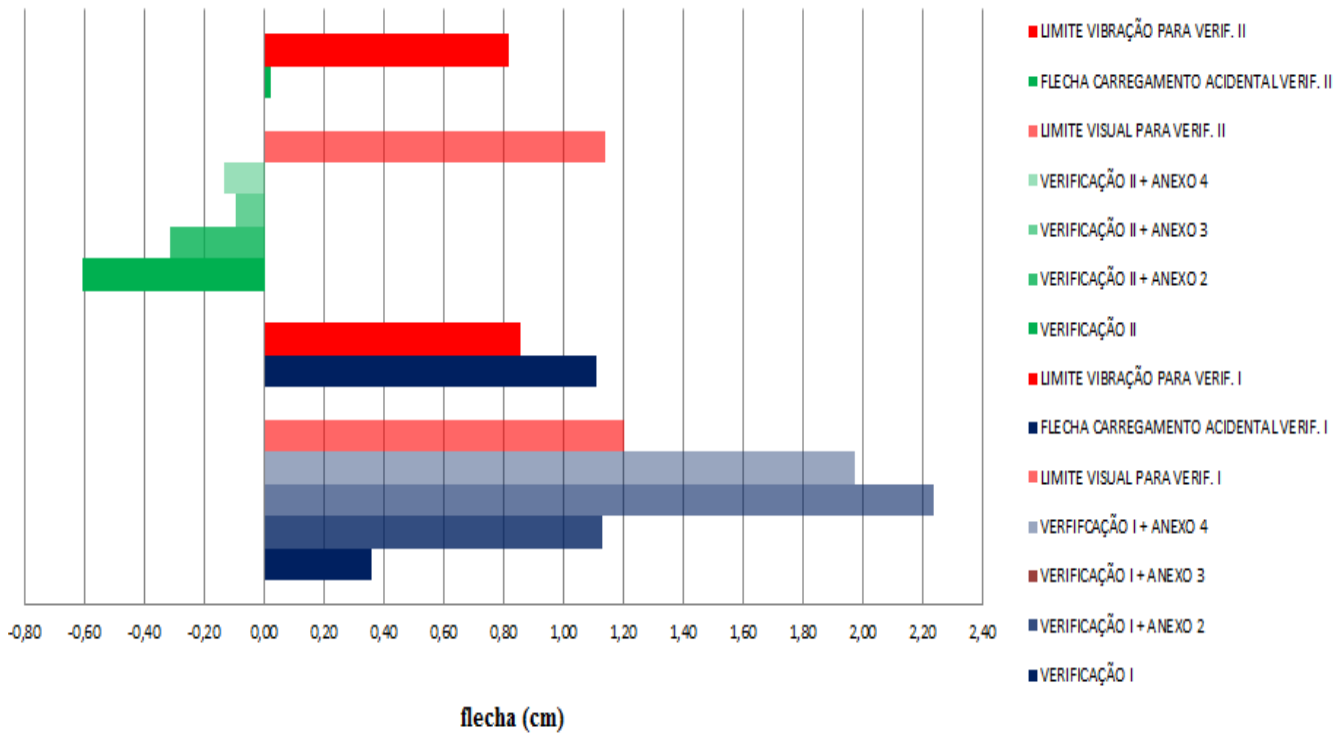
Verificação II – Verificação onde se considera a entrada de cargas na estrutura de maneira incremental, ou seja, leva em consideração os aspectos construtivos.

Anexo 2 – Anexo que apresenta informações para definir o valor de a_f utilizados para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014.

Anexo 3 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 8.2.1 tabela 8.2 da ABNT NBR 6118:2014.

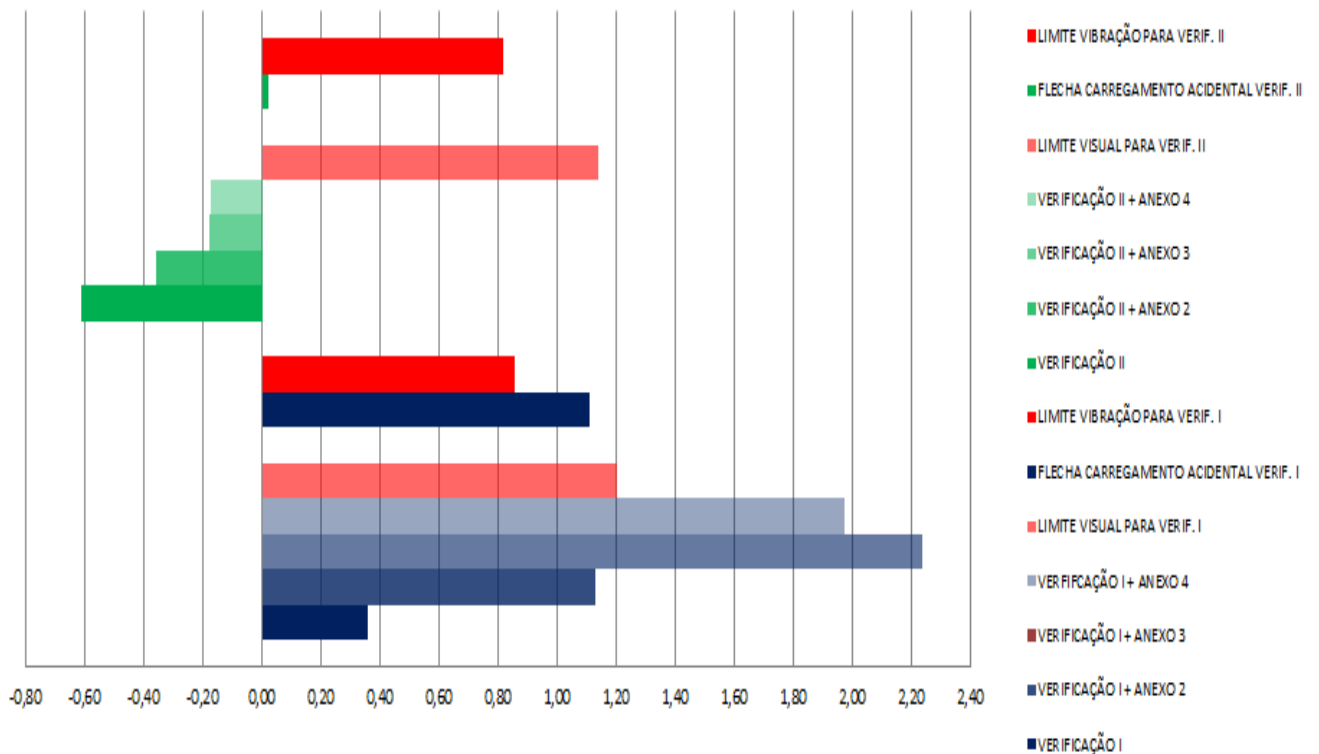
Anexo 4 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com anexo A – Efeito do tempo no concreto estrutural - ABNT NBR 6118:2014.

Gráfico 5: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 3,00m.



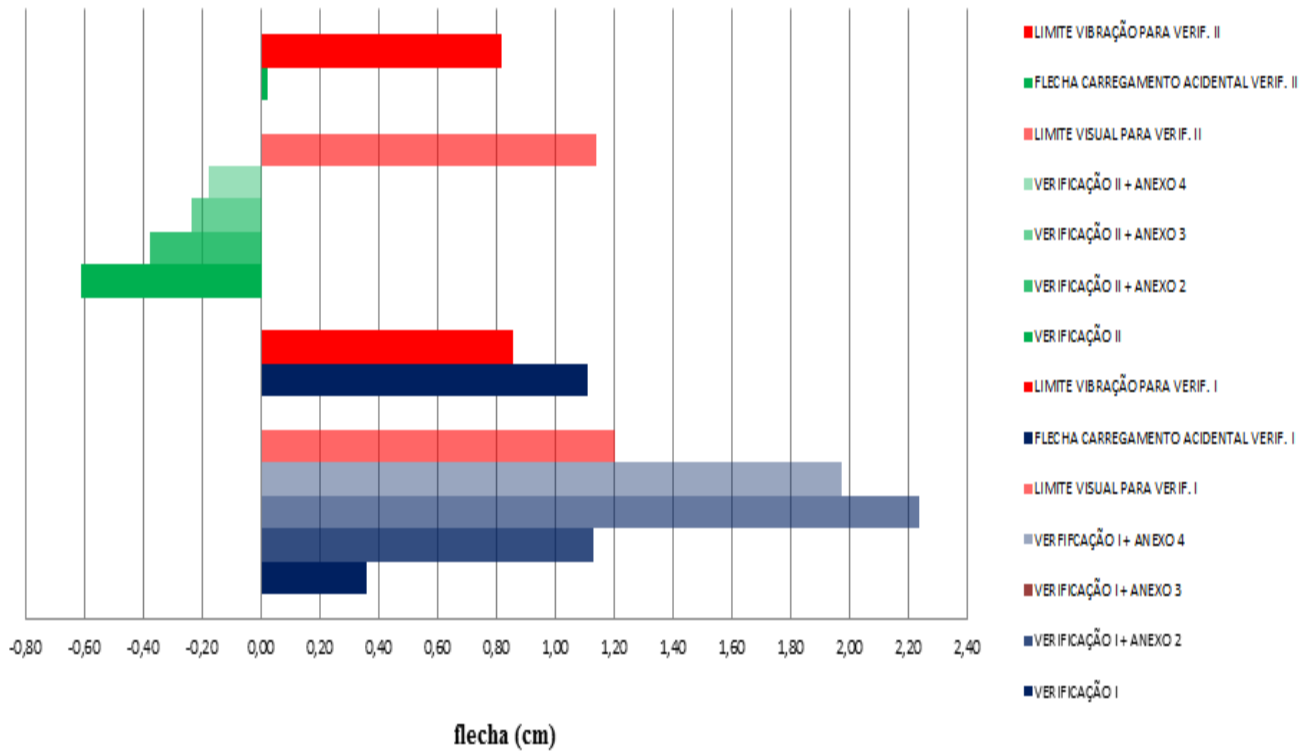
Fonte: Autor.

Gráfico 6: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 3,00m



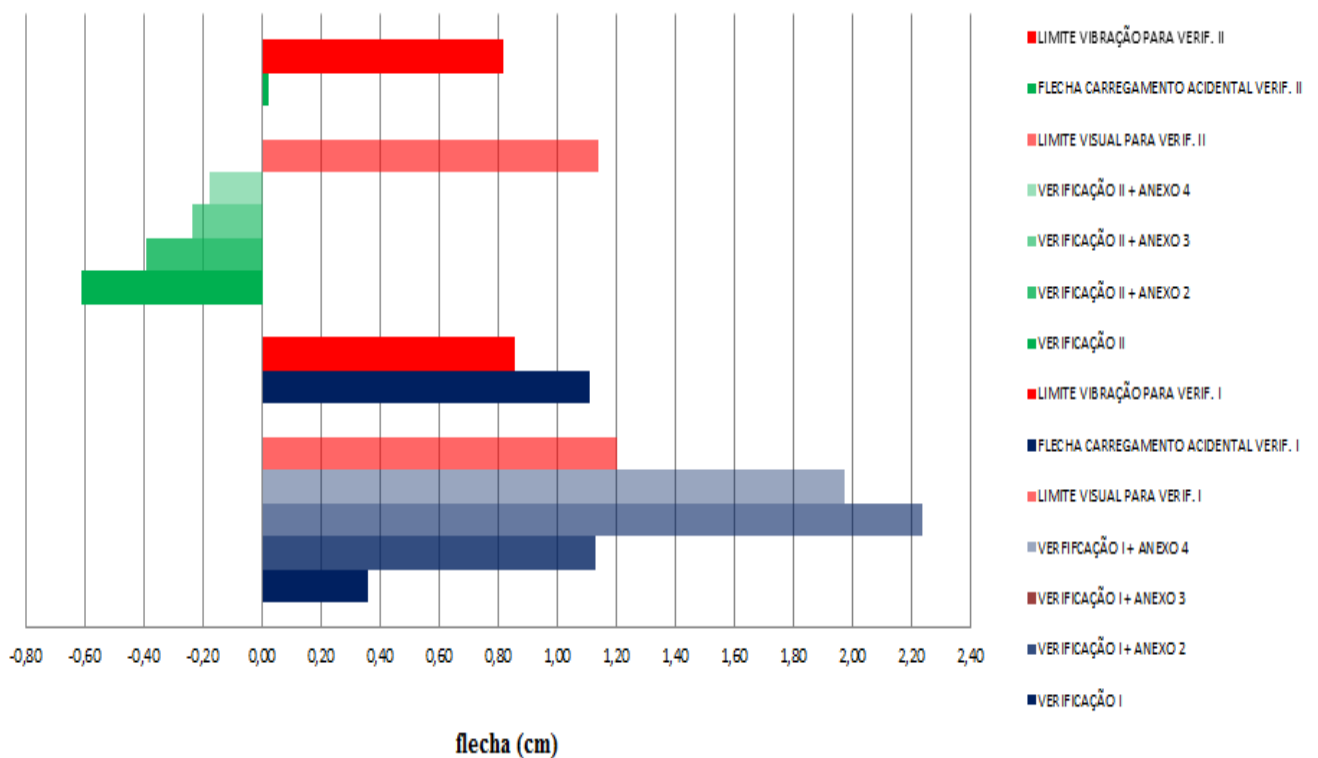
Fonte: Autor.

Gráfico 7: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,00m.



Fonte: Autor.

Gráfico 8: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 3,00m.



Fonte: Autor.

Analisando a tabela 54 e os gráficos oriundos da mesma é possível notar:

Considerações sobre a Verificação I:

Laje com vãos de 3,00m atendem aos limites de serviço para verificação em uma única data de aplicação de cargas quando se utiliza análise de fluência igual ao item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 2) porém, quando se aplicam os métodos constantes nos itens 8.2.11 e anexo A da referida norma (anexos 3 e 4) que consideram maior número de variáveis relacionadas ao local de execução da laje, os limites visuais e de vibração não são atendidos.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) = 74,34% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) = 98% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Limites de vibração não foram atendidas.

Considerações sobre a Verificação II:

Laje com vãos de 3,00m apresentam flechas negativas, portanto se torna necessário avaliar a utilização da contra flecha.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) apresenta-se entre 52,63% e 58,06% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) apresenta-se entre 36,84% e 70,96% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

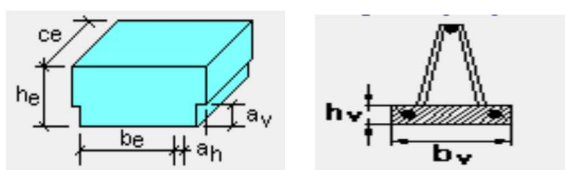
Com relação aos aspectos construtivos (cronogramas), foram utilizados cronogramas com prazos máximos de 3,6,9 e 12 meses de execução da obra respectivamente. A utilização deste processo de cálculo conseguiu reduzir consideravelmente os valores das flechas finais.

A variação das flechas ocorridas entre os cronogramas 4 (12 meses) e cronograma 1 (3 meses) foram de 25,81%, 166,67% e 23,68% respectivamente.

- Limites de vibração foram atendidos.

Tabela 55: Resultados obtidos para laje 3 - vão eixo a eixo apoio 3,50m – ELU.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA LAJE



b_v (cm)	13	h_e (cm)	7	a_v (cm)	3
h_v (cm)	3	b_e (cm)	30	a_h (cm)	2
f_{ck} (MPa)	20	h total da laje (cm)	11	c_e (cm)	120
Aço CA (kN/cm²)	60	Espessura capeamento de concreto h_r (cm)			4

DIMENSIONAMENTO ELU

A_s (cm²/nervura)	0,84	Treliça adotada	TB 8M	Armadura Adicional	2 ϕ 6.0mm
--	------	------------------------	-------	---------------------------	----------------

DESCRIPTIVO:

Laje treliçada pré-fabricada TB8L com enchimento em Eps (120x34x7) - ADICIONAL 2 ϕ 6.0mm

VERIFICAÇÃO DO ELS-W

ELS-W atendido

VERIFICAÇÃO AO CISCALHAMENTO

Sem Arm.Transv.

Fonte: Autor.

Tabela 56: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 3,50m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha acidental.

Verificação I							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
Verificação em única etapa	1,09	2,89	4,80	4,34	1,40	1,00	1,35

Verificação II							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
1º cronograma	-0,30	0,62	1,32	1,19	1,34	0,96	0,07
2º cronograma		0,48	1,05	1,07			
3º cronograma		0,42	0,87	1,05			
4º cronograma		0,37	0,87	1,04			

Fonte: Autor.

Legenda para os gráficos a seguir:

Verificação I – Verificação onde se considera a entrada de cargas em uma única data, não leva em consideração os aspectos construtivos.

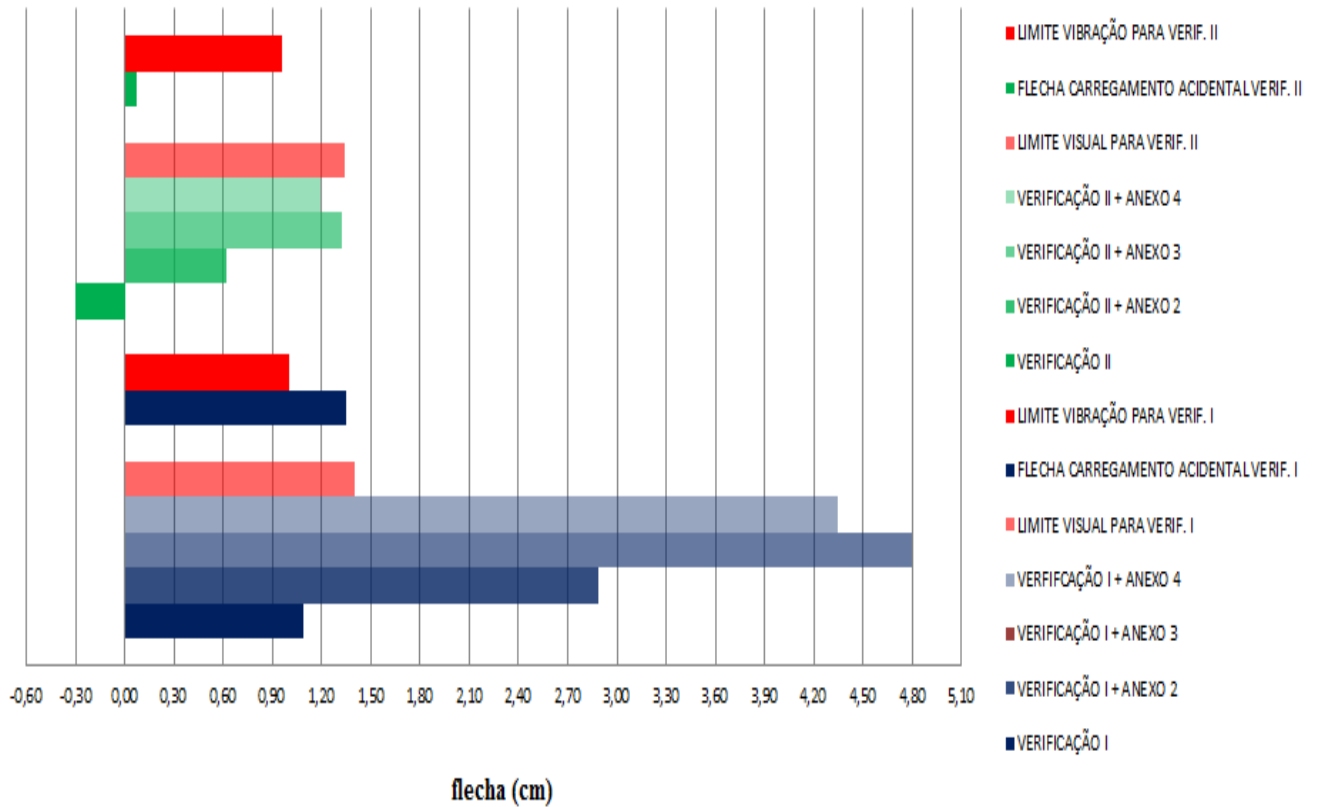
Verificação II – Verificação onde se considera a entrada de cargas na estrutura de maneira incremental, ou seja, leva em consideração os aspectos construtivos.

Anexo 2 – Anexo que apresenta informações para definir o valor de a_f utilizados para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014.

Anexo 3 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 8.2.1 tabela 8.2 da ABNT NBR 6118:2014.

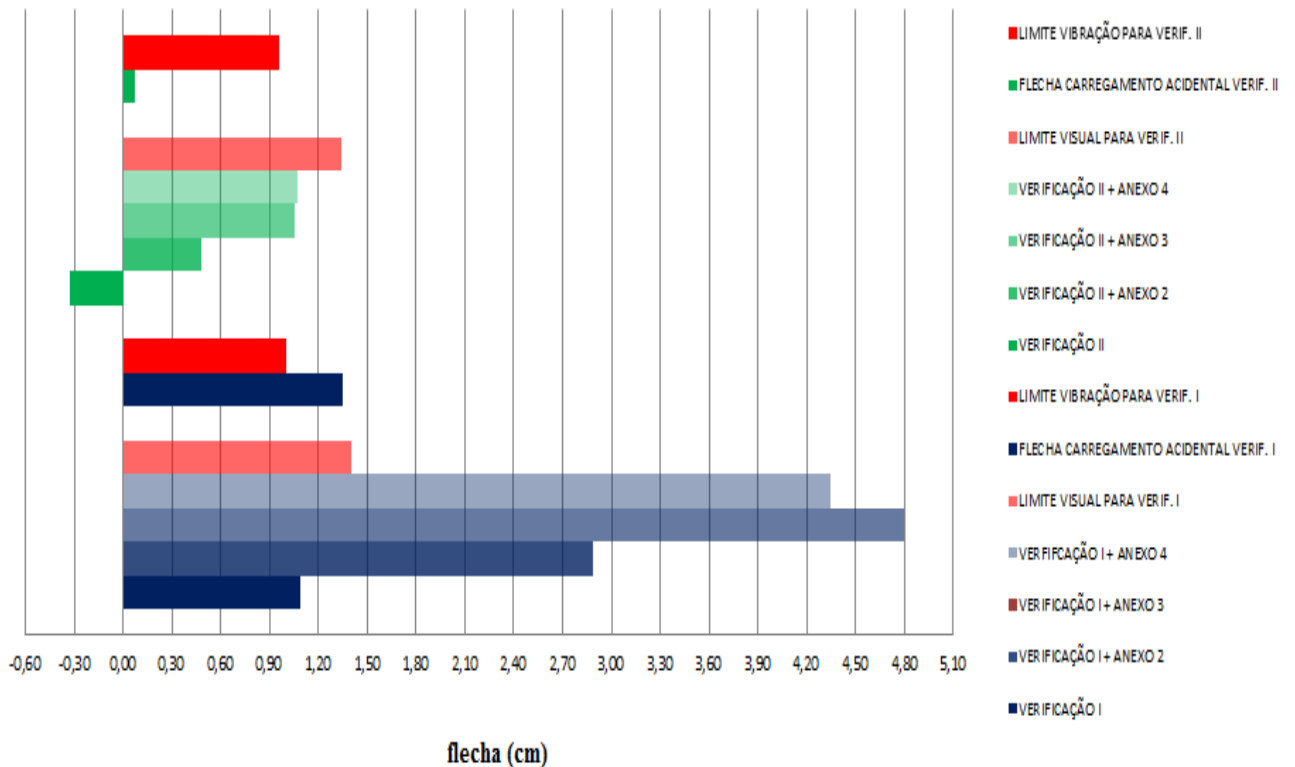
Anexo 4 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com anexo A – Efeito do tempo no concreto estrutural - ABNT NBR 6118:2014.

Gráfico 9: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 3,50m.



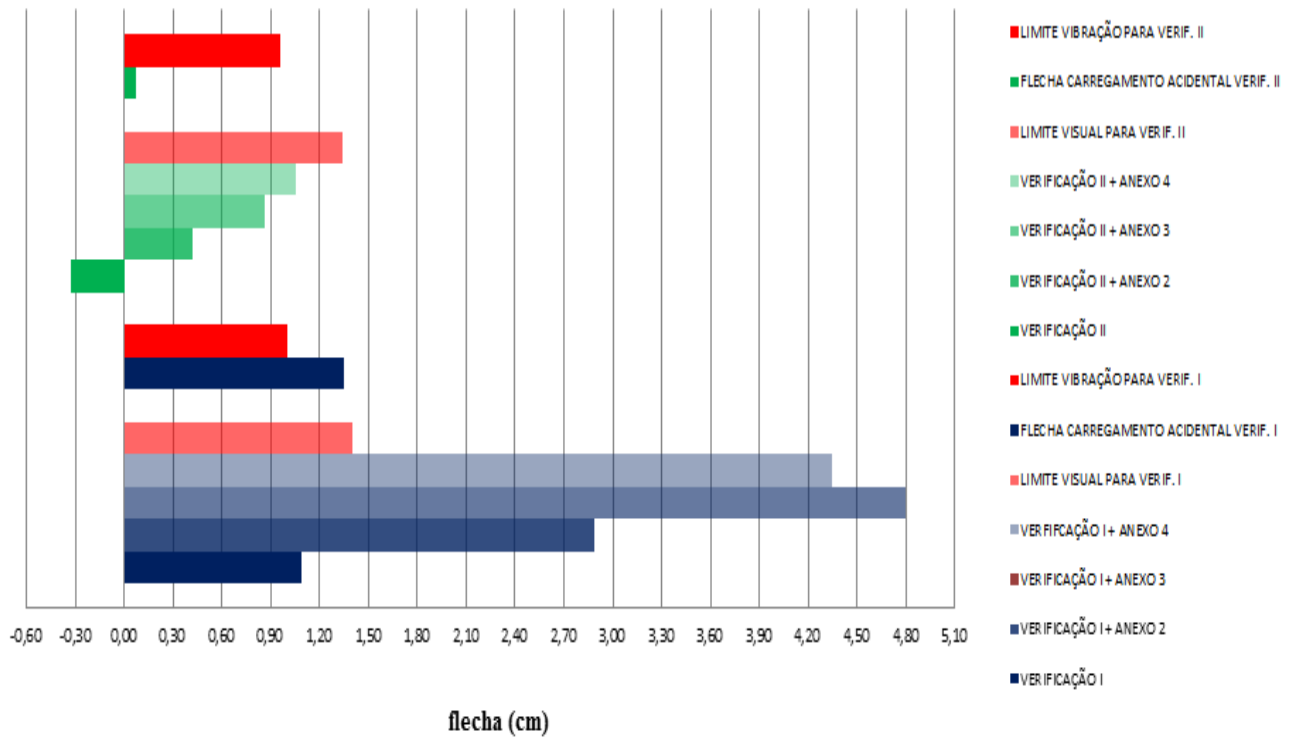
Fonte: Autor.

Gráfico 10: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 3,50m.



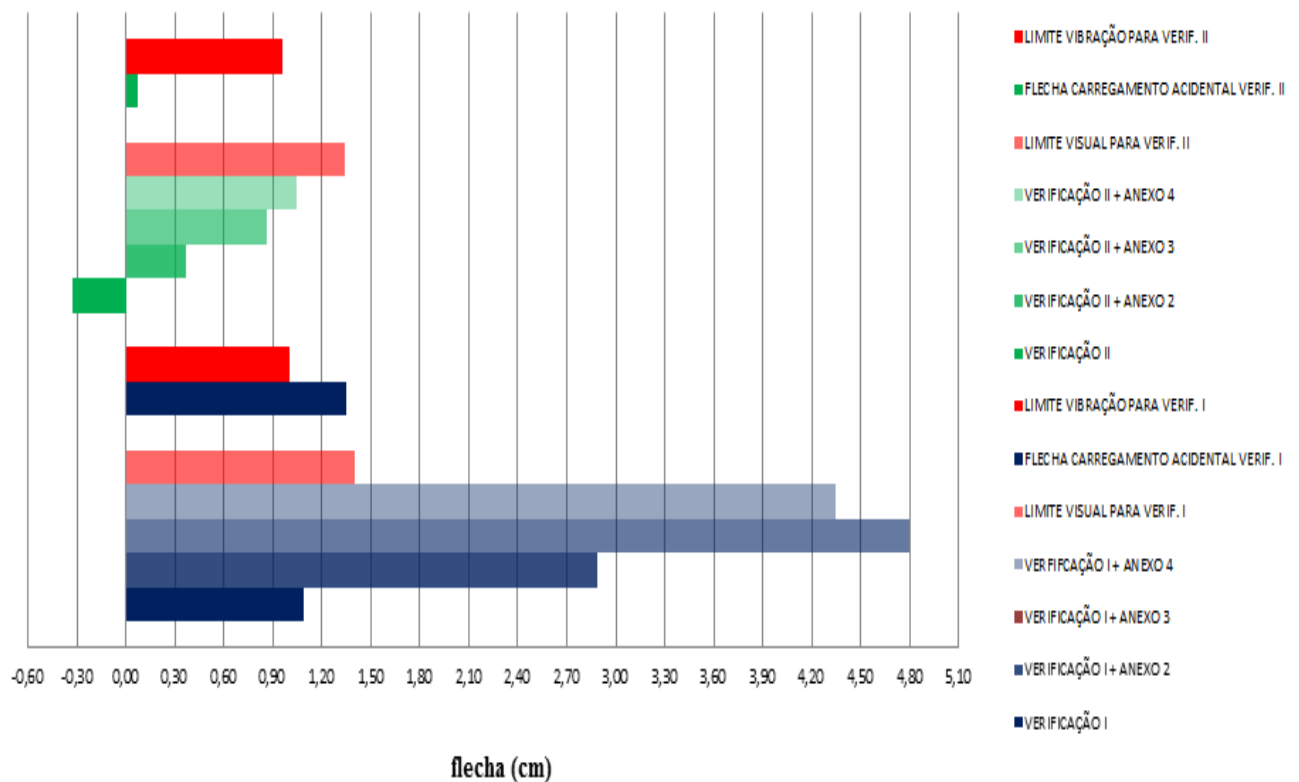
Fonte: Autor.

Gráfico 11: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,50m.



Fonte: Autor.

Gráfico 12: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 3,50m.



Fonte: Autor.

Analisando a tabela 56 e os gráficos oriundos da mesma é possível notar:

Considerações sobre a Verificação I:

Laje com vãos de 3,50m não atendem aos limites de serviço para verificação em uma única data de aplicação de cargas quando se utiliza análise de fluência igual aos anexos 2, 3 e 4 deste material.

A utilização da análise de fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) apresenta-se 50,17% maior em relação ao método simplificado apresentado no Item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) = 66,09% maior em relação ao método simplificado apresentado no Item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Limites de vibração não foram atendidos.

Considerações sobre a Verificação II:

Laje com vãos de 3,50m apresentam flechas imediatas negativas, portanto se torna necessário avaliar a utilização da contra flecha.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) apresenta-se entre 91,94% e 181,08% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) apresenta-se entre 107,14% e 135,14% maior em relação ao método simplificado apresentado no no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Com relação aos aspectos construtivos (cronogramas), foram utilizados cronogramas com prazos máximos de 3,6,9 e 12 meses de execução da obra

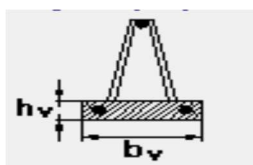
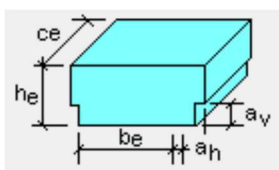
respectivamente. A utilização deste processo de cálculo conseguiu reduzir consideravelmente os valores das flechas finais.

A variação das flechas ocorridas entre os cronogramas 4 (12 meses) e cronograma 1 (3 meses) foram de 40,32%, 34,09% e 12,65% respectivamente.

Limites de vibração foram atendidas.

Tabela 57: Resultados obtidos para laje 4 - vão eixo a eixo apoio 4,00m – ELU.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA LAJE



b_v (cm)	13	h_e (cm)	7	a_v (cm)	3
h_v (cm)	3	b_e (cm)	30	a_h (cm)	2
f_{ck} (MPa)	20	h total da laje (cm)	11	c_e (cm)	120
Aço CA (kN/cm²)	60	Espessura capeamento de concreto h_r (cm)			4

DIMENSIONAMENTO ELU

A_s (cm²/nervura)	1,16	Treliça adotada	TB 8M	Armadura Adicional	2ø7.0mm
---	------	------------------------	-------	---------------------------	---------

DESCRIPTIVO:

Laje treliçada pré-fabricada TB8M com enchimento em Eps (120x34x7) - ADICIONAL 2ø7.0mm

VERIFICAÇÃO DO ELS-W

ELS-W atendido

VERIFICAÇÃO AO CISCALHAMENTO

Sem Arm. Transv.

Fonte: Autor.

Tabela 58: Valores (cm) limites e resultantes obtidos para laje com vão eixo a eixo 4,00m - flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação da a_{cf} limite e flecha acidental.

Verificação I							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha I + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
Verificação em única etapa	1,77	4,52	7,17	6,54	1,60	1,14	1,59

Verificação II							
	Flecha imediata - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 2 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 3 - a_{cf} limite	Flecha II + fluência do anexo 4 - a_{cf} limite	Limite $l/250$	Limite $l/350$	Flecha acidental
1º cronograma	0,22	2,07	3,46	3,20	1,54	1,10	0,20
2º cronograma		1,80	2,96	2,99			
3º cronograma		1,67	2,58	2,95			
4º cronograma		1,57	2,58	2,93			

Fonte: Autor.

Legenda para os gráficos a seguir:

Verificação I – Verificação onde se considera a entrada de cargas em uma única data, não leva em consideração os aspectos construtivos.

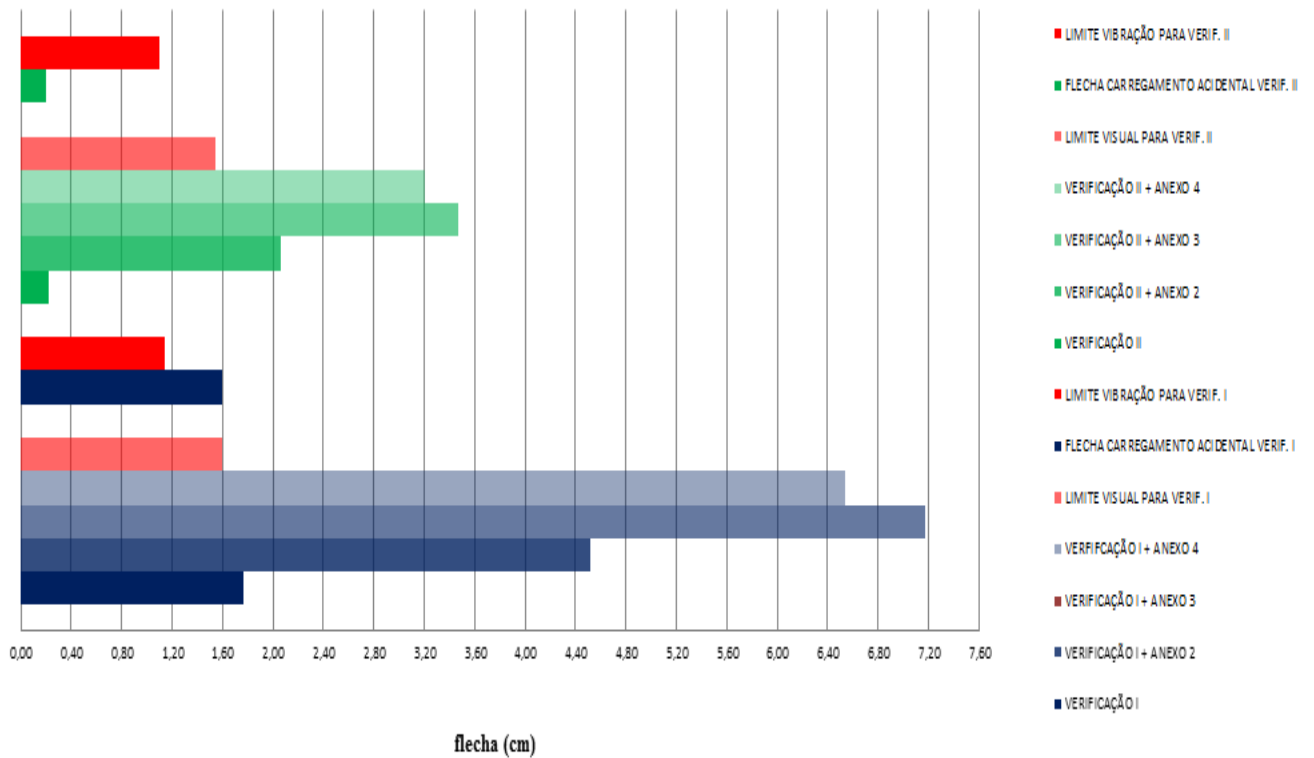
Verificação II – Verificação onde se considera a entrada de cargas na estrutura de maneira incremental, ou seja, leva em consideração os aspectos construtivos.

Anexo 2 – Anexo que apresenta informações para definir o valor de a_f utilizados para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014.

Anexo 3 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com item 8.2.1 tabela 8.2 da ABNT NBR 6118:2014.

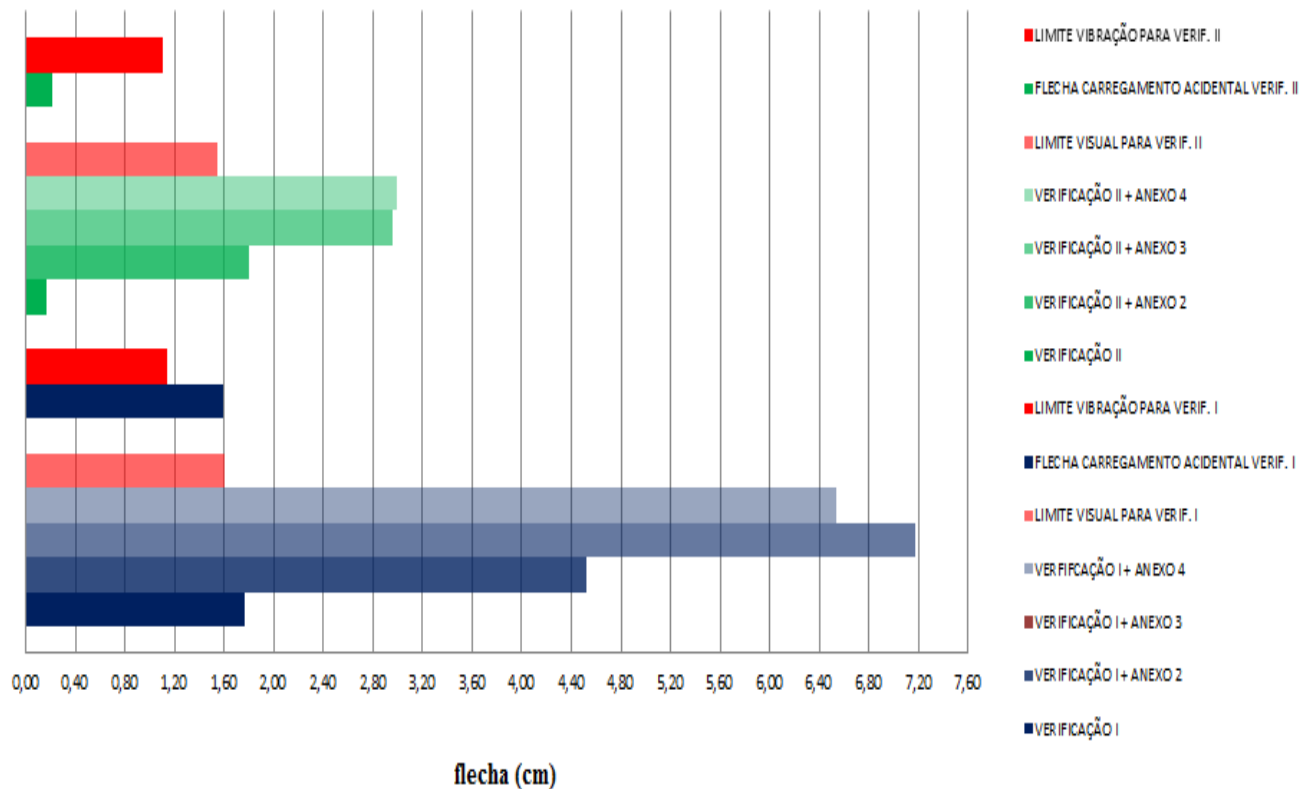
Anexo 4 – Anexo que apresenta informações para definir o valor do coeficiente de fluência para determinação da deformação da estrutura de concreto armado ao longo do tempo, de acordo com anexo A – Efeito do tempo no concreto estrutural - ABNT NBR 6118:2014.

Gráfico 13: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 1º cronograma – laje 4,00m.



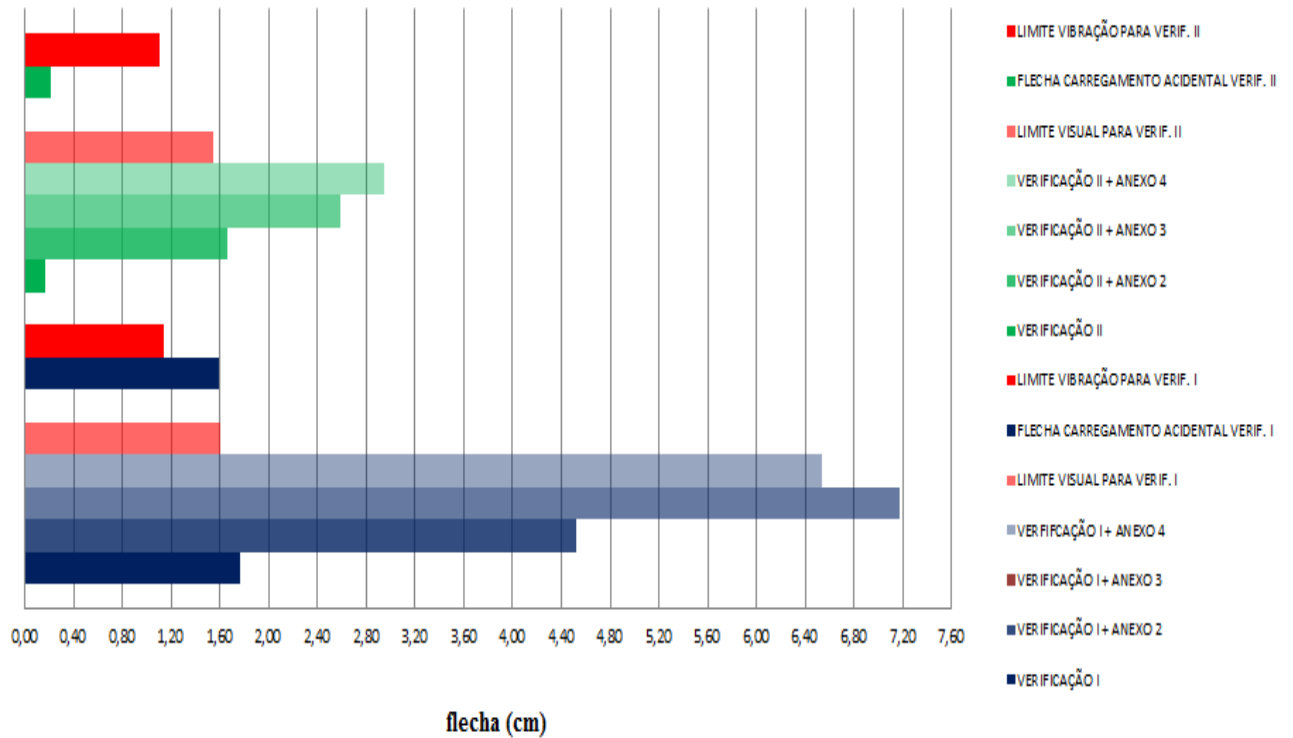
Fonte: Autor.

Gráfico 14: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 2º cronograma – laje 4,00m.



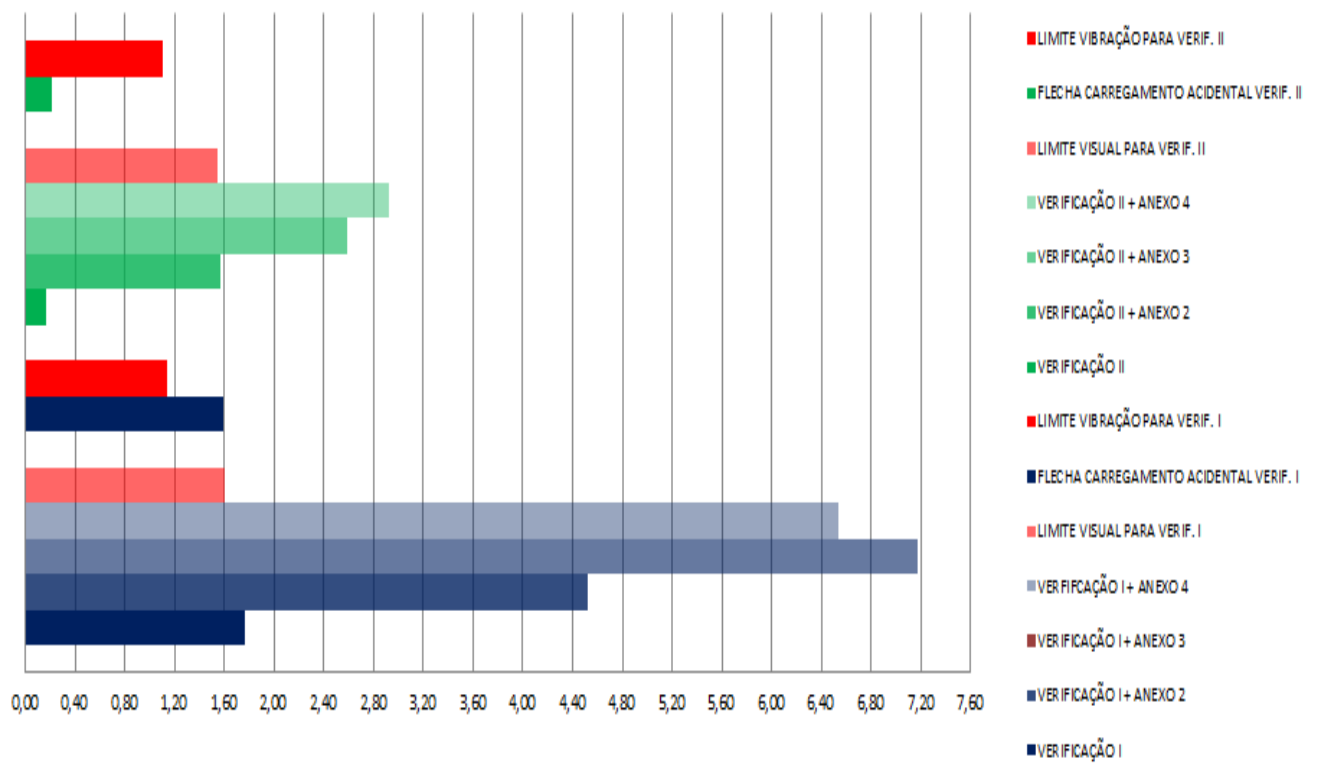
Fonte: Autor.

Gráfico 15: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 3º cronograma – laje 4,00m.



Fonte: Autor.

Gráfico 16: Flecha referente ao carregamento quase permanente com aplicação de contra flecha limite e coeficientes de fluência para verificação I e II - 4º cronograma – laje 4,00m.



Fonte: Autor.

Analisando a tabela 58 e os gráficos oriundos da mesma é possível notar:

Considerações sobre a Verificação I:

Laje com vãos de 4,00m não atendem aos limites de serviço para verificação em uma única data de aplicação de cargas quando se utiliza análise de fluência igual aos anexos 2, 3 e 4 deste material.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) apresenta-se 44,69% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) = 58,63% maior em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Limites de vibração não foram atendidos.

Considerações sobre a Verificação II:

Laje com vãos de 4,00m apresentam flechas acima do limite, sendo a consideração de fluência pelo item 17.3.2.1.2 (anexo 2) deste material a única condição que atende aos limites.

A utilização da análise da fluência pelos métodos do anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) e item 8.2.11 (anexo 3) são mais desfavoráveis considerando a cidade de Varginha e suas condições climáticas.

Flecha final de acordo com anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 4) apresenta valores entre 54,59% e 86,62% maiores em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Flecha final de acordo com item 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 3) apresenta valores entre 54,49% e 67,15% maiores em relação ao método simplificado apresentado no item 17.3.2.1.2 (anexo 2).

Com relação aos aspectos construtivos (cronogramas), foram utilizados cronogramas com prazos máximos de 3,6,9 e 12 meses de execução da obra

respectivamente. A utilização deste processo de cálculo conseguiu reduzir consideravelmente os valores das flechas finais.

A variação das flechas ocorridas entre os cronogramas 4 (12 meses) e cronograma 1 (3 meses) foram de 24,15%, 25,43% e 8,44% respectivamente.

Limites de vibração foram atendidos.

6. DISCUSSÃO.

O aumento de espessura das lajes para suprir a deficiência normativa quanto ao ELS, leva a execução de obras com espessuras de lajes maiores e conseqüentemente aumento de consumo de materiais, além de aumentar o peso da própria estrutura como um todo.

As conclusões de trabalhos elaborados por Rogge (2002) e Kataoka (2004), apresentam resultados experimentais que comprovam que a flecha ao longo do tempo, é muito maior do que a flecha considerada pelo método simplificado da ABNT NBR 6118:2003 que é o mesmo presente na ABNT NBR 6118:2014, e em contrapartida os trabalhos apresentados pelos mesmos concluem também que a utilização de carregamento incremental na análise estrutural leva a valores bem próximos dos resultados reais obtidos em laboratório. Enfim conforme visto na análise do item 5 deste material isto ficou comprovado, chegamos a valores muito maiores quando foi utilizado métodos diferentes para determinação dos coeficientes de fluência contidos no item 8.2.11 tabela 8.2 e anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (contidos no anexo 3 e 4 deste material respectivamente) , também foi possível verificar a redução considerável das flechas utilizando o processo construtivo adotando os cronogramas apresentados no item 3.7 deste material.

A análise incremental basicamente se resume na análise do processo construtivo, onde o carregamento é avaliado separadamente em tempos diferenciados de aplicação.

As informações contidas nos anexos 3 e 4 deste trabalho, conforme gráficos apresentados no item 5, são desfavoráveis na verificação do estado limite de serviço de lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas, porém não significa que devam ser descartados na verificação do ELS pois o item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014 cita que “pode” ser feita verificação do coeficiente de acordo com valores da tabela 17.1 da referida norma (anexo 2), porém não cita obrigatoriedade, ou seja, nada impede que possamos utilizar consideração do item 8.2.11 e tabela 8.2 (anexo 3) e anexo A (anexo 4).

As dimensões continentais do Brasil exigem que cada profissional desenvolva a análise para a região em que atua, sendo este estudo válido para a cidade de Varginha-MG.

Quando falamos em análise estrutural, elaborar conclusões e soluções em forma de tabelas ou manuais se torna praticamente impossível para os dias atuais. Neste

trabalho, a principal consideração é de que não existe uma solução trivial para o dimensionamento de um elemento estrutural. A norma técnica estabelece diferentes critérios para a avaliação, aprofundar nestes critérios é muito importante para o crescimento profissional do Engenheiro, saber analisar e comparar pode levar a resultados cada vez melhores.

Os resultados contidos no item 5 mostram que a avaliação sem o carregamento incremental resulta em valores acima dos limites normativos, assim como utilizar outros métodos de fluência contidos em norma também são desfavoráveis.

A tabela 59 a seguir apresenta valores filtrados para análise final, nela é possível observar que o método de fluência apresentado é o mais favorável e os resultados finais para as flechas obtidas são os determinados com consideração de cronograma construtivo.

Tabela 59: Verificação considerando vãos adotados no item 5 e fluência de acordo com anexo 2 e cronogramas construtivos – flechas em cm.

	Verificação Final			
	laje de 2,50m	laje de 3,00m	laje de 3,50m	laje de 4,00m
Flecha imediata - acf limite	-0,63	-0,61	-0,30	0,22
Flecha II + fluência do anexo 2 - acf limite - 1º cronograma	-0,58	-0,31	0,62	2,07
Flecha II + fluência do anexo 2 - acf limite - 2º cronograma	-0,59	-0,36	0,48	1,80
Flecha II + fluência do anexo 2 - acf limite - 3º cronograma	-0,59	-0,38	0,42	1,67
Flecha II + fluência do anexo 2 - acf limite - 4º cronograma	-0,59	-0,39	0,37	1,57
Limite $l/250$	0,94	1,14	1,34	1,54
Verificação	ok	ok	ok	não ok
Flecha acidental	0,00	0,02	0,07	0,20
Limite $l/350$	0,67	0,81	0,96	1,10
Verificação	ok	ok	ok	ok

Fonte: Autor.

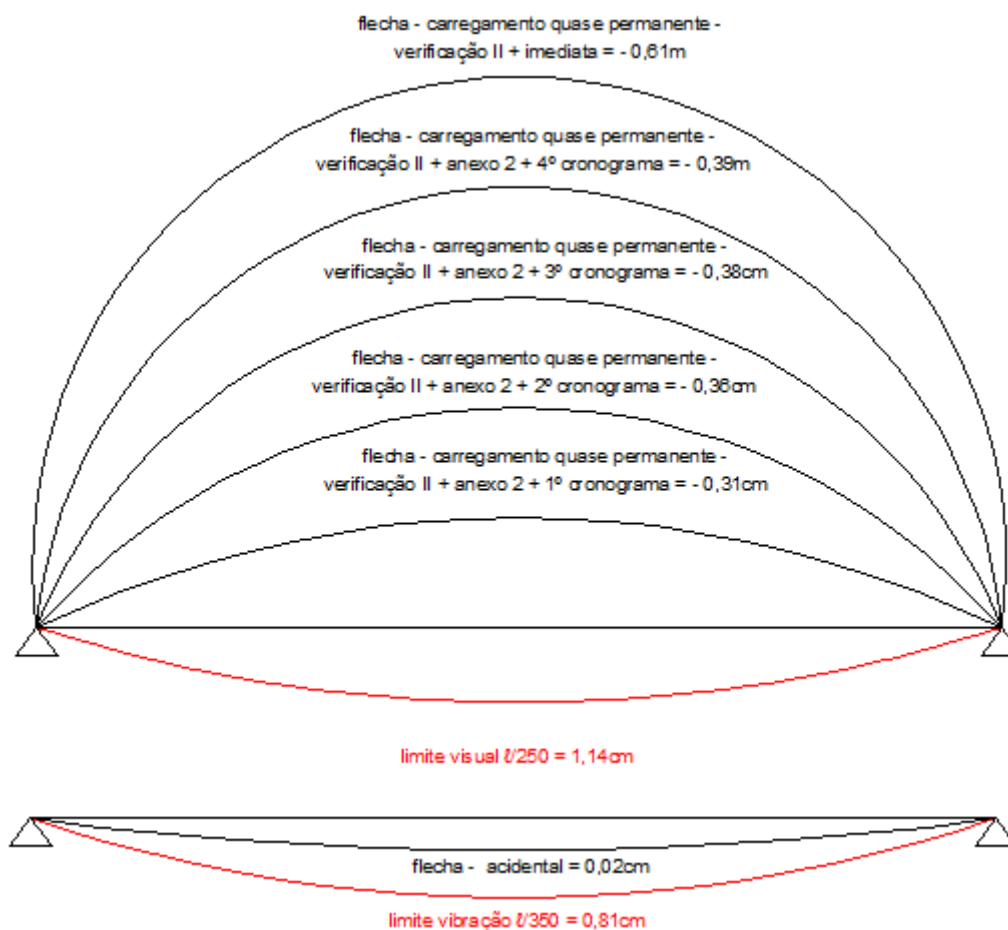


Figura 45: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II e fluência do anexo 2 – laje com vão de 3,00m - tabela 59.
Fonte: Autor.

Conforme apresentado no diagrama acima é possível notar que a utilização do cronograma construtivo apresenta valores de flechas negativos, portanto a não observação dos aspectos construtivos podem trazer inconvenientes durante o processo executivo, pois a estrutura pode apresentar imperfeições não previstas e impactantes na execução dos acabamentos finais.

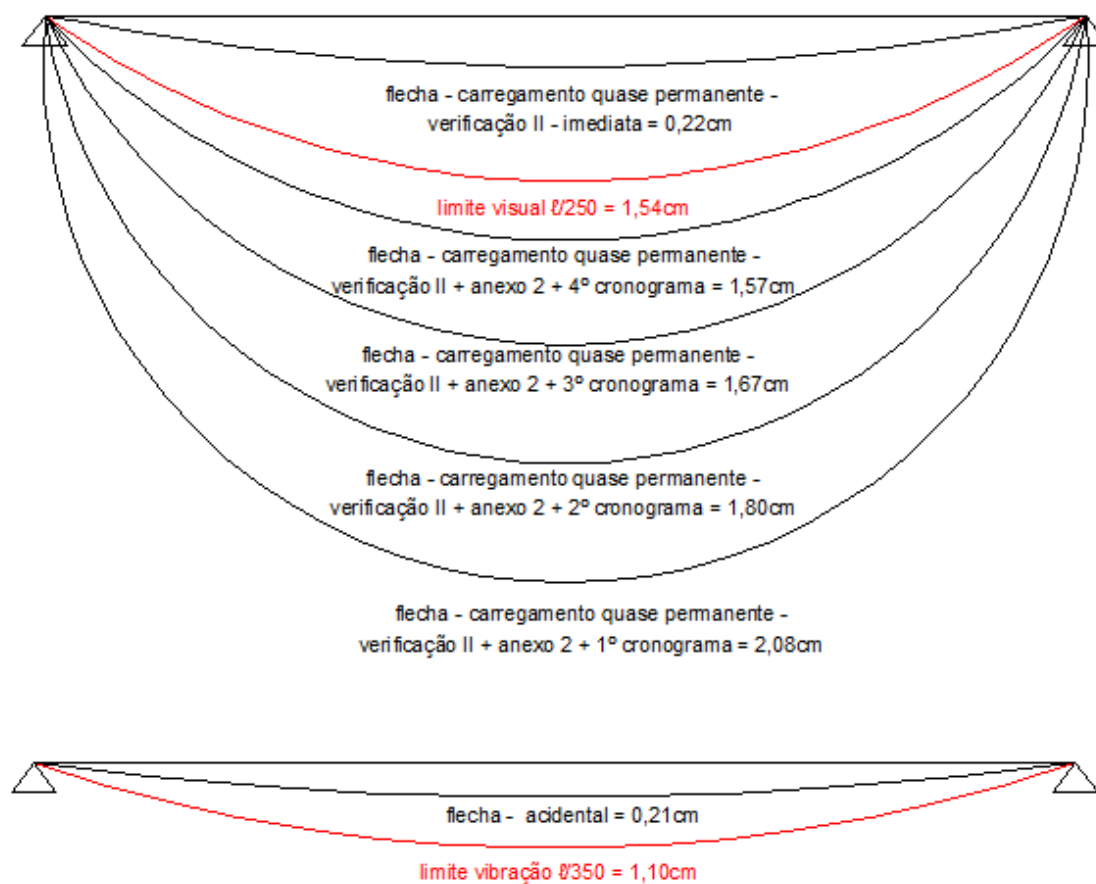


Figura 46: Diagrama de análise das flechas imediatas com aplicação dos coeficientes de fluência e dedução da a_{cf} de acordo com Verificação II e fluência do anexo 2 – laje com vão de 4,00m - tabela 59.
Fonte: Autor.

Conforme demonstrado também na figura 27, a análise simplificada não admite nenhum valor dentro dos limites normativos para a situação apresentada na tabela 59 e figura 46, porém ao analisarmos a figura 46 é possível diagnosticar que a análise com o 4º cronograma ultrapassa aproximadamente 2% o limite $l/250$, mostrando a importância da análise incremental de carregamentos.

7. CONCLUSÃO.

Durante a elaboração deste estudo foram levantadas informações a respeito das lajes nervuradas pré-fabricadas treliçadas, os dados colhidos visaram representar desde aspectos como tipo de materiais a serem utilizados até limites normativos para o elemento estrutural analisado.

Foram feitas análises considerando 4 (quatro) cronogramas construtivos, que determinam um período de execução para o elemento estrutural e datas de aplicação das cargas na estrutura, posteriormente foi feita a aplicação dos coeficientes de fluência para análise da deformação ao longo do tempo considerando 3 (três) maneiras distintas contidas em norma, de modo que pudesse ser verificado o motivo pelo qual estes elementos não atendem aos limites normativos contidos em norma e qual aspecto é o mais relevante no processo de dimensionamento.

Após análise efetuada pode-se afirmar que utilizar os métodos de determinação dos coeficientes de fluência contidos no item 8.2.11 e anexo A da ABNT NBR 6118:2014 (anexos 3 e 4) são desfavoráveis na verificação do estado limite de serviço, porém não se pode afirmar se estão mais próximos da realidade do elemento estrutural, sendo para isto necessário o desenvolvimento de pesquisas através de análise de protótipos reais e considerações relacionadas à região onde será executada a obra, ou seja, neste estudo foi abordada a cidade de Varginha-MG, sendo os dados de temperatura e umidade relativa do ar inerentes a este mesmo município.

A análise incremental de carregamentos foi feita através de 4 cronogramas distintos e conseguiu-se verificar que quanto mais tardiamente é dada a entrada dos carregamentos na estrutura menor é a deformação da mesma ao longo do tempo, não houve linearidade nos resultados obtidos considerando os cronogramas de execução e os vãos de laje analisados, sendo possível verificar diferenciações nos valores finais obtidos dentre os cronogramas definidos, ou seja, cabe ao responsável projetista avaliar cada caso e definir qual a melhor situação.

Considerando todas as condições definidas e dados climáticos relacionados a cidade de Varginha-MG pode-se determinar que o método contido no item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014 (anexo 2) é a situação mais favorável para a verificação de flechas ao longo do tempo, lembrando que sempre que possível, deve ser feita também análise de carregamento incremental utilizando o cronograma de execução da obra para verificação do limite visual e de vibração exigidos por norma.

Enfim, este estudo contribui para mostrar a importância da verificação e dimensionamento estrutural considerando os aspectos construtivos e o que os mesmos impactam neste processo, considerações estas que não são abordadas a durante a graduação de Engenheiro Civil.

8. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS E PESQUISAS.

- Elaboração de um software que englobe não somente o dimensionamento no estado limite último, mas também a verificação do estado limite de serviço com considerações construtivas e variáveis contidas neste trabalho;
- Análise da argamassa de regularização potencialmente estrutural capaz de contribuir para melhoria d rigidez da seção composta;
- Estudo de cronogramas relacionados à execução para obras residenciais e comerciais de múltiplos pavimentos tendo em vista a entrada de cargas ao longo de um determinado período;
- Estudo do perímetro da seção de concreto em contato com o ar que deve ser considerada para análise dos coeficientes de fluência;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASISIS, Túlio N.B.W.S. **Verificação da fissuração em vigas de concreto armado estado limite de abertura de fissuras ELS-W**. EPUSP – Escola politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo: 2003.

Disponível em: < <http://www.imc.ep.usp.br/pesquisas/tecedu/flash/fissuras.swf> >
Acesso em: 13 de maio 2015 às 14;14 horas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. 5p. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. 5p. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto forno**. 6p. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. 5p. Rio de Janeiro: 1991 – versão corrigida 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 238p. Rio de Janeiro: 2014 – versão corrigida 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. 5p. Rio de Janeiro: 1980 – versão corrigida 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. 5p. Rio de Janeiro: 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. 16p. Rio de Janeiro: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - procedimento**. 18p. Rio de Janeiro: 2003 – versão corrigida 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. 3p. Rio de Janeiro: 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. 59p. Rio de Janeiro: 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto - especificação**. 5p. Rio de Janeiro: 1991 – versão corrigida 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1: Laje pré-fabricada - Requisitos – Parte 1: Lajes unidirecionais.** 15p. Rio de Janeiro: 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14862: Armaduras treliçadas eletrossoldadas – Requisitos.** 10p. Rio de Janeiro: 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** 23p. Rio de Janeiro; 2015 - versão corrigida 2015.

CAIXETA, D.P. **Contribuição ao estudo de lajes pré-fabricadas com vigas treliçadas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas: 1998.

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO J.R. **Cálculo de dimensionamento de estruturas usuais de concreto armado.** 3ª edição 5ª reimpressão. EDUFScar, São Carlos: 2013.

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO J.R. **Cálculo de dimensionamento de estruturas usuais de concreto armado.** 4ª edição. EDUFScar, São Carlos: 2014.

DI PIETRO, J. E. **Projeto, execução e produção de lajes com vigotas pré-moldados de concreto.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina: 1993.

DISTANCIACIDADES. **Rotas.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://br.distanciacidades.com/distancia-de-varginha-a-machado> >
Acesso em: 04 de abril 2015 às 21;22 horas.

DISTANCIACIDADES. **Rotas.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://br.distanciacidades.com/distancia-de-varginha-lavras> > Acesso em: 04 de abril 2015 às 21;35 horas.

DROPPA Jr, A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada.** Dissertação (Mestrado) – escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: 1999.

FARIA, A. **Notas de aula das matérias de estruturas I e II com Professor Mestre Antônio de Faria.** Centro universitário do Sul de Minas, UNIS-MG, curso de Engenharia Civil, Varginha: 2014.

FLÓRIO, M. C. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado.** 202p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GASPAR, R. **Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. SP: 1997.

INMET. **Instituto nacional de meteorologia.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: 13 de abril 2015 às 09;14 horas.

KATAOKA, L. T.; MELLO, A.L.V; ROGDE, A.C; CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO, J.R. **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas.** Anais. 46º congresso brasileiro de concreto. Florianópolis, SC, Brasil: 2004.

KATAOKA, L.T.. **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas de concreto.** Pós-graduação. Universidade federal de São Carlos, SP, São Carlos: 2005.

LAJES PRÉ-MOLDADAS. **Laje convencional – vigota T.** Brasil: 2015.

Disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe_tcAC/lajes-pre > Acesso em: 13 de maio 2015 às 14;14 horas.

LAJE.A **concretagem.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/laje-concretagem/>> Acesso em: 26 de maio 2015 às 21;14 horas

LAJE.**Conduites e caixas elétricas em lajes.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/conduites-caixas-eletricas/>> Acesso em: 26 de maio 2015 às 21;45 horas

LAJES REAL. **Vantagens da laje treliça.** Brasil: 2015.

Disponível em: < <http://lajesreal.com/index.php/component/content/category/2-produtos> > Acesso em: 13 de maio 2015 às 14;14 horas.

MAGALHÃES, F.L. **Estudo dos momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo nervuras com armação treliçada.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2001.

REIS, M. **Cartilha para a execução de lajes treliçadas pré-moldadas em edificações residenciais de pequeno porte.** Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade do Sul de Minas, UNIS-MG. Varginha:2014

SANTINE, C.R. **Projeto e construção de lajes pré-fabricadas de concreto armado.** Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo: 2005.

SILVA, M.A.F. **Projeto e execução de lajes nervuradas de concreto armado.** Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo: 2005

ANEXOS

ANEXO 1 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA LONGITUDINAL UTILIZANDO MÉTODO ADIMENSIONAL

Fonte: (KATAOKA, L.T. 2005 apud CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014) – material colhido na íntegra.

A seguir será apresentado o procedimento de cálculo utilizado para dimensionamento no estado limite último da armadura longitudinal para concretos até C50, segundo (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A fim de facilitar o emprego de diversos sistemas de unidades e permitir a utilização de tabelas de modo mais racional, sempre que possível é bom trabalhar com fórmulas adimensionais, para dimensionamento da armadura longitudinal (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

1.1. Nomenclaturas Utilizadas

Para melhor entendimento dos procedimentos que serão descritos para o dimensionamento das peças de concreto armado, é conveniente definir as principais nomenclaturas das grandezas envolvidas no cálculo (ABNT NBR 6118, 2014).

d – altura útil: distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até à fibra mais comprimida de concreto.

d' – distância entre o centro de gravidade da armadura transversal comprimida e a face mais próxima do elemento estrutural (fibra mais comprimida de concreto).

M_{sd} – momento fletor solicitante de cálculo na seção (na continuação será chamado apenas de M_d): no dimensionamento é obtido multiplicando-se o momento em serviço pelo coeficiente de ponderação γ_f .

M_{rd} – momento fletor resistente de cálculo (calculado com f_{cd} e f_{yd}): máximo momento fletor que a seção pode resistir (deve-se ter sempre $M_{sd} \leq M_{rd}$).

b_w – largura da seção transversal de vigas de seção retangular ou da nervura (parte mais estreita da seção transversal), também chamada de alma das vigas de seção T.

h – altura total da seção transversal de uma peça.

z – braço de alavanca: distância entre o ponto de aplicação das resultantes das tensões normais de compressão no concreto e de tração no aço (distância entre o centro de gravidade da armadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida de concreto).

x – altura (profundidade) da linha neutra: distância da borda mais comprimida do concreto ao ponto que tem deformação e tensão nulas (distância da linha neutra ao ponto de maior encurtamento da seção transversal de uma peça fletida).

y – altura da linha neutra convencional: altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto, na seção transversal de uma peça fletida; é uma idealização que simplifica o equacionamento do problema e conduz a resultados bem próximos daqueles que seriam obtidos com o diagrama parábola-retângulo ($y = 0,8 \cdot x$).

1.2. Cálculo da Armadura Longitudinal de Vigas sob Flexão Normal Utilizando fórmulas Adimensionais e Tabela para Dimensionamento de Seções Retangulares.

O cálculo da quantidade de armadura longitudinal, para seções transversais retangulares, conhecidos a resistência do concreto (f_{ck}), largura da seção (b_w), altura útil (d) e tipo de aço (f_{yd} e ϵ_{yd}) é feito, de maneira simples, a partir do equilíbrio das forças atuantes na seção. O dimensionamento pode ser utilizado para a flexão normal pura e simples, que é representada pelos domínios 2, 3, 4 e 4a de acordo com (CARVALHO E FIGUEIREDO, 2014; KATAOKA, 2005).

1.2.1. Equacionamento

a) Equilíbrio das forças atuantes normais à seção transversal: como não há força externa, a força atuante no concreto (F_c) deve ser igual à força atuante na armadura (F_s):

$$\sum F = 0 \rightarrow F_s - F_c = 0 \rightarrow F_s = F_c \quad \text{Eq.(151)}$$

b) Equilíbrio dos momentos: o momento das forças internas em relação a qualquer ponto (no caso, em relação ao C.G. da armadura) deve ser igual ao momento externo de cálculo:

$$\sum M = M_d \rightarrow M_d = F_c \cdot z \quad \text{Eq.(152)}$$

Sendo:

$$F_c = (0,85 \cdot f_{cd}) \cdot (b_w) \cdot (0,8 \cdot x) \quad \text{Eq.(153)}$$

$$z = d - 0,4 \cdot x \text{ (braço de alavanca)} \quad \text{Eq.(154)}$$

Tem-se:

$$M_d = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd} \quad \text{Eq.(155)}$$

Resolvendo esta equação obtém-se x , o qual define a posição da linha neutra, necessário para determinação da armadura. Nota-se que a variação de x não é linear com o esforço solicitante M_d , mas segue um polinômio do segundo grau.

c) Cálculo da área necessária de armadura (A_s)

Com o valor de x determinado é possível encontrar A_s . A força na armadura (F_s) vem do produto da área de aço (A_s) pela tensão atuante no aço (f_s).

Tem-se:

$$\frac{M_d}{M_z} = F_s = f_s \cdot A_s, \text{ resultando:}$$

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_s} \quad \text{Eq.(156)}$$

Admitindo que a peça esteja trabalhando nos domínios 2 ou 3, para um melhor aproveitamento da armadura, tem-se $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$, resultando que a tensão na armadura é a de escoamento ($f_s = f_{yd}$); caso contrário, tira-se o valor de ε_s do diagrama de tensão \times deformação do aço e calcula-se f_s , ficando:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad \text{Eq.(157)}$$

1.2.2. Equacionamento Adimensional

Dessa forma, a forma adimensional das equações de dimensionamento é dada por:

a) Equação de M_d

- dividindo ambos os membros da equação de M_d por $b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}$ tem-se:

$$\frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{(0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \left(0,68 \cdot \frac{x}{d} - 0,272 \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \quad \text{Eq.(158)}$$

- chamando

$\frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = K_{MD}$ e $\frac{x}{d} = K_X$ a equação anterior torna-se:

$$K_{MD} = 0,68 \cdot (K_X) - 0,272 \cdot (K_X)^2 \quad \text{Eq.(159)}$$

A equação anterior contém apenas termos adimensionais, e K_X só pode variar de 0 a 1 ($x = 0$ e $x = d$):

$$x = 0 \text{ (início do domínio 2)} \rightarrow K_X = \frac{x}{d} = 0 \rightarrow K_{MD} = 0$$

$$x = d \text{ (fim do domínio 4)} \rightarrow K_X = \frac{x}{d} = 1 \rightarrow K_{MD} = 0,408$$

b) Expressão que fornece o braço de alavanca z ($z = d - 0,4 \cdot x$)

- dividindo os dois termos por d resulta:

$$\frac{z}{d} = \frac{d - 0,4 \cdot x}{d} = 1 - 0,4 \cdot \frac{x}{d} \quad \text{Eq.(160)}$$

- chamando $\frac{z}{d} = K_Z$ e lembrando que $K_X = \frac{x}{d}$, da equação anterior obtém-se K_Z :

$$K_Z = 1 - 0,4 \cdot K_X \quad \text{Eq.(161)}$$

c) Expressão para o cálculo da armadura

$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_s}$ e, com $z = (K_Z) \cdot d$, resulta:

$$A_s = \frac{M_d}{(K_Z) \cdot d \cdot f_s} \quad \text{Eq.(162)}$$

d) Equação que relaciona as deformações com a altura da linha neutra

$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$ e, como $\frac{x}{d} = K_X$, resulta:

$$K_X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad \text{Eq.(163)}$$

Como K_X só admite valores de 0 a 1, pode-se construir a tabela 1.1 em que a cada K_X arbitrado entre 0 e 1 corresponde: um valor de K_{MD} ; um de K_Z ; conhecendo-se ε_c , um de ε_s . É importante destacar que conhecido o par de deformações ($\varepsilon_c; \varepsilon_s$) conhece-se o domínio em que a peça está trabalhando. Na tabela, por praticidade, foram dados valores a K_{MD} e calculados os demais, mantidos os limites de validade para K_X .

$$K_X = \frac{x}{d} = 0,45 \text{ e } K_{MD} \approx 0,25$$

Tabela 1. 1: Valores para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até a classe C50.

K_{MD}	K_x	K_z	ϵ_c	ϵ_s	K_{MD}	K_x	K_z	ϵ_c	ϵ_s
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,000	0,205	0,3507	0,8597	3,5000	6,4814
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,000	0,210	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,000	0,215	0,3713	0,8515	3,5000	5,9255
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,000	0,220	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,000	0,225	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,0550	0,0837	0,9665	0,9133	10,000	0,230	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,000	0,235	0,4142	0,8343	3,5000	4,9496
0,0650	0,0996	0,9602	1,1056	10,000	0,240	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,000	0,245	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,000	0,250	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,000	0,255	0,4594	0,8162	3,5000	4,1181
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,000	0,260	0,4711	0,8115	3,5000	3,9287
0,0900	0,1402	0,9439	1,6308	10,000	0,265	0,4830	0,8068	3,5000	3,7459
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,000	0,270	0,4951	0,8020	3,5000	3,5691
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,000	0,275	0,5074	0,7970	3,5000	3,3981
0,1050	0,1653	0,9339	1,9810	10,000	0,280	0,5199	0,7921	3,5000	3,2324
0,1100	0,1739	0,9305	2,0645	10,000	0,285	0,5326	0,7870	3,5000	3,0719
0,1150	0,1824	0,9270	2,0870	10,000	0,290	0,5455	0,7818	3,5000	2,9162
0,1200	0,1911	0,9236	2,1075	10,000	0,295	0,5587	0,7765	3,5000	2,7649
0,1250	0,1998	0,9201	2,1260	10,000	0,300	0,5721	0,7712	3,5000	2,6179
0,1300	0,2086	0,9166	2,1428	10,000	0,305	0,5858	0,7657	3,5000	2,4748
0,1350	0,2174	0,9130	2,1579	10,000	0,310	0,5998	0,7601	3,5000	2,3355
0,1400	0,2264	0,9094	2,1714	10,000	0,315	0,6141	0,7544	3,5000	2,1997
0,1450	0,2354	0,9058	2,1834	10,000	0,320	0,6287	0,7485	3,5000	2,0672
0,1500	0,2445	0,9022	2,1940	10,000	0,325	0,6437	0,7425	3,5000	1,9376
0,1550	0,2537	0,8985	3,3391	10,000	0,330	0,6590	0,7364	3,5000	1,8110
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104	0,340	0,6910	0,7236	3,5000	1,5652
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531	0,350	0,7249	0,7100	3,5000	1,3283
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222	0,360	0,7612	0,6955	3,5000	1,0983
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154	0,370	0,8003	0,6799	3,5000	0,8732
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,1306	0,380	0,8433	0,6627	3,5000	0,6506
0,1850	0,3107	0,8757	3,5000	7,7662					
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204					
0,1950	0,3304	0,8678	3,5000	7,0919					
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793					

ANEXO 2 – ELEMENTOS LINEARES SUJEITOS A SOLICITAÇÕES NORMAIS – ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – material colhido na íntegra.

2.1 Generalidades

Nos estados-limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois comportamentos é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad \text{Eq.(164)}$$

Sendo:

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;

$\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido;

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

onde:

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto, conforme 8.2.5, com o quantil apropriado a cada verificação particular. Para determinação do momento de fissuração, deve ser usado o $f_{ctk,inf}$ no estado-limite de formação de fissuras e o $f_{ct,m}$ no estado-limite de deformação excessiva (ver 8.2.5, ABNT NBR 6118:2014).

No caso da utilização de armaduras ativas, deve ser considerado o efeito da protensão no cálculo do momento de fissuração.

2.2. Estado limite de deformação

A verificação dos valores-limites estabelecidos na Tabela 13.3 da ABNT NBR 6118:2014 para a deformação da estrutura, mais propriamente rotações e deslocamentos em elementos estruturais lineares, analisados isoladamente e submetidos à combinação de ações conforme a Seção 11 deve ser realizada através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.

A deformação real da estrutura depende também do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais (principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração) no momento de sua efetiva solitação. Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos prescritos.

2.3. Avaliação aproximada da flecha em vigas.

O modelo de comportamento da estrutura pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico e linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no estágio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, e no estágio II, em caso contrário.

Deve ser utilizado no cálculo o valor do módulo de elasticidade secante E_{cs} definido na Seção 8 da ABNT NBR 6118:2014, sendo obrigatória a consideração do efeito da fluência.

2.4. Flecha imediata em vigas de concreto armado.

Para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada a seguir:

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad \text{Eq.(165)}$$

Onde:

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado

$$\text{com } \alpha e = \frac{E_s}{E_{cs}}$$

M_a é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, ou seja, o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

2.5. Cálculo da flecha diferida no tempo para vigas de concreto armado.

A flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad \text{Eq.(166)}$$

Onde:

$$\rho' = \frac{A_s'}{b.d} \quad \text{Eq.(167)}$$

ξ é um coeficiente função do tempo, que pode ser obtido diretamente na Tabela 2.1 ou ser calculado pelas expressões seguintes:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad \text{Eq.(168)}$$

$$\xi(t) = 0,68 (0,996^t) t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(169)}$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses} \quad \text{Eq.(170)}$$

Tabela 2. 1: Valores do coeficiente ξ em função do tempo.

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Sendo:

t o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 A idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração. No caso de parcelas da carga de longa duração serem aplicadas em idades diferentes, pode-se tomar para t_0 o valor ponderado a seguir:

$$t_0 = \frac{\sum P_i \cdot t_{oi}}{\sum P_i} \quad \text{Eq.(171)}$$

Onde :

P_i Representa as parcelas de carga;

t_{oi} é a idade em que se aplicou cada parcela P_i , expressa em meses.

O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata por $(1 + \alpha_f)$.

ANEXO 3 – FLECHA EM VIGAS COM ARMADURAS ATIVAS

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – material colhido na íntegra.

Nos elementos estruturais com armaduras ativas, é suficiente considerar $(EI)_{eq} = E_{cs}I_c$, desde que não seja ultrapassado o estado-limite de formação de fissuras. Caso contrário, a expressão completa de 17.3.2.1.1 ABNT NBR 6118:2014 pode ser aplicada, desde que I_{II} , M_r e M_a sejam calculados considerando o elemento estrutural de concreto submetido à combinação de ações escolhida, acrescida da protensão representada como ação externa equivalente (gerando força normal e momento fletor) (ver 11.3.3.5).

Para consideração da deformação diferida no tempo, basta multiplicar a parcela permanente da flecha imediata acima referida por $(1 + \phi)$, onde ϕ é o coeficiente de fluência (ver 8.2.11 da ABNT NBR 6118:2014).

3.1 Fluência e retração

Em casos onde não é necessária grande precisão, os valores finais do coeficiente de fluência $\phi(t_\infty, t_0)$ e da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ do concreto, submetidos a tensões menores que $0,5 f_c$ quando do primeiro carregamento, podem ser obtidos, por interpolação linear, a partir da Tabela 3.1.

A Tabela 3.1 fornece o valor do coeficiente de fluência $\phi(t_\infty, t_0)$ e da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ em função da umidade média ambiente e da espessura fictícia $2A_c/u$, onde A_c é a área da seção transversal e u é o perímetro da seção em contato com a atmosfera. Os valores desta tabela são relativos a temperaturas do concreto entre 10 °C e 20 °C, podendo-se, entretanto, admiti-los como válidos para temperaturas entre 0 °C e 40 °C. Esses valores são válidos para concretos plásticos e de cimento Portland comum.

Deformações específicas devidas à fluência e à retração mais precisas podem ser calculadas segundo indicação do Anexo A da ABNT NBR 6118:2014 e descrito no anexo 4 deste.

Tabela 3. 1: Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\varphi(t_{\infty}, t_0)$.

Umidade média ambiente %		40		55		75		90		
		20	60	20	60	20	60	20	60	
Espessura fictícia 2Ac / u (cm)		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\varphi(t_{\infty}, t_0)$ Concreto das classes C20 a C45	t_0 Dias	5	4,6	3,8	3,9	3,3	2,8	2,4	2	1,9
		30	3,4	3	2,9	2,6	2,2	2	1,6	1,5
		60	2,9	2,7	2,5	2,3	1,9	1,8	1,4	1,4
$\varphi(t_{\infty}, t_0)$ Concreto das classes C50 a C90		5	2,7	2,4	2,4	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5
		30	2	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
		60	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,2	1	1
$\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ ‰		5	– 0,53	– 0,47	– 0,48	– 0,43	– 0,36	– 0,32	– 0,18	– 0,15
		30	– 0,44	– 0,45	– 0,41	– 0,41	– 0,33	– 0,31	– 0,17	– 0,15
		60	– 0,39	– 0,43	– 0,36	– 0,40	– 0,30	– 0,31	– 0,17	– 0,15

ANEXO 4 – EFEITO DO TEMPO NO CONCRETO ESTRUTURAL

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – material colhido na íntegra.

4.1 Generalidades

As prescrições deste Anexo têm caráter informativo que podem, na falta de dados melhores, ser usadas no projeto de estruturas com concretos do grupo I da ABNT NBR 8953 cobertos por esta Norma. Outros valores podem ser usados, desde que comprovados experimentalmente, por meio de ensaios realizados de acordo com Normas Brasileiras específicas, levando em conta variações nas características e propriedades dos componentes do concreto, ou ainda desde que respaldados por Normas Internacionais ou literatura técnica.

4.2 Deformações do concreto

4.2.1 Introdução

Quando não há impedimento à livre deformação do concreto, e a ele é aplicada, no tempo t_0 , uma tensão constante no intervalo $t - t_0$, sua deformação total, no tempo t , vale:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) \quad \text{Eq.(172)}$$

Onde:

$\varepsilon_c(t_0) = \sigma_c(t_0) / E_{ci}(t_0)$ é a deformação imediata, por ocasião do carregamento, com $E_{ci}(t_0)$ calculado, para $j = t_0$, pela expressão $E_{ci}(t_0) = 5\,600 f_{ckj}^{1/2}$;

$\varepsilon_{cc}(t) = [\sigma_c(t_0) / E_{ci28}] \phi(t, t_0)$ é a deformação por fluência, no intervalo de tempo (t, t_0) , com E_{ci28} calculado pela mesma expressão para $j = 28$ dias;

$\varepsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração, no intervalo de tempo (t, t_0) .

4.2.2 Fluência do concreto

4.2.2.1 Generalidades

A deformação por fluência do concreto (ϵ_{cc}) é composta de duas partes, uma rápida e outra lenta. A deformação rápida (ϵ_{cca}) é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 h após a aplicação da carga que a originou. A deformação lenta é, por sua vez, composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível (ϵ_{ccf}) e a deformação lenta reversível (ϵ_{ccd}).

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{cca} + \epsilon_{ccf} + \epsilon_{ccd} \quad \text{Eq.(173)}$$

$$\epsilon_{c,tot} = \epsilon_c + \epsilon_{cc} = \epsilon_c (1 + \varphi) \quad \text{Eq.(174)}$$

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d \quad \text{Eq.(175)}$$

Onde:

φ_a é o coeficiente de deformação rápida;

φ_f é o coeficiente de deformação lenta irreversível;

φ_d é o coeficiente de deformação lenta reversível.

4.2.2.2 Hipóteses

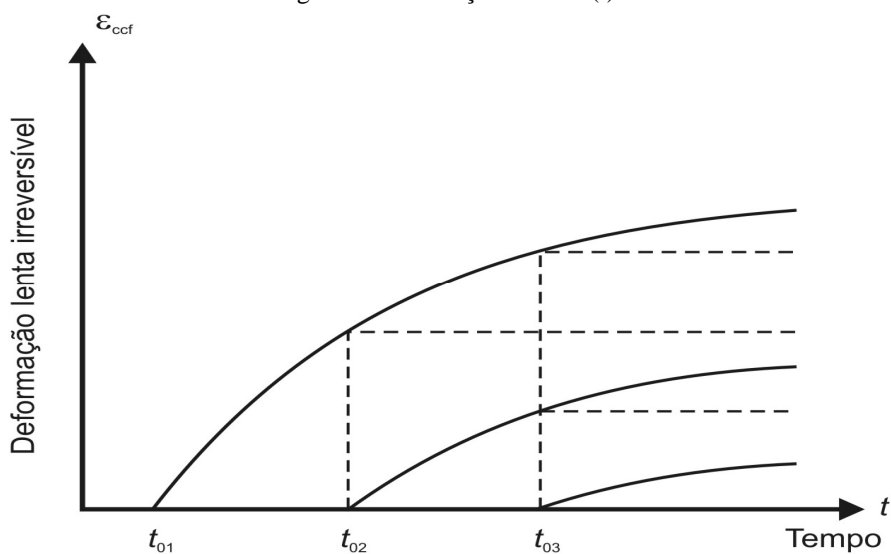
Para o cálculo dos efeitos da fluência, quando as tensões no concreto são as de serviço, admitem-se as seguintes hipóteses:

- A deformação por fluência ϵ_{cc} varia linearmente com a tensão aplicada;
- Para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- A deformação rápida produz deformações constantes ao longo do tempo; os valores do coeficiente φ_a são função da relação entre a resistência do concreto no

momento da aplicação da carga e a sua resistência final;

- d) O coeficiente de deformação lenta reversível φ_d depende apenas da duração do carregamento; o seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da carga;
- e) O coeficiente de deformação lenta irreversível φ_f depende de:
- Umidade relativa do ambiente (U);
 - Consistência do concreto no lançamento;
 - Espessura fictícia da peça h_{fic} (ver 4.2.4);
 - Idade fictícia do concreto (ver 4.2.4) no instante (t_0) da aplicação da carga;
 - Idade fictícia do concreto no instante considerado (t);
- f) Para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível em função do tempo, correspondentes às diferentes idades do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações, conforme a Figura 4.1.

Figura 4. 1: Variação de $\varepsilon_{ccf}(t)$.



4.2.2.3 Valor da fluência

No instante t a deformação devida à fluência é dada por:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccd} + \varepsilon_{ccf} = \frac{\sigma_c}{E_{C28}} \varphi(t, t_0) \quad \text{Eq.(176)}$$

com E_{C28} , módulo de deformação tangente inicial para $j = 28$ dias, que deve ser obtido segundo ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522. Quando não forem realizados ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado, podem ser utilizados os valores da Tabela 8.1 da NBR 6118:2014.

O coeficiente de fluência $\varphi(t, t_0)$, válido também para a tração, é dado por:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \beta_d \quad \text{Eq.(177)}$$

Onde:

- T é a idade fictícia do concreto no instante considerado, expressa em dias;
- t_0 é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento único, expressa em dias;
- t_{0i} é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, expressa em dias;
- φ_a é o coeficiente de fluência rápida, determinado pela expressão:

$$\varphi_a = 0,80 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right], \text{ para concretos de classes C20 a C45.}$$

$$\varphi_a = 1,40 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \text{ para concretos de classes C50 a C90.}$$

Onde:

$$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)}$$

é a função do crescimento da resistência do concreto com a idade, definida em 12.3;

$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível para

concretos de classes C20 a C45;

$\varphi_{f\infty} = 0,45 \cdot \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível para concretos de classes C50 a C90;

φ_{1c} é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U , expresso em porcentagem (%), e da consistência do concreto dada pela Tabela 4.1;

φ_{2c} é o coeficiente dependente da espessura fictícia h_{fic} da peça, definida em 4.2.4.

$$\varphi_{2c} = \frac{43 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad \text{Eq.(178)}$$

onde:

h_{fic} é espessura fictícia, expressa em centímetros (cm) (4.2.4);

$\beta_f(t)$ ou $\beta_f(t_0)$ é o coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto (ver Figura 4.2);

$\varphi_{d\infty}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4;

$\beta_d(t)$ o coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo ($t - t_0$) decorrido após o carregamento.

$$\beta_d(t) = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70} \quad \text{Eq.(179)}$$

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + At + B}{t^2 + Ct + D} \quad \text{Eq.(180)}$$

onde:

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113; \quad \text{Eq.(181)}$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23; \quad \text{Eq.(182)}$$

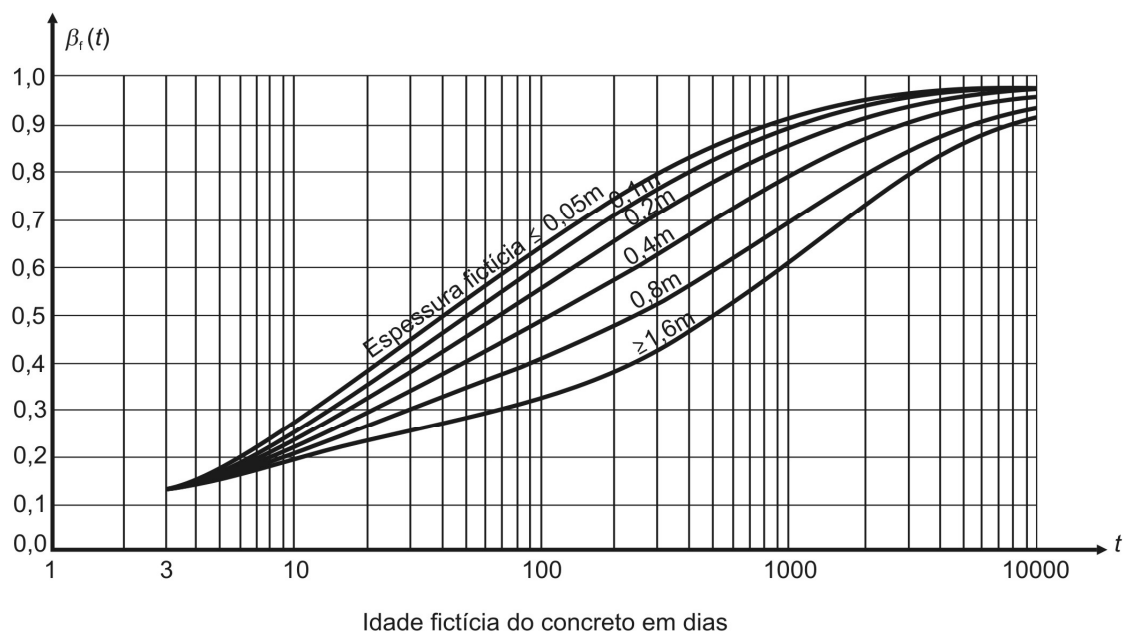
$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183; \quad \text{Eq.(183)}$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 1931; \quad \text{Eq.(184)}$$

h é a espessura fictícia, expressa em metros (m); para valores de h fora do intervalo $(0,05 \leq h \leq 1,6)$, adotam-se os extremos correspondentes;

t é o tempo, expresso em dias ($t \geq 3$).

Figura 4. 2: Variação de $\beta_f(t)$.



4.2.3 Retração do concreto

4.2.3.1 Hipóteses básicas

O valor da retração do concreto depende da:

- a) Umidade relativa do ambiente;
- b) Consistência do concreto no lançamento;
- c) Espessura fictícia da peça.

4.2.3.2 Valor da retração

Entre os instantes t_0 e t , a retração é dada por:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \text{Eq.(185)}$$

onde:

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \varepsilon_{2s}$$

$\varepsilon_{cs\infty}$ é o valor final da retração;

ε_{1s} é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto (ver Tabela 4.1);

ε_{2s} é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça:

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}} \quad \text{Eq.(186)}$$

Onde:

h_{fic} é a espessura fictícia, expressa em centímetros (cm) (4.2.4);

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ é o coeficiente relativo à retração, no instante t ou t_0 (Figura 4.3);

t é a idade fictícia do concreto no instante considerado, expressa em dias;

t_0 é a idade fictícia do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado, expressa em dias.

Tabela 4. 1: Valores numéricos usuais para determinação da fluência e da retração.

Ambiente	Umidade U %	Fluência $\phi_{1\chi}^{1)3)}$			Retração $10^4 e_{1s}^{2)3)}$			$\gamma^4)$
		Abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67 Cm						
		0 - 4	05-09	10-15	0 - 4	05-9	10-15	
Na água	-	0,6	0,8	1	1	1	1	30
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	1	1,3	1,6	-1,9	-2,5	-3,1	5
Ao ar livre, em geral	70	1,5	2	2,5	-3,8	-5	-6,2	1,5
Em ambiente seco	40	2,3	3	3,8	-4,7	-6,3	-7,9	1

1) $j_{1c} = 4,45 - 0,035U$ para abatimento no intervalo de 5 cm a 9 cm e $U \leq 90\%$.

2) $10^4 e_{1s} = -8,09 + (U/15) - (U^2/2284) + (U^3/133765) - (U^4/7608150)$ para abatimentos de 5 cm a 9 cm e $40\% \leq U \leq 90\%$.

3) Os valores de j_{1c} e e_{1s} para $U \leq 90\%$ e abatimento entre 0 cm e 4 cm são 25% menores e para abatimentos entre 10 cm e 15 cm são 25% maiores.

4) $g = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U)$ para $U \leq 90\%$.

NOTAS

1 Para efeito de cálculo, as mesmas expressões e os mesmos valores numéricos podem ser empregados no caso de tração.

2 Para o cálculo dos valores de fluência e retração, a consistência do concreto é aquela correspondente à obtida com o mesmo traço sem a adição de superplastificantes e superfluidificantes.

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad \text{Eq.(187)}$$

onde:

$$A = 40;$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8; \quad \text{Eq.(188)}$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7; \quad \text{Eq.(189)}$$

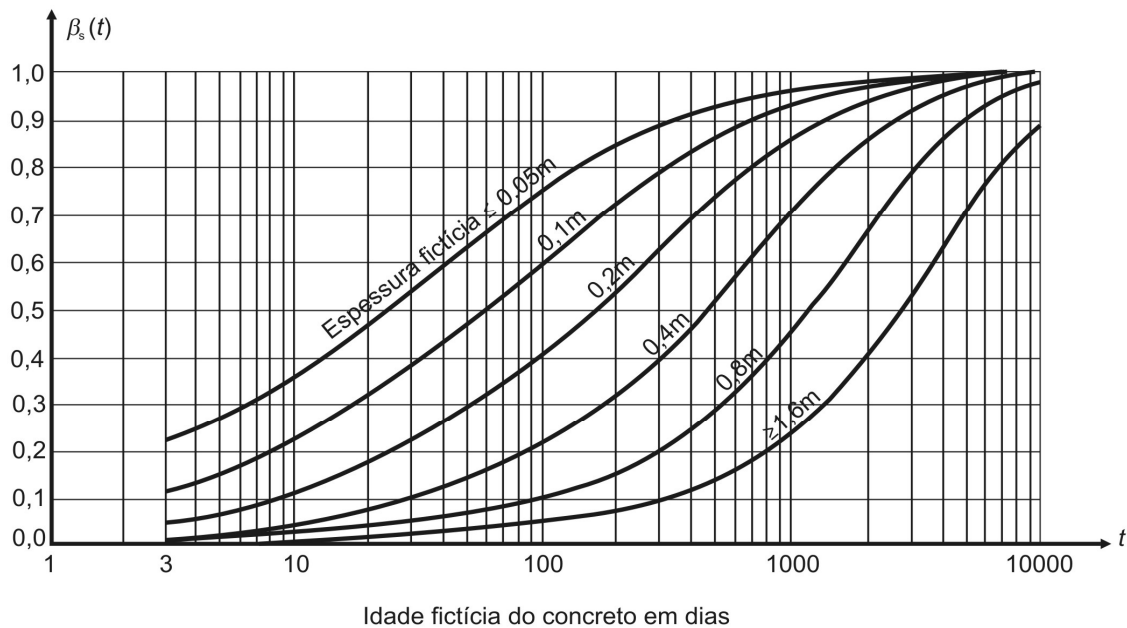
$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8; \quad \text{Eq.(190)}$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8; \quad \text{Eq.(191)}$$

h é a espessura fictícia, expressa em metros (m); para valores de h fora do intervalo $(0,05 \leq h \leq 1,6)$, adotam-se os extremos correspondentes;

t é o tempo, expresso em dias ($t \geq 3$).

Figura 4. 3: Variação de $\beta_s(t)$.



4.2.4 Idade e espessura fictícias

4.2.4.1 Idade fictícia do concreto

A idade a considerar é a idade fictícia (αt_{ef}), em dias, quando o endurecimento é feito à temperatura ambiente de 20 °C e, nos demais casos, quando não houver cura a vapor, a idade a considerar é a idade fictícia dada por:

$$h_{fic} = \gamma \frac{2Ac}{u_{ar}} \quad \text{Eq.(192)}$$

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \Delta t_{ef,i} \quad \text{Eq.(193)}$$

onde:

- t é a idade fictícia, expressa em dias;
- α é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento; na falta de dados experimentais, permite-se o emprego dos valores constantes na Tabela 4.2;
- T_i é a temperatura média diária do ambiente, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- $t_{ef,i}$ é o período, expresso em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente, T_i , pode ser admitida constante.

NOTA: Essa expressão não se aplica à cura a vapor.

Figura 4. 4: Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento.

Cimento Portland (CP)	α	
	Fluência	Retração
De endurecimento lento (CP III e CP IV, todas as classes de resistência)	1	1
De endurecimento Normal (CP I e CP II, todas as classes de resistência)	2	
De endurecimento rápido (CP V-ARI)	3	

Legenda:

CPI e CPI-S - Cimento Portland comum

CPII-E, CPII-F e CPII-Z - Cimento Portland Composto

CPIII - Cimento Portland de alto forno

CPIV - Cimento Portland pozolânico

CPV-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial

RS - Cimento Portland resistente a sulfatos (propriedade específica de alguns dos tipos de cimento citados)

4.2.4.2 Espessura fictícia da peça

Define-se como espessura fictícia o seguinte valor:

onde:

- γ é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente (U %) (ver Tabela 4.1), sendo:

$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U); \quad \text{Eq.(194)}$$

A_c é a área da seção transversal da peça;

u_{ar} é a parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar.

4.2.5 Deformação total do concreto

Quando há variação de tensão ao longo do intervalo, induzida por ações externas ou agentes de diferentes propriedades reológicas (incluindo-se armadura, concretos de diferentes idades etc.), a deformação total no concreto pode ser calculada por:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_c t_0}{E_c t_0} + \frac{\sigma_c t_0}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \int_{t=t_0}^t \frac{\partial \sigma_c}{\partial \tau} \left(\frac{1}{E_{c\tau}} + \frac{\alpha \varphi(\tau, t_0)}{E_{c28}} \right) d\tau \quad \text{Eq.(195)}$$

em que os três primeiros termos representam a deformação não impedida e a integral, e os efeitos da variação de tensões ocorridas no intervalo.

Permite-se substituir essa expressão por:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{\sigma_c t_0}{E_c t_0} + \frac{\sigma_c t_0}{E_{c28}} \right] + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \Delta \sigma_c(t, t_0) \left(\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(\tau, t_0)}{E_{c28}} \right) \quad \text{Eq.(196)}$$

Nas expressões de $\varepsilon_c(t)$:

$\Delta \sigma_c(t, t_0)$ é a variação total de tensão no concreto, no intervalo (t, t_0) ;

α é o coeficiente característico que tem valor variável conforme o caso.

No cálculo de perdas de protensão em casos usuais onde a peça pode ser considerada como concretada de uma só vez e a protensão como aplicada de uma só vez, pode-se adotar $\alpha = 0,5$ e admitir $E_c(t_0) = E_{c28}$, como foi feito em 9.6.3.4.2. Observar que aquela subseção considera que o coeficiente de fluência do concreto: $\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d$ é um coeficiente de deformação lenta irreversível, com as propriedades definidas para φ_f .

Nos outros casos usuais, pode-se considerar $\alpha = 0,8$, mantendo $E_c(t_0) \neq E_{c28}$ sempre que significativo.

Essa aproximação tem a vantagem de tratar ϕ como uma única função, sem separar ϕ_a , ϕ_f , e ϕ_d .

É possível separar ϕ_a , ϕ_f , e ϕ_d , mas para isso é necessário aplicar a expressão integral ao problema em estudo. A expressão simplificada não se aplica nesse caso.

Especial atenção deve ser dada aos casos em que as fundações são deformáveis ou parte da estrutura não apresenta deformação lenta, como é o caso de tirantes metálicos.

4.3 Deformações na armadura

4.3.1 Quando a armadura é solicitada em situação análoga à descrita em 4.2.1, sua deformação vale:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s} + \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s} \chi(t, t_0). \quad \text{Eq.(197)}$$

Onde:

$\sigma_s(t_0) / E_s$ é a deformação imediata, por ocasião do carregamento;

$[\sigma_s(t_0) / E_s] \chi(t, t_0)$ é a deformação por fluência, ocorrida no intervalo de tempo (t, t_0) e considerada sempre que $\sigma_s(t_0) > 0,5 f_{ptk}$.

4.3.2 Quando a livre deformação por fluência é impedida, em situação análoga à descrita em 4.2.4 para o concreto, a deformação total pode ser calculada por:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s} + \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s} \chi(t, t_0) + \frac{\Delta\sigma_s(t, t_0)}{E_s} [1 + \chi(t, t_0)] \quad \text{Eq.(198)}$$

Onde:

$\Delta\sigma_s(t, t_0)$ é a variação total de tensão na armadura, no intervalo (t, t_0) .

ANEXO 5 – DADOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS UTILIZADOS

Fonte: BDMEP – INMET, adaptado pelo autor.

Tabela 5. 1: Dados históricos de temperatura e umidade relativa da cidade de Lavras - MG.

BDMEP - INMET			
Estação: LAVRAS - MG (OMM: 83687)			
Latitude (graus): -21.75			
Longitude (graus): -45			
Altitude (metros): 918.84			
Estação Operante			
Início de operação: 18/02/1911			
Período solicitado dos dados: 01/01/1974 a 31/12/2014			
Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP			
Estação	Data	TempCompensadaMedia	UmidadeRelativaMedia
83687	31/01/1974	21,83	79,68%
83687	28/02/1974	22,77	70,08%
83687	31/03/1974	21,38	83,02%
83687	30/04/1974	19,53	79,56%
83687	31/05/1974	17,21	78,36%
83687	30/06/1974	15,23	79,53%
83687	31/07/1974	15,27	66,19%
83687	31/08/1974	17,56	62,33%
83687	30/09/1974	20,44	54,81%
83687	31/10/1974	20,43	69,89%
83687	30/11/1974	21,00	64,59%
83687	31/12/1974	20,49	80,69%
83687	31/01/1975	21,19	79,38%
83687	28/02/1975	22,26	81,96%
83687	31/03/1975	21,74	75,03%
83687	30/04/1975	18,36	75,39%
83687	31/05/1975	16,47	74,48%
83687	30/06/1975	16,25	72,18%
83687	31/07/1975	14,80	70,10%
83687	31/08/1975	18,78	58,73%
83687	30/09/1975	19,47	63,44%
83687	31/10/1975	20,58	74,12%
83687	30/11/1975	20,47	83,22%
83687	31/12/1975	21,73	76,97%
83687	31/01/1976	22,52	75,23%
83687	29/02/1976	20,95	84,59%
83687	31/03/1976	21,23	82,79%

83687	30/04/1976	19,91	80,15%
83687	31/05/1976	16,95	84,44%
83687	30/06/1976	16,27	77,07%
83687	31/07/1976	14,99	79,88%
83687	31/08/1976	17,26	76,42%
83687	30/09/1976	17,90	80,45%
83687	31/10/1976	19,43	74,77%
83687	30/11/1976	20,85	78,18%
83687	31/12/1976	20,74	87,02%
83687	31/01/1977	21,92	86,59%
83687	28/02/1977	22,83	75,03%
83687	31/03/1977	22,01	83,95%
83687	30/04/1977	20,00	81,68%
83687	31/05/1977	16,87	77,83%
83687	30/06/1977	16,93	77,09%
83687	31/07/1977	17,50	65,36%
83687	31/08/1977	19,35	66,98%
83687	30/09/1977	19,36	73,78%
83687	31/10/1977	21,30	71,27%
83687	30/11/1977	21,09	85,02%
83687	31/12/1977	20,68	84,11%
83687	31/01/1978	22,49	80,90%
83687	28/02/1978	21,85	76,45%
83687	31/03/1978	21,71	75,69%
83687	30/04/1978	19,19	75,69%
83687	31/05/1978	16,88	74,77%
83687	30/06/1978	15,20	73,75%
83687	31/07/1978	16,21	69,04%
83687	31/08/1978	16,99	60,13%
83687	30/09/1978	18,46	68,89%
83687	31/10/1978	21,43	69,76%
83687	30/11/1978	20,69	82,51%
83687	31/12/1978	20,84	82,35%
83687	31/01/1980	21,02	85,83%
83687	29/02/1980	21,93	78,60%
83687	31/03/1980	21,78	76,46%
83687	30/04/1980	20,01	86,95%
83687	31/05/1980	18,21	83,65%
83687	30/06/1980	15,80	80,00%
83687	31/07/1980	16,12	78,70%
83687	31/08/1980	17,73	67,49%
83687	30/09/1980	18,27	71,42%
83687	31/10/1980	20,77	73,44%
83687	30/11/1980	20,60	85,14%
83687	31/12/1980	21,38	86,87%

83687	31/01/1982	20,75	90,41%
83687	28/02/1982	21,83	84,20%
83687	31/03/1982	20,77	91,85%
83687	30/04/1982	18,52	87,62%
83687	31/05/1982	16,26	86,27%
83687	30/06/1982	17,05	89,72%
83687	31/07/1982	16,27	85,29%
83687	31/08/1982	18,45	81,04%
83687	30/09/1982	18,69	77,99%
83687	31/10/1982	20,32	88,38%
83687	30/11/1982	22,69	84,69%
83687	31/12/1982	20,41	94,17%
83687	31/01/1983	21,22	94,19%
83687	28/02/1983	22,06	89,53%
83687	31/03/1983	21,28	89,45%
83687	30/04/1983	19,82	84,15%
83687	31/05/1983	19,00	80,26%
83687	30/06/1983	17,64	82,97%
83687	31/07/1983	16,88	76,65%
83687	31/08/1983	16,91	71,29%
83687	30/09/1983	17,97	88,57%
83687	31/10/1983	19,72	87,14%
83687	30/11/1983	21,30	87,63%
83687	31/12/1983	20,68	92,69%
83687	31/01/1984	23,01	77,96%
83687	29/02/1984	23,85	72,53%
83687	31/03/1984	22,46	73,44%
83687	30/04/1984	20,39	77,58%
83687	31/05/1984	19,98	73,97%
83687	30/06/1984	18,35	69,57%
83687	31/07/1984	17,74	65,49%
83687	31/08/1984	17,59	69,23%
83687	30/09/1984	18,51	66,74%
83687	31/10/1984	21,69	65,44%
83687	30/11/1984	21,39	71,22%
83687	31/12/1984	21,31	82,15%
83687	31/01/1991	21,74	82,09%
83687	28/02/1991	22,54	78,62%
83687	31/03/1991	21,65	80,61%
83687	30/04/1991	20,54	73,98%
83687	31/05/1991	18,26	74,90%
83687	30/06/1991	18,09	71,25%
83687	31/07/1991	16,60	70,34%
83687	31/08/1991	18,21	60,85%
83687	30/09/1991	19,40	65,83%

83687	31/10/1991	20,72	71,25%
83687	30/11/1991	22,22	72,81%
83687	31/12/1991	22,44	80,23%
83687	31/01/1993	22,40	77,49%
83687	28/02/1993	21,64	85,49%
83687	31/03/1993	22,44	76,90%
83687	30/04/1993	21,20	78,54%
83687	31/05/1993	17,55	77,47%
83687	30/06/1993	16,24	76,18%
83687	31/07/1993	18,07	67,65%
83687	31/08/1993	17,77	68,00%
83687	30/09/1993	20,55	67,10%
83687	31/10/1993	21,71	67,61%
83687	30/11/1993	23,24	66,03%
83687	31/12/1993	21,95	78,90%
83687	31/01/1995	23,75	73,49%
83687	28/02/1995	22,69	81,00%
83687	31/03/1995	22,31	75,28%
83687	30/04/1995	20,62	75,47%
83687	31/05/1995	18,80	79,21%
83687	30/06/1995	16,60	70,35%
83687	31/07/1995	18,07	67,35%
83687	31/08/1995	20,26	54,59%
83687	30/09/1995	20,21	61,42%
83687	31/10/1995	20,93	70,99%
83687	30/11/1995	20,91	74,77%
83687	31/12/1995	22,23	78,26%
83687	31/01/1996	23,17	75,11%
83687	29/02/1996	23,16	77,53%
83687	31/03/1996	22,76	79,22%
83687	30/04/1996	20,71	73,44%
83687	31/05/1996	17,35	75,62%
83687	30/06/1996	16,27	69,58%
83687	31/07/1996	16,18	65,60%
83687	31/08/1996	17,75	63,67%
83687	30/09/1996	18,84	72,10%
83687	31/10/1996	21,44	72,21%
83687	30/11/1996	20,87	75,98%
83687	31/12/1996	22,15	83,54%
83687	31/01/1998	23,25	77,58%
83687	28/02/1998	23,79	77,48%
83687	31/03/1998	23,22	74,34%
83687	30/04/1998	21,49	74,33%
83687	31/05/1998	18,06	72,26%
83687	30/06/1998	16,23	73,21%

83687	31/07/1998	16,88	64,48%
83687	31/08/1998	19,84	67,22%
83687	30/09/1998	21,28	63,78%
83687	31/10/1998	20,36	76,38%
83687	30/11/1998	21,03	74,93%
83687	31/12/1998	22,90	76,43%
83687	31/01/1999	23,38	74,90%
83687	28/02/1999	22,72	79,17%
83687	31/03/1999	22,13	77,98%
83687	30/04/1999	20,60	71,55%
83687	31/05/1999	17,23	68,28%
83687	30/06/1999	17,07	72,91%
83687	31/07/1999	17,86	69,26%
83687	31/08/1999	17,78	54,32%
83687	30/09/1999	20,27	55,54%
83687	31/10/1999	20,05	66,00%
83687	30/11/1999	20,29	70,48%
83687	31/12/1999	21,81	76,08%
83687	31/01/2000	22,66	76,81%
83687	29/02/2000	22,39	78,23%
83687	31/03/2000	21,84	78,21%
83687	30/04/2000	20,36	68,85%
83687	31/05/2000	17,66	69,40%
83687	30/06/2000	16,92	64,41%
83687	31/07/2000	16,20	65,16%
83687	31/08/2000	18,45	59,34%
83687	30/09/2000	19,25	71,33%
83687	31/10/2000	23,20	60,58%
83687	30/11/2000	21,14	76,06%
83687	31/12/2000	22,33	77,31%
83687	31/01/2001	22,99	72,16%
83687	28/02/2001	23,80	67,96%
83687	31/03/2001	22,57	74,40%
83687	30/04/2001	22,04	67,77%
83687	31/05/2001	18,44	72,03%
83687	30/06/2001	17,70	68,81%
83687	31/07/2001	17,85	63,78%
83687	31/08/2001	18,44	59,70%
83687	30/09/2001	19,22	67,09%
83687	31/10/2001	20,95	66,01%
83687	30/11/2001	22,28	74,23%
83687	31/12/2001	21,47	80,53%
83687	31/01/2002	22,83	76,17%
83687	28/02/2002	21,67	81,90%
83687	31/03/2002	22,76	75,08%

83687	30/04/2002	22,17	65,30%
83687	31/05/2002	19,46	74,96%
83687	30/06/2002	18,67	68,18%
83687	31/07/2002	17,55	70,07%
83687	31/08/2002	20,42	59,42%
83687	30/09/2002	19,65	64,79%
83687	31/10/2002	23,82	54,10%
83687	30/11/2002	22,30	70,45%
83687	31/12/2002	23,23	76,16%
83687	31/01/2003	22,42	82,90%
83687	28/02/2003	23,95	67,38%
83687	31/03/2003	21,89	78,51%
83687	30/04/2003	21,23	72,33%
83687	31/05/2003	17,31	73,06%
83687	30/06/2003	18,28	70,21%
83687	31/07/2003	16,94	66,67%
83687	31/08/2003	18,13	65,54%
83687	30/09/2003	20,48	63,41%
83687	31/10/2003	21,58	61,26%
83687	30/11/2003	21,80	72,98%
83687	31/12/2003	22,69	76,32%
83687	31/01/2004	22,30	74,91%
83687	29/02/2004	21,60	80,52%
83687	31/03/2004	21,30	75,70%
83687	30/04/2004	20,94	78,32%
83687	31/05/2004	18,06	78,07%
83687	30/06/2004	16,59	75,88%
83687	31/07/2004	15,76	73,37%
83687	31/08/2004	18,20	59,06%
83687	30/09/2004	21,78	54,45%
83687	31/10/2004	20,66	72,10%
83687	30/11/2004	21,77	71,34%
83687	31/12/2004	21,73	79,59%
83687	31/01/2005	22,64	81,13%
83687	28/02/2005	22,08	73,29%
83687	31/03/2005	22,44	78,60%
83687	30/04/2005	22,14	73,15%
83687	31/05/2005	18,95	74,05%
83687	30/06/2005	17,37	75,85%
83687	31/07/2005	16,93	71,71%
83687	31/08/2005	19,32	60,09%
83687	30/09/2005	20,02	70,08%
83687	31/10/2005	22,98	64,05%
83687	30/11/2005	20,89	77,49%
83687	31/12/2005	21,14	77,62%

83687	31/01/2006	23,12	69,56%
83687	28/02/2006	23,20	75,84%
83687	31/03/2006	22,43	78,39%
83687	30/04/2006	20,80	74,38%
83687	31/05/2006	17,35	72,65%
83687	30/06/2006	16,52	70,94%
83687	31/07/2006	17,27	60,31%
83687	31/08/2006	19,43	58,06%
83687	30/09/2006	19,41	64,52%
83687	31/10/2006	21,18	72,73%
83687	30/11/2006	21,42	75,95%
83687	31/12/2006	22,59	78,08%
83687	31/01/2007	22,04	86,46%
83687	28/02/2007	22,75	72,29%
83687	31/03/2007	23,56	65,64%
83687	30/04/2007	21,85	71,70%
83687	31/05/2007	18,09	69,98%
83687	30/06/2007	17,42	65,91%
83687	31/07/2007	17,06	65,98%
83687	31/08/2007	18,94	54,08%
83687	30/09/2007	21,29	51,22%
83687	31/10/2007	22,81	58,66%
83687	30/11/2007	21,48	76,00%
83687	31/12/2007	22,97	72,20%
83687	31/01/2008	21,82	77,44%
83687	29/02/2008	22,30	78,40%
83687	31/03/2008	21,90	76,35%
83687	30/04/2008	20,97	79,77%
83687	31/05/2008	17,82	73,98%
83687	30/06/2008	17,55	75,79%
83687	31/07/2008	16,53	61,90%
83687	31/08/2008	19,57	62,56%
83687	30/09/2008	19,43	63,67%
83687	31/10/2008	22,00	69,74%
83687	30/11/2008	21,20	76,23%
83687	31/12/2008	21,49	80,46%
83687	31/01/2009	22,21	79,94%
83687	28/02/2009	23,29	76,11%
83687	31/03/2009	22,70	78,19%
83687	30/04/2009	20,41	73,96%
83687	31/05/2009	18,67	74,40%
83687	30/06/2009	16,23	73,71%
83687	31/07/2009	18,56	69,77%
83687	31/08/2009	18,47	65,30%
83687	30/09/2009	21,57	68,61%

83687	31/10/2009	21,87	72,67%
83687	30/11/2009	23,70	72,71%
83687	31/12/2009	22,43	79,55%
83687	31/01/2010	23,96	71,06%
83687	28/02/2010	23,95	67,85%
83687	31/03/2010	23,11	72,35%
83687	30/04/2010	21,05	69,00%
83687	31/05/2010	18,49	71,44%
83687	30/06/2010	16,02	68,48%
83687	31/07/2010	17,70	66,72%
83687	31/08/2010	18,07	51,96%
83687	30/09/2010	20,10	60,03%
83687	31/10/2010	20,90	69,37%
83687	30/11/2010	21,43	75,80%
83687	31/12/2010	23,38	75,37%
83687	31/01/2011	23,00	76,62%
83687	28/02/2011	23,99	67,32%
83687	31/03/2011	22,01	78,97%
83687	30/04/2011	21,43	71,77%
83687	31/05/2011	18,29	72,14%
83687	30/06/2011	16,28	71,61%
83687	31/07/2011	17,33	64,73%
83687	31/08/2011	19,65	57,23%
83687	30/09/2011	20,23	51,60%
83687	31/10/2011	20,91	70,56%
83687	30/11/2011	20,40	71,67%
83687	31/12/2011	21,79	80,76%
83687	31/01/2012	21,66	79,25%
83687	29/02/2012	23,15	69,57%
83687	31/03/2012	22,27	72,42%
83687	30/04/2012	21,40	75,19%
83687	31/05/2012	17,72	74,85%
83687	30/06/2012	17,83	79,26%
83687	31/07/2012	16,79	67,18%
83687	31/08/2012	17,96	61,52%
83687	30/09/2012	20,50	55,50%
83687	31/10/2012	22,95	56,87%
83687	30/11/2012	21,96	71,74%
83687	31/12/2012	24,07	72,40%
83687	31/01/2013	22,23	80,07%
83687	28/02/2013	23,47	72,03%
83687	31/03/2013	22,22	79,67%
83687	30/04/2013	19,91	76,38%
83687	31/05/2013	18,32	74,06%
83687	30/06/2013	18,04	78,96%

83687	31/07/2013	16,89	70,63%
83687	31/08/2013	18,23	61,13%
83687	30/09/2013	20,24	63,44%
83687	31/10/2013	20,35	70,84%
83687	30/11/2013	21,62	73,24%
83687	31/12/2013	22,75	76,94%
83687	31/01/2014	24,18	63,71%
83687	28/02/2014	24,05	60,71%
83687	31/03/2014	22,78	70,36%
83687	30/04/2014	21,06	73,23%
83687	31/05/2014	18,40	70,09%
83687	30/06/2014	17,97	70,66%
83687	31/07/2014	17,12	68,64%
83687	31/08/2014	18,54	58,46%
83687	30/09/2014	20,96	55,90%
83687	31/10/2014	22,09	55,44%
83687	30/11/2014	22,10	70,78%
83687	31/12/2014	22,96	72,75%

Tabela 5. 2: Dados históricos de temperatura e umidade relativa da cidade de Machado - MG.
BDMEP - INMET

Estação : MACHADO - MG (OMM: 83683)

Latitude (graus) : -21.68

Longitude (graus): -45.94

Altitude (metros): 873.35

Estação Operante

Início de operação: 01/09/1961

Período solicitado dos dados: 01/01/1974 a 31/12/2014

Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP

Estação	Data	Temp Compensada Media	Umidade Relativa Media
83683	31/01/1974	22,43	81,13%
83683	28/02/1974	23,63	75,84%
83683	31/03/1974	22,07	80,98%
83683	30/04/1974	20,14	79,51%
83683	31/05/1974	17,43	76,40%
83683	30/06/1974	15,56	79,73%
83683	31/07/1974	15,80	69,74%
83683	31/08/1974	17,69	63,31%
83683	30/09/1974	21,00	54,23%
83683	31/10/1974	20,99	68,35%
83683	30/11/1974	21,68	63,80%
83683	31/12/1974	21,14	82,03%
83683	31/01/1975	21,89	78,51%
83683	28/02/1975	22,93	80,86%
83683	31/03/1975	22,51	74,02%
83683	30/04/1975	18,77	75,24%
83683	31/05/1975	16,71	74,90%

83683	30/06/1975	16,57	69,79%
83683	31/07/1975	14,85	67,49%
83683	31/08/1975	19,30	55,79%
83683	30/09/1975	20,28	59,26%
83683	31/10/1975	20,76	69,12%
83683	30/11/1975	20,87	80,48%
83683	31/12/1975	22,57	76,12%
83683	31/01/1976	23,28	76,55%
83683	29/02/1976	21,53	92,58%
83683	31/03/1976	21,82	83,73%
83683	30/04/1976	20,02	82,33%
83683	31/05/1976	17,31	85,97%
83683	30/06/1976	16,15	82,17%
83683	31/07/1976	15,04	85,98%
83683	31/08/1976	17,14	85,65%
83683	30/09/1976	18,05	84,33%
83683	31/10/1976	19,63	77,17%
83683	30/11/1976	20,95	78,26%
83683	31/12/1976	21,22	83,24%
83683	31/01/1977	22,25	78,90%
83683	28/02/1977	23,36	66,55%
83683	31/03/1977	22,31	77,63%
83683	30/04/1977	20,29	79,90%
83683	31/05/1977	16,88	78,63%
83683	30/06/1977	16,83	75,17%
83683	31/07/1977	17,05	65,86%
83683	31/08/1977	19,23	61,43%
83683	30/09/1977	19,76	71,28%
83683	31/10/1977	21,43	71,81%
83683	30/11/1977	21,35	84,32%
83683	31/12/1977	21,20	81,20%
83683	31/01/1983	21,80	82,94%
83683	28/02/1983	22,39	75,61%
83683	31/03/1983	21,24	77,66%
83683	30/04/1983	20,42	77,33%
83683	31/05/1983	18,87	77,61%
83683	30/06/1983	17,15	80,36%
83683	31/07/1983	16,90	69,37%
83683	31/08/1983	17,08	58,24%
83683	30/09/1983	18,36	78,18%
83683	31/10/1983	19,93	73,90%
83683	30/11/1983	21,11	70,23%
83683	31/12/1983	20,93	82,36%
83683	31/01/1984	23,35	65,98%
83683	29/02/1984	24,09	65,03%
83683	31/03/1984	22,97	68,08%
83683	30/04/1984	20,69	72,15%
83683	31/05/1984	19,26	70,98%
83683	30/06/1984	17,03	63,29%
83683	31/07/1984	16,98	59,63%
83683	31/08/1984	17,13	66,81%
83683	30/09/1984	18,38	58,55%
83683	31/10/1984	22,26	58,84%

83683	30/11/1984	22,11	66,24%
83683	31/12/1984	21,78	75,68%
83683	31/01/1985	21,68	82,93%
83683	28/02/1985	22,72	73,37%
83683	31/03/1985	22,04	74,44%
83683	30/04/1985	20,50	69,07%
83683	31/05/1985	17,34	67,40%
83683	30/06/1985	13,97	58,99%
83683	31/07/1985	14,34	58,81%
83683	31/08/1985	17,90	55,62%
83683	30/09/1985	18,89	62,89%
83683	31/10/1985	21,77	61,48%
83683	30/11/1985	22,15	65,03%
83683	31/12/1985	21,41	72,77%
83683	31/01/1991	21,98	85,67%
83683	28/02/1991	22,46	84,13%
83683	31/03/1991	21,21	88,15%
83683	30/04/1991	20,45	82,73%
83683	31/05/1991	17,36	80,65%
83683	30/06/1991	16,92	78,90%
83683	31/07/1991	15,75	75,15%
83683	31/08/1991	17,85	62,77%
83683	30/09/1991	19,35	61,66%
83683	31/10/1991	20,82	68,94%
83683	30/11/1991	22,46	67,28%
83683	31/12/1991	22,36	80,41%
83683	31/01/1993	22,27	80,44%
83683	28/02/1993	21,48	86,45%
83683	31/03/1993	21,81	81,59%
83683	30/04/1993	20,61	81,65%
83683	31/05/1993	17,16	80,00%
83683	30/06/1993	15,50	81,88%
83683	31/07/1993	16,73	74,35%
83683	31/08/1993	17,22	71,02%
83683	30/09/1993	20,04	73,20%
83683	31/10/1993	21,34	71,47%
83683	30/11/1993	23,05	71,05%
83683	31/12/1993	22,31	82,44%
83683	31/01/1996	22,84	84,94%
83683	29/02/1996	22,94	84,80%
83683	31/03/1996	22,45	87,90%
83683	30/04/1996	20,53	82,80%
83683	31/05/1996	17,09	86,21%
83683	30/06/1996	15,48	83,58%
83683	31/07/1996	15,23	79,33%
83683	31/08/1996	17,11	76,35%
83683	30/09/1996	18,59	81,73%
83683	31/10/1996	21,06	82,47%
83683	30/11/1996	21,02	82,74%
83683	31/12/1996	22,25	87,85%
83683	31/01/1998	23,58	81,81%
83683	28/02/1998	23,49	87,08%
83683	31/03/1998	23,39	83,25%

83683	30/04/1998	21,00	83,58%
83683	31/05/1998	17,46	81,33%
83683	30/06/1998	15,04	83,98%
83683	31/07/1998	15,98	75,73%
83683	31/08/1998	19,11	78,00%
83683	30/09/1998	20,52	77,00%
83683	31/10/1998	20,56	84,14%
83683	30/11/1998	21,08	83,24%
83683	31/12/1998	22,61	84,72%
83683	31/01/1999	23,24	84,61%
83683	28/02/1999	22,78	85,84%
83683	31/03/1999	22,29	83,55%
83683	30/04/1999	20,18	78,82%
83683	31/05/1999	16,63	75,59%
83683	30/06/1999	16,20	81,47%
83683	31/07/1999	17,23	79,77%
83683	31/08/1999	16,94	66,97%
83683	30/09/1999	19,52	65,30%
83683	31/10/1999	20,73	70,00%
83683	30/11/1999	20,69	72,38%
83683	31/12/1999	22,10	78,93%
83683	31/01/2000	22,77	81,48%
83683	29/02/2000	22,11	84,74%
83683	31/03/2000	21,89	85,17%
83683	30/04/2000	19,82	79,24%
83683	31/05/2000	17,32	76,52%
83683	30/06/2000	15,77	77,29%
83683	31/07/2000	14,62	76,12%
83683	31/08/2000	17,17	71,19%
83683	30/09/2000	19,06	76,34%
83683	31/10/2000	22,88	65,76%
83683	30/11/2000	21,54	78,28%
83683	31/12/2000	22,56	80,09%
83683	31/01/2001	23,03	76,74%
83683	28/02/2001	23,63	75,30%
83683	31/03/2001	22,49	78,57%
83683	30/04/2001	21,73	71,88%
83683	31/05/2001	18,15	76,87%
83683	30/06/2001	16,97	74,63%
83683	31/07/2001	17,25	69,26%
83683	31/08/2001	17,98	62,57%
83683	30/09/2001	19,72	66,23%
83683	31/10/2001	20,99	70,69%
83683	30/11/2001	22,37	77,02%
83683	31/12/2001	21,94	78,62%
83683	31/01/2002	22,77	80,97%
83683	28/02/2002	22,02	83,35%
83683	31/03/2002	22,97	78,06%
83683	30/04/2002	21,78	72,39%
83683	31/05/2002	18,89	79,89%
83683	30/06/2002	17,42	76,07%
83683	31/07/2002	16,85	72,82%
83683	31/08/2002	19,90	66,73%

83683	30/09/2002	19,60	69,41%
83683	31/10/2002	23,84	59,55%
83683	30/11/2002	22,36	76,53%
83683	31/12/2002	23,50	80,27%
83683	31/01/2003	22,94	85,43%
83683	28/02/2003	23,95	71,81%
83683	31/03/2003	22,36	79,69%
83683	30/04/2003	20,92	77,99%
83683	31/05/2003	16,98	74,97%
83683	30/06/2003	17,59	74,40%
83683	31/07/2003	16,14	70,48%
83683	31/08/2003	17,43	69,04%
83683	30/09/2003	21,13	65,92%
83683	31/10/2003	21,61	67,76%
83683	30/11/2003	21,87	77,21%
83683	31/12/2003	23,03	78,56%
83683	31/01/2004	22,29	81,61%
83683	29/02/2004	21,79	83,12%
83683	31/03/2004	20,87	78,90%
83683	30/04/2004	20,95	81,69%
83683	31/05/2004	17,30	83,15%
83683	30/06/2004	15,66	83,95%
83683	31/07/2004	15,45	77,46%
83683	31/08/2004	17,48	62,58%
83683	30/09/2004	21,78	55,69%
83683	31/10/2004	20,47	76,29%
83683	30/11/2004	21,87	74,79%
83683	31/12/2004	22,26	79,67%
83683	31/01/2005	22,90	85,03%
83683	28/02/2005	22,43	72,00%
83683	31/03/2005	22,60	81,31%
83683	30/04/2005	21,44	77,54%
83683	31/05/2005	18,18	78,04%
83683	30/06/2005	16,47	81,47%
83683	31/07/2005	15,99	78,03%
83683	31/08/2005	17,82	68,35%
83683	30/09/2005	19,57	77,43%
83683	31/10/2005	22,86	68,82%
83683	30/11/2005	21,41	77,78%
83683	31/12/2005	21,46	80,76%
83683	31/01/2006	23,31	73,02%
83683	28/02/2006	23,28	79,55%
83683	31/03/2006	23,15	79,48%
83683	30/04/2006	20,62	75,84%
83683	31/05/2006	17,01	74,60%
83683	30/06/2006	15,78	74,11%
83683	31/07/2006	16,25	69,81%
83683	31/08/2006	18,75	61,26%
83683	30/09/2006	19,91	64,98%
83683	31/10/2006	21,44	76,49%
83683	30/11/2006	21,40	79,19%
83683	31/12/2006	22,59	83,59%
83683	31/01/2009	22,18	82,05%

83683	28/02/2009	22,71	81,87%
83683	31/03/2009	22,75	80,17%
83683	30/04/2009	20,01	76,98%
83683	31/05/2009	17,84	80,64%
83683	30/06/2009	14,95	80,73%
83683	31/07/2009	17,11	84,12%
83683	31/08/2009	17,48	78,65%
83683	30/09/2009	20,55	81,19%
83683	31/10/2009	21,38	77,48%
83683	30/11/2009	23,86	74,78%
83683	31/12/2009	22,32	84,56%
83683	31/01/2010	23,19	80,48%
83683	28/02/2010	23,37	75,17%
83683	31/03/2010	22,61	77,73%
83683	30/04/2010	20,32	75,11%
83683	31/05/2010	17,61	77,11%
83683	30/06/2010	15,24	75,25%
83683	31/07/2010	16,92	72,06%
83683	31/08/2010	17,43	56,96%
83683	30/09/2010	20,21	62,73%
83683	31/10/2010	20,77	73,35%
83683	30/11/2010	21,78	74,99%
83683	31/12/2010	23,45	78,48%
83683	31/01/2011	22,89	81,49%
83683	28/02/2011	23,72	72,02%
83683	31/03/2011	22,02	82,98%
83683	30/04/2011	20,72	80,23%
83683	31/05/2011	17,41	78,59%
83683	30/06/2011	14,50	80,29%
83683	31/07/2011	16,63	74,25%
83683	31/08/2011	18,96	66,47%
83683	30/09/2011	20,15	54,15%
83683	31/10/2011	21,27	66,02%
83683	30/11/2011	20,93	69,15%
83683	31/12/2011	22,13	78,61%
83683	31/01/2012	21,57	80,21%
83683	29/02/2012	23,12	71,03%
83683	31/03/2012	22,18	74,74%
83683	30/04/2012	21,07	79,54%
83683	31/05/2012	17,03	78,36%
83683	30/06/2012	17,30	82,91%
83683	31/07/2012	15,98	72,35%
83683	31/08/2012	17,52	63,94%
83683	30/09/2012	20,11	59,56%
83683	31/10/2012	22,81	61,68%
83683	30/11/2012	22,12	74,78%
83683	31/12/2012	23,84	78,10%

