

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

KARINA BARTH FERRO

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES

**VITÓRIA – ES
DEZEMBRO DE 2020**

KARINA BARTH FERRO

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves.

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO DE 2020

KARINA BARTH FERRO

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves

Doutor em Engenharia Civil

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi

Doutor em Engenharia Civil

Universidade Federal do Espírito Santo

Membro interno

Prof. Dr. Marcos Antônio Campos Rodrigues

Doutor em Engenharia Civil

Universidade Federal do Espírito Santo

Membro interno

VITÓRIA – ES

09 DE DEZEMBRO DE 2020

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção transversal de laje alveolar e geometria dos alvéolos.....	18
Figura 2. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 15 cm.....	21
Figura 3. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 20 cm.....	21
Figura 4. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 26,5 cm.....	21
Figura 5. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 32 cm.....	21
Figura 6. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 40 cm.....	22
Figura 7. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 50 cm.....	22
Figura 8. Diâmetro nominal (D) em cordoalhas de 3 e 7 fios.	23
Figura 9. Esquema de descontinuidade nos apoios.....	24
Figura 10. Distribuição de tensões na seção transversal genérica de concreto, de acordo com o diagrama parábola-retângulo.....	26
Figura 11. Diagrama de Tensão x Deformação para aço de protensão.....	29
Figura 12. Representação da força de protensão atuante e excentricidade dos cabos.	47
Figura 13. Menu inicial do Alveolaje 2.0.....	58
Figura 14. Entrada de dados Alveolaje 2.0	59
Figura 15. Gráficos dos processo de otimização.....	60
Figura 16. Menu de Resultados Alveolaje 2.0.....	60
Figura 17. Seção transversal de laje alveolar h=20cm.....	62
Figura 18. Representação da chave de cisalhamento.	63
Figura 19. Resultados para validação do software.....	66
Figura 20. Convergência dos resultados da otimização.....	67
Figura 21. Gráfico da evolução Vão Livre x Custo para uma unidade de laje alveolar.	69
Figura 22. Gráfico de Tensões do ELU no ato de protensão das cordoalhas.	71
Figura 23. Gráfico de Deformação x vão livre de laje alveolar.	72

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Propriedades geométricas de seção transversal de laje alveolar.....	22
Tabela 2. Especificações cordoalhas de 7 fios.....	23
Tabela 3.Valores de cálculo de Ψ_{1000}	33
Tabela 4. Fatores s e α relacionados ao endurecimento do cimento.	37
Tabela 5. Custo das cordoalhas por Kg.	54
Tabela 6. Custo de concreto por m^3	54
Tabela 7. Propriedades geométricas da seção transversal simples e composta.	62
Tabela 8.Comparação de resultado obtidos para perdas iniciais.	63
Tabela 9.Comparação de resultado obtidos para perdas finais.	64
Tabela 10. Resultados obtidos para o ELU, em $t=t_{\infty}$	64
Tabela 11. Tensões no ELU, em $t=t_0$	65
Tabela 12. Tensões para o ELS-D e ELS-F.....	65
Tabela 13. Deformação inicial e final.	66
Tabela 14. Cisalhamento na seção simples e composta.	66
Tabela 15. Resultados otimizados para vão livre de 5 a 9 metros.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Níveis de protensão de armadura ativa pré-tracionada.....	20
Quadro 2. Fases de atuação dos carregamentos, área da seção de concreto e perímetro em contato com o ar.	32
Quadro 3. Dados de entrada para exemplo de validação do programa.....	61
Quadro 4. Parâmetros de entrada para análise gráfica dos resultados.	68

SIMBOLOGIA

Δl	Encurtamento total da cordoalha durante a ancoragem
$\Delta\sigma_{ancoragem}$	Perdas de deformação por ancoragem
$\Delta\sigma_{def}$	Perdas por deformação imediata do concreto
$\Delta\sigma_{relaxação}$	Perdas por relaxação da armadura
$\Delta\sigma_{p,fc}$	Perdas por fluência do concreto
$\Delta\sigma_{p,rc}$	Perdas por retração do concreto
$\Delta\sigma_{relaxação}(t_{\infty})$	Perdas devidas relaxação da armadura, com todos os carregamentos atuantes
μ_p	Massa linear da cordoalha
A_p	Área de aço total calculada
A_s	Área de aço real
$A_{seção\ simples}$	Área da seção de laje alveolar
$a_{total,0}$	Flecha, considerando tensões de protensão e peso próprio da laje
$a_{total,\infty}$	Flecha total, considerando a atuação do carregamento ao longo do tempo
Ct_c	Preço do concreto por m ³
Ct_p	Preço da cordoalha por Kg
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_p	Módulo de elasticidade do aço
$e_{p, simples}$	Excentricidade dos cabos de protensão na seção simples
f_{cd}	Resistência característica de cálculo do concreto
f_{cj}	Resistência característica do concreto na idade de protensão
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{ctm}	Resistência média a tração do concreto
f_{ptd}	Tensão de cálculo de resistência a tração da cordoalha
f_{ptk}	Tensão característica de resistência a tração da cordoalha
f_{pyd}	Tensão de cálculo para escoamento da cordoalha
f_{pyk}	Tensão característica de escoamento da cordoalha
g_1	Peso próprio da laje alveolar
g_2	Peso próprio da capa estrutural de concreto
g_3	Sobrecarga de revestimento
q	Sobrecarga de utilização

h_{capa}	Altura da capa estrutural de concreto
h_{fic}	Altura fictícia da seção de concreto
$h_{útil}$	Altura útil
$I_{seção\ simples}$	Inercia da seção de laje alveolar
KMD	Fator adimensional para verificação no Estado Limite Último
KX	Fator adimensional para verificação no Estado Limite Último
KZ	Fator adimensional para verificação no Estado Limite Último
L	Comprimento da pista de protensão
l_{bpt}	Comprimento de transferência, distância onde ocorre transferência total da protensão
$I_{seção}$	Largura da seção transversal da laje alveolar
$l_{vão}$	Comprimento da laje
$M_{(g1+g2)}$	Momento fletor devido ao peso próprio da laje e capa de concreto
$M_{(g3+\phi 2xq)}$	Momento fletor devido ao revestimento e carga acidental quase permanente
$M_{(g3+\phi 1xq)}$	Momento fletor devido ao revestimento e carga acidental frequente
M_d	Momento fletor de cálculo
M_{g1}	Momento fletor devido ao peso próprio da laje
M_p	Momento fletor devido a força normal de protensão
n_{alv}	Número de alvéolos da laje
n_{cord}	Número de cordoalhas
N_p	Força normal de protensão
$\emptyset_p$	Diâmetro da cordoalha
$perda_{inicial}$	Perda inicial real nos cabos de protensão
$perda_{final}$	Perda final real nos cabos de protensão
t	Idade de atuação do carregamento, em cada etapa
t_0	Idade de protensão das cordoalhas
t_{∞}	Tempo de atuação do carregamento, com a estrutura em serviço e todos os carregamentos atuando
t_{fic}	Idade fictícia do concreto
U	Umidade relativa do ambiente
V_{Rd1}	Esforço cortante resistente de cálculo
V_{Rd2}	Esforço corte resistente de cálculo das diagonais comprimidas de concreto

V_{sd}	Esforço cortante de cálculo na seção crítica
W_s	Módulo de resistência superior da seção de concreto
W_i	Módulo de resistência inferior da seção de concreto
x	Posição da linha neutra
Y_{cg}	Distância no eixo Y, do centro de gravidade da seção transversal de laje alveolar
Y_s	Distância do centro de gravidade à borda superior da seção
Y_i	Distância do centro de gravidade à borda inferior da seção
ϵ_c	Deformação específica do concreto
ϵ_{cs}	Coeficiente de retração
ϵ_p	Pré-alongamento do aço de protensão
$\epsilon_{p,final}$	Pré-alongamento total da armadura ativa
ϵ_s	Deformação específica do aço
ϵ_{uk}	Alongamento inicial do aço após ruptura
σ_c	Tensão de compressão no concreto
σ_{ELS-D}	Tensão nas bordas superior e inferior da laje, no ELS-Descompressão
σ_{ELS-F}	Tensão nas bordas superior e inferior da laje, no ELS-Formação de Fissuras
$\sigma_{i,ELU}$	Tensão na borda inferior da laje, no ELU
$\sigma_{s,ELU}$	Tensão na borda superior da laje, no ELU
σ_p	Tensão inicial nas cordoalhas
σ_{pd}	Tensão total de cálculo na armadura ativa
σ_{pf}	Tensão final de protensão
σ_{pi}	Tensão inicial de protensão
φ	Coeficiente de fluência
$\varphi(t_0, t_0)$	Coeficiente de fluência do concreto no instante de protensão do aço
φ_2	Fator de redução para carga acidental quase permanente
φ_1	Fator de redução para carga acidental frequente
$\chi(t, t_0)$	Coeficiente de fluência do aço
$\Psi(t, t_0)$	Coeficiente de relaxação dos cabos na idade t, em relação ao tempo t=0
Ψ_{1000}	Coeficiente de relaxação dos cabos após 1000 horas, à temperatura de 20° C

ψ_2	Coeficiente de ponderação de ação variável no Estado Limite de Serviço
γ_c	Peso específico do concreto
γ_g	Coeficiente de ponderação de ações permanentes
γ_q	Coeficiente de ponderação das ações variáveis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO.....	17
1.1.1 <i>Objetivos Específicos</i>	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 PARÂMETROS DE PROJETO	19
2.1.1 <i>Tipo e nível de protensão</i>	20
2.1.2 <i>Geometria da seção</i>	20
2.1.3 <i>Tipo de cordoalha</i>	23
2.2 ETAPAS DO DIMENSIONAMENTO	24
2.2.1 <i>Esforços Solicitantes</i>	24
2.2.2 <i>Pré-dimensionamento</i>	25
2.2.3 <i>Cálculo das perdas de protensão</i>	31
2.2.3.1 <i>Deformação por ancoragem</i>	32
2.2.3.2 <i>Relaxação da armadura</i>	33
2.2.3.3 <i>Deformação imediata do concreto</i>	34
2.2.3.4 <i>Perda inicial real</i>	35
2.2.3.5 <i>Perdas por fluência do concreto</i>	36
2.2.3.6 <i>Perdas por retração do concreto</i>	41
2.2.3.7 <i>Perda final real</i>	42
2.2.4 <i>Dimensionamento</i>	43
2.2.5 <i>Verificações do Estado Limite de Serviço (ELS)</i>	45
2.2.6 <i>Deformação</i>	46
2.2.7 <i>Cisalhamento</i>	48
2.3 ALGORITMO GENÉTICO	50
3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	53
3.1 VARIÁVEIS DO PROBLEMA.....	53
3.2 FUNÇÃO OBJETIVO.....	53
3.3 FUNÇÃO DE RESTRIÇÃO	54
4. METODOLOGIA	58

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
5.1	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL.....	61
5.2	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS.....	68
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
6.1	CONCLUSÕES.....	73
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
7.	REFERÊNCIAS.....	75
8.	ANEXOS	79

RESUMO

A presente pesquisa propõe o aprimoramento do programa inicialmente desenvolvido por Ferro e Alves (2019) para verificações da análise estrutural e dimensionamento da laje alveolar. Com a nova versão do programa, é possível obter o resultado ótimo para peso de aço e volume de concreto, resultando assim na redução de custos com os materiais. O programa se justifica pelas as limitações ocasionadas pelo dimensionamento através de ábacos, e por não haver disponível um *software* iterativo e gratuito para o cálculo das lajes alveolares. Serão apresentados exemplos para validação do programa, e análise dos custos obtidos com a variação do comprimento da laje alveolar.

Palavra-Chave: Lajes, Alveolares, Programa, Otimização.

1. INTRODUÇÃO

O processo de industrialização do Brasil e o desenvolvimento econômico foram os fatores que contribuíram para o processo de industrialização da construção civil. A necessidade por construções mais rápidas, estruturas esbeltas e comprimento livre cada vez maiores, estimularam o uso de pré-moldados de concreto e posteriormente, a instalação de indústrias de estruturas pré-fabricadas.

As estruturas pré-fabricadas de concreto propiciaram velocidade, qualidade e redução de custos com mão de obra na construção civil, e aliada com as técnicas de protensão do aço, tornou-se possível obter estruturas com “pé direito” e vãos maiores.

Segundo Vasconcelos (2002), a primeira obra com utilização em larga escala de elementos pré-moldados no Brasil, foi o hipódromo da Gávea, no Rio de Janeiro, em 1926. Pode-se citar o uso de estacas nas fundações e as cercas no perímetro da área reservada ao hipódromo, sendo eles fabricados em um local reservado no canteiro de obras.

Após consolidadas no Estados Unidos e Europa, iniciou-se a instalação de indústrias de estruturas pré-fabricadas de concreto no Brasil. A partir da década de 1970, com o desenvolvimento de máquinas extrusoras e elementos de moldagem do concreto, houve a popularização do uso de painéis alveolares, podendo ser utilizados como laje ou elemento de vedação.

De acordo com a NBR 9062:2017 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, elementos pré-fabricados são executados industrialmente em instalações permanentes de empresas destinadas a este fim, com rigoroso controle tecnológico, mão de obra especializada e produção com auxílio de máquinas e equipamentos que propiciem qualidade e otimização do processo de fabricação. Elementos pré-moldados são moldados e executados previamente, fora do local de instalação definitiva da estrutura, dispensando instalações próprias para realização de controle tecnológico.

Por serem elementos pré-fabricados de concreto utilizando armadura de protensão, as lajes alveolares possuem diversos benefícios, entre eles estão a redução do peso próprio, devido aos vazios propiciado pelos alvéolos, alcance de vão maiores com espessuras menores de laje e rigoroso controle tecnológico, garantindo qualidade e eficiência aos painéis, além da redução de custo com mão de obra no canteiro. Os pavimentos compostos por lajes alveolares possuem rapidez na execução e montagem por não haver necessidade de forma e escoramento.

A laje alveolar é uma solução para piso em diversos sistemas estruturais como, concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco*, alvenaria estrutural e sistema misto de aço e concreto.

Não há no Brasil muitos estudos referentes aos painéis alveolares de concreto, e a escolha do tipo de painel adequado é realizado através de tabelas e ábacos fornecidos pelos fabricantes, o que não significa que a laje escolhida possui as dimensões e consumo de aço ótimo. Desta forma, as técnicas de otimização vêm para auxiliar na obtenção da solução otimizada para os problemas de engenharia estrutural.

A aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento de elementos estruturais vem crescendo ao longo das últimas décadas como pode ser observado nos trabalhos de Senouci e Al-Ansari(2009), Erdal, Dogan e Saka (2011), Kripka, Medeiros e Lemonge(2015), Lubke, Alves e Azevedo (2017), Alves e Tomaz (2018), Turini *et al.* (2019), Santoro e Kripka (2020), Tormen *et al.* (2020) entre outros.

Porém, conforme apontado por Lippiatt (2007), Camp e Huq (2013), Yepes, Martí e García-Segura (2015), Santoro e Kripka (2020) e Tormen *et al.* (2020) apenas levar em conta a minimização do custo não seria suficiente para determinar a solução ótima para o problema. Estudos de impacto ambiental, levando em consideração o ciclo de vida dos materiais e seus impactos ao meio ambiente passar a ser um fator importante que também deve ser considerado.

Através de análises computacionais é possível obter um dimensionamento ótimo da estrutura, ou seja, redução no consumo de material e custo de fabricação, atendendo as condições estabelecidas pelas normas.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento do programa para solução do problema de otimização para o dimensionamento de lajes alveolares protendidas de concreto. O dimensionamento ótimo em questão é uma extensão do trabalho desenvolvido por Ferro e Alves (2019). O programa foi desenvolvido na plataforma do MATLAB® e a solução do problema de otimização será dada através do Algoritmo Genético disponível na biblioteca do MATLAB®.

1.1.1 Objetivos Específicos

Formular o problema de otimização;

Desenvolver uma interface gráfica iterativa e de fácil manuseio para o usuário;

Apresentar exemplos numéricos de Aplicação de forma a validar a formulação apresentada;

Estudo paramétrico dos resultados obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente o dimensionamento das lajes alveolares se dá através de planilhas ou tabelas pré-definidas pelos fabricantes deste tipo de laje, ficando desta forma, em algumas situações a estrutura superdimensionada.

Devida a eficiência do algoritmo genético e disponibilidade na biblioteca do MATLAB®, há possibilidade de encontrar soluções ótimas para redução do custo de concreto e aço, dentre as formas disponíveis nos catálogos de fabricação de lajes alveolares, obedecendo aos requisitos estabelecidos pelas NBR 6118:2014, NBR 14861:2011 e NBR 9062:2017.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a NBR 14861:2011 (p.2), sejam as lajes alveolares definidas por:

Peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade [...]. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento.

As lajes possuem em sua seção típica os alvéolos, alma de concreto e cordoalhas na borda inferior. Segundo a NBR 14861:2011, a geometria dos alvéolos deve ser definida em projeto, podendo variar de acordo com o equipamento dos fabricantes. A Figura 1 mostra seções de lajes alveolares e geometria dos alvéolos típica.

Fonte: NBR 14861:2011 (Adaptado)

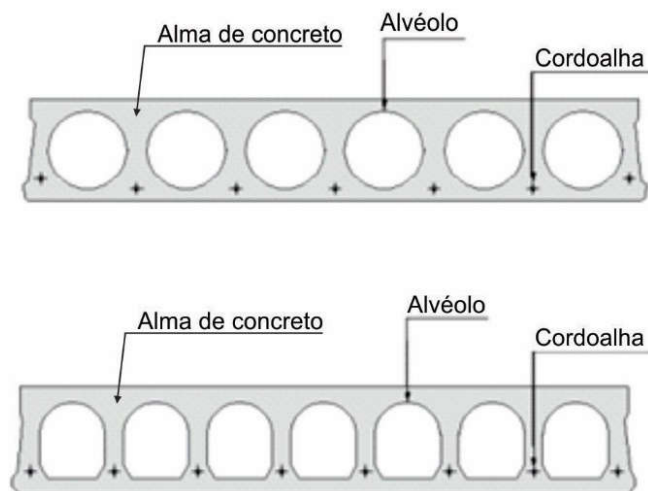


Figura 1. Seção transversal de laje alveolar e geometria dos alvéolos.

Van Acker (2002), apud Ferreira (2003), diz que as lajes alveolares possuem largura nominal de 1200 mm, podendo ter comprimento de até 20 m. A seção transversal possui altura variável entre 15 cm e 50 cm, a depender do catálogo do fabricante. Os recortes nas bordas dos elementos (chavetas de cisalhamento), de acordo com Van Acker (2002), apud Ferreira (2003), garantem a transferência do cisalhamento vertical entre os objetos ligados, através das juntas grauteadas.

O processo de produção pode ser realizado por máquinas extrusoras ou formas deslizantes. Segundo Petrucelli (2009, p.20), o processo de fabricação das lajes alveolares é contínuo, podendo definir o sistema de produção como um processo linear. A concretagem é realizada em pistas de protensão, podendo ter até 180 metros de comprimento. O comprimento das peças é definido em projeto, sendo eles marcados na pista de protensão, e após o processo de cura do concreto é realizado o corte da peça. Após o processo de montagem do piso e grauteamento das chavetas de cisalhamento, é necessário a adição de uma capa estrutural de concreto composta por tela de aço soldada, para posterior paginação do piso. A capa pode contribuir no ganho de resistência ao cisalhamento, sendo recomendado pela NBR 9062:2017 espessura mínima nominal de 5 cm.

2.1 PARÂMETROS DE PROJETO

Os parâmetros de projetos estão diretamente relacionados com o processo de fabricação da estrutura, sendo eles:

- Tipo e nível de protensão;
- Tipo de cordoalha;
- Fases de atuação do carregamento;
- Altura da laje;
- Altura da capa;
- Comprimento da laje;
- Comprimento da pista de protensão;
- Classe de Agressividade Ambiental;
- Tipo de cimento;
- Abatimento do concreto (*Slump*);
- Umidade do ambiente;
- Temperatura do ambiente;
- Resistência a compressão do concreto aos 28 dias de idade;

- Resistência a compressão do concreto na idade de protensão;
- Idade de protensão.

2.1.1 Tipo e nível de protensão

No processo de fabricação das lajes alveolares, a protensão aplicada é do tipo pré-tração, com aderência inicial, que segundo a NBR 6118:2014:

Concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto; a ancoragem no concreto realiza-se somente por aderência.

O nível de protensão é definido de acordo com o tipo de protensão e a Classe de Agressividade Ambiental (CAA), sendo CAA I – fraca, CAA II – moderada, CAA III – forte e CAA IV – muito forte. Para a armadura ativa pré-tracionada, o Quadro 1 mostra os níveis de protensão para cada CAA.

Quadro 1. Níveis de protensão de armadura ativa pré-tracionada.

Tipo de Protensão	CAA	Nível de Protensão
Pré -tração	I	PARCIAL
	II	LIMITADA
	III	COMPLETA
	IV	

Fonte: NBR 6118:2014 (Adaptado)

Neste trabalho, o dimensionamento da estrutura é realizado para o concreto protendido de nível 2 (protensão limitada), pois é considerada Classe de Agressividade Ambiental moderada (CAA II).

2.1.2 Geometria da seção

Para o estudo em questão, são utilizadas lajes alveolares com alturas entre 15 e 50 cm. As propriedades geométricas da seção transversal, são obtidas com auxílio do software AutoCad®, a partir dos desenhos de fabricação fornecido por um fabricante local (Figura 2 a Figura 7).

LA15

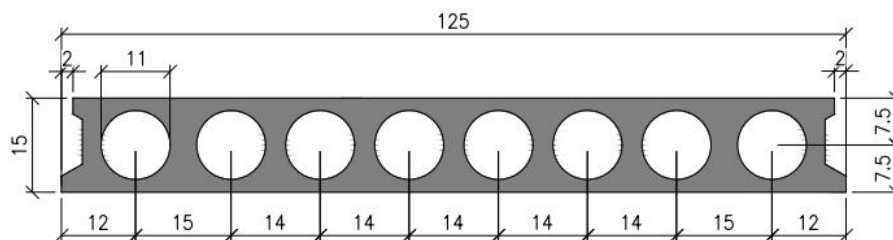


Figura 2. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 15 cm.

LA20

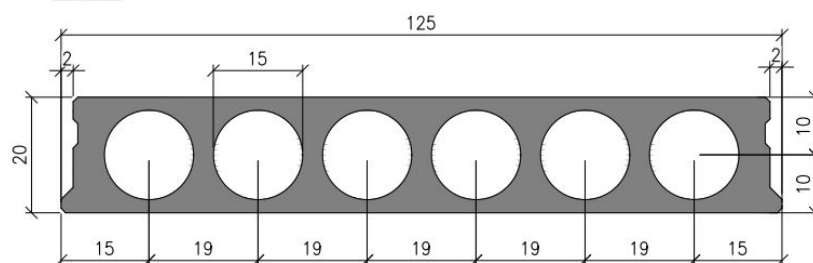


Figura 3. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 20 cm.

LA26.5

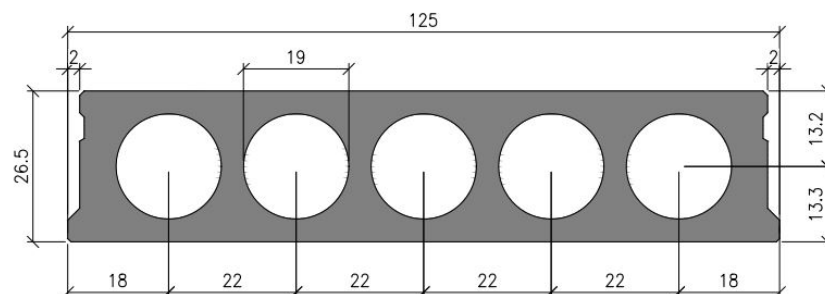


Figura 4. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 26,5 cm.

LA32

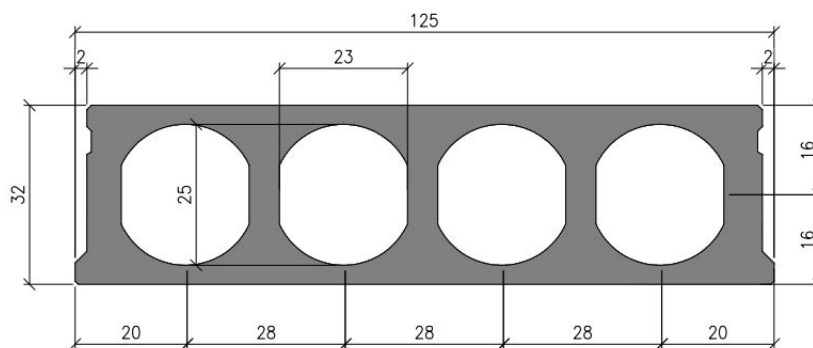


Figura 5. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 32 cm.

LA40

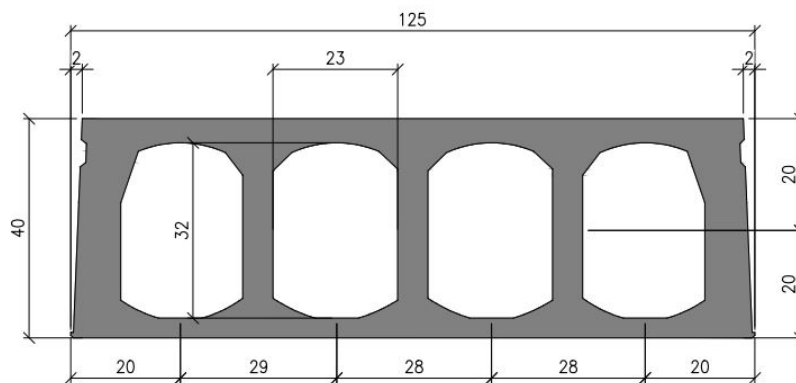


Figura 6. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 40 cm.

LA50

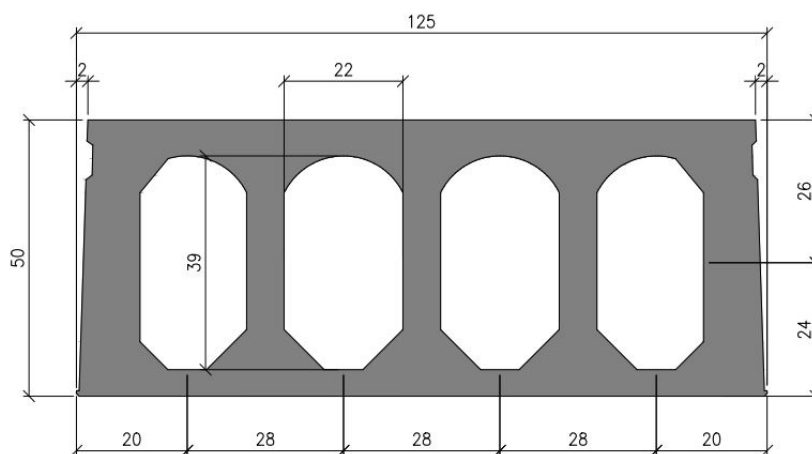


Figura 7. Seção transversal de Laje Alveolar com altura de 50 cm.

A Tabela 1 mostra as propriedades geométricas obtidas para cada forma de laje alveolar fornecida pelo fabricante.

Tabela 1. Propriedades geométricas de seção transversal de laje alveolar.

Propriedades Geométricas Seção de Laje Alveolar					
Altura [cm]	Largura [cm]	Área [cm ²]	Inércia [cm ⁴]	Y _{CG} [cm]	Nº de Alvéolos
15	125	1.047,94	28.682,00	7,42	8
20		1.289,77	64.257,71	9,89	6
26,5		1.869,23	160.444,82	13,10	5
32		1.948,93	253.958,23	15,82	4
40		2.237,46	452.270,20	20,55	4
50		3.298,00	979.515,61	25,36	4

Fonte: Cassol Pré-Fabricados Ltda (Adaptado).

2.1.3 Tipo de cordoalha

Para a protensão do tipo pré-tração, são utilizadas cordoalhas “nuas”, com relaxação baixa. Segundo Carvalho (2012), os aços com relaxação baixa, em seu processo de fabricação, recebem um alongamento com temperatura controlada permitindo uma menor perda devido a relaxação da armadura.

Segundo o catálogo fornecido pelo fabricante, o alongamento inicial do aço após ruptura, para cordoalhas de 3 e 7 fios, é de 3,5%, ou seja, perda máxima por relaxação da armadura após 1000 horas a 20°C. A Tabela 2 apresenta as especificações para cordoalhas de 7 fios.

Tabela 2. Especificações cordoalhas de 7 fios

Cordoalha 7 fios - CP190 RB				
Diâmetro nominal [mm]	Área aprox. [mm²]	Massa Aprox. [kg/m]	Custo [R\$/kg]	Resistência a tração [MPa]
9,5	56	0,441	9,31	1863,9
12,7	101	0,792	8,84	
15,2	143	1,126	8,84	
15,7	150	1,172	9,46	
Cordoalha 7 fios - CP210 RB				
12,7	101	0,792	9,98	2060,1
15,2	143	1,126	9,98	

Fonte: Catálogo Belgo Bekaert Arames.

A Figura 8 mostra a representação esquemática do diâmetro nominal para cordoalhas de 3 e 7 fios.

Fonte: Catálogo Belgo Bekaert Arames.

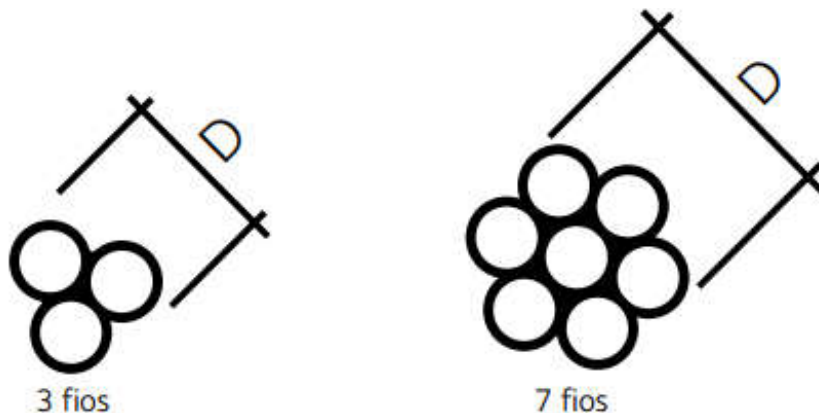


Figura 8. Diâmetro nominal (D) em cordoalhas de 3 e 7 fios.

2.2 ETAPAS DO DIMENSIONAMENTO

Para o presente trabalho, o roteiro de dimensionamento utilizado para as lajes alveolares é o proposto por Petrucelli (2009), considerando a estrutura biapoiada e com carregamento distribuído. Não são considerados os efeitos da continuidade nos apoios e os demais elementos de ligação. A Figura 9 mostra o esquema de descontinuidade nos apoios.

Fonte: A autora.

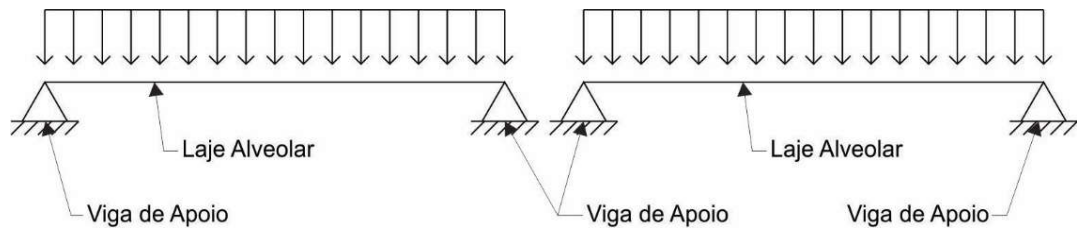


Figura 9. Esquema de descontinuidade nos apoios.

2.2.1 Esforços Solicitantes

Os esforços solicitantes obtidos são devido ao peso próprio da laje (g_1), capa de concreto (g_2), revestimento (g_3) e sobrecarga de utilização (q). Os valores g_1 e g_2 podem ser obtidos pelas equações 1 e 2, respectivamente.

$$g_1 = A_{seção\ simples} \times \gamma_c \quad (1)$$

$$g_2 = h_{capa} \times l_{seção} \times \gamma_c \quad (2)$$

Onde:

g_1 = peso próprio da laje;

g_2 = peso próprio da capa estrutural de concreto;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

h_{capa} = altura da capa de concreto;

$l_{seção}$ = largura da laje;

γ_c = peso específico do concreto, adotando 25 kN/m³.

2.2.2 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento da estrutura é realizado no Estado Limite Último (ELU), no tempo $t=t_{\infty}$, ou seja, a laje e a capa estão solidarizadas, sendo a estrutura considerada composta. São realizadas verificações considerando perda de protensão estimada de 25%. Dessa forma obtém-se a área de aço estimada da seção.

Os esforços solicitantes obtidos são majorados, de acordo com a equação 3.

$$F_d = \gamma_g \times F_g + \gamma_q \times F_q \quad (3)$$

Onde:

F_d = esforço solicitante de cálculo;

F_g = somatório das ações permanentes “g”;

F_q = somatório das ações variáveis “q”;

γ_g = coeficiente de ponderação de ação permanentes, sendo 1,3 para ações normais.

γ_q = coeficiente de ponderação de ação variáveis, sendo 1,4 para ações normais.

O cálculo da armadura longitudinal da laje alveolar é realizado para elemento estrutural sob flexão normal, sendo consideradas as hipóteses básicas para cálculo de seções no ELU submetidas a tensões normais, definidas pela NBR 6118:2014. As principais hipóteses consideradas são:

- A seção transversal de concreto permanece plana após as deformações;
- O acréscimo de deformação para armadura ativa aderente é igual à deformação do concreto em seu entorno;
- Devem ser desprezadas as tensões de tração da seção transversal de concreto;
- A distribuição de tensões na seção de concreto é feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo (Figura 10).

Carvalho (2012) define os fatores adimensionais KMD , KX e KZ para determinar a posição da linha neutra. Para o dimensionamento, é necessário que a linha neutra esteja na capa de concreto. A Figura 10 mostra o esquema de distribuição de tensões na seção de concreto e a posição da linha neutra, sendo x , a posição da linha neutra e σ_c , a tensão do concreto.

Fonte: NBR 6118:2014 (Adaptado).

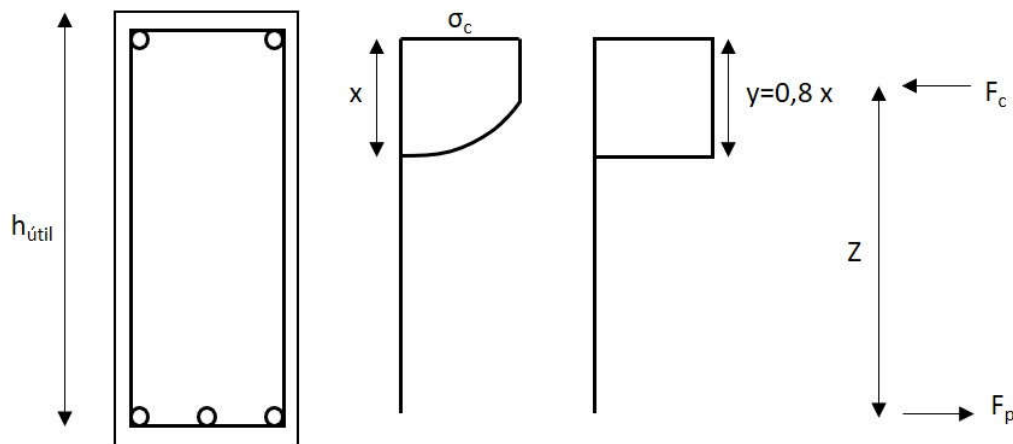


Figura 10. Distribuição de tensões na seção transversal genérica de concreto, de acordo com o diagrama parábola-retângulo.

Os fatores KMD e KX são obtidos a partir do equilíbrio de esforços na seção transversal de concreto. Pode-se encontrar o valor de KMD a partir da equação 4.

$$KMD = \frac{M_d}{l_{\text{seção}} \times h_{\text{útil}}^2 \times f_{cd}} \quad (4)$$

Onde:

KMD = fator adimensional;

M_d = momento de cálculo;

$l_{\text{seção}}$ = largura da seção transversal;

$h_{\text{útil}}$ = altura útil;

f_{cd} = resistência característica de cálculo do concreto da capa estrutural, aos 28 dias de idade.

Se obtém o fator adimensional KX a partir do valor de KMD , assim como mostra a equação 5. Como $x \leq h_{\text{útil}}$, deve-se obedecer ao limite $0 \leq KX \leq 1$.

$$KMD = 0,68 \times KX - 0,272 \times KX^2 \quad (5)$$

Obtido KX , a posição da linha neutra é definida pela equação 6:

$$x = KX \times h_{\text{útil}} \quad (6)$$

O fator KZ é obtido pela razão entre o braço de alavanca e a altura útil da seção.

A partir da Figura 10, pode-se obter as equações 7 e 8:

$$Z = h_{\text{útil}} - 0,4x \quad (7)$$

$$KZ = \frac{Z}{h_{\text{útil}}} \quad (8)$$

Onde:

Z = “braço de alavanca” dos esforços de tração e compressão;

$h_{\text{útil}}$ = altura útil;

x = posição da linha neutra;

KZ = fator adimensional;

KX = fator adimensional.

Manipulando as equações 6, 7 e 8, pode -se obter a relação entre KZ e KX , como apresentado na equação 9.

$$KZ = 1 - 0,4 \times KX \quad (9)$$

Encontrada a posição da linha neutra, obtém-se o valor da deformação específica do aço de protensão, definida pelo domínio em que a estrutura atinge o ELU. Segundo Carvalho (2012), para flexão simples, os domínios de deformação possíveis estão entre 2 e 4. A deformação específica do aço (ε_s) é obtida pela equação 10.

$$KX = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad (10)$$

Onde:

ε_s = deformação específica do aço;

ε_c = deformação específica do concreto.

De acordo com a NBR 6118:2014, durante o domínio 2, tem-se $\varepsilon_s=0,10\%$. Nesta região há o rompimento da seção devido ao escoamento do aço e não há ruptura à compressão do concreto.

Entretanto, em todo o domínio 3 e 4 o colapso da estrutura acontece devido a ruptura por compressão do concreto e escoamento do aço. É considerada deformação específica do concreto ($\varepsilon_c = 0,35\%$)

Os piores casos para os limites de deformação estão no início do domínio 2, para $\varepsilon_c = 0$, e no final do domínio 4, para $\varepsilon_s = 0$. Definido o domínio de deformação da estrutura, calcula-se o pré-alongamento da armadura ativa.

As lajes alveolares protendidas são dimensionadas à pré-tração com aderência inicial. O aço de protensão utilizado é do tipo cordoalha nua com relaxação baixa. Segundo a NBR 6118:2014, o tipo de protensão denominado pré-tração com aderência inicial, é o estado em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito com apoios independentes, ou seja, primeiro é realizado o esticamento do aço, e posteriormente é lançado o concreto. A ancoragem do aço é realizada por simples aderência ao concreto.

De acordo com a NBR 6118:2014, na operação de protensão, a tensão inicial da armadura ativa na saída do aparelho de tração deve obedecer aos limites $\sigma_p \leq \begin{pmatrix} 0,77 \times f_{ptk} \\ 0,85 \times f_{pyk} \end{pmatrix}$, para o caso de pré-tração. Estima-se perdas de 25% para o cálculo de tensão final nos cabos, sendo obtida pela equação 11.

$$\sigma_{pf} = \sigma_p \times \left(\frac{100 - \%perdas_{final}}{100} \right) \quad (11)$$

Onde:

σ_{pf} = tensão de protensão final, considerando as perdas;

σ_p = tensão de inicial nos cabos de protensão;

f_{ptk} = tensão característica de resistência a tração da cordoalha, obtido da Tabela 2;

f_{pyk} = tensão de escoamento da cordoalha, sendo 90% da resistência a tração.

O pré-alongamento da armadura ativa, devido as tensões de protensão é obtido pela equação 12.

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{pf}}{E_p} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

ε_p = pré-alongamento no aço de protensão;

σ_{pf} = tensão de protensão final, considerando as perdas;

E_p = módulo de elasticidade do aço, considerando 200 GPa.

A equação (13) define o pré-alongamento total do aço de protensão.

$$\varepsilon_{p,final} = \varepsilon_p + \varepsilon_s \quad (13)$$

$\varepsilon_{p,final}$ = pré-alongamento total da armadura ativa;

ε_p = pré-alongamento no aço de protensão;

ε_s = deformação específica do aço;

Carvalho (2012) deduz que, para o diagrama de Tensão x Deformação do aço de protensão, apresentado na Figura 11, a tensão na armadura ativa pode ser calculada por meio das equações 14 e 15.

Fonte: NBR 6118:2014

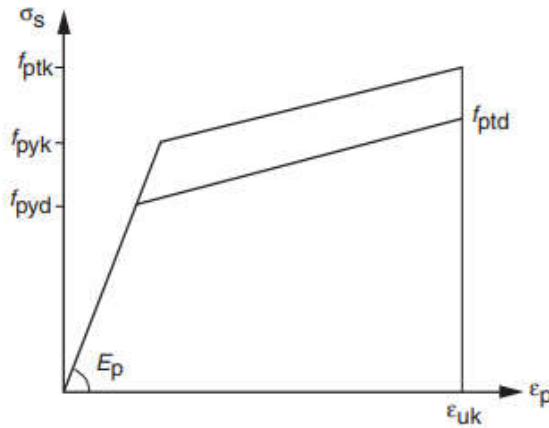


Figura 11. Diagrama de Tensão x Deformação para aço de protensão.

$$\varepsilon_p < \frac{f_{pyd}}{E_p} \rightarrow \sigma_{pd} = E_p \times \varepsilon_p \quad (14)$$

$$\varepsilon_p \geq \frac{f_{pyd}}{E_p} \rightarrow \sigma_{pd} = f_{pyd} + \frac{(\varepsilon_{p,final} - \varepsilon_{yd}) \times (f_{ptd} - f_{pyd})}{(\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{yd})} \quad (15)$$

Onde:

σ_{pd} = tensão na armadura ativa;

E_p = módulo de elasticidade do aço, considerando 200 GPa;

ε_p = pré-alongamento no aço de protensão;

f_{pyk} = tensão de escoamento da cordoalha;

$$f_{pyd} = f_{pyk} / 1,15$$

f_{ptk} = tensão característica de resistência a tração da cordoalha;

$$f_{ptd} = f_{ptk} / 1,15$$

$\varepsilon_{p,final}$ = pré-alongamento total da armadura ativa;

$$\varepsilon_{yd} = f_{pyd} / E_p$$

ε_{uk} = Alongamento inicial do aço após ruptura, sendo 3,5% para cordoalhas de 7 fios.

A área total de aço necessária, dado os carregamento e condições estabelecidos, é obtida pela equação (16), utilizando o momento máximo solicitante de cálculo, o fator adimensional KZ , a altura útil da seção e a tensão na armadura ativa devido ao pré-alongamento e a tensão na armadura de protensão.

$$A_p = \frac{M_d}{KZ \times h_{\text{útil}} \times \sigma_{pd}} \quad (16)$$

Onde:

A_p = área de aço calculada;

M_d = momento de cálculo;

KZ = fator adimensional;

$h_{\text{útil}}$ = altura útil;

σ_{pd} = tensão na armadura ativa.

2.2.3 Cálculo das perdas de protensão

As perdas são calculadas a partir da área de aço obtida no pré-dimensionamento. São obtidas as perdas iniciais no ato de protensão e as perdas diferidas (ao longo do tempo).

As perdas iniciais são obtidas por: deformação por ancoragem, relaxação imediata da armadura e perdas por deformação imediata do concreto. As perdas diferidas são obtidas através de: perdas por fluência e retração do concreto, perdas por relaxação progressiva da armadura. As perdas totais são obtidas através da simultaneidade das perdas iniciais e diferidas.

Para cálculo das perdas diferidas, é necessário definir as fases de atuação dos carregamentos. Segundo Petrucelli (2009), é preciso definir como será o processo de fabricação e montagem, para fazer as considerações sobre o tempo de atuação dos carregamentos, a área de concreto e o perímetro da peça em contato com o ar. O Quadro 2 mostra as fases de atuação dos carregamentos, área da seção a ser considerada e perímetro em contato com o ar. Para seção composta considera-se a atuação da laje junto com capa de concreto.

Na fase 1, ocorrem as perdas imediatas. O concreto não está endurecido e ocorre a protensão do aço. A idade de protensão pode variar de acordo com o estabelecido em projeto.

Na fase 2 iniciam-se as perdas diferidas. Nesta fase a seção inteira da laje está em contato com o ar. Para cálculo da seção colaborante, considera-se a contribuição parcial da capa de concreto.

Na fase 3, consideram-se preenchidas as chavetas de cisalhamento e as laterais da laje não estão em contato com o ar. Os alvéolos estão parcialmente saturados e metade dos alvéolos estão em contato com o ar.

Na fase 4, a capa de concreto já está curada e a mesa superior não está mais em contato com o ar.

Na fase 5, já houve a finalização do processo de montagem e apenas a mesa inferior está em contato com o ar.

Quadro 2.Fases de atuação dos carregamentos, área da seção de concreto e perímetro em contato com o ar.

Fase	Tempo após a concretagem	Carregamento	Área seção	Perímetro
1	20 horas (idade de protensão)	N_p+g_1	-	-
2	15 dias	$N_p+g_1+g_2$	Média seção simples e composta	Seção Simples
3	45 dias	$N_p+g_1+g_2+g_3$	Composta	Largura inferior +Largura superior+ Metade do perímetro dos alvéolos
4	60 dias	$N_p+g_1+g_2+g_3+\Psi_2q$	Composta	Largura inferior + Metade do perímetro dos alvéolos
5	∞	$N_p+g_1+g_2+g_3+\Psi_2q$	Composta	Largura inferior

Fonte: Petrucelli (2009).

2.2.3.1 Deformação por ancoragem

As perdas de deformação por ancoragem, ocorrem com a liberação do aço, após a protensão. A deformação do aço obedece a Lei de Hooke, e pode ser obtida pela equação 17.

$$\Delta_{\sigma, ancoragem} = \frac{\Delta_l \times E_p}{L} \quad (17)$$

Onde:

$\Delta_{\sigma, ancoragem}$ = perdas de deformação por ancoragem;

E_p = módulo de elasticidade do aço, considerando 200 GPa;

Δ_l = encurtamento total do cabo durante a ancoragem;

L = comprimento da pista de protensão.

O encurtamento total do cabo durante a ancoragem, em geral é fornecido pelo fabricante dos equipamentos de ancoragem, sendo um valor em torno de 6 mm. Segundo a NBR 14861:2011, caso o valor não seja fornecido, o escorregamento da cordoalha pode ser obtido através da equação 18.

$$\Delta_l = 0,4 \times l_{pt2} \times \frac{\sigma_{pi}}{E_p} \quad (18)$$

Onde:

l_{pt2} = comprimento de transmissão de tensão nas extremidades da laje, fixados em 85Φ ;

σ_{pi} = tensão inicial de protensão, considerando perdas iniciais estimadas dada pela equação 19.

$$\sigma_{pi} = \sigma_p \times \left(\frac{100 - \%perdas_{inicial,est}}{100} \right) \quad (19)$$

E_p = módulo de elasticidade do aço, considerando 200 GPa.

2.2.3.2 Relaxação da armadura

Após o processo de ancoragem há perda da tensão inicial do aço, sendo a perda por relaxação diretamente proporcional a idade de protensão do aço.

De acordo com a NBR 6118:2014, a intensidade de relaxação do aço deve ser determinada por $\Psi(t, t_0)$, sendo o coeficiente de relaxação dos cabos na idade t , em relação ao tempo $t=0$ definido pela equação 20.

$$\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \times \frac{t - t_0^{0,15}}{41,67} \quad (20)$$

O coeficiente Ψ_{1000} , segundo a NBR 6118:2014, para efeito de cálculo pode ser obtido por interpolação linear da Tabela 3, sendo o valor de relaxação médio do aço de protensão, medidos após 1000 horas, à temperatura de 20 °C. Os dados experimentais são obtidos para tensão inicial entre $0,5f_{ptk}$ e $0,8f_{ptk}$.

Tabela 3. Valores de cálculo de Ψ_{1000} .

σ_{pr}	ψ_{1000} [%]
$0,5 f_{ptk}$	0,00
$0,6 f_{ptk}$	1,30
$0,7 f_{ptk}$	2,50
$0,8 f_{ptk}$	3,50

Fonte: NBR 6118:2014 (Adaptado).

O valor de $\sigma_{pr'}$, já considerando as perdas por ancoragem, é obtido pela equação 21.

$$\sigma_{pr'} = \sigma_p - \Delta_{\sigma, ancoragem} \quad (21)$$

Onde:

$\Delta_{\sigma, ancoragem}$ = perdas deformação por ancoragem;

σ_p = tensão de inicial nos cabos de protensão;

Podem ser desprezadas as perdas por relaxação da armadura se $\sigma_{pi} < 0,5 f_{ptk}$. Para o tempo $t=\infty$, o coeficiente de relaxação dos cabos é aproximado pela equação 22.

$$\psi(t, t_0) = 2,5 \times \psi_{1000} \quad (22)$$

O valor da perda de tensão é obtido pela equação 23.

$$\Delta_{\sigma, relaxação}(t, t_0) = \psi(t, t_0) \times \sigma_{pr'} \quad (23)$$

Onde:

$\Delta_{\sigma, relaxação}$ = perdas por relaxação da armadura;

$\psi(t, t_0)$ = coeficiente de relaxação dos cabos na idade t.

2.2.3.3 Deformação imediata do concreto

Considerando que haja deformação elástica na seção de concreto, devido ao encurtamento da seção ocorrem perdas de tensão no cabo de protensão. A tensão na seção de concreto devido ao peso próprio e a força de protensão é dada pela equação 24, com tensão no centro de gravidade dos cabos.

$$\sigma_{c, p0+g} = \frac{N_p}{A_{seção\ simples}} + \frac{M_p - M_{g1}}{I_{seção\ simples}} \times e_{p, simples} \quad (24)$$

Onde:

$\sigma_{c, p0+g}$ = tensão no centro de gravidade dos cabos;

N_p = força normal de protensão, considerando as perdas por ancoragem e relaxação da armadura;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

M_p = momento fletor devido a força normal de protensão;

M_{g1} = momento fletor devido ao peso próprio da laje;

$I_{seção\ simples}$ = Inercia da seção de laje alveolar;

$e_{p, simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples.

Devida a acomodação dos materiais, a deformações específica do aço está relacionada com a deformação do concreto pelo coeficiente α_p dada pela equação 25.

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{ci}} \quad (25)$$

Onde:

α_p = coeficiente que relaciona as deformações específicas do aço e do concreto;

E_p = módulo de elasticidade do aço;

E_{ci} = módulo de elasticidade do concreto, para o valor de f_{cj} .

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{cj}}, \text{ para } 20MPa \leq f_{cj} \leq 50MPa;$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{cj}}{10} + 1,25\right)^{1/3}, \text{ para } 55MPa \leq f_{cj} \leq 90MPa$$

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

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

$$\alpha_E = 0,9 \text{ para calcário};$$

$$\alpha_E = 0,7 \text{ para arenito}.$$

A variação de tensão devida à deformação imediata do concreto é obtida pela equação 26.

$$\Delta_{\sigma, def} = \alpha_p \times \sigma_{c, p0+g} \quad (26)$$

2.2.3.4 Perda inicial real

A perda inicial é obtida pela razão entre a soma das perdas iniciais pela tensão inicial na armadura ativa, dada pela equação 27.

$$\%perda_{inicial} = \frac{\Delta_{\sigma, ancoragem} + \Delta_{\sigma, relaxação} + \Delta_{\sigma, def}}{\sigma_p} \times 100 \quad (27)$$

Onde:

σ_p = tensão de inicial nos cabos de protensão;

$\Delta\sigma_{ancoragem}$ = perdas deformação por ancoragem;

$\Delta\sigma_{relaxação}$ = perdas por relaxação da armadura;

$\Delta\sigma_{def}$ = perdas por deformação imediata do concreto.

2.2.3.5 Perdas por fluência do concreto

As perdas por fluência ocorrem devido a aplicação constante de um carregamento na estrutura ao longo do tempo, provocando deformações parcialmente reversíveis. Segundo Bortone (2013), após a aplicação do carregamento, uma parte das tensões é absorvida pela água microscópica presente no concreto e outra pelo esqueleto sólido. Após longo período de atuação das ações, as tensões absorvidas pela água são transferidas gradualmente para o sólido, aumentando as deformações na estrutura.

De acordo com a NBR 6118:2014, a deformação por fluência ocorre em duas etapas, uma rápida e uma lenta. A fluência rápida, é considerada irreversível e ocorre nas primeiras 24h de atuação do carregamento.

Na etapa lenta de deformação, há ainda a deformação lenta reversível e a deformação lenta irreversível. O processo de deformação lenta reversível ocorre apenas em função do tempo de duração e intensidade do carregamento. A deformação irreversível ocorre em função da idade do concreto, do valor do abatimento do concreto no ensaio de tronco de cone, da espessura da peça e da umidade relativa do ambiente.

Para obtenção dos coeficientes de fluência, é considerada a idade fictícia do concreto. Quando o endurecimento do concreto é realizado à temperatura ambiente, e não há cura a vapor, pode-se usar a equação 28.

$$t_{fic} = \alpha \sum_{n=1}^5 \frac{T + 10}{30} \times t_n \quad (28)$$

Onde:

t_{fic} = idade fictícia do concreto, em dias;

α = coeficiente que depende da velocidade de endurecimento do cimento (Tabela 4);

T = temperatura média diária do ambiente, em °C;

t_n = idade real do concreto nas fases de atuação do carregamento, em dias;

De acordo com a NBR 6118:2014, o tipo de cimento utilizado define os coeficientes s e α . Na falta de resultados experimentais, os valores da Tabela 4 podem ser utilizados.

Tabela 4. Fatores s e α relacionados ao endurecimento do cimento.

Cimento Portland (CP)	s	α	
		fluência	retração
CP I	0,25	2	
CP II	0,25	2	
CP III	0,38	1	1
CP IV	0,38	1	
CP V - ARI	0,2	3	

Legenda:

CP I e CP I-S - Cimento Portland Comum

CP II-E, CP II-F e CP II-Z - Cimento Portland composto

CP III - Cimento Portland de alto forno

CP IV - Cimento Portland pozolânico

CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial

Fonte: NBR 6118:2014.

Os coeficientes de fluência para as etapas de carregamento definidas no Quadro 2, são definidos pela equação 29.

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_f(t) \times [\beta_f(t_\infty) - \beta_f(t)] + \varphi_d \times \beta_d(t) \quad (29)$$

Onde:

φ = coeficiente de fluência;

φ_a = coeficiente de fluência rápida;

φ_f = coeficiente de deformação lenta irreversível;

φ_d = coeficiente de deformação lenta reversível, fixado em 0,4;

β_f = coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, de acordo com a idade e altura fictícia da peça;

β_d = coeficiente relativo à deformação lenta reversível em função da idade fictícia ($t-t_0$), de acordo com as fases de atuação do carregamento;

O coeficiente de fluência rápida (φ_a) é obtido pelas equações 30 e 31.

$$\varphi_a = 0,8 \times \left[1 - \frac{\beta_1(t)}{\beta_1(t_\infty)} \right], \text{ para concretos entre C20 e C45;} \quad (30)$$

$$\varphi_a = 1,4 \times \left[1 - \frac{\beta_1(t)}{\beta_1(t_\infty)} \right], \text{ para concretos entre C50 e C90;} \quad (31)$$

Onde:

$$\beta_1(t) = \exp \left\{ s \times \left[1 - \left(28/t \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (32)$$

s =fator para determinação de β_1 , dependente do tipo de cimento do concreto (Tabela 4);

β_1 = relação $f_{ck,j}/f_{ck}$, na idade t do concreto, de acordo com as fases de atuação dos carregamentos.

O coeficiente de deformação lenta irreversível (φ_f), é obtido pelas equações 33 e 34.

$$\varphi_f(t) = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c}, \text{ para concretos entre C20 e C45;} \quad (33)$$

$$\varphi_f(t) = 0,45 \times \varphi_{1c} \times \varphi_{2c}, \text{ para concretos entre C50 e C90;} \quad (34)$$

Onde:

φ_{1c} = coeficiente que depende da umidade (U%) e do “*slump*” do concreto;

φ_{2c} = coeficiente que depende espessura fictícia da laje;

Os coeficientes φ_{1c} , φ_{2c} e a altura fictícia da peça (h_{fic}), são obtidos pelas equações 35 a 40.

$$\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035 \times U, \text{ para } 5 \leq \text{slump} \leq 9 \text{ e } U \leq 90\% \quad (35)$$

$$\varphi_{1c} = 0,75 \times (4,45 - 0,035 \times U), \text{ para } \text{slump} < 5 \quad (36)$$

$$\varphi_{1c} = 1,25 \times (4,45 - 0,035 \times U), \text{ para } \text{slump} > 9 \quad (37)$$

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad (38)$$

$$h_{fic}(t) = \gamma \frac{2 \times A_c(t)}{u_{ar}(t)} \quad (39)$$

$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1 \times U) \quad (40)$$

γ = coeficiente que depende da umidade relativa do ambiente (U %);

A_c = área da seção transversal da peça, de acordo com as fases de atuação do carregamento;

u_{ar} = perímetro da seção em contato com o ar, de acordo com as fases de atuação do carregamento;

Os coeficientes β_d e β_f são obtidos das equações 41 a 46.

$$\beta_d(t) = \frac{t_{fic,n} - t_{fic,0} + 20}{t_{fic,n} - t_{fic,0} + 70} \quad (41)$$

$$\beta_f(t) = \frac{t_{fic}^2 + A \times t_{fic} + B}{t_{fic}^2 + C \times t_{fic} + D} \quad (42)$$

$$A = 42 \times h_{fic}^3 - 350 \times h_{fic}^2 + 588 \times h_{fic} + 113 \quad (43)$$

$$B = 768 \times h_{fic}^3 - 3060 \times h_{fic}^2 + 3234 \times h_{fic} - 23 \quad (44)$$

$$C = -200 \times h_{fic}^3 + 13 \times h_{fic}^2 + 1090 \times h_{fic} + 183 \quad (45)$$

$$D = 7579 \times h_{fic}^3 - 31916 \times h_{fic}^2 + 35343 \times h_{fic} + 1931 \quad (46)$$

A variação de tensão devida à deformação por fluência é calculada pela equação 47. O momento fletor e as propriedades geométricas da seção, devem ser obtidas para cada fase de atuação do carregamento na estrutura.

$$\Delta\sigma_{p,fc} = \alpha_p \times \left[\frac{N_{p,f}}{A_{seção\ simples}} + \frac{M_{p,f} - M_{g1}}{I_{seção\ simples}} \times e_{p,simples} \times \varphi_1 \right. \quad (47)$$

$$\left. - \sum_{i=2}^3 \frac{M_{gi} \times e_p}{Inercia} \times \varphi_i - \psi_2 \frac{M_q \times e_p}{Inercia} \times \varphi_q \right]$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{c28}} \quad (48)$$

Onde:

α_p = coeficiente que relaciona as deformações específicas do aço e do concreto;

E_p = módulo de elasticidade do aço;

E_{c28} = módulo de elasticidade do concreto, para o valor de f_{ck} da laje;

$$E_{c28} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } 20MPa \leq f_{ck} \leq 50MPa;$$

$$E_{c28} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } 55MPa \leq f_{ck} \leq 90MPa;$$

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

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

$$\alpha_E = 0,9 \text{ para calcário};$$

$$\alpha_E = 0,7 \text{ para arenito}.$$

$N_{p,f}$ = força normal de protensão, considerando as perdas iniciais reais obtidas em 2.2.3.4;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

$M_{p,f}$ = momento fletor devido a força normal de protensão;

M_{g1} = momento fletor devido ao peso próprio da laje;

$I_{seção\ simples}$ = Inercia da seção de laje alveolar;

$e_{p,simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples.

φ = coeficiente de fluência;

Ψ_2 = coeficiente de ponderação de ação variável no ELS.

2.2.3.6 Perdas por retração do concreto

A deformação causada por retração do concreto, ocorre devido a variação volumétrica da estrutura, pela perda de água presente no concreto. Segundo Bortone (2013), a retração ocorre a partir do instante em que a água presente no concreto é consumida pelas reações químicas presente, porém para determinação das perdas é considerada apenas o período que ocorre depois da protensão. O valor da deformação resultante no concreto, depende da umidade relativa do ar (U%), do “slump” e da espessura fictícia da peça.

O coeficiente de retração é obtido pela equação (49).

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s} \quad (49)$$

Onde:

ε_{cs} = coeficiente de retração;

ε_{1s} e ε_{2s} são dados pelas equações 50 a 57.

$$\varepsilon_{1s} = -8,09 + \left(\frac{U}{15}\right) - \left(\frac{U^2}{2284}\right) + \left(\frac{U^3}{133765}\right) - \left(\frac{U^4}{7608150}\right), \text{ para } 5 \leq \text{slump} \leq 9 \text{ e } 40\% \leq U \leq 90\%; \quad (50)$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{32 + 2 \times h_{fic}}{20,8 + 3 \times h_{fic}} \quad (51)$$

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t_{fic}^3}{100}\right) + A' \times \left(\frac{t_{fic}^2}{100}\right) + B' \left(\frac{t_{fic}}{100}\right)}{\left(\frac{t_{fic}^3}{100}\right) + C' \times \left(\frac{t_{fic}^2}{100}\right) + D' \left(\frac{t_{fic}}{100}\right) + E} \quad (52)$$

$$A' = 40 \quad (53)$$

$$B' = 116 \times h_{fic}^3 - 282 \times h_{fic}^2 + 220 \times h_{fic} - 4,8 \quad (54)$$

$$C' = 2,5 \times h_{fic}^3 - 8,8 \times h_{fic} + 40,7 \quad (55)$$

$$D' = -75 \times h_{fic}^3 + 585 \times h_{fic}^2 + 496 \times h_{fic} - 6,8 \quad (56)$$

$$E = -169 \times h_{fic}^4 + 88 \times h_{fic}^3 + 584 \times h_{fic}^2 - 39 \times h_{fic} + 0,8 \quad (57)$$

A perda de tensão devido a retração do concreto é obtida pela equação 58.

$$\Delta\sigma_{p,rc} = \varepsilon_{cs} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \times E_p \quad (58)$$

2.2.3.7 Perda final real

Para obter as perdas finais, são considerados os efeitos das perdas progressivas e das perdas isoladas, adotando-se o maior resultado entre eles.

A perda final real dos cabos de protensão é calcula pela equação 59.

$$perdas_{final} = \frac{\sigma_p \times (1 - perdas_{inicial}) - \Delta\sigma_p(t, t_0)}{\sigma_p} \quad (59)$$

Onde:

σ_p = tensão de inicial nos cabos de protensão;

$\Delta\sigma_p(t, t_0)$ = maior resultados entre as perdas progressivas e perdas isoladas.

a) Perdas progressivas

As perdas progressivas são determinadas considerando a interação entre os as perdas diferidas: fluência, retração e relaxação da armadura em t_∞ . são dadas pelas equações de (60) a (65).

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{p,rc} - \Delta\sigma_{p,fc} - \Delta\sigma_{relaxação}(t_\infty)}{\chi_p + \chi_c \times \alpha_p \times \eta \times \rho_p} \quad (60)$$

$$\chi_c = 1 + 0,5 \times \varphi(t_0, t_0) \quad (61)$$

$$\chi_p = 1 + \chi(t, t_0) \quad (62)$$

$$\eta = 1 + e_{p,simples}^2 \times \frac{A_{seção simples}}{I_{seção simples}} \quad (63)$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_{seção simples}} \quad (64)$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{c28}} \quad (65)$$

Onde:

$\Delta\sigma_{p,rc}$ = perdas devido a retração do concreto;

$\Delta\sigma_{p,fc}$ = perdas devido a fluência do concreto;

$\Delta\sigma_{relaxação}(t_\infty)$ = perdas devidas relaxação da armadura no tempo $t=t_\infty$;

$\varphi(t_0, t_0)$ = coeficiente de fluência no instante t de protensão do aço;

$\chi(t, t_0)$ = coeficiente de fluência do aço, para relaxação da armadura em $t=t_\infty$;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

$I_{seção\ simples}$ = Inercia da seção de laje alveolar;

$e_{p, simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples.

A_p = área de aço calculada;

E_p = módulo de elasticidade do aço;

E_{c28} = módulo de elasticidade do concreto, para o valor de f_{ck} da laje.

b) Perdas isoladas

As perdas isoladas são obtidas pela equação 66.

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = -\Delta\sigma_{p,rc} + \Delta\sigma_{p,fc} + \Delta\sigma_{relaxação}(t_\infty) \quad (66)$$

Onde:

$\Delta\sigma_{p,rc}$ = perdas devido a retração do concreto;

$\Delta\sigma_{p,fc}$ = perdas devido a fluência do concreto;

$\Delta\sigma_{relaxação}(t_\infty)$ = perdas devidas relaxação da armadura no tempo $t=t_\infty$;

2.2.4 Dimensionamento

O dimensionamento é realizado considerando as perdas reais obtidas, inicial e final.

Assim como no pré-dimensionamento, é dimensionado a armadura ativa no ELU em $t=t_\infty$, considerando seção composta, já adotando a perda final real. O procedimento de cálculo utilizado é o mesmo já descrito em 2.2.2.

Nesta etapa também é realizada a verificação dos estados de tensão da seção no instante $t=0$. É considerada a seção simples, no ato da protensão, onde são verificados os limites de tração e compressão nas bordas superior e inferior do concreto.

É realizado o cálculo do comprimento de transferência, distância onde ocorre transferência total da protensão e a regularização de tensão na seção transversal. Para liberação gradual do dispositivo de tração, o comprimento de transferência é obtido pela equação 67.

$$l_{bpt} = 0,5 \times l_{bp} \times \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \times 1,25 \quad (67)$$

Onde:

l_{bpt} = comprimento de transferência;

l_{bp} = comprimento de ancoragem básico, para cordoalhas de 7 fios:

$$l_{bp} = \frac{7 \times \phi \times f_{pyd}}{36 \times f_{bpd,j}}$$

$$f_{bpd,j} = \frac{1,2 \times 0,7 \times 0,7 \times 0,3 \times f_{cj}^{2/3}}{1,3}, \text{ para } f_{cj} \leq 50 \text{MPa.}$$

σ_{pi} = tensão de inicial de cálculo, considerando as perdas iniciais reais;

f_{pyd} = tensão de escoamento de cálculo da cordoalha;

Para que haja completa distribuição das tensões, a distância de regularização, deve ser maior que o comprimento de transferência, como mostra a equação 68.

$$l_p = \sqrt{h_{seção\ simples}^2 + 0,6 \times l_{bpt}^2} \leq l_{bpt} \quad (68)$$

Onde:

l_p = distância de regularização;

l_{bpt} = comprimento de transferência;

Após obter o comprimento de transferência, é realizado a verificação do estado de tensões na seção de concreto, ao longo da estrutura. A verificação da tensão normal é realizada na região fora do comprimento de transferência. A NBR 14861:2011 estabelece os limites de tração e compressão na seção de concreto, no ato da protensão, sendo ele: $-f_{ctm,j1,2} \leq \sigma \leq \frac{0,85f_{cj}}{1,3}$. A tensão nas bordas superior e inferior da seção é obtida pela equação 69.

$$\sigma = \frac{N_p}{A_{seção\ simples}} \pm \frac{N_p \times e_{p,simples}}{W_{seção\ simples}} \mp \frac{M_{g1}}{W_{seção\ simples}} \quad (69)$$

Onde:

N_p = força normal de protensão, considerando as perdas iniciais reais obtidas em 2.2.3.4;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

M_{g1} = momento fletor devido ao peso próprio da laje;

$W_{seção\ simples}$ = Módulo de resistência da seção de concreto da laje alveolar;

$e_{p,simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples.

2.2.5 Verificações do Estado Limite de Serviço (ELS)

No ELS são realizadas verificações quanto aos limites de tensão que podem fissurar o concreto. A Classe de Agressividade Ambiental (CAA) e o tipo de protensão definem as combinações para o ELS e as verificações a serem realizadas. Para CAA= 2, de acordo com a NBR 6118:2014, são realizadas as verificações quanto aos limites para o ELS – Descompressão (ELS -D) e ELS – Formação de Fissuras (ELS-F).

As tensões atuantes no ELS-D são calculadas pela equação 70.

$$\sigma = \frac{N_p}{A_{seção\ simples}} \pm \frac{N_p \times e_{p,simples}}{W_{seção\ simples}} \mp \frac{M_{(g1+g2)}}{W_{seção\ simples}} \mp \frac{M_{(g3+\varphi 2 \times q)}}{W_{seção\ composta}} \quad (70)$$

As tensões atuantes no ELS-F são calculadas pela equação 71.

$$\sigma = \frac{N_p}{A_{seção\ simples}} \pm \frac{N_p \times e_{p,simples}}{W_{seção\ simples}} \mp \frac{M_{(g1+g2)}}{W_{seção\ simples}} \mp \frac{M_{(g3+\varphi 1 \times q)}}{W_{seção\ composta}} \quad (71)$$

Onde:

N_p = força normal de protensão, considerando área de aço real e as perdas finais reais obtidas em 2.2.3.7;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

$M_{(g1+g2)}$ = momento fletor devido ao peso próprio da laje e capa de concreto;

$W_{seção\ simples}$ = módulo de resistência da seção de concreto da laje alveolar;

$e_{p, simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples;

$M_{(g3+ \varphi_2 \times q)}$ = momento fletor devido ao revestimento e carga accidental quase permanente;

$M_{(g3+ \varphi_1 \times q)}$ = momento fletor devido ao revestimento e carga accidental frequente.

Para o cálculo do momento fletor, é considerada atuação simultânea do peso próprio da laje e capa de concreto ($M_{(g1+g2)}$). O momento fletor causado pelo revestimento e carga accidental quase permanente ($M_{(g3+ \varphi_2 \times q)}$), considera o fator de redução $\varphi_2=0,4$. O cálculo do momento com carga accidental frequente ($M_{(g3+ \varphi_1 \times q)}$) é realizado com fator de redução $\varphi_1=0,6$.

Para ELS-D, o limite estabelecido de acordo com a NBR 14861:2011 é $0 \leq \sigma \leq 0,85f_{ck}$, pois não é permitido tração do concreto. Para ELS-F, a tensão deve estar entre $-0,7f_{ctm} \leq \sigma \leq 0,85f_{ck}$. São considerados a resistência à compressão do concreto da laje alveolar (f_{ck}) e a resistência média a tração do concreto (f_{ctm}), como mostrado nas equações 72 e 73.

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3}, \quad \text{para } f_{ck} \leq 50MPa; \quad (72)$$

$$f_{ctm} = 1,2 \times \ln(1 + 0,11f_{ck}), \quad \text{para } 55MPa \leq f_{ck} \leq 90MPa; \quad (73)$$

2.2.6 Deformação

O limite de deformação é obtido considerando o efeito da protensão, da relaxação da armadura e fluência do concreto, que são responsáveis pelas variações volumétricas da estrutura.

É necessário calcular a deformação da estrutura com a atuação de cada carregamento, considerando-os inicialmente isolados. Para obter a deformação da estrutura considerando os efeitos de protensão e perdas de protensão, é necessário considerar o esforço normal atuando na seção transversal e a excentricidade da cordoalha, como apresentado na Figura 12. A deformação devido ao momento fletor resultante em um dos apoios é obtida pela equação 74. A equação 75, é utilizada para cálculo de deformação em estrutura biapoiada e carga distribuída.

Fonte: Da Autora.

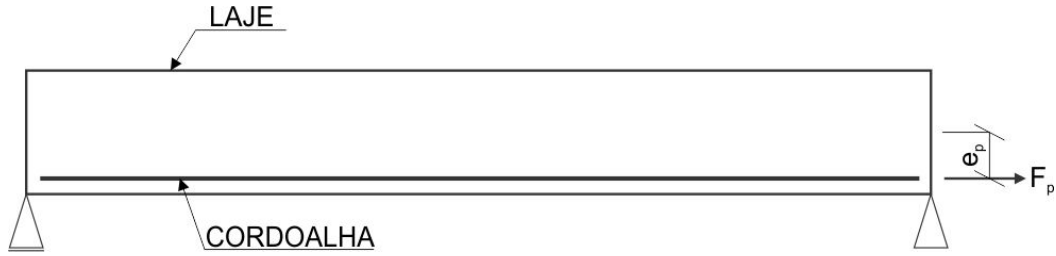


Figura 12. Representação da força de protensão atuante e excentricidade dos cabos.

A flecha total atuante na estrutura é obtida pela equação 76, considerando o coeficiente de fluência e a flecha considerando ação isolada do carregamento.

$$a_p = \frac{F_p \times e_{p,simples} \times l_{vão}^2}{8 \times E_{ci} \times I_{seção\ simples}} \quad (74)$$

$$a_{gi} = \frac{5 \times g_i \times l_{vão}^4}{384 \times E_{ci} \times I_{seção}} \quad (75)$$

$$a_{total} = (a_p + a_{g1}) \times (1 + \varphi_{(1+\infty)}) + a_{g2} \times (1 + \varphi_{(15+\infty)}) + a_{g3} \times (1 + \varphi_{(45+\infty)}) + a_{\Delta p} \times \left(1 + \frac{\varphi_{(1+\infty)}}{2}\right) \quad (76)$$

Onde:

φ = coeficiente de fluência para cada etapa de carregamento, obtido em 2.2.3.5;

α_p = deformação causada pela protensão;

F_p = força de protensão;

$e_{p,simples}$ = excentricidade dos cabos de protensão na seção simples;

$\alpha_{\Delta p}$ = deformação devida as perdas de protensão;

α_{gi} = deformação devido a atuação de peso próprio da laje, peso da capa estrutural, revestimento e sobrecarga acidental;

E_{ci} = módulo de elasticidade do concreto, para cada idade de atuação do carregamento. De acordo com a NBR 6118:2014, para obtenção do módulo de elasticidade em idades menores que 28 dias, o valor de E_{ci} deve ser minorado pelo obtido da equação 77:

$$\beta = e^{s \times (1 - \sqrt{28/t_i})} \quad (77)$$

$s = 0,25$ para CPI e CPII;

$s = 0,38$ para CPIII e CPIV;

$s = 0,20$ para CPV.

Segundo os limites estabelecidos pela NBR 6118:2014, o valor da contraflecha no ato de protensão não deve superar $\frac{L}{350}$, e a flecha não deve superar $\frac{L}{250}$.

2.2.7 Cisalhamento

As verificações dos limites de cisalhamento são realizadas de acordo com a NBR 14861:2011. Apesar de o preenchimento dos alvéolos trazer ganho de resistência ao cisalhamento, neste trabalho esse efeito não é considerado.

Os modos de ruptura por esforço cortante ocorrem de duas maneiras: quando a tensão de cisalhamento é maior que a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo, e por combinação das tensões de cisalhamento e tração devido a protensão ou flexão da laje alveolar.

O esforço cortante de cálculo máximo na seção crítica, deve obedecer aos limites apresentados nas equações 78 e 79.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (78)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (79)$$

Onde:

V_{Sd} = esforço cortante de cálculo na seção crítica, a partir de 0,5h do apoio;

V_{Rd1} = força cortante resistente de cálculo

V_{Rd2} = força corte resistente de cálculo das diagonais comprimidas de concreto;

Os valores de V_{Rd1} e V_{Rd2} , são obtidos pelas equações 80 a 87:

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (80)$$

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \times v \times f_{cd} \times 0,9 \times h_{\text{útil}} \times \sum b_{w,1} \quad (81)$$

Onde:

$$V_{c,1} = 0,25 \times f_{ctd} \times \kappa \times (1,2 + 40\rho_1) \times \sum b_{w,1} \times h_{\acute{u}til} \quad (82)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \times \sigma_{cp} \times \sum b_{w,1} \times h_{\acute{u}til} \quad (83)$$

$\sum b_{w,1}$ = somatório das nervuras internas e externas;

f_{ctd} = resistência a tração do concreto;

$$\nu = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (84)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1} \times h_{\acute{u}til}} \quad (85)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A_c} \quad (86)$$

$$\kappa = 1,6 - h_{\acute{u}til} \geq 1 \quad (87)$$

$h_{\acute{u}til}$ = altura útil da seção;

A_s = área de aço real;

N_p = fora normal de compressão;

A_c = área de concreto na seção.

É necessária a verificação do esforço cortante para a seção simples de concreto, considerando efeitos de transporte e montagem da estrutura. Nesta etapa é considerado a resistência a compressão do concreto da laje, na idade de protensão (f_{cj}).

A verificação considerando a estrutura em serviço, ou seja, como todos os carregamentos atuando, é realizado considerando a contribuição da capa de concreto.

2.3 ALGORITMO GENÉTICO

O Algoritmo Genético (AG) tem seu funcionamento com base na teoria do processo de evolução e seleção natural de Darwin e apresentada a sua base teórica com John Holland na década de 60. A base do AG é que a partir de uma dada população inicial, com ou sem restrições impostas, são escolhidos pais, e estes serão utilizados para a geração de novos indivíduos cada vez mais aptos, os filhos. Após sucessivas iterações, são escolhidos os indivíduos que convergem para uma melhor solução, sendo ela o resultado ótimo para o problema.

O AG é aplicado para resolução de problemas de análise não linear, com variáveis contínuas ou discretas. Com a função objetivo e função de restrições, é possível maximizar ou minimizar um resultado. Na área de engenharia civil, em sua maioria, o objetivo é a minimização de um resultado, sendo ele o custo de fabricação, o peso total da estrutura ou redução da área de aço.

Cho *et al.* (2001) realizaram um estudo de otimização usando o AG na avaliação do custo do ciclo de vida de pontes com o sistema "orthotropic steel deck", que são lajes de aço, constituídas por fôrmas nervuradas e reforçada longitudinalmente ou transversalmente, ou em ambas as direções. Por se tratar de uma análise de ciclo de vida, considerou-se o custo inicial e de manutenção, com ajuste de resistência, deflexão e fadiga da estrutura. Foi possível concluir que dessa forma consegue-se um projeto mais racional, econômico e seguro quando comparado a um projeto dimensionado por método convencional.

Kuan-Chen Fu *et al.* (2005) utilizaram o AG para encontrar soluções otimizadas para pontes de vigas de aço, onde o principal objetivo era minimizar o peso, conseqüentemente o custo da estrutura. Nesse estudo analisou-se pontes com vigas de vão único e com vigas contínuas de variados comprimentos, onde foi possível concluir que o AG apresenta resultados satisfatórios, ressaltando-se sua aproximação a projetos reais com a utilização de variáveis discretas.

Kripakaran *et al.* (2011) elaboraram um sistema de suporte à tomada de decisão baseado no AG e aplicado à pórticos de aço variando-se os tipos de ligações. Eles também destacaram as vantagens da utilização de variáveis discretas com AG. Tal característica é explorada no programa aqui apresentado.

Kociecki e Adeli (2015) utilizaram o AG como parte de um programa de otimização de estruturas de aço e Prendes-Gero *et al.* (2018), que utilizaram o AG na otimização de pórticos de aço espaciais por diferentes normas, observaram ganhos da ordem de 10% quando comparados à dimensionamentos não otimizados. Ambos destacaram também a capacidade de se trabalhar com variáveis discretas, quando utilizando o AG, como característica importante para obtenção dos bons resultados.

Malveiro *et al.* (2018) utilizaram o AG em um estudo de pontes e viadutos com modelos numéricos validados por experimentos. O AG foi utilizado para realizar a calibração de parâmetros, calculando os valores ótimos das propriedades físicas mais significantes com o objetivo de aumentar a correlação entre os resultados numéricos e os experimentais.

Alves e Pietralonga (2020), realizaram em seu trabalho comparação e análise do dimensionamento otimizado de vigas casteladas e celulares de aço, via algoritmo genético. A análise é realizada com variáveis discretas para dimensões dos perfis, considerando as dimensões comerciais dos perfis dos tipos “I” e “H”. A função objetivo a ser minimizada é o peso do perfil, se comparado aos perfis de alma cheia.

De Larazzi, Alves e Calenzani (2020) propõem a formulação e aplicação do dimensionamento ótimo para pórticos espaciais em estruturas de aço, utilizando as técnicas de otimização de programação quadrática sequencial, para variável contínua e o algoritmo genético, para variáveis discretas. Deve ser minimizado o peso total da estrutura, pois quanto menor o consumo de aço, consequentemente menor será o custo.

Ramos e Alves (2020) apresentam um estudo de otimização e análise dos modos de colapso através de algoritmos genéticos para vigas mistas celulares de aço e concreto. Neste estudo os autores apontam a vantagem do uso desta ferramenta de otimização e os modos preponderantes de falha nas vigas mistas celulares de aço e concreto.

A rotina de otimização Algoritmo Genético possui determinadas características. Segundo a documentação da plataforma de suporte dos Matlab, o algoritmo de otimização (AG), possui a seguinte rotina:

- a) Criação de uma população inicial aleatória;
 - b) Pontua cada membro da população atual, com seu valor (*escore bruto*) de condicionamento físico;
 - c) São encontrados os valores de expectativa, ou seja, as pontuações de *escore bruto*, são convertidas em um intervalo de valores utilizáveis;
 - d) Com base nos valores de expectativa, são selecionados membros, chamados *pais*;
 - e) Os indivíduos que possuem melhor condicionamento físico são classificados como *elite*, e passados para a próxima população, contribuindo com seus genes;
 - f) A partir da *mutação* de um único *pai*, ou *cruzamento* de um par de pais, são gerados os filhos;
 - g) A população atual é substituída pelos *filhos* e é formada a próxima geração;
- A rotina dos itens **b)** a **g)** são repetidos diversas vezes, e o processo de iteração é interrompido quando uns dos critérios de parada é atendido.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Para o problema em questão, o dimensionamento otimizado das lajes alveolares é realizado com variáveis discretas. É utilizado o catálogo de lajes alveolares fornecido pela Cassol Pré-Fabricados, além dos projetos de fabricação disponível em anexo. Além disso, o catálogo de cordoalhas utilizados é o fornecido pela Belgo Bekaert Arames.

A função objetivo deve convergir para um ponto mínimo, para reduzir o custo de material na fabricação das lajes alveolares, sendo ele o volume de concreto e o peso de aço de protensão, além de minimizar a espessura da capa estrutural, buscando dimensões que atendam às restrições impostas, de acordo com a norma.

3.1 VARIÁVEIS DO PROBLEMA

As variáveis do problema estão organizadas em forma vetorial, estando relacionadas as dimensões da laje, da capa estrutural e das cordoalhas, sendo elas:

x_1 = dimensões da laje

$x_{1,1}$ = altura da seção simples ($h_{seção\ simples}$)

$x_{1,2}$ = área da seção simples ($A_{seção\ simples}$)

x_2 = altura da capa (h_{capa})

x_3 = dimensões da cordoalha

$x_{3,1}$ = diâmetro da cordoalha ($\emptyset_p$)

3.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Se tem o objetivo de minimizar o custo de aço e concreto no processo de fabricação da laje alveolar. A equação 88 representa a formulação de obtenção do custo final, considerando concreto e cordoalha de protensão.

$$f(x) = (Ct_c \times A_{seção\ simples} + Ct_p \times n_{cord} \times \mu_p) \times l_{vão} \quad (88)$$

Onde:

Ct_c = preço do concreto por m³;

$A_{seção\ simples}$ = área de concreto da seção de laje alveolar;

Ct_p = preço da cordoalha por kg;

n_{cord} = número de cordoalha;

μ_p = massa linear da cordoalha, em kg/m;

$l_{vão}$ = comprimento da laje, em m.

O valor unitário das cordoalhas e do concreto estão apresentados nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5. Custo das cordoalhas por Kg.

Cordoalha 7 fios - CP190 RB	
Diâmetro nominal [mm]	Custo [R\$/kg]
9,5	9,31
12,7	8,84
15,2	8,84
15,7	9,46
Cordoalha 7 fios - CP210 RB	
12,7	9,98
15,2	9,98

Fonte: Fornecedor local.

Tabela 6. Custo de concreto por m³.

Concreto	
f_{ck}	Custo [R\$/m³]
25	307,42
30	317,77
35	329,15
40	341,57
45	384,01
50	455,43

Fonte: Sinapi (2020).

3.3 FUNÇÃO DE RESTRIÇÃO

Foram impostas restrições não lineares, que obedecem aos limites impostos no dimensionamento no ELU e ELS, conforme formulações apresentadas no capítulo 2. São obtidas restrições de desigualdade, representadas por um vetor com 20 posições, sendo elas:

$$C(1): 4 \times 0,272 \times KMD - 0,68^2 \leq 0$$

$$C(2): h_{\text{útil}} - h_{\text{capa}} / KX \leq 0$$

$$C(3): 2 - n_{\text{cord}} \leq 0$$

$$C(4): n_{\text{cord}} - (n_{\text{alv}} + 1) \leq 0$$

$$C(5): \frac{f_{ctm,j}}{1,2} - \sigma_{s,ELU} \leq 0$$

$$C(6): \sigma_{i,ELU} - 0,85 \times \frac{f_{cj}}{1,3} \leq 0$$

$$C(7): \sigma_{s,ELS-D} \geq 0$$

$$C(8): \sigma_{s,ELS-D} - 0,85 \times \frac{f_{ck}}{1,4} \leq 0$$

$$C(9): \sigma_{s,ELS-F} - 0,7 \times f_{ctm} > 0$$

$$C(10): \sigma_{s,ELS-F} - 0,85 \times \frac{f_{ck}}{1,4} \leq 0$$

$$C(11): \sigma_{i,ELS-D} \geq 0$$

$$C(12): \sigma_{i,ELS-D} - 0,85 \times \frac{f_{ck}}{1,4} \leq 0$$

$$C(13): \sigma_{i,ELS-F} - 0,7 \times f_{ctm} > 0$$

$$C(14): \sigma_{i,ELS-F} - 0,85 \times \frac{f_{ck}}{1,4} \leq 0$$

$$C(15): a_{total,0} - \frac{l_{v\grave{a}o}}{350} \leq 0$$

$$C(16): a_{total,\infty} - \frac{l_{v\grave{a}o}}{250} \leq 0$$

$$C(17): V_{Sd,simples} - V_{Rd1,simples} \leq 0$$

$$C(18): V_{Sd,simples} - V_{Rd2,simples} \leq 0$$

$$C(19): V_{Sd,composta} - V_{Rd1,composta} \leq 0$$

$$C(20): V_{Sd,composta} - V_{Rd2,composta} \leq 0$$

Onde:

$h_{\text{útil}}$ = altura útil da seção;

h_{capa} = altura da capa;

n_{cord} = número de cordoalha;

n_{alv} = número de alvéolos da laje;

$perda_{final}$ = perda final real nos cabos de protensão, em %;

$\sigma_{s,ELU}$ = tensão na borda superior da laje, no ELU, em $t=0$;

$\sigma_{i,ELU}$ = tensão na borda inferior da laje, no ELU, em $t=0$;

f_{ctm} = resistência média a tração no concreto;

f_{cj} = resistência a compressão do concreto na idade de protensão;

σ_{ELS-D} = tensão nas bordas superior e inferior da laje, no ELS-Descompressão;

σ_{ELS-F} = tensão nas bordas superior e inferior da laje, no ELS-Formação de Fissuras;

$a_{total,0}$ = flecha, considerando tensões de protensão e peso próprio da laje;

$a_{total,\infty}$ = flecha total, considerando a atuação do carregamento ao longo do tempo;

$l_{vão}$ = comprimento da laje, em m;

$V_{Sd,simples}$ = esforço cortante de cálculo na seção crítica, para a seção pura de laje alveolar;

$V_{Sd,composta}$ = esforço cortante de cálculo na seção crítica, considerando a atuação da capa de concreto sobre a laje;

V_{Rd1} = força cortante resistente de cálculo;

V_{Rd2} = força cortante resistente de cálculo das diagonais comprimidas de concreto.

A restrição C(1), ocorre para que a equação 5, obtida no capítulo 2, que relaciona KMD e KX, obtenha valor real para KX. Com C(2), verificamos que a posição da linha neutra está dentro dos limites da capa de concreto.

A restrição C(3), determina a quantidade mínima de cordoalhas na seção transversal. De acordo com a NBR 14861:2011, a distância máxima entre cabos é de 2 vezes a altura da seção da laje alveolar, não excedendo 400 mm.

C(4) estabelece o número de cordoalhas máximas para cada seção de laje alveolar, sendo estabelecido uma cordoalha para cada espessura de alma.

C(5) e C(6) determinam os limites de tração e compressão no ELU no ato de protensão, nas bordas superior e inferior do concreto, respectivamente.

C(7) e C(8) estabelecem os limites de tensão na borda superior da laje, atendendo ao ELS - Descompressão. De forma análoga, C(9) e C(10) atendem aos limites do ELS - Formação de Fissuras.

C(11) e C(12) estabelecem os limites de tensão na borda inferior da laje, atendendo ao ELS - Descompressão. De forma análoga, C(13) e C(14) atendem aos limites do ELS - Formação de Fissuras.

C(15) e C(16), verificam os limites de deformação, considerando tensões de protensão e peso próprio, e atuação de carregamento ao longo do tempo, respectivamente.

C(17) e C(18), verificam o esforço de cisalhamento atuante e o resistente para seção simples, verificação necessário para resistência da estrutura durante o processo de fabricação e montagem. C(19) e C(20), consideram esforço de cisalhamento solicitante e resistente, para seção composta, ou seja, com contribuição da capa de concreto e estrutura em serviço.

4. METODOLOGIA

Ferro e Alves (2019), desenvolveram em seu trabalho a versão 1.0 do *software* nomeado por “Alveolaje”. Neste trabalho, é desenvolvida a versão 2.0 do Alveolaje, onde a opção de dimensionamento otimizado foi acrescentada, agregando valor ao programa, visto que a versão inicial apenas realiza a análise estrutural e dimensionamento da laje alveolar, desconsiderando os custos. A Figura 13 mostra a interface de abertura do *software*. O programa foi desenvolvido na plataforma *guide* do Matlab.

Fonte: A autora.



Figura 13. Menu inicial do Alveolaje 2.0

É possível inserir dados para iniciar uma nova verificação, como mostra a Figura 13. Ao selecionar “NOVO”, uma nova interface gráfica é apresentada ao usuário, sendo necessário inserir os dados de entrada, sendo eles, Classe de Agressividade Ambiental(CAA), tipo de cimento, valor do *slump* para o concreto, f_{ck} da laje, f_{cj} , idade de protensão, f_{ck} da capa estrutural, tipo de agregado, vão da laje, carga accidental e de revestimento. A Figura 14 mostra a interface para recebimento dos dados de entrada, sendo possível ao usuário escolher o dimensionamento otimizado via Algoritmo Genético.

Fonte: A autora.

The image shows a software window titled "Editor - ALVEOLAJE 2.0". The interface is organized into several sections:

- TIPO DE DIMENSIONAMENTO**: Contains two radio buttons: "Otimizado via Algoritmo Genético" (selected) and "Não Otimizado".
- PROPRIEDADES DO CONCRETO**: Includes input fields for:
 - CAA: 2
 - Cimento: CPI
 - Slump [cm]: (empty)
 - Fck Laje [MPa]: 25
 - Fcj [MPa]: (empty)
 - Idade de Protensão [h]: (empty)
 - Fck Capa [MPa]: 25
 - Natureza do Agregado: Basalto
- AÇO DE PROTENSÃO**: Includes a dropdown for "Cordoalha 7 fios" set to "CP190RB".
- PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**: Includes input fields for:
 - Vão da Laje [cm]: (empty)
 - Altura Seção [cm]: 15
 - Altura Capa [cm]: (empty)
- CARREGAMENTOS**: Includes dropdowns for:
 - Sobrecarga [KN/m²]: Arquibanc...
 - Revestimento [KN/m²]: (empty)

An "OK" button is located at the bottom center of the window.

Figura 14. Entrada de dados Alveolaje 2.0

Após a inserção dos dados de entrada, e iniciado o processo de otimização, sendo exibidos os gráficos para acompanhamento do problema, como mostra a Figura 15.

Fonte: Matlab.

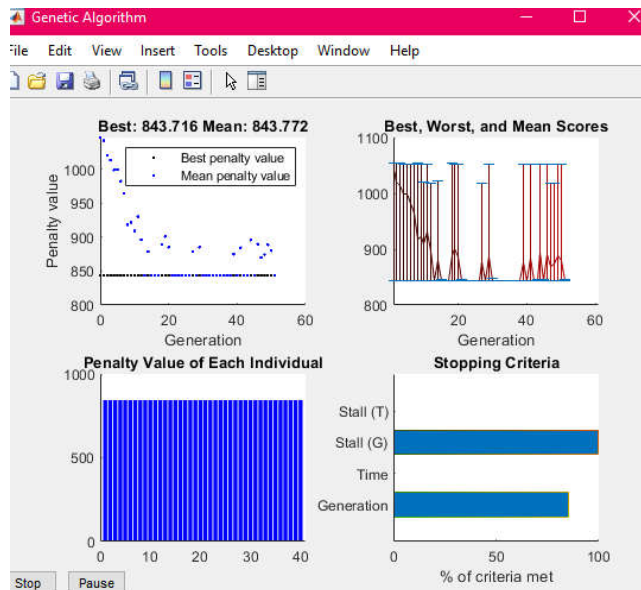


Figura 15. Gráficos dos processo de otimização.

Ao final do processo, os resultados podem ser visualizados no menu de resultados, como mostra a Figura 16, sendo exibidos os limites de tensões e deformações. As informações detalhadas da análise realizada, podem ser obtidas no menu “Relatórios”.

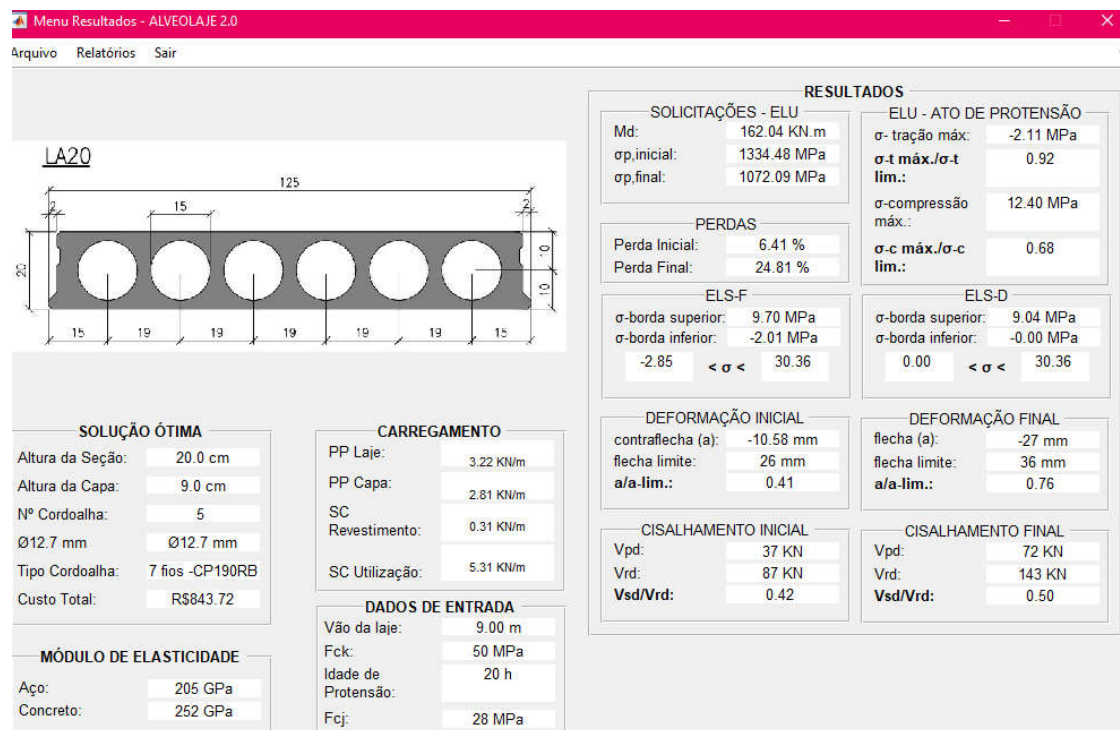


Figura 16. Menu de Resultados Alveolaje 2.0

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisados os resultados obtidos com o Alveolaje 2.0, comparando-os com resultados obtidos em outros trabalhos. Posteriormente é realizada uma análise gráfica da evolução dos resultados.

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

Para validação do Alveolaje 2.0, é necessário a verificação dos resultados obtidos com a análise estrutural. Para mostrar aplicabilidade e vantagens da ferramenta desenvolvida, foi realizada a comparação de resultados do programa desenvolvido por Ferro e Alves (2019) e a versão desenvolvida no presente trabalho. Este exemplo é o mesmo apresentado por Camillo (2012), entretanto, neste trabalho não é considerada a natureza do agregado. Com a atualização da NBR 6118, se fez necessária a escolha da natureza do agregado. Os dados de entrada utilizados são os apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Dados de entrada para exemplo de validação do programa.

DADOS DE ENTRADA	
Classe de Agressividade Ambiental	CAA II
Tipo de cimento	CP V
<i>Slump</i>	0
f_{ck} laje	50 MPa
f_{cj}	28 MPa
idade de protensão	20 h
f_{ck} capa	25 MPa
Natureza do Agregado	BASALTO
Vão livre da laje	9 m
Sobrecarga acidental	4,25 KN/m ²
Carga de revestimento	0,25 KN/m ²
Altura da Laje	20 cm
Altura da capa	5 cm

Fonte: Camillo (2012).

Com os parâmetros iniciais para dimensionamento da laje alveolar, o resultado ótimo obtido para altura da laje e altura da capa possuem os mesmos valores que os propostos por Camillo (2012), sendo laje com altura da seção de 20 cm, e capa estrutural de 5 cm.

A Figura 17 mostra a seção transversal da laje, com altura de 20 cm utilizada nas verificações deste trabalho. A forma da seção transversal foi fornecida por um fabricante local.

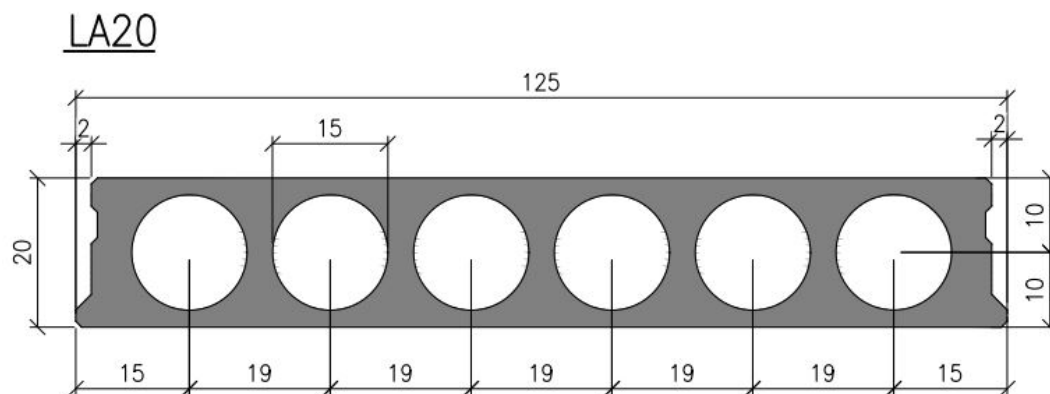


Figura 17. Seção transversal de laje alveolar $h=20\text{cm}$.

As características geométricas da seção, são obtidas com o auxílio do *software Autocad®*. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para a seção simples, considerando apenas a laje, e seção composta, considerando laje e capa estrutural de 5 cm. São apresentados os valores de área da seção transversal, distância do centro de gravidade à borda superior (Y_s), Inércia, módulo resistente superior e inferior da seção, respectivamente W_s e W_i , excentricidade da cordoalha (e). É realizada também, a comparação dos resultados obtidos com os apresentados por Ferro e Alves (2019).

Tabela 7. Propriedades geométricas da seção transversal simples e composta.

	Seção Simples - LA20		Seção Composta - LA20 e $h_{\text{capa}}=5$	
	Autores (2020)	Ferro e Alves (2019)	Autores (2020)	Ferro e Alves (2019)
Área [cm²]	1289,77	1439,71	1914,77	2064,71
Y_s [cm]	10,11	10,00	10,99	11,22
Inércia [cm⁴]	64257,71	68423,04	132506,03	147850,12
W_s [cm³]	6355,67	6842,3	12052,39	13181,86
W_i [cm³]	6497,44	6842,3	9460,77	10726,35
e [cm]	7,39	7,5	11,51	11,28

As propriedades geométricas obtidas possuem valores diferentes, assim como o esperado. Ferro e Alves (2019) obtiveram resultados para seção retangular uniforme e furos centralizados, entretanto para o programa desenvolvido neste trabalho, a seção transversal utilizada possui recortes para as chaves de cisalhamento (Figura 18). Dessa forma, a área da seção transversal obtida através do catálogo fornecido pelo fabricante é menor, se comparada com as obtidas por Ferro e Alves (2019). Igualmente, os resultados de inércia, módulo resistente da seção superior e inferior, e excentricidade dos cabos possuem valores menores.

Fonte: NBR 14861:2011 (Adaptado).

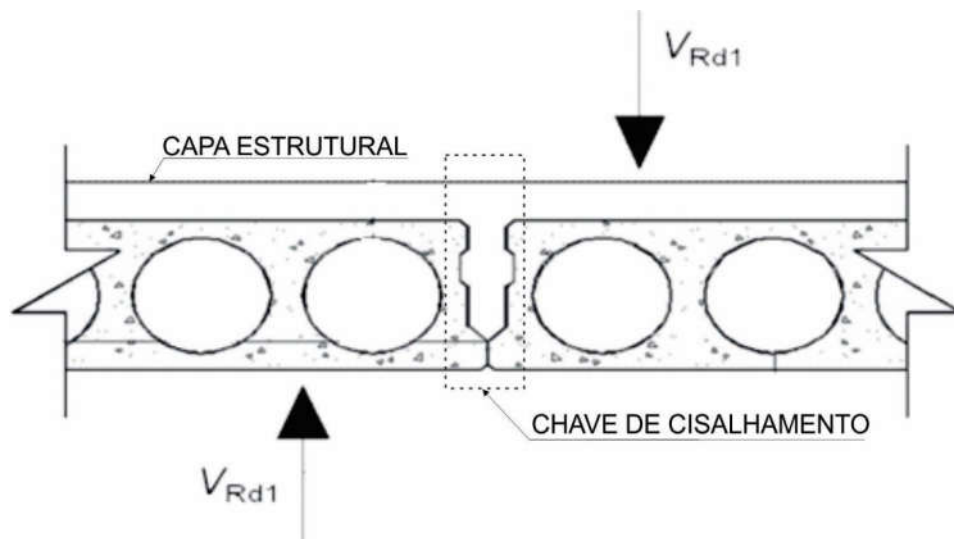


Figura 18. Representação da chave de cisalhamento.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos no cálculo das perdas iniciais. As tensões obtidas devida à deformação por ancoragem, relaxação da armadura e deformação imediata do concreto, são comparadas com os resultados de Ferro & Alves (2019).

Tabela 8.Comparação de resultado obtidos para perdas iniciais.

	Deformação por Ancoragem	Relaxação da Armadura	Deformação Imediata do Concreto	Perda Inicial
Autores (2020)	8,20 MPa	16,78 MPa	45,52 MPa	4,47%
Ferro e Alves (2019)	8,20 MPa	15,17 MPa	58,87 MPa	5,77%

A tensão de deformação por ancoragem possui resultados iguais para ambos os trabalhos pois, ele é diretamente influenciado pelo comprimento da pista de protensão, sendo considerado 150 metros. O valor de deformação imediata do concreto obtido, possui valor menor quando comparado com Ferro e Alves (2019), devido ao módulo de elasticidade do concreto. A perda inicial obtida com a otimização é 19,7% menor que o obtido por Ferro e Alves (2019).

As perdas finais obtidas, e as tensões por fluência, retração e relaxação da armadura estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9.Comparação de resultado obtidos para perdas finais.

	Fluência do Concreto	Retração do Concreto	Relaxação da Armadura	Perda Final
Autores (2020)	30,09 MPa	-115,26 MPa	117,37 MPa	21,14%
Ferro e Alves (2019)	46,17 MPa	-114,82 MPa	104,75 MPa	24,40%

O valor de tensão por Fluência no Concreto depende diretamente das propriedades geométricas da seção de trabalho, portanto os resultados obtidos apresentam os valores esperados. O valor de perda final obtido com a otimização possui resultado 13,4% menor, comparado com Ferro e Alves (2019).

Para dimensionamento no ELU em $t=t_{\infty}$, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10. Com a otimização obteve-se área de aço total 8,7% menor em relação ao obtido por Ferro e Alves (2019).

Tabela 10. Resultados obtidos para o ELU, em $t=t_{\infty}$.

	Tensão de Cálculo [MPa]	Área de Aço [cm²]	Perda Final
Autores (2020)	1666,4	4,192	21,14%
Ferro e Alves (2019)	1506,0	4,591	24,40%

Para dimensionamento no ELU em $t=t_0$, as tensões máximas de tração e compressão estão dentro dos limites estabelecidos pela norma. O comprimento de transferência obtido com a otimização é de 24,04 cm, lugar onde ocorrem as tensões máximas da seção. O limite de tensão $-2,3 \text{ MPa} < \sigma < 18,3 \text{ MPa}$ deve ser respeitado. Os resultados obtidos estão na Tabela 11.

Tabela 11. Tensões no ELU, em $t=t_0$.

x [m]	$\sigma_{s,ELU}$ [MPa]	$\sigma_{i,ELU}$ [MPa]
0,2404	-1,97	11,83
1,2404	-0,06	9,96
2,2404	1,34	8,60
3,2404	2,23	7,72
4,2404	2,62	7,35
5,2404	2,50	7,46
6,2404	1,87	8,08
7,2404	0,73	9,19
8,2404	-0,91	10,80

Fonte: Autores (2020).

As tensões obtidas no ELS estão dentro dos limites admissíveis pela norma, sendo o limite $0 \text{ MPa} < \sigma_{ELS-D} < 30,4 \text{ MPa}$, para tensões no ELS-Descompressão, e o limite de $-2,9 \text{ MPa} < \sigma_{ELS-F} < 30,4 \text{ MPa}$, para tensões no ELS- Formação de Fissuras. As tensões máximas obtidas estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Tensões para o ELS-D e ELS-F.

	$\sigma_{s,ELS-D}$ [MPa]	$\sigma_{i,ELS-D}$ [MPa]	$\sigma_{s,ELS-F}$ [MPa]	$\sigma_{i,ELS-F}$ [MPa]
Autores (2020)	7,6	0,1	8,5	-1,0
Ferro e Alves (2019)	7,3	0,0	8,1	-1,2

As deformações de flecha e contraflecha obtidas estão apresentados na Tabela 13. A flecha otimizada apresenta valores maiores devida à redução da inercia da seção considerada, porém de acordo com os limites estabelecidos pela norma.

Tabela 13. Deformação inicial e final.

	Deformação Inicial [mm]	Contraflecha Limite [mm]	Deformação Total [mm]	Flecha Limite [mm]
Autores (2020)	9,09		23,22	
Ferro e Alves (2019)	8,98	25,71	18,82	36,00

Os esforços de cisalhamento obtidos estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Cisalhamento na seção simples e composta.

	Seção Simples			Seção Composta		
	V _{Rd1} [KN]	V _{Rd2} [KN]	V _{Sd} [KN]	V _{Rd1} [KN]	V _{Rd2} [KN]	V _{Sd} [KN]
Autores (2020)	83,63	282,24	28,71	120,55	578,57	64,14
Ferro e Alves (2019)	89,37	308,70	30,90	128,84	632,81	66,34

É possível observar que o esforço de cisalhamento obtido com a otimização é 7% menor para seção simples e 3,3% menor para seção composta. Ocorre a redução do esforço cortante devida à redução do carregamento de peso próprio atuante.

Os resultados obtidos são apresentados na interface gráfica do *software*, além da seção transversal da laje, como pode ser visto na Figura 19.

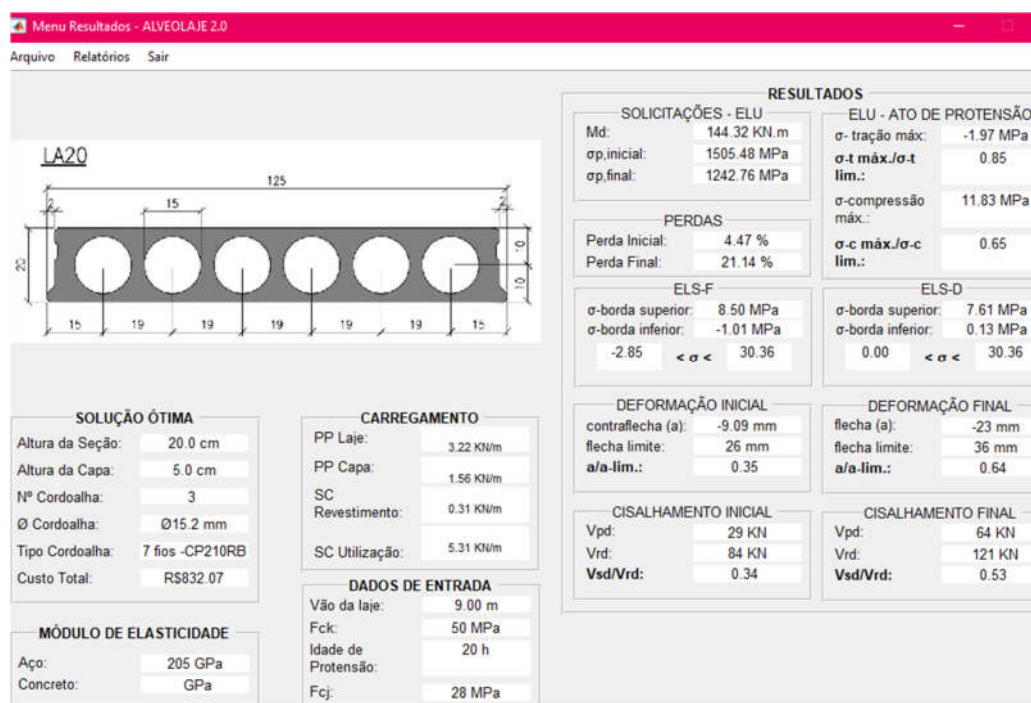


Figura 19. Resultados para validação do software.

Para o exemplo analisado, o resultado da otimização apresenta um custo de R\$ 832,07, para uma laje de altura 20 cm, vão livre de 9 metros, 3 cordoalhas com diâmetro de 15,2 mm, do tipo CP210RB.

Ferro e Alves (2019), obtém um custo de R\$922,68, para uma laje de altura 20 cm, vão livre de 9 metros, 9 cordoalhas com diâmetro 9,5 mm, do tipo CP190RB.

Os resultados obtidos mostram que o *software* desenvolvido está verificado quanto aos requisitos de análise estrutural e dimensionamento da estrutura. Além disso, os resultados obtidos mostram que a redução da área de aço total necessária e do número de cordoalhas, ocasionou a redução de 9,82% do custo de material para fabricação da laje.

A Figura 20 mostra o gráfico de evolução do custo final, e que houve convergência dos resultados, pois a curva do melhor valor se aproxima da média, sendo 832,07 o melhor valor.

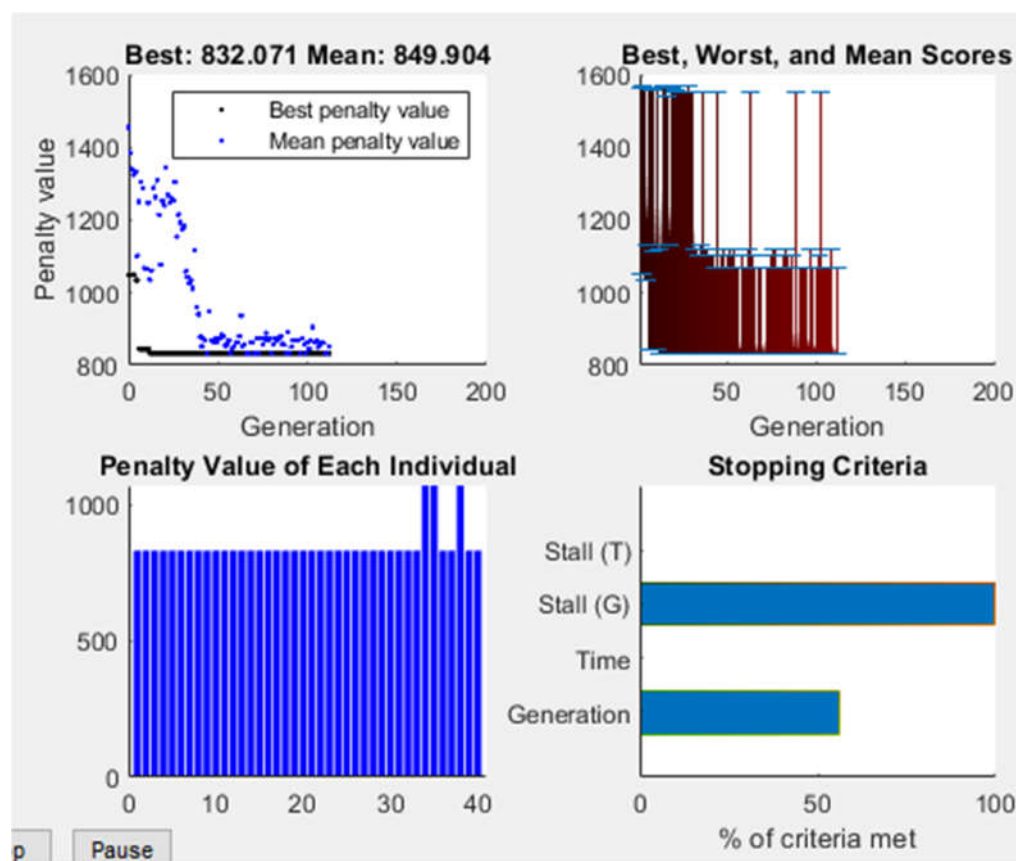


Figura 20. Convergência dos resultados da otimização.

5.2 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

Para avaliar a evolução de soluções de lajes alveolares protendidas para diferentes comprimentos, foi realizada uma análise do custo de material para fabricação de uma unidade de laje alveolar, considerando os dados de entrada apresentados no Quadro 4, havendo variação do vão livre. Os dados utilizados são iguais aos utilizados para a validação do programa.

Quadro 4. Parâmetros de entrada para análise gráfica dos resultados.

DADOS DE ENTRADA	
Classe de Agressividade Ambiental	CAA II
Tipo de cimento	CP V
<i>Slump</i>	0
f_{ck} laje	50 MPa
f_{cj}	28 MPa
idade de protensão	20 h
f_{ck} capa	25 MPa
Natureza do Agregado	BASALTO
Vão livre da laje	variável
Sobrecarga acidental	4,25 KN/m ²
Carga de revestimento	0,25 KN/m ²

A Figura 21 mostra o gráfico de evolução do vão livre x custo de material para fabricação de uma unidade de laje alveolar. Pode-se observar no gráfico que há tendência de linearidade dos resultados obtidos, mostrando que há coerência com os resultados. Vale ressaltar que, para a análise em questão não são considerados os custos da capa estrutural de concreto, por se tratar de outro item do projeto. Para a laje alveolar com largura da seção transversal no valor de 1250 mm, os custos obtidos para o intervalo de 5 a 9 metros de comprimento possuem valores entre R\$300 a R\$850.

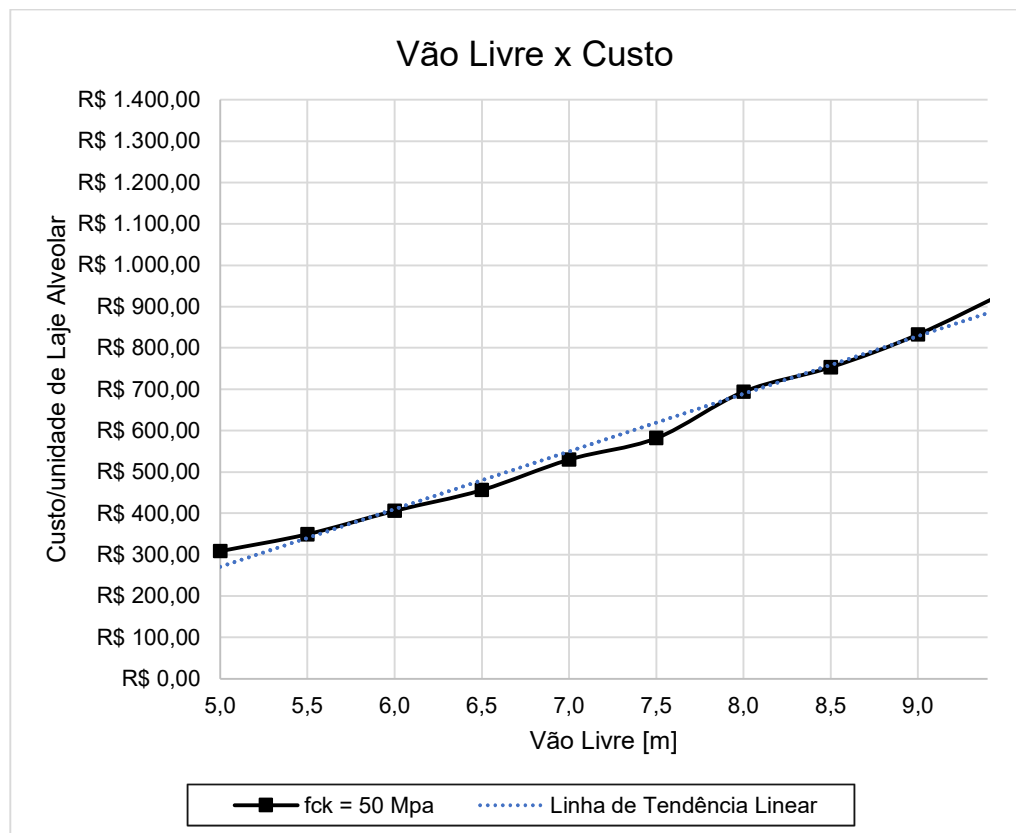


Figura 21. Gráfico da evolução Vão Livre x Custo para uma unidade de laje alveolar.

Na Tabela 15 pode-se observar o resultado detalhado para os vários comprimentos da laje em estudo, obtido para cada iteração do programa inserindo os dados de entrada obtidos do Quadro 4.

Tabela 15. Resultados otimizados para vão livre de 5 a 9 metros.

Vão [m]	Altura Seção [cm]	Altura Capa [cm]	Ø Cordoalha [mm]	Tipo	Nº Cordoalha	Custo Total
5,00	15	8	12,7	CP 190 RB	2	R\$308,64
5,50	15	5	12,7	CP 210 RB	2	R\$349,44
6,00	15	5	15,2	CP 190 RB	2	R\$405,80
6,50	15	5	15,2	CP 210 RB	2	R\$456,31
7,00	15	6	12,7	CP 190 RB	4	R\$530,12
7,50	15	5	15,2	CP 190 RB	3	R\$581,91
8,00	20	6	12,7	CP 190 RB	4	R\$693,96
8,50	20	5	15,2	CP 190 RB	3	R\$753,11
9,00	20	5	15,2	CP 210 RB	3	R\$832,07
9,50	20	6	12,7	CP 210 RB	5	R\$933,48

Os resultados obtidos com a Tabela 15 mostram que para atender as verificações de ELU e ELS, e obter redução no custo de material para fabricação de laje alveolar, é necessário que haja redução no número de cordoalhas e utilização de cabos de protensão com diâmetro de 12,7 mm e 15,2 mm. O número de cordoalhas varia entre 2 e 5 cabos, com altura da seção de 15 cm e 20 cm.

Além dos custos, é realizada a análise da evolução das tensões no concreto no ato de protensão e a deformação inicial e final da estrutura.

A Figura 22 mostra o gráfico de evolução de tensões de tração e compressão no concreto durante o ato de protensão, para o intervalo de comprimentos entre 5 e 9 metros. Com a análise do gráfico tem-se uma relação de linearidade das tensões para o vão 5 a 7,5 m, entretanto para vãos maiores que 7,5 metros há queda na tensão de compressão na seção de concreto e aumento do esforço de tração na estrutura, atingindo ao máximo estabelecido pelas NBR 6118:2014 e NBR 14681:2011, para o vão de 9,4 metros. Para lajes com comprimentos maiores que 9,4 metros, no ato de protensão ocorre tração excessiva na borda superior de concreto, ocorrendo fissuração e inutilização da unidade produzida. Este problema pode ser solucionado com a adição de armadura na mesa superior da laje alveolar, porém podem existir limitações construtivas caso essa solução seja adotada.

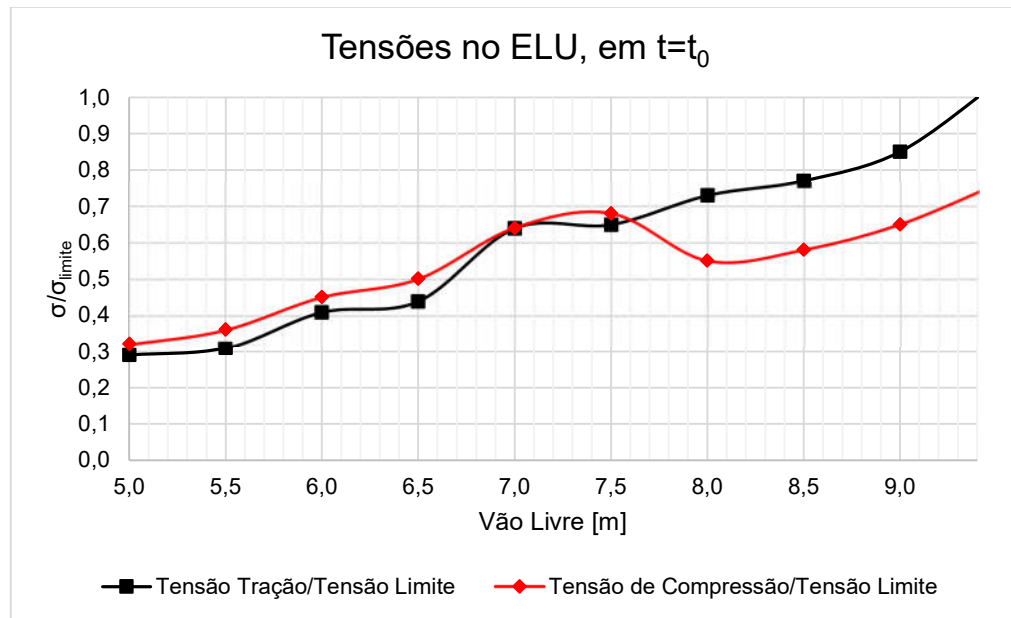


Figura 22. Gráfico de Tensões do ELU no ato de protensão das cordoalhas.

Outra análise realizada é a evolução de deformações iniciais e finais, com a variação do vão livre. A análise com o gráfico apresentado na Figura 23, mostra que para vãos entre 5 e 7 metros há tendência de aproximação da deformação com os valores limites da norma, ocorrendo melhor utilização dos limites estabelecidos. Entretanto para vão entre 7 e 9 metros, percebe-se que há baixa deformabilidade na estrutura.

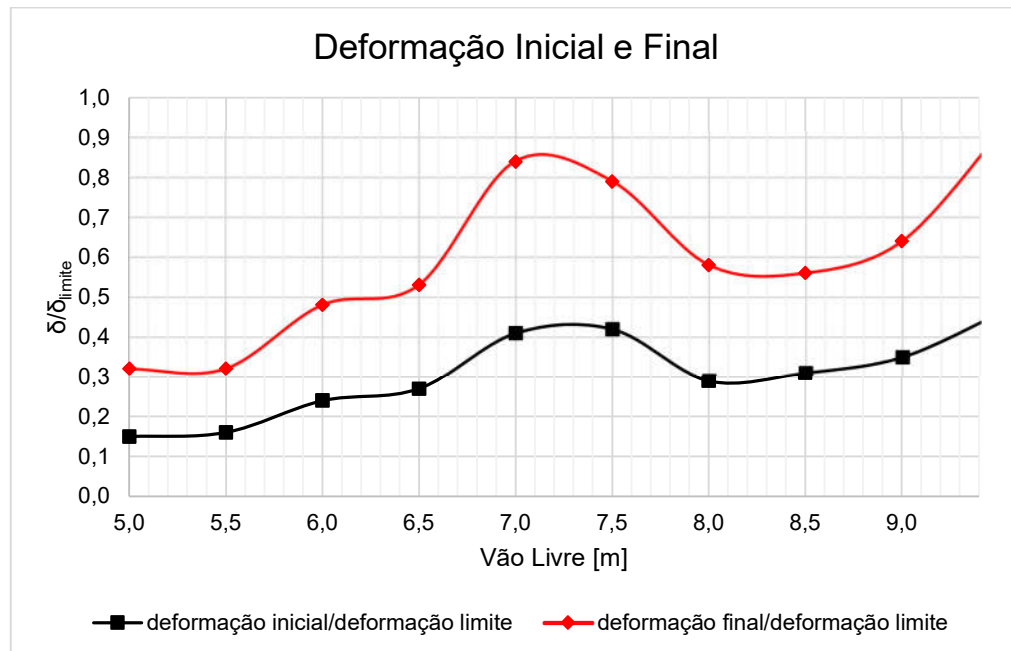


Figura 23. Gráfico de Deformação x vão livre de laje alveolar.

Com a análise conjunta dos gráficos de tensões no ELU e deformações, Figura 22 e Figura 23, respectivamente, percebe-se que para vão livre entre 5 e 7 metros, o modo de colapso da laje ocorre por deformação da estrutura. Para vão entre 7 e 9 metros, o colapso ocorre por excesso de protensão nas cordoalhas, ocasionando tração excessiva na borda superior da seção de concreto.

Para lajes com comprimento maior que 9 metros, o dimensionamento só é possível caso haja a inserção de armadura na borda superior da seção da laje alveolar. O dimensionamento deve ser realizado de maneira análoga ao proposto neste trabalho, e considerando as prescrições normativas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para o problema de otimização de lajes alveolares, se mostraram satisfatórios, mostrando redução no custo de material para fabricação. Para o exemplo analisado, foi possível obter redução de peso total de aço e volume de concreto, e consequentemente o custo de material. Dessa forma, é possível mostrar a aplicabilidade do programa desenvolvido, quanto aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas.

A análise paramétrica realizada aponta uma coerência do problema de otimização implementado, uma vez que para os menores vãos, obteve-se lajes com uma quantidade mínima de cordoalhas e na medida que o vão aumentou, consequentemente aumentou-se a quantidade de cordoalhas utilizadas na protensão e consequentemente o custo da laje. A análise do custo em função do vão livre mostrou-se praticamente linear na relação do custo com a variação do vão da laje alveolar.

Para conclusões mais contundentes, em especial relacionadas à otimização da área de aço, são necessários estudos de quantidade mínima de cordoalhas em cada laje alveolar, que não foi objeto de estudo do presente trabalho, considerando as restrições físicas impostas pela estrutura para a melhor distribuição dos cabos de protensão.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar a solução apresentada pelo *software* desenvolvido, são apresentados como sugestão:

- Verificação de fendilhamento longitudinal da laje alveolar, de acordo com a NBR 14861:2011;
- Dimensionamento da estrutura para concretos com f_{ck} maior que 50 MPa, de acordo com as especificações da NBR 6118:2014;
- Consideração do custo da capa de concreto/ m^2 de laje;
- Otimização do f_{ck} da laje e f_{ck} da capa estrutural;

- Verificar a necessidade somente de armadura ativa ou passiva, a depender do vão livre da estrutura;
- Análise do efeito da continuidade nos apoios;
- Consideração do custo de fabricação da estrutura, transporte e montagem;
- Analisar a otimização da laje considerando com função objetivo a emissão de CO₂ e verificar se os valores encontrados são os mesmos.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, E.C., PIETRALONGA T.C. **Análise dos modos de colapso no dimensionamento ótimo de vigas alveolares via algoritmos genéticos**, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed.LNEC. Série III. nº 12. ISSN 2183-8488, p. 17-32, 2020.

ALVES, E.C., TOMAZ, A. G. S. **Dimensionamento ótimo de bloco sobre estacas**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. nº 8. ISSN 2183-8488. p. 19-32, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861: **Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

BORTONE, T. P. **Avaliação das tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido**. Mostra PROPEEs, v.1, n.1 – Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

CAMILLO, C. A. **Continuidade de Painéis de Lajes Alveolares em Edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CAMP, CHARLES V., HUQ, FARAH. **CO₂ and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm**. Engineering Structures, v. 48, p. 363-372, 2013.

CARVALHO, R. C. **Estrutura em Concreto Protendido: Cálculo e Detalhamento**. São Paulo: Pini, 2012.

CHO, H., MIN, D. AND LEE, K. **Optimum Life-Cycle Design of Orthotropic Steel Deck Bridges**. Steel Structures, 2001.

DE LARAZZI, J. A., ALVES, E. C., CALENZANI, A. F. G, **Dimensionamento otimizado de pórticos em estruturas de aço via algoritmo genético**. Revista da Estrutura de Aço, 2020.

ERDAL, F. DOĞAN, E., SAKA, MEHMET P. **Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers**. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, n. 2, p. 237-247, 2011.

FERREIRA, M. A. **Manual de Sistemas Pré-fabricados de Concreto**. ABIC, 2003.

FERRO, K. B, ALVES, E. C. **Desenvolvimento de sistema iterativo para o dimensionamento de lajes alveolares**. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto. ISSN 2175-882, 2019.

KOCIECKI, M., ADELI, H. **Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 38, p. 168–182, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.10.012>>

KRIPAKARAN, P., HALL, B., GRUPTA, A. **A genetic algorithm for design of moment-resisting steel frames**. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011.

KRIPKA, M., MEDEIROS, GUILHERME F., LEMONGE, AFONSO CC. **Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures**. Engineering Structures, v. 99, p. 311-318, 2015.

KUAN-CHEN FU, F.A., ZHAI, Y. , ZHOU, S. **Optimum Design of Welded Steel Plate Girder Bridges Using a Genetic Algorithm with Elitism**. *Journal of Bridge Engineering*, 10 Edition, p. 291-301, 2005. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2005\)10:3\(291\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:3(291))>

LIPPIATT, B. **BEES 4.0: Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide** - NIST, 2007.

LUBKE, G. P., ALVES, E. C.; AZEVEDO, M. S. **Dimensionamento otimizado de vigas celulares de aço**. In: XXXVII Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, p. 01-29, 2017.

MALVIEIRO, J., RIBEIRO, D., SOUSA, C. and CALÇADA, R. (2018), ***Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests***. *Engineering Structures*, v. 164, p. 40–52, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.057>.>

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

PRENDES-GERO, M.B., BELLO-GARCÍA, A., COZ-DÍAZ, J.J.DEL, DOMÍNGUEZ, F.J.S., NIETO, P.J.G. ***Optimization of steel structures with one genetic algorithm according to three international building codes***. *Revista de La Construcción*, April, 2018.

RAMOS, J.R.S., ALVES, E.C., **Análise numérica dos modos de colapso no dimensionamento otimizado de vigas mistas celulares**. *Revista da Estrutura de Aço*, v. 9, n. 2, p. 222-240, 2020.

SANTORO, J.F., KRIPKA, M. ***Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete elements***. *Computers and Concrete*, v. 25, n. 2, p. 111-118, 2020.

SENOUCI, A. B., AL-ANSARI, M. S. ***Cost optimization of composite beams using genetic algorithms***. *Advances in Engineering Software*, v. 40, n. 11, p. 1112-1118, 2009.

SINAPE (2020). **Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil** - Caixa Econômica Federal, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

TORMEN, A. F. *et al.* **Estudos sobre Alternativas de Projeto para a Minimização do Impacto Ambiental de Edifícios em Concreto Armado**. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Investigación, desarrollo y práctica, v. 13, n. 1, 2020.

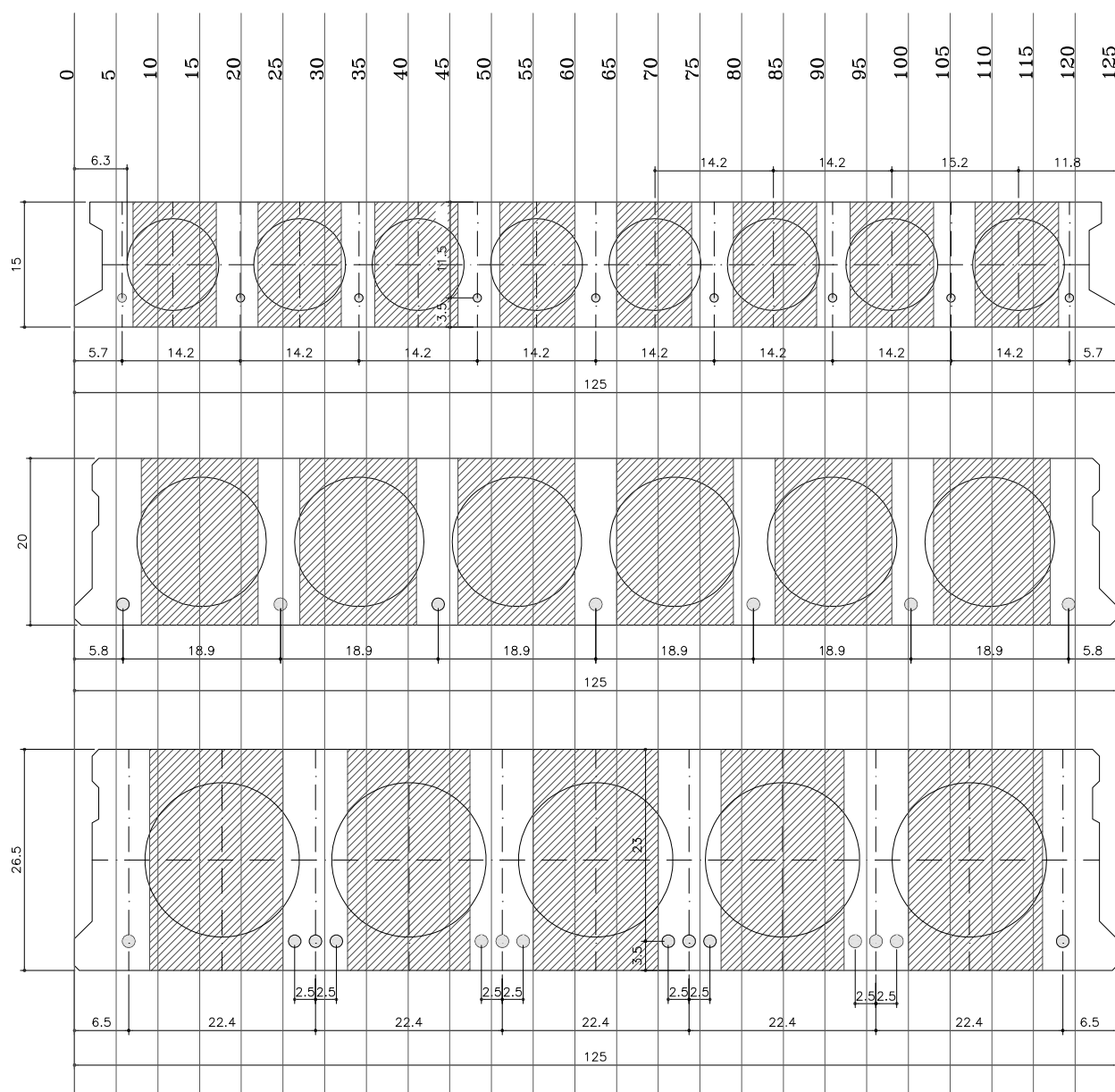
TURINI, T. *et al.* **Análise comparativa de dimensionamento otimizado de blocos de concreto sobre estacas de concreto**. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, v. 16, n. 1, 2019.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações** (Vol. III). São Paulo: Studio Nobel, 2002.

YEPES, V., MARTÍ, J.V., GARCÍA-SEGURA, TATIANA. **Cost and CO₂ emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm.** Automation in Construction, v. 49, p. 123-134, 2015.

8. ANEXOS

SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS LAJES ALVEOLARES



OBS.: OS POSSÍVEIS RECORTES DAS LAJES DEVEM SER EFETUADOS NAS ÁREAS DE HACHURA INDICADAS NO DESENHO.

LAJES ALVEOLARES

ESCALA:

DATA: JUL/05

RESP:

EVERSON

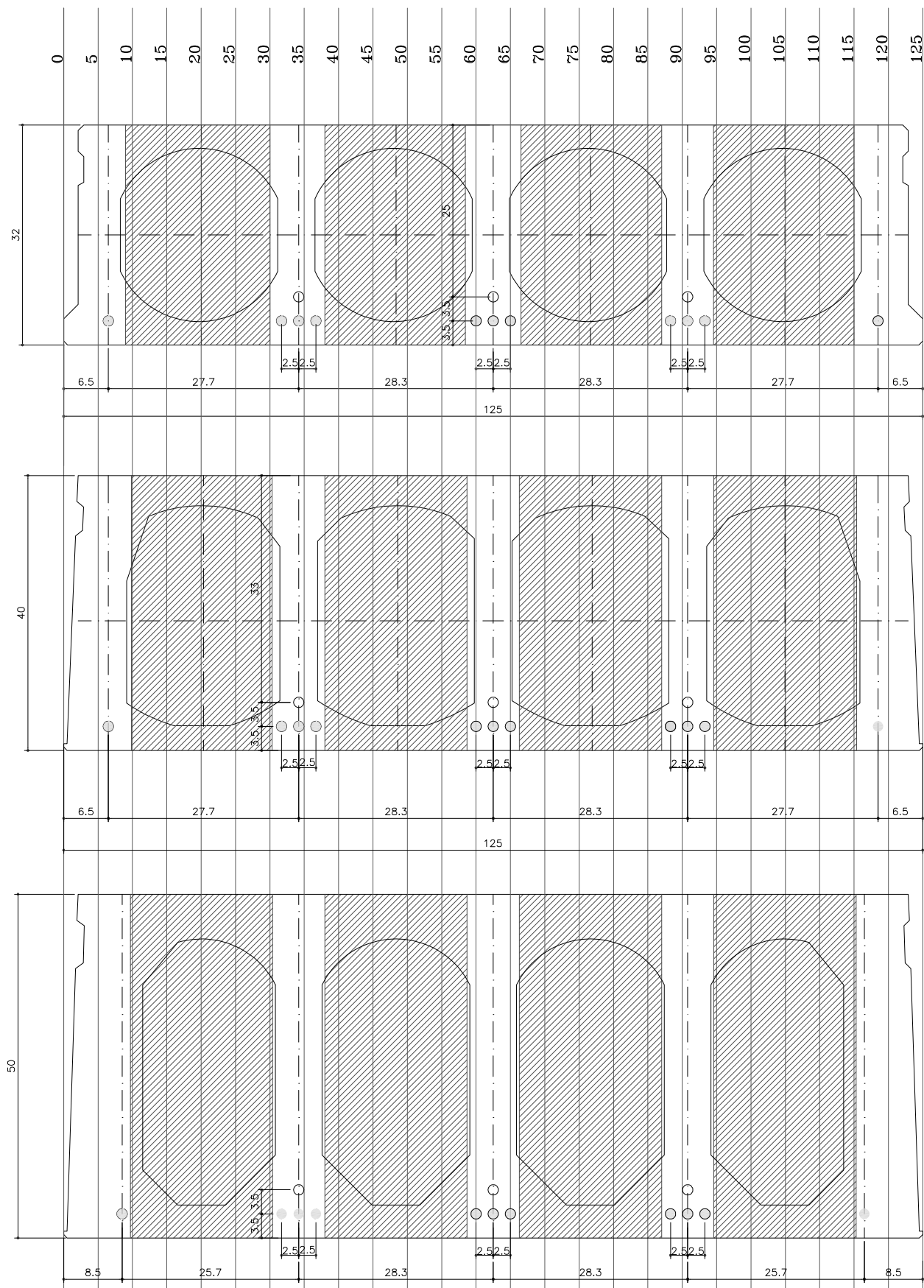


CASSOL PRÉ-FABRICADOS LTDA
PR 421 - Km 01 - CURITIBA - PR
(041) 2141-5900-projeto@cassol.ind.br

SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS LAJES ALVEOLARES

LA-21

SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS LAJES ALVEOLARES



OBS.: OS POSSÍVEIS RECORTES DAS LAJES DEVEM SER EFETUADOS NAS ÁREAS DE HACHURA INDICADAS NO DESENHO.

LAJES ALVEOLARES		ESCALA:	DATA: JUL/05	RESP: EVERSON
	CASSOL PRÉ-FABRICADOS LTDA PR 421 - Km 01 - CURITIBA - PR (041) 2141-5900-projeto@cassol.ind.br		SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS LAJES ALVEOLARES	
			LA-22	