



**GERALDO MAGELA GONÇALVES FILHO**  
**MATHEUS HENRIQUE MORATO DE MORAES**

---

**UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA  
COMPUTACIONAL DE ENXAME PARA  
DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES  
ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS E PROTENDIDAS**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**



**FENG**  
UAE de Engenharia

**CATALÃO  
2020**

**GERALDO MAGELA GONÇALVES FILHO  
MATHEUS HENRIQUE MORATO DE MORAES**

**UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL DE ENXAME PARA  
DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS E  
PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Wanderlei Malaquias Pereira Junior

Coorientadora: Prof. Prof. DSc. Sylvania Regina Mesquita de Almeida

**CATALÃO - GO**

**2020**

**GERALDO MAGELA GONÇALVES FILHO  
MATHEUS HENRIQUE MORATO DE MORAES**

**UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL DE ENXAME PARA  
DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS E  
PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 03 de dezembro de 2020.

Prof. DSc. Wanderlei Malaquias Pereira Junior  
Orientador – UFG/Regional Catalão

Profa. DSc. Sylvia Regina Mesquita de Almeida  
Coorientador – UFG/Regional Goiânia

Prof. DSc. Daniel de Lima Araújo  
Membro da Banca – UFG/Regional Goiânia

Prof. DSc. Romes Antonio Borges  
Membro da Banca – UFG/Regional Catalão

## AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. DSc. Wanderlei Malaquias Pereira Junior e a nossa coorientadora Prof<sup>ª</sup>. DSc. Sylvia Regina Mesquita de Almeida, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos membros da banca o Prof. DSc. Daniel de Lima Araújo e o Prof. DSc. Romes Antonio Borges.

Aos amigos que fizemos durante a graduação compartilharam conosco momentos bons e ruins. Desde momentos de festejos e alegrias, até os momentos de passar noites em claro para estudar, fazer trabalhos e executar projetos de pesquisa. Minha gratidão a vocês: Rafael Rodrigues, Priscila Kur, Lorrann Ferreira, Paulo Augusto, João Eduardo, Matheus Moura, Juarez Francisco, Pedro Emilio, Gabriel Mendes, Gabriel Alves, Guilherme Cabral, Gabriel Germano, Júlia Mota, Júlia Longo, Gilmar Fernandes, Murilo Mendes, Carol Alves, Victor de Castro, Wolney Lima, Ana Carolina, Gustavo Barbosa, Lucas Barros, Paula Luiza.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

*Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.*

*(Charles Chaplin)*

## RESUMO

GONÇALVES FIHO, G. M.; MORAES, M. H. M. **Utilização de inteligência computacional de enxame para dimensionamento ótimo de lajes alveolares e protendidas**. 2020. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão, 2020.

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação de técnicas de otimização como uma etapa inicial para o dimensionamento de lajes alveolares pré-fabricadas e protendidas com auxílio do Algoritmo Colônia de Vagalumes (ACV), considerando o cálculo médio das perdas de protensão imediatas e progressivas. As variáveis de projeto para a otimização da laje alveolar pré-fabricada e protendida são o diâmetro dos alvéolos, a área da seção transversal do cabo e a altura da laje. São consideradas também as condições de Estado Limite de Serviço e Estado Limite Último para os quais a peça está submetida como esforços de flexão, esforço cortante, normal, limitações construtivas e condições de falha. São avaliadas 37 restrições de projeto, objetivando atender a normativa vigente e a segurança estrutural para o dimensionamento da peça, utilizando a técnica de otimização como um selecionador inicial das variáveis de projeto do problema estudado.

**Palavras-chave:** Otimização. Protensão. Concreto Pré-fabricado. Lajes Alveolares. Algoritmo Colônia de Vagalumes.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Exemplos de elementos estruturais pré-fabricados.....	19
<b>Figura 2.2</b> – Laje pré-moldada para tabuleiro de ponte ( <i>Japan Highway Corporation</i> ).....	21
<b>Figura 2.3</b> - Vendas totais da indústria do pré-fabricado (2006-2019) .....	21
<b>Figura 2.4</b> - Produção anual de painéis alveolares em países da Europa em 1990 .....	22
<b>Figura 2.5</b> - Vários tipos de lajes de pré-fabricadas alveolares protendidas .....	22
<b>Figura 2.6</b> – Pista de protensão.....	23
<b>Figura 2.7</b> – Lançamento do concreto .....	24
<b>Figura 2.8</b> – Cura do concreto .....	24
<b>Figura 2.9</b> – Desmoldagem da peça .....	25
<b>Figura 2.10</b> – Içamento e transporte para o local de armazenamento .....	25
<b>Figura 2.11</b> – Armazenamento das peças .....	26
<b>Figura 2.12</b> – Representação dos veículos utilizados no transporte.....	27
<b>Figura 2.13</b> – Representação Autogruas.....	28
<b>Figura 2.14</b> – Representação Grua de torre .....	28
<b>Figura 2.15</b> – Representação Grua de pórtico .....	29
<b>Figura 2.16</b> – Representação Guindaste derrick.....	29
<b>Figura 2.17</b> – Colocação de painéis alveolares .....	30
<b>Figura 3.1</b> - Pseudocódigo do ACV .....	40
<b>Figura 3.2</b> - Topologia de comunicação entre vagalumes.....	41
<b>Figura 3.3</b> – Características geométricas do painel alveolar .....	42
<b>Figura 3.4</b> - Seção transversal de uma laje alveolar com a apresentação do diagrama de forças resistentes .....	50
<b>Figura 5.1</b> – Modelo da treliça 2D de 10 barras .....	60
<b>Figura 5.2</b> – Modelo da viga.....	62
<b>Figura 5.3</b> – Modelo da mola .....	65
<b>Figura 5.4</b> – Características geométricas dos painéis alveolares.....	67
<b>Figura 5.5</b> – Gráfico de variação de FO penalizada para cada tipo de Laje.....	68
<b>Figura 5.6</b> – Gráfico do comportamento da FO ao longo das iterações para laje tipo TBCC.....	69

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	32
<b>Tabela 2.2</b> - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	33
<b>Tabela 2.3</b> - Combinações de serviço.....	34
<b>Tabela 2.4</b> – Perdas de protensão. ....	37
<b>Tabela 3.1</b> – Perdas de protensão. ....	44
<b>Tabela 3.2</b> - Condições, combinações e limites para verificação de tensões normais.....	46
<b>Tabela 3.3</b> - Coeficientes $\delta_{gi}$ , $\delta_{qi}$ e $\Psi_{q1}$ em cada etapa da análise .....	47
<b>Tabela 3.4</b> - Valores do coeficiente $\gamma_f$ .....	47
<b>Tabela 4.1</b> – Parâmetros de projeto .....	57
<b>Tabela 4.2</b> – Variáveis de projeto .....	58
<b>Tabela 4.3</b> – Perda média para cada etapa.....	58
<b>Tabela 5.1</b> – Cargas aplicadas na treliça.....	60
<b>Tabela 5.2</b> – Resultados da otimização da área da seção transversal das barras para a treliça de 2D 10 barras. ....	61
<b>Tabela 5.3</b> – Parâmetros envolvidos no problema da viga. ....	63
<b>Tabela 5.4</b> – Resultados da otimização para a viga soldada.....	64
<b>Tabela 5.5</b> – Resultados da otimização para o problema da mola.....	66
<b>Tabela 5.6</b> – Parâmetros envolvidos no problema da viga. ....	67
<b>Tabela 5.7</b> – Resumo dos resultados da FO penalizada para a otimização para o problema da laje .....	68
<b>Tabela 5.8</b> – Resultados da otimização para o problema da laje .....	69
<b>Tabela 5.9</b> – Resultados da otimização para o problema da laje após a adequação de projeto .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Algoritmo Colônia de Vagalumes
CAA	Classe de agressividade ambiental
CF	Combinação Frequente
CP	Cimento Portland
CP	Concreto Protendido
CQP	Combinação quase permanente
CR	Combinação rara
ELS	Estado Limite de Serviço
ELS-D	Estado-limite de descompressão
ELS-DEF	Estado-limite de deformações excessivas
ELS-DP	Estado-limite de descompressão parcial
ELS-F	Estado-limite de formação de fissuras
ELS-W	Estado-limite de abertura das fissuras
ELU	Estado Limite Último
ELU-SN	Estado-limite último de solicitações normais
EUA	Estados Unidos da América
FO	Função Objetivo
NBR	Norma Brasileira
NPCA	<i>National Precast Concrete Association</i>
PCI	<i>Precast/Prestressed Concrete Institute</i>
RB	Relaxação baixa
RC	Restrições construtivas.
RELS	Restrições do ELS-D.
RELU	Restrições do ELU.
RFEND	Restrição de fendilhamento.
RN	Relaxação Normal
RTN	Restrições de tensões normais nas fases construtivas e nos ELS.
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	Área de concreto
$A_{c, \text{nerv}}$	Área da seção transversal da nervura
$A_p$	Área da seção transversal do cabo
$b$	Largura do painel
$b$	Espessura da viga
$b_w$	Soma da largura das nervuras
$cob$	Cobrimento da armadura
$D$	Diâmetro médio da bobina
$d$	Altura útil
$d$	Diâmetro da mola
$D_a$	Diâmetro dos alvéolos
$d_p$	Altura útil da seção em relação a armadura
$D_p$	Diâmetro da armadura de protensão
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
$E_{cs}$	Módulo de elasticidade secante do concreto
$e_p$	Excentricidade da armadura de protensão.
$E_p$	Módulo de elasticidade do cabo
$F_c$	Força normal resistente do concreto
$F_{cd}$	Resistência de cálculo do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto aos 28 dias
$f_{ckj}$	Resistência característica do concreto aos j dias de idade
$f_{ct,m}$	Resistência característica do concreto a tração
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica do concreto a tração
$F_{d,ser}$	Valor de cálculo das ações para combinações de serviço
$F_{gi,k}$	Ações permanentes em seu valor característico
$f_{ptk}$	Tensão característica de ruptura do aço;
$f_{pyk}$	Tensão característica do escoamento do aço;
$F_{q1k}$	Valor característico das ações variáveis principais diretas
$F_{qj,k}$	Ações variáveis em seu valor característico
$F_s$	Força resistente do aço protendido
$g$	Cargas permanentes
$g_{ed}$	Carga estática equivalente para a consideração do efeito dinâmico

$g_i(x)$	Restrições de projeto
$g_k$	Carga estática característica de natureza permanente
$h$	Altura da peça não considerando a capa estrutural
$h$	Espessura de solda
$h_c$	Altura da capa de regularização
$h_f$	Altura da mesa
$h_n$	Altura da nervura
$I_c$	Momento de inércia da seção do pré-fabricado
$k$	Coefficiente calculado pela razão entre o módulo resistente da nervura
$L$	Comprimento do painel
$L$	Largura da seção transversal
$L_0$	Comprimento inicial do cabo
$\ln$	Logaritmo natural
$l_{pt1}$	Valor inferior de projeto para o comprimento de transmissão
$l_{pt2}$	Comprimento de transmissão da força de protensão
$l_x$	Distância entre apoios da seção em análise
$M_c$	Momento atuante do concreto
$M_d$	Momento resistente de cálculo
$M_g$	Momento permanente característico
$M_{g1}$	Momento devido carga permanente parcela número 1
$M_{g2}$	Momento devido carga permanente parcela número 2
$M_{g3}$	Momento devido carga permanente parcela número 3
$M_{mesa}$	Momento atuante na mesa
$M_p$	Momento efetivamente transmitido ao concreto
$M_q$	Momento acidental característico
$M_{q1}$	Momento devido carga variável parcela número 1
$M_{q2}$	Momento devido carga variável parcela número 2
$M_{res}$	Momento resistente do concreto
$M_s$	Momento atuante do aço protendido
$n_a$	Número de alvéolos
$n_c$	Número de cordoalha
$P$	Carga atuante na ponta livre da viga soldada
$P(t)$	Força de protensão para cada etapa analisada
$P_0$	Força aplicada na nervura

$P_{\infty}$	Força de protensão após ocorrerem todas as perdas
$P_i$	Força inicial na armadura na operação de protensão
$q$	Cargas variáveis
rand	Número randômico aleatório no intervalo [0;1]
$r_{ij}$	Distância euclidiana entre os vagalumes i e j
$t$	Altura da viga
$t$	Idade efetiva do concreto, em dias
$t_0$	Idade fictícia do concreto dada a atuação de um carregamento permanente, em dias
$T_1$	Tempo do corte dos fios
$T_4$	Tempo para aplicação da capa
$T_5$	Tempo para aplicação do revestimento
$V_{Rd1}$	Esforço cortante resistente de cálculo 1
$V_{Rd2}$	Esforço cortante resistente de cálculo 2
$V_{Sd}$	Esforço cortante solicitante de cálculo
$W_i$	Módulo de resistência inferior
$W_{nerv}$	Módulo resistente da nervura
$W_s$	Módulo de resistência superior
$x$	Posição da linha neutra
$x$	Variáveis de projeto
$x_i$	Movimentação do vagalume i
$x_j$	Movimentação do vagalume j
$y_i$	Posição da linha neutra em relação a face inferior
$y_s$	Posição da linha neutra em relação a face superior
$z$	Braço de alanca
$\Delta t$	Tempo para estiramento do cabo em dias
$\mu$	Média
$\alpha$	Coefficiente que depende da velocidade de endurecimento do concreto.
$\alpha$	Fator de aleatoriedade.
$\alpha_c$	Coefficiente redutor das tensões resistentes do concreto.
$\alpha_e$	Parâmetro da natureza do agregado
$\beta$	Atratividade
$\beta_0$	Fator de atratividade.
$\beta_a$	Coefficiente de amplificação dinâmica.

$\gamma$	Fator de absorção de luz.
$\gamma_a$	Peso específico do aço da cordoalha
$\gamma_a$	Peso específico do aço da cordoalha
$\gamma_c$	Coefficiente de majoração do concreto
$\gamma_{cs}$	Peso específico do concreto
$\gamma_{cs}$	Peso específico do concreto
$\gamma_f$	Coefficiente de majoração de esforços
$\delta_{gi}$	Fator indicativo da presença ou ausência da carga permanente i
$\delta_{qi}$	Fator indicativo da presença ou ausência da carga variável i
$\epsilon_{cu}$	Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.
$\epsilon_s$	Deformação do aço
$\lambda$	Parâmetro que define o fator de profundidade da linha neutra
$\rho_l$	Taxa de armadura.
$\sigma$	Desvio padrão
$\sigma$	Tensão normal de projeto nas fases de análise no Estádio I.
$\sigma_{(cp,\infty)}$	Tensão no concreto na fibra do centro de gravidade da armadura
$\sigma_{(cp\_cisa)}$	Tensão de compressão do concreto
$\sigma_{(Pi,\infty)}$	Tensão resistente da armadura de protensão já descontada as perdas.
$\sigma_c$	Limite de compressão prescrito para a tensão normal no concreto.
$\sigma_{cP}$	Tensão no concreto pretendido
$\sigma_{p0}(t,t_0)$	Tensão na armadura ativa
$\sigma_{pi}$	Tensão inicial na armadura na operação de protensão
$\sigma_T$	Limite de tração prescrito para a tensão normal no concreto.
$\tau_{Rd}$	Tensão resistente de cálculo.
$\Psi_{(ELS-D)}$	Fator de redução da combinação para verificação do ELS-D.
$\Psi_{(ELS-F)}$	Fator de redução de combinação para verificação do ELS-F.
$\Psi(t, t_0)$	Coefficiente de relaxação
$\psi_1$	Ponderador protensão limitada e em caso de protensão completa
$\Psi_1$	Fator de redução de combinação frequente para ELS
$\Psi_2$	Fator de redução de combinação quase permanente para ELS
$\psi_A$	Ponderador para carga acidental
$\Psi_{q1}$	Fator de redução nas combinações de serviço

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivo geral .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	Concreto pré-fabricado e sua evolução.....	19
2.2	Critérios de projeto para peças de concreto pré-fabricadas e protendidas.....	30
2.2.1	Fases Transitórias .....	30
2.3	O projeto de peças em concreto protendido.....	31
2.4	Tensão de protensão inicial.....	36
2.5	Perdas de protensão .....	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
3.1	OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA DE ENXAME.....	38
3.1.1	Inteligência de Enxame .....	38
3.1.2	Algoritmo Colônia de Vagalumes .....	39
3.2	CRITÉRIOS PARA VERIFICAÇÃO DA PEÇA ESTRUTURAL .....	41
3.2.1	Características geométricas e mecânicas do painel .....	41
3.2.2	Carregamentos.....	44
3.3	RESTRICÇÕES DO PROJETO ÓTIMO .....	44
3.3.1	Verificações construtivas.....	44
3.3.2	Verificação de tensões normais nas fases construtivas e em serviço (ELS-SN) .....	45
3.3.3	Verificação do ELS de deformações (ELS-DEF) .....	48
3.3.4	Verificação de solicitações normais (ELU-SN) .....	49
3.3.5	Verificação de solicitações tangenciais (ELU-ST).....	53
3.3.6	Verificação de fendilhamento longitudinal .....	54
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO</b> .....	<b>56</b>
4.1.1	Previsão das perdas de protensão via modelos normativos.....	58

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
5.1	Calibração do Algoritmo através de problemas de <i>benchmark</i> .....	59
5.1.1	<i>Setup</i> padrão .....	59
5.1.2	Treliça 2D 10 barras .....	59
5.1.3	Viga Soldada .....	61
5.1.4	Mola.....	64
5.2	Análise da laje alveolar pré-fabricada e protendida.....	66
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	72
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da construção civil nota-se a constante evolução dos processos construtivos e sua interferência no que diz respeito ao ambiente de canteiro e aos demais processos que envolvem a construção de uma estrutura. Portanto, no atual cenário da construção civil essa evolução tem facilitado a implementação de métodos ou sistemas que permitam racionalização do processo produtivo, como, por exemplo, os sistemas pré-fabricados.

Serra *et al* (2005) afirmam que, no cenário econômico brasileiro, a construção civil detém aproximadamente 10% do PIB, empregando cerca de 10 milhões de trabalhadores, ocupando assim uma posição de destaque na economia.

Dentro dessa perspectiva de racionalização e tendência de aprimoramento fabril da construção civil, Pederiva Júnior (2009) afirma que as obras em elementos pré-fabricado têm ganhado destaque por possuir características como rapidez na execução, elevado controle de qualidade, otimização das formas das peças e planejamento de produção. Navarro-Rubio *et al* (2019) discutem os temas já citados e inclui em sua pesquisa o impacto ambiental e a viabilidade real da redução de tempo a partir de um estudo de caso de um edifício de sete pavimentos. Bull (1986) afirma que o uso de concreto pré-fabricado é uma técnica construtiva bem consolidada. A utilização em lajes, painéis e pilares, entre outros elementos estruturais, justifica-se visto o seu alto controle de qualidade, a produção em grande escala e uma alta velocidade de produção até seu transporte ao destino para aplicação no empreendimento, e em serviço. A tecnologia do concreto pré-fabricado é versátil, podendo ser aplicada a diversas peças estruturais como vigas, lajes, pilares e paredes (ELLIOTT *et al.*, 1998), abrangendo assim os elementos mais tradicionais de um sistema estrutural.

Dentre os elementos passíveis de pré-fabricação, as lajes alveolares são os elementos mais populares em todo o mundo (CASTILHO *et al.*, 2005), possuindo ampla utilização na construção de edificações, podendo essa ser de natureza residencial ou não. Tal sistema possui um comportamento estrutural eficiente para grandes vãos e cargas elevadas (ALBERO *et al.*, 2018), como, por exemplo, em ambientes industriais. Estima-se que até 2018 somente na Europa o estoque de lajes alveolares chegam a cerca de 1.000 milhão de metros quadrados (ALBERO *et al.*, 2018).

No projeto de peças pré-fabricadas e protendidas, como as lajes alveolares, o maior desafio do projetista está na determinação das dimensões e das características ideais do elemento estrutural. Em um projeto convencional, a estimativa dessas características é feita de maneira intuitiva e baseada na experiência (VASCONCELOS, 2014). Logo, o projeto desse

tipo de estrutura se torna um processo iterativo de busca das características que atendam os critérios de projeto das normas vigentes. Em análise numérica tal processo de busca é denominado como uma “caminhada randômica”. Em um ambiente de projeto estrutural esse modelo de análise pode ser ineficiente e com a taxa de sucesso baseada totalmente na experiência do projetista. Portanto, o uso de ferramentas de análise numérica baseadas em inteligência computacional torna-se um aliado interessante na melhoria de eficiência para o dimensionamento de peças estruturais. Tais ferramentas de análise são baseadas em um problema de otimização no qual se deseja determinar as variáveis que minimizam ou maximizam uma determinada função. Em projetos estruturais na maioria das vezes o que se deseja é a otimização do custo ou do peso total da estrutura (AZAD *et al.*, 2018).

No campo do projeto de estruturas, podem ser vistas diversas aplicações dos *frameworks* de otimização como, por exemplo, os trabalhos de Santos e Rodrigues (2010), Al-Gahtani *et al* (1995), Alberio *et al.*(2018) e Castilho *et al.* (2005) que aplicaram conceitos de otimização para redução de custo e peso de peças pré-fabricadas. Outras aplicações no campo da engenharia estrutural podem ser vistas em Azad *et al* (2018), Castilho (2003) e Navarro-Rubio *et al* (2019). Portanto, esse trabalho visa contribuir com a aplicação de modelos de otimização baseados em inteligência computacional, considerando as recomendações de dimensionamento de normas brasileiras como a NBR 14861 (ABNT, 2011) e a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Projetos de engenharia estrutural tem um elevado custo para a produção de peças estruturais, com isso a competitividade e a busca por um menor preço resultaram na necessidade da otimização tendo como objetivo a minimização do custo do sistema estrutural, criando assim o conceito de projeto ótimo. Cabe ao projetista desenvolver meios para elaborar um projeto que desempenhe sua função estrutural de forma segura e confiável.

A otimização é definida como o processo por meio do qual é obtido o melhor resultado de uma determinada variável por meio de uma busca sistematizada com objetivo de atender as condições que o limitam, as quais constituem as restrições do problema e delimitam o espaço de soluções viáveis. A qualidade da solução é medida pela função objetivo. As variáveis de projeto são as grandezas as quais busca-se otimizar, obtendo assim os valores de forma direta, enquanto os parâmetros de projeto são os valores que se mantém constante. Trata-se de um ramo de pesquisa que é aplicável a inúmeros problemas que vão da área de engenharia à análise econômica de projetos e execução.

Segundo Vasconcelos (2014), a otimização é um direcionamento de uma busca sistematizada para uma solução ótima, sendo executado de forma automatizada e obtendo a melhor solução para o problema sem a necessidade da pesquisa da totalidade das soluções.

Atualmente se vê grande desenvolvimento na área de otimização desde o final do século passado, sendo cada vez mais ampla a sua presença nas áreas de engenharia (CASTILHO, 2003). A presença da otimização na engenharia mostra a importância na busca de projetos ótimos, econômicos, eficientes e seguros, fornecendo resultados cada vez mais precisos e atendendo, assim, um mercado mais rigoroso e competitivo.

Com a evolução da tecnologia e por consequência da computação, foi possível desenvolver métodos para a obtenção de melhores resultados através de criação de *softwares* e algoritmos de otimização aplicados a engenharia. O desenvolvimento de algoritmos mostrou com bom desempenho em relação aos métodos manuais de cálculo, devido ao processo de cálculo ser um processo extenso, cria-se uma rotina de cálculo para que o mesmo possa ser executado por meio de algoritmos, criando laços de repetição juntamente com um modelo de comportamento das variáveis de projeto, buscando, assim, um resultado ótimo.

Atualmente na engenharia há inúmeros exemplos de otimização em diversas áreas, podendo citar os vários softwares de otimização estrutural presentes no mercado e uma ampla área de pesquisa com diferentes métodos de otimização como o algoritmo colônia de vagalumes (ACV) utilizado nesse trabalho e que foi proposto por Yang (2010a), o *Branch and Bound (B&B)* utilizado na dissertação de mestrado de Vasconcelos (2014) e inúmeros outros, demonstrando a necessidade da otimização e seus métodos no atual cenário de engenharia estrutural.

## 1.1 Objetivos

Nessa seção são descritos os objetivos gerais desse trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

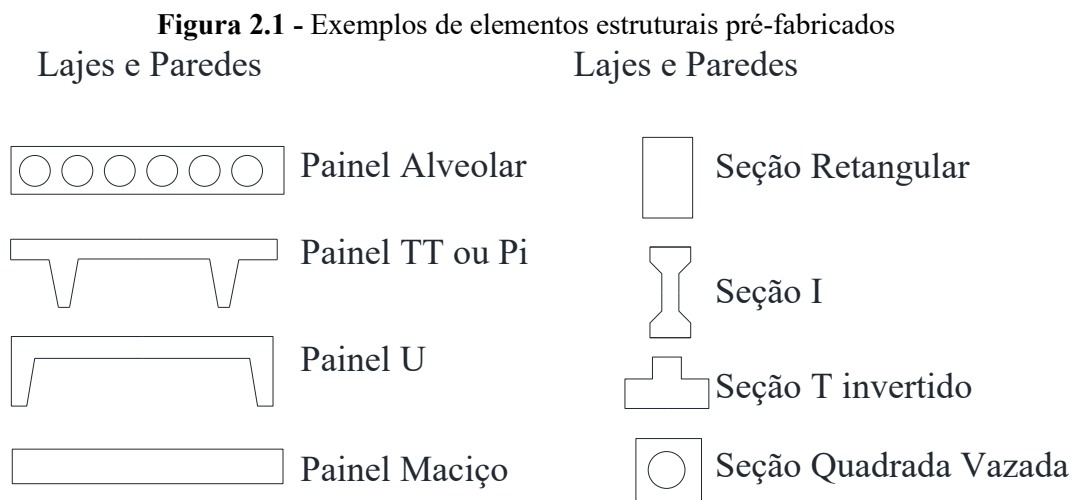
O presente trabalho tem como objetivo geral utilizar algoritmos de otimização, baseado em inteligência computacional, para estimativa inicial dos parâmetros do projeto estrutural de uma peça pré-fabricada. A Função Objetivo utilizada para esse processo de otimização será uma função peso com restrições relacionadas ao projeto no Estado Limite Último e de Serviço.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são descritos conceitos teóricos relacionados ao dimensionamento e verificação de peças pré-fabricadas, além dos conceitos relativos a otimização e sua correlação com a engenharia estrutural.

### 2.1 Concreto pré-fabricado e sua evolução

O concreto pré-fabricado, segundo a definição da NBR 9062 (ABNT, 2017), são elementos pré-fabricados moldados previamente e fora do local definitivo de utilização da estrutura, em condições de alto rigor de controle tecnológico e de qualidade. Pode-se entender como uma metodologia construtiva, onde partes ou a obra como um todo, é moldada fora do seu local definitivo de utilização da peça. Na Figura 2.1 são apresentados exemplos de elementos estruturais pré-fabricados.



**Fonte:** Adaptado de El Debs (2017)

Segundo Bittarello (2013), não é possível precisar o início da pré-fabricação. Porém, pode-se inferir que a utilização do pré-fabricado deu-se com a invenção do concreto armado (AURICH, 2001).

De acordo com Serra *et al.* (2005), o nascimento do sistema de pré-fabricação se identifica com a história da industrialização, que está relacionada com a evolução da mecanização, por consequência a evolução do sistema de produção e a mudança da produção manufaturada para a produção industrializada. Contudo, sua evolução não está somente ligada

aos processos produtivos de fabricação, mas também aos processos de montagem, controle tecnológico e qualidade do concreto, transporte e desenvolvimento de materiais mais resistentes. Assim como descreve Serra *et al.* (2005), para se entender o progresso da evolução do processo de pré-fabricação de concreto deve-se entender o surgimento, e todo o contexto da evolução da industrialização no mundo.

Avaliando a evolução dos pré-fabricados no Brasil, ela se deu de forma mais lenta do que em outros países, que devastados pela segunda guerra mundial necessitaram de grandes reconstruções em larga escala.

Segundo Serra *et al* (2005) a primeira grande obra brasileira com a utilização de elementos pré-fabricadas no Brasil foi o Hipódromo de Gávea, executado pela empresa dinamarquesa Christian-Nielsen, que se localiza no Rio de Janeiro. Essa obra foi desenvolvida com a aplicação de estacas de fundação e das cercas no entorno com elementos pré-fabricados.

Mesmo apresentando uma obra com elementos pré-fabricados no ano de 1926 a indústria do sistema pré-fabricado teve um maior crescimento no fim da década de 50 (VASCONCELOS, 2002), quando a Construtora Mauá, com especialidade em construções industriais, trabalhou na execução de vários galpões em estruturas pré-fabricadas, na cidade de São Paulo.

Com a maior aceitação do mercado devido a velocidade de construção, as estruturas com peças pré-fabricadas passaram a ter sua utilização não só em galpões, mas também em edifícios de multipavimentos com estruturas reticuladas (VASCONCELOS, 2002).

Após a melhor aceitação das peças pré-fabricadas e a demonstração da eficiência das mesmas, desde a sua implantação foram apresentados altos e baixos no mercado, principalmente devido a incentivos governamentais para o mesmo. Atualmente verifica-se a crescente utilização das mesmas em residências, edifícios comerciais, hotéis e edifícios industriais, devido a necessidade de obras com menores tempos de execução, visto cenário brasileiro.

Assim como afirma Bull (1986) a utilização de unidades de pavimentos de concreto pré-fabricado na Europa, nos Estados Unidos da América (EUA), no Japão e na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) foram desenvolvidas principalmente em áreas de galpões, estacionamento e edificações. Dentre essas utilizações pode-se destacar a de Hanna *et al.* (1976) que descreve variados métodos de dimensionamento aplicados em projetos de estruturas pré-fabricado e protendidas, juntando detalhes de conjuntos de vários projetos utilizados em construções nos EUA.

A aplicação do pré-fabricado é muito ampla. Ralls *et al.* (2005) investigou diversos processos de fabricação em busca da obtenção de informações quanto a métodos construtivos aplicados a construção de pontes. Na Figura 2.2 é apresentado o sistema *Full-Depth Prefabricated Concrete Decks* usado no Japão e que é executado com laje pré-fabricada.

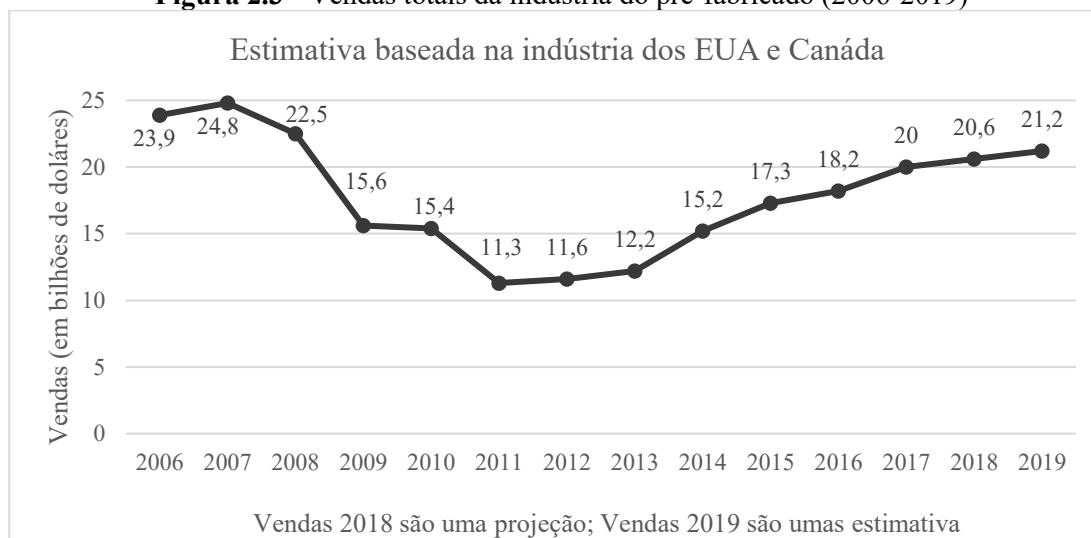
**Figura 2.2** – Laje pré-moldada para tabuleiro de ponte (*Japan Highway Corporation*)



**Fonte:** Russell *et al.* (2005)

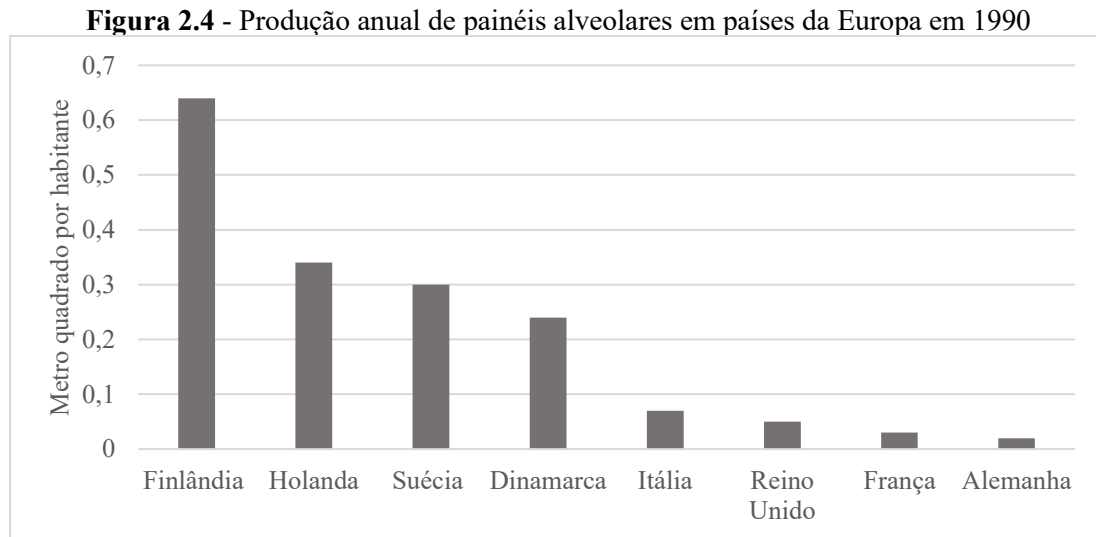
O concreto pré-fabricado vem sendo utilizado de maneira abrangente em todo o mundo e movimentando tanto a economia quanto a indústria da construção civil. A *National Precast Concrete Association* (2019) prevê um aumento de 3% no consumo de concreto pré-fabricado em relação a 2018, estimando a movimentação de US\$ 21,2 bilhões em vendas anuais de concreto pré-fabricado.

**Figura 2.3** - Vendas totais da indústria do pré-fabricado (2006-2019)



**Fonte:** Adaptado NPCA (2019)

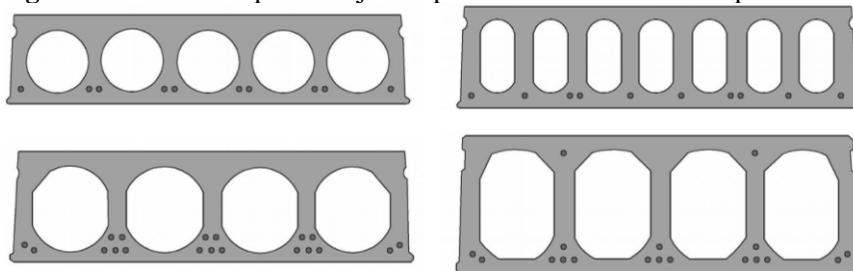
Segundo El Debs (2017) as peças pré-fabricadas com maior utilização são os painéis alveolares. Ele afirma que sua utilização é massiva em países Norte-Americanos e Europeus. Em 1990, a produção média foi estimada em 150 milhões de metros cúbicos por ano. O demonstrativo dos indicadores de produção anual por habitante de alguns países da Europa é apresentado na Figura 2.4.



**Fonte:** Acker (1990) *apud* <sup>1</sup> (EL DEBS, 2017)

As lajes alveolares pré-fabricadas e protendidas têm múltiplos furos de seção circular ou elíptica, como mostrado na Figura 2.5, permitindo assim uma peça com rigidez elevada porém com peso próprio reduzido e conseqüente economia de materiais em sua fabricação.

**Figura 2.5 - Vários tipos de lajes de pré-fabricadas alveolares protendidas**



**Fonte:** (PARK *et al.*, 2019)

Os painéis alveolares podem ser utilizados em diversas formas, desde a aplicação em sistemas de lajes ou cobertura até a composição de paredes de vedação, fachada e tabuleiros de pontes (PCI, 2015).

<sup>1</sup> ACKER, Arnold Van. **Prefabrication of concrete structures**. Delft, Holand: Delft, 1990

Um exemplo de produção de peças pré-fabricadas com utilização de técnicas de protensão são a produção de lajes alveolares protendidas. O processo de produção de lajes alveolares protendidas, de acordo com Pinheiro *et al* (2017), é realizado em etapas que engloba os procedimentos entre a execução da peça e a execução da ligação definitiva. Tais procedimentos podem ser descritos como a produção da peça em um pátio, armazenamento temporário, transporte da fábrica ao local de instalação, montagem final e realização das ligações.

Segundo El Debs (2017) devem ser desenvolvidas atividades preliminares antes de efetivamente começar a produção da peça, que são o armazenamento de matéria-prima, dosagem e mistura do concreto, preparo da armadura (corte e dobramento) e a montagem da armadura.

Inicialmente é feita a limpeza da pista de concretagem com objetivo de remover qualquer resíduo sólido ou líquido presente evitando assim a possibilidade de comprometer características físicas ou visuais do elemento. Após a limpeza da pista é feita a disposição da armadura, os cabos de protensão são posicionados sobre a pista respeitando os parâmetros de protensão.

Em seguida do posicionamento é executada a aplicação da tensão de tração nos cabos por meio do aparelho tensor (macaco hidráulico), cujos valores são definidos em projeto. A ancoragem das cordoalhas é o processo seguinte com objetivo de manter os cabos tensionados.

O processo construtivo prevê a concretagem em faixas em pista de protensão industrial Figura 2.6 e Figura 2.7.

**Figura 2.6 – Pista de protensão**



**Fonte:** (MARKA, 2019)

**Figura 2.7 – Lançamento do concreto**

Fonte: (MARKA, 2019)

Após a concretagem a peça segue para a cura do concreto. Normalmente cobre-se a peça para evitar a evaporação da água, conforme apresentado na Figura 2.8. Na desmoldagem da peça ocorre a liberação da força de protensão, assim como a retirada do elemento da fôrma. A Figura 2.9 apresenta a desmoldagem das peças pré-fabricadas. Para garantir que o concreto atingiu a resistência necessária com determinado tempo de cura são feitos ensaios de compressão.

Os cortes transversais das lajes são efetuados após o processo de cura do concreto. O processo é feito a partir de uma serra que se desloca sobre toda a pista de protensão.

**Figura 2.8 – Cura do concreto**

Fonte: (BASTOS, 2018)

**Figura 2.9** – Desmoldagem da peça



**Fonte:** (BASTOS, 2018)

Fechando as atividades internas (ocorridas no local de fabricação) tem-se o transporte interno (geralmente feito por içamento da peça) da pista de protensão para à área de armazenamento, assim como mostrado na Figura 2.10.

**Figura 2.10** – Içamento e transporte para o local de armazenamento



**Fonte:** (MARKA, 2019)

**Figura 2.11** – Armazenamento das peças

**Fonte:** (MARKA, 2019)

Para projetos de estruturas protendidas utiliza-se para verificações os parâmetros definidos pela norma vigente. Tais verificações envolvem a aplicação das cargas atuantes no sistema, verificando os estados limites.

Iniciando com a aplicação de um alongamento prévio das armaduras, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) para estruturas protendidas tem-se 3 classificações: concreto com armadura ativa pré-tracionada, concreto com armadura ativa pós tracionada e concreto com armadura ativa pós tracionada sem aderência, a definição dos mesmos é descrita a seguir.

Concreto com armadura ativa pré-tracionada, pode ser definido também como protensão com aderência inicial, é o processo de protensão no qual é feito um pré-alongamento dos cabos com a utilização de apoios sem a dependência do elemento estrutura, processo anterior ao lançamento do concreto, após o endurecimento do concreto os apoios nas extremidades podem ser removidos.

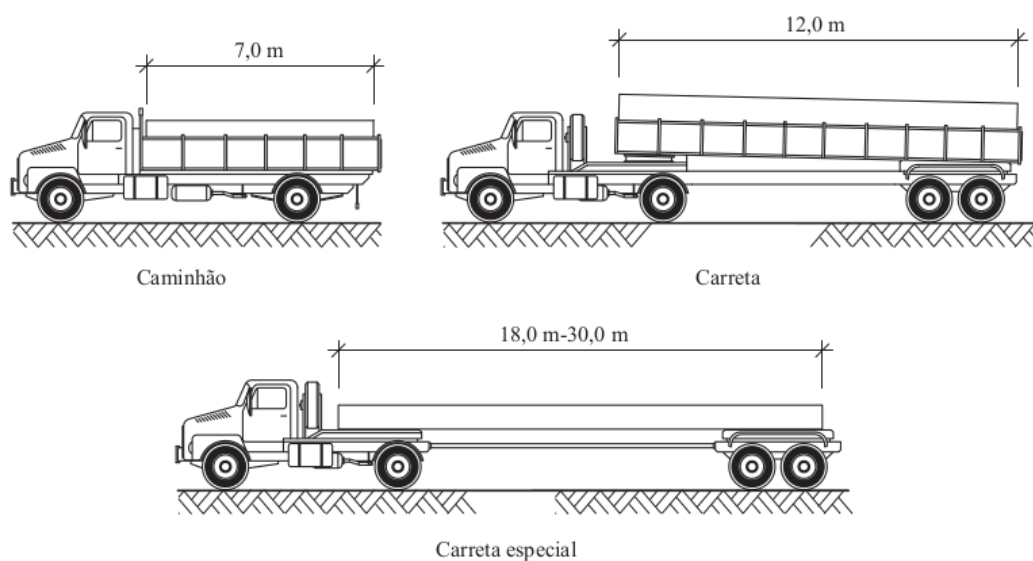
Concreto com armadura ativa pós-tracionada sendo também definido como protensão com aderência posterior, é o processo de protensão onde o pré alongamento da armadura ativa é aplicado após a peça já estar endurecida, com a utilização de apoios feitos no próprio elemento estrutural, a aderência da armadura com a peça é feita posteriormente a partir da injeção de concreto de alto desempenho das bainhas.

Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência, que é definido por protensão sem aderência é o processo de protensão onde o pré alongamento da armadura ativa

é aplicado após a peça já estar endurecida, porém não é criada aderência posterior, sendo a armadura ligada ao concreto apenas em pontos específicos.

Após finalizada a etapa na fábrica, é iniciada os processos para o transporte da peça até sua chegada na obra, conforme El Debs (2017) os transportes de peças podem ser classificados em rodoviário, ferroviário e marítimo. O transporte mais difundido no Brasil é o transporte rodoviário, que pode ser feito por caminhões, carretas ou carretas especiais.

**Figura 2.12** – Representação dos veículos utilizados no transporte

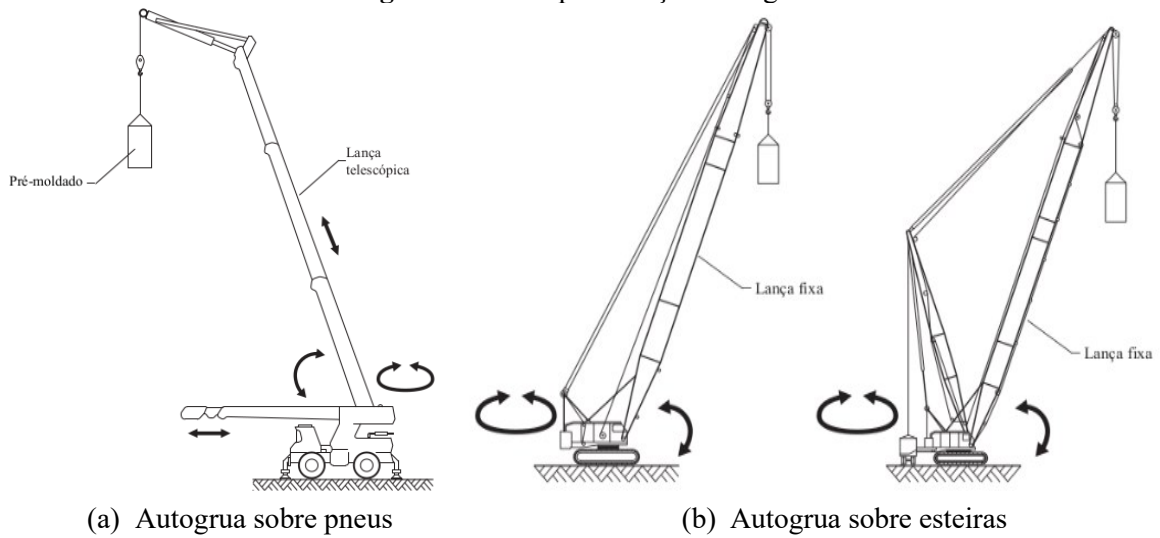


**Fonte:** (EL DEBS, 2017)

Com chegada da peça na obra inicia-se o processo de montagem, o processo de montagem de estruturas de concreto pré-fabricado deve ser planejado e projetado, que necessita ser avaliado com antecedência. Para a montagem dos elementos pré-fabricados é necessário utilização de equipamentos de montagem, que executam operações governadas e programadas.

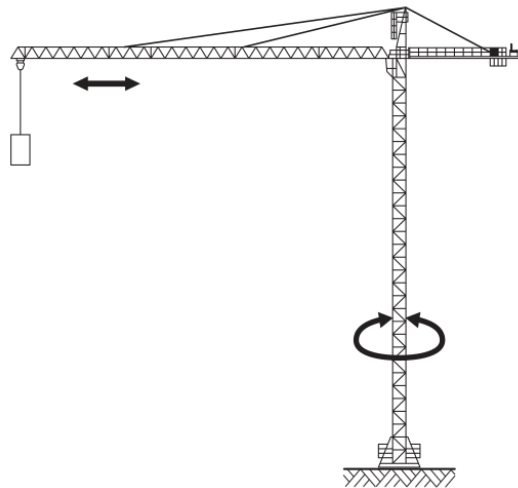
Os equipamentos de uso comum têm-se a autogrua (guindaste sobre plataforma móvel) apresentada na Figura 2.13 e a grua de torre (guindaste de torre) apresentada na Figura 2.14.

**Figura 2.13 – Representação Autogrúas**



Fonte: (EL DEBS, 2017)

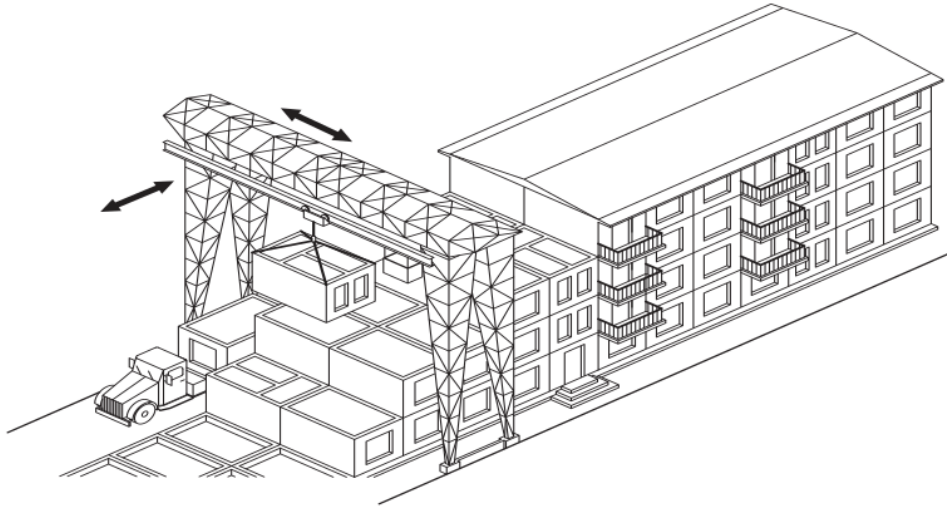
**Figura 2.14 – Representação Grúa de torre**



Fonte: (EL DEBS, 2017)

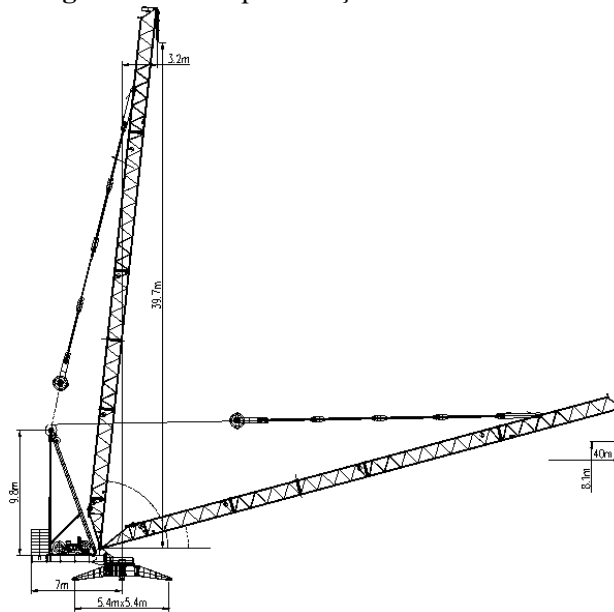
Para obras de uso restrito tem-se a grúa de pórtico (guindaste de pórtico) apresentada na Figura 2.15 e guindaste derrick apresentada na Figura 2.16.

**Figura 2.15** – Representação Grua de pórtico



**Fonte:** (EL DEBS, 2017)

**Figura 2.16** – Representação Guindaste derrick



**Fonte:** (HUAXIA GRUOP, 2019)

Quanto à disposição final na obra, deve ser feito em justaposição assim como mostrado na Figura 2.17. Admite-se que, em serviço, o painel trabalhe em protensão completa ou limitada.

**Figura 2.17** – Colocação de painéis alveolares



**Fonte:** R4 Tecno (2019)

## 2.2 Critérios de projeto para peças de concreto pré-fabricadas e protendidas

Segundo El Debs (2017), para se executar uma construção que receba elementos pré-fabricados a mesma deve ser projetada a partir de sua fase inicial, já previstos os métodos construtivos a serem utilizados. Onde é necessário o entendimento de todas as etapas que envolvem o projeto de estruturas pré-fabricadas (GUSTANI, 2017).

Os critérios para dimensionamento de peças pré-fabricadas como as lajes alveolares tem como base as prescrições de três normativas: NBR 14861 (ABNT, 2011), NBR 9062 (ABNT, 2017), NBR 6118 (2014). Em relação a pré-fabricação é necessário avaliar as situações transitórias que são fabricação nas pistas, armazenamento, transporte e montagem dos elementos. A consideração de protensão em projeto, devem atender as condições definidas em função do grau de protensão do projeto, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) os níveis de protensão são: de nível 1 (concreto com protensão parcial), nível 2 (concreto com protensão limitada) e nível 3 (com protensão completa).

### 2.2.1 Fases Transitórias

As principais preocupações quanto as fases transitórias são a determinação dos esforços atuantes na estrutura em decorrência das situações de serviço. A seguir são descritas algumas considerações a respeito desses critérios.

Segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017), os dispositivos de içamento, manuseio e montagem, que estiverem em contato com direto com a superfície do elemento ou ancorados no concreto necessitam, para considerações de projeto uma solicitação de cálculo no mínimo igual a quatro vezes a solicitação obtida para o peso próprio do elemento.

Considerando o transporte da peça pré-fabricada a NBR 9062 (ABNT, 2017) recomenda que seja empregado aos cálculos um coeficiente de amplificação dinâmica, caso não seja possível efetuar a análise dinâmica do transporte.

O coeficiente a ser empregado resultante da análise dinâmica da peça é expresso por  $\beta_a$ , que considera de forma aproximada a executar uma análise estática equivalente, o mesmo varia de 0,8 a 3 o que muda de acordo com as condições de manuseio, transporte e montagem dos elementos, como descrito na NBR 9062 (ABNT, 2017), no item 5.3.2.2.

De qualquer forma em qualquer projeto de estruturas de concreto deve-se verificar o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS) das peças, em situação de uso ou situação transitória, garantindo assim resistência, estabilidade e segurança conforme previsão da NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 9062 (ABNT, 2017).

### 2.3 O projeto de peças em concreto protendido

Como citado há três tipos de classificação, quanto ao nível de protensão onde é escolhido o tipo de protensão a ser empregado a partir da classe de agressividade, as exigências relativas à fissuração e a finalidade da estrutura. A classe de agressividade são os fatores aos quais a estrutura estará sujeita quando concluída como ações físicas e químicas atuantes na estrutura, as classes são apresentadas na NBR 6118 (ABNT, 2014) demonstradas na Tabela 2.1, onde relaciona o grau de risco com a deterioração da estrutura. A partir dessa classificação são definidos os parâmetros de durabilidade e a proteção da armadura de acordo com o nível de fissuração da estrutura apresentado na Tabela 2.2.

**Tabela 2.1** - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup> Industrial <sup>a, b</sup>	Grande
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a, b</sup> Respingos de maré	Elevado

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

**Fonte:** Adaptado NBR 6118 (ABNT, 2014)

**Tabela 2.2** - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAAII e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	Combinação frequente
		ELS-F	
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
		Verificar as duas condições abaixo	Combinação rara
		ELS-F	
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

**Fonte:** Adaptado NBR 6118 (ABNT, 2014)

Definidos os parâmetros de protensão as verificações de peças protendidas deveram ser realizadas segundo o critério do método dos estado-limite conforme descrição da NBR 8681 (ABNT, 2003). Essa verificação é realizada em duas etapas, são elas: Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), que definem os limites mínimos e máximos de funcionamento de uma estrutura para atender aos requisitos de segurança, resistência e desempenho.

Com os estados limites definidos podem-se iniciar as considerações de projeto relativa aos carregamentos, esforços e demais verificações estabelecidas pelas normativas vigentes.

As combinações últimas e de serviço a serem utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Combinações de serviço.**

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} F_{qjk}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal $F_{q1}$ é tomada com seu valor frequente $\Psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum \Psi_{2j} F_{qjk}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal $F_{q1}$ é tomada com seu valor característico $F_{q1k}$ e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\Psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + F_{q1k} + \sum \Psi_{1j} F_{qjk}$

**Fonte:** Adaptado NBR 6118 (ABNT, 2014)

Sendo:

- $F_{d,ser}$  Valor de cálculo das ações para combinações de serviço;  
 $F_{q1k}$  Valor característico das ações variáveis principais diretas;  
 $\Psi_1$  Fator de redução de combinação frequente para ELS;  
 $\Psi_2$  Fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

Devem ser analisadas também as propriedades do concreto em função do tempo. A principal análise é sobre as propriedades de resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade do concreto.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), em casos em que não se tenha resultados experimentais, para verificações anteriores aos 28 dias, deve-se adotar como método estimativo da resistência a compressão a equação (2.1), onde  $\beta_1$  é dado pela equação (2.2).

$$f_{ckj} = \beta_1 f_{ck} \quad (2.1)$$

$$\beta_1 = e^{\left[1 - \left(\sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]} \quad (2.2)$$

Sendo:

- $f_{ckj}$  Resistência característica do concreto aos j dias de idade;  
 $f_{ck}$  Resistência característica do concreto aos 28 dias;  
t Idade efetiva do concreto, em dias.

No cálculo da equação (2.2), adotam-se os seguintes valores para s:

s=0,38 – para concreto de cimento CP III e IV;

s=0,25 – para concreto de cimento CP I e II;

s=0,20 – para concreto de cimento CP V-ARI.

Já para a verificação da resistência a tração, a NBR 6118 (ABNT, 2014), é admitido para a situação de falta de ensaios que o valor característico seja dado pelas equações (2.3) e (2.4), que tem validade para ensaios com  $f_{ckj} \geq 7 \text{ MPa}$ .

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_{ck}) \quad 50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (2.5)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.6)$$

Sendo:

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

$f_{ctk,inf}$  Resistência característica inferior do concreto a tração;

$f_{cd}$  Resistência de cálculo do concreto.

A última propriedade também importante a ser considerada é o módulo de elasticidade. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), estima-se o valor utilizando a equação (2.7). E o módulo de elasticidade secante a ser utilizado é calculado pela equação

$$E_{ci} = \alpha_e 5600 f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (2.8)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (2.9)$$

Sendo:

$E_{ci}$  Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

$E_{cs}$  Módulo de elasticidade secante do concreto;

$\alpha_e$  Parâmetro da natureza do agregado.

Segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017) a liberação dos elementos de concreto pré-fabricados protendidos por pré-tração das armaduras ancoradas nas mesas ou pistas de protensão é a operação de alívio da fixação das ancoragens dos fios ou cabos aderentes e o seccionamento destes entre as extremidades de elementos contínuos no caso de fabricação em linha. Esta operação deve ser executada com meios apropriados que evitem transmissão de choques aos fios ou cabos ao concreto e somente após comprovação de que a resistência efetiva

do concreto à compressão tenha atingido o valor indicado no projeto para esta fase, não admitindo valor inferior a 21 MPa.

#### 2.4 Tensão de protensão inicial

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores característicos da resistência ao escoamento ( $f_{pyk}$ ), a resistência a tração ( $f_{ptk}$ ) e do alongamento após a ruptura das cordoalhas, devem atender aos mínimos valores especificados na NBR 7483 (ABNT, 2008a) assim como a NBR 7482 (ABNT, 2008b).

Para armaduras pré-tracionadas, e aço de relaxação normal utilizasse a equação (2.10) e para baixa relaxação a equação (2.11):

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 \cdot f_{ptk} \\ 0,87 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 \cdot f_{ptk} \\ 0,82 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (2.11)$$

Para armaduras pós-tracionadas, e aço de relaxação normal utilizasse a equação (2.12) e para baixa relaxação a equação (2.13):

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,90 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,85 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (2.13)$$

Para aços CP-85/105, fornecidos em barras, os limites assumem os valores da equação (2.14):

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,72 \cdot f_{ptk} \\ 0,88 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (2.14)$$

Dessa forma a força de protensão inicial ( $P_i$ ) é calculada pela equação (2.15).

$$P_i = A_p \sigma_{pi} \quad (2.15)$$

Sendo:

$f_{ptk}$  Tensão característica de ruptura do aço;

$f_{pyk}$  Tensão característica do escoamento do aço;

$P_i$  Força inicial na armadura na operação de protensão;

$\sigma_{pi}$  Tensão inicial na armadura na operação de protensão.

## 2.5 Perdas de protensão

Os projetos de estruturas protendidas em geral tem que prever as perdas da força de protensão em relação ao seu valor inicial aplicado pelo aparelho tensor. Essas perdas podem ser classificadas em relação ao tempo (perdas imediatas ou perdas progressivas ver Tabela 2.4) e quanto à causa (ancoragem, relaxação do aço, fluência do concreto, retração, encurtamento do concreto).

Para efeito da análise do presente trabalho foram adotadas as seguintes perdas:

- Perdas por deslizamento e acomodação da ancoragem;
- Perdas por relaxação do aço;
- Deformação imediata do concreto;
- Fluência do concreto;
- Retração do concreto.

**Tabela 2.4** – Perdas de protensão.

Tipo de perda	Classificação quanto a tempo
Ancoragem	Imediata
Relaxação da armadura	Imediata
Deformação Imediata	Imediata
Retração do concreto	Progressiva
Fluência do concreto	Progressiva
Relaxação da armadura com o tempo	Progressiva

**Fonte:** Próprios autores

As perdas de protensão podem ser estimadas ou calculadas. O detalhamento das perdas de protensão são descritos no item 9.6.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Existindo a possibilidade de se executar um cálculo detalhado seguindo todos os passos descritos na norma supracitado ou estimar as perdas baseado em outras bibliografias como exemplo, Vasconcelos (2014) utilizou valores estimados e Alves (2018) valores de perda calculados.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada para elaboração deste trabalho;

#### 3.1 OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA DE ENXAME

O presente trabalho tem por objetivo analisar e avaliar a utilização do Algoritmo Colônia de Vagalume (ACV) para a otimização de lajes alveolares, o algoritmo demonstra resultados satisfatórios, como exposto por Carvalho (2018) no desenvolvimento de um Algoritmo de Otimização com utilização do ACV, o mesmo demonstra ter bom desempenho em análises de estruturas como exposto por Gandomi *et al* (2011), porém o que mais se aproxima do objetivo desse trabalho é mostrado por Sheikholeslami *et al* (2016), que mostra a otimização de estruturas de concreto, afirmando assim a aplicabilidade do ACV para cálculos dessas estruturas.

##### 3.1.1 Inteligência de Enxame

Dugenci (2019) define que o termo inteligência de enxame (em inglês *swarm intelligence*) se refere ao comportamento coletivo de sistemas descentralizados e auto organizados. Busca-se replicar o comportamento coletivo de enxame utilizando dos colaboradores individuais e seu esforço coletivo para obter uma solução útil. Bonabeau *et al.* (1999) afirma que a inteligência abrange os algoritmos ou dispositivos distribuídos de solução de problemas bio-inspirados em comportamento de colônia de insetos sociais e outras sociedades animais. A inteligência de enxame é a propriedade de um sistema de indivíduos, que exibem comportamento coletivo inteligente (WHITE; PAGUREK, 2000). As principais propriedades da inteligência coletiva segundo Zuben e Attux (2003) define que os agentes, assim como: a proximidade entre os agentes, tem a capacidade de interagir entre si e influenciar seu comportamento; os indivíduos carecem da capacidade de avaliar seus comportamentos e propriedades; a diversidade permitindo os indivíduos do sistema reagem a situações inesperadas; quanto a sua estabilidade em qual nem todas as variações do ambiente devem afetar o comportamento dos agentes; sua adaptabilidade que é a capacidade de se adequar a variações do ambiente.

Soto (2018) afirma que a abordagem de utilização de inteligência de enxame tem sido utilizado para resolver problemas de engenharia. Assim como aplicação dos métodos do ACV para dimensionamento ótimo de lajes alveolares pré-fabricadas e protendidas.

### 3.1.2 Algoritmo Colônia de Vagalumes

Atribui-se o desenvolvimento do ACV a Xin-She Yang da Universidade de Middlesex em 2007. Yang (2010c) define algumas primícias estabelecidas são elas:

- a) Todos os vagalumes têm um único sexo e podem ser atraídos por outro vagalume independente do seu sexo;
- b) A atratividade de cada vagalume proporcional a seu brilho, reduzindo de acordo com que a distância entre eles aumenta. Em caso da inexistência de um vagalume mais brilhante, ele se moverá aleatoriamente;
- c) A intensidade luminosa é determinada pela função objetivo.

A equação mostra a movimentação do vagalume  $i$  que é atraído por outro vagalume  $j$  é determinado pela equação (3.1).

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

$x_i$  é a movimentação do vagalume  $i$ ;

$x_j$  é a movimentação do vagalume  $j$ ;

$\beta_0$  é o fator de atratividade;

$\gamma$  é o fator de absorção de luz;

$r_{ij}$  é a distância euclidiana entre os vagalumes  $i$  e  $j$  (Ver equação (3.3));

$\alpha$  é o fator de aleatoriedade;

rand é número randômico aleatório no intervalo  $[0;1]$ .

A atratividade entre os vagalumes são proporcionais a intensidade luminosa vista pelos vagalumes adjacentes, pode-se definir a atratividade  $\beta$  do vagalume pela equação (3.2), podendo o fator de absorção de luz  $\gamma$  pode variar de 0,01 a 100 assim como afirma Gandomi *et al.* (2011):

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma r_{ij}^2} \cong \frac{\beta_0}{(1 + \gamma r_{ij}^2)} \quad (3.2)$$

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_i - x_j)^2} \quad (3.3)$$

Sendo:

$\beta$  é a atratividade.

O terceiro termo da equação (3.1) diz respeito a parcela probabilística da otimização onde o parâmetro  $\alpha$  comumente empregado entre valores entre 0 e 1 assim como descreve Yang (2010c)., diz respeito a parcela probabilística da otimização onde o parâmetro  $\alpha$  comumente empregado entre valores entre 0 e 1 assim como descreve Yang (2010c). A Figura 3.1 apresenta o Pseudo-Código do ACV e a Figura 3.2 Topologia de comunicação entre vagalumes.

**Figura 3.1** - Pseudocódigo do ACV

---

**Algoritmo 1:** ALGORITMO DE COLÔNIA DE VAGALUMES

---

**Entrada:**  $\beta, \gamma, \alpha, N_{pop}, N_{gen}$   
**Saída:** Variáveis de projeto que minimizam ou maximização a FO

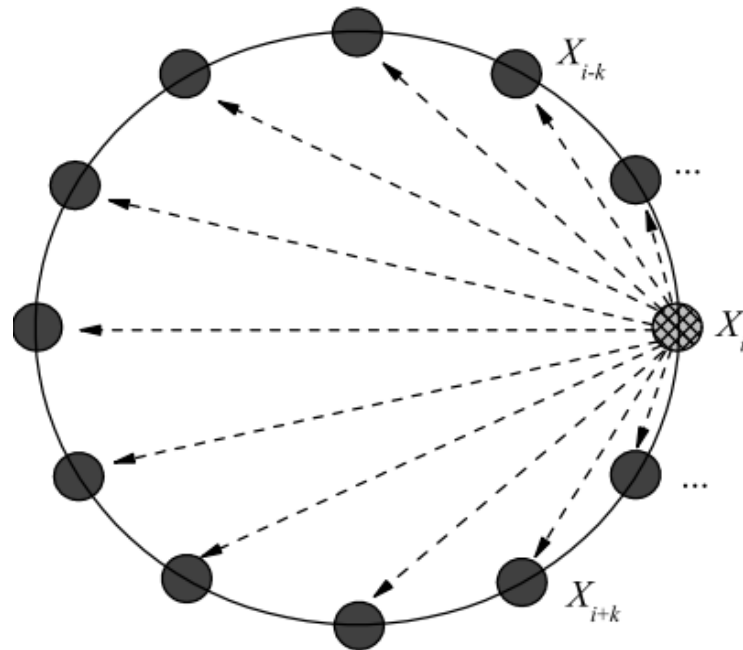
```

1 início
2   Gera população inicial  $X_k$ 
3   while  $t < N_{gen}$  do
4      $FO^t \leftarrow X^t$ 
5     Ranqueia a população de vagalumes (Melhor FO para pior FO)
6     for  $i = N_{pop}$  do
7       for  $j = N_{pop}$  do
8         if  $FO_i^t > FO_j^t$  then
9           | Movimenta o vagalume conforme Equação 3.1
10          end
11        end
12      end
13    end
14    retorna  $FO(X_k^{N_{gen}})$ 
15 fim
```

---

**Fonte:** Adaptado (YANG, 2010b)

**Figura 3.2** - Topologia de comunicação entre vagalumes



**Fonte:** Adaptado (YANG, 2010b)

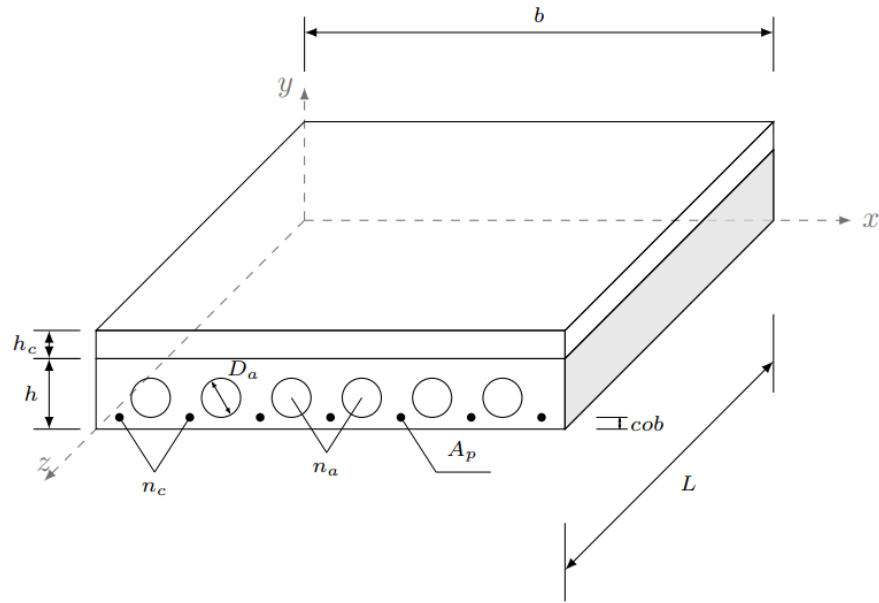
### 3.2 CRITÉRIOS PARA VERIFICAÇÃO DA PEÇA ESTRUTURAL

Nesta seção são apresentados os critérios de verificação para projeto de lajes alveolares, em concreto protendido e em regime de pré-tração. São apresentadas as características geométricas, assim como as variáveis de projeto e as restrições do problema de dimensionamento da peça.

#### 3.2.1 Características geométricas e mecânicas do painel

A representação geométrica do painel, juntamente com o sistema de eixos adotado em projeto estão representados na Figura 3.3. O sistema estrutural em estudo é o painel alveolar pré-fabricado e protendido que em questão de esforços comporta-se como viga.

**Figura 3.3** – Características geométricas do painel alveolar



Fonte: Próprio autor (2020)

Sendo:

- h      Altura do painel;
- b      Largura do painel;
- L      Comprimento do painel;
- $D_a$     Diâmetro dos alvéolos;
- $A_p$     Área da seção transversal do cabo;
- $h_c$     Altura da capa de regularização;
- cob    Cobrimento da armadura;
- $n_a$     Número de alvéolos;
- $n_c$     Número de cordoalhas.

As características geométricas do painel alveolar podem ser obtidas por meio das equações (3.4) a (3.7). Tais características são estabelecidas no regime elástico e linear, visto que é o modelo de análise de tensões empregado.

$$A_C = hb - \frac{\pi D_a^2}{4} n_a \quad (3.4)$$

$$I_C = \frac{bh^3}{12} - \frac{\pi D_a^4}{64} n_a \quad (3.5)$$

$$y_i = \frac{h}{2} \text{ e } y_s = \frac{h}{2} \quad (3.6)$$

$$W_i = \frac{I_c}{y_i} \text{ e } W_s = \frac{I_c}{y_s} \quad (3.7)$$

Sendo:

- $A_c$  Área de concreto da peça;
- $b$  Largura do painel;
- $D_a$  Diâmetro dos alvéolos admitindo que os mesmos possuem a seção transversal circular;
- $h$  Altura da peça não considerando a capa estrutural;
- $I_c$  Momento de inércia da seção do pré-fabricado;
- $n_a$  Número de alvéolos;
- $W_i$  Módulo de resistência inferior;
- $W_s$  Módulo de resistência superior;
- $y_i$  Posição da linha neutra em relação a face inferior;
- $y_s$  Posição da linha neutra em relação a face superior.

O painel alveolar protendido pode apresentar  $n_c$  cabos com área efetiva  $a_p$  de aço protendido. Assim, a área de protensão total ( $A_p$ ) e a excentricidade da armadura em relação ao centro de gravidade da seção pré-fabricada ( $e_p$ ) são dados pelas equações (3.8) e (3.9), respectivamente. Já o valor da altura útil  $d_p$  da armadura protendida é dada pela equação (3.10). O cobrimento da peça é dado pela variável  $cob$ .

$$A_p = n_c \cdot a_p \quad (3.8)$$

$$e_p = \frac{h}{2} - \frac{D_p}{2} - cob \quad (3.9)$$

$$d_p = \frac{h}{2} + e_p \quad (3.10)$$

Sendo:

- $d_p$  Altura útil da seção em relação a armadura;
- $D_p$  Diâmetro da armadura de protensão;
- $e_p$  Excentricidade da armadura de protensão.

Para execução da laje alveolar protendido em seu processo produtivo e construtivo é dividido comumente em seis etapas básicas. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) define que estas etapas devem ser verificadas separadamente de forma a evitar que a peça atinja um Estado Limite, seja ele Estado Limite Último (ELU) ou um Estado Limite de Serviço (ELS). Tais etapas são apresentados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Perdas de protensão.

Etapa	Descrição
1	Corte dos fios;
2	Içamento e transporte na indústria;
3	Içamento e transporte na obra
4	Montagem e colocação da capa de regularização
5	Aplicação do revestimento
6	Situação de serviço

Fonte: Próprios autores

### 3.2.2 Carregamentos

Para o sistema avaliado neste trabalho as cargas atuantes no sistema estrutural podem ser de natureza permanente ou acidental. O carregamento permanente ( $g_i$ ) é formado pelo peso próprio da estrutura e de seus elementos fixos, enquanto o carregamento acidental ( $q_i$ ) é definido conforme utilização da estrutura de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019).

Para este trabalho as cargas do tipo permanente são divididas em 3 partes de carregamento:

- a)  $g_1$  – Peso próprio do painel;
- b)  $g_2$  – Peso da capa de regularização;
- c)  $g_3$  – Peso do revestimento.

Com as cargas acidentais serão divididas em duas partes.

- a)  $q_1$  – Carga acidental de utilização;
- b)  $q_2$  – Carga acidental de montagem do painel.

## 3.3 RESTRIÇÕES DO PROJETO ÓTIMO

Em elaboração de projetos de peças estrutural a NBR 6118 (ABNT, 2014) é necessário etapas de cálculo em ELU e ELS que devem ser verificados de forma a evitar a ruína e assegurar durabilidade do projeto. Logo, nesta seção são apresentados os requisitos de verificação da peça de forma a garantir que a geometria adotada seja exequível.

### 3.3.1 Verificações construtivas

Com o intuito de garantir que as dimensões da peça sejam exequíveis temos as equações (3.11) e (3.12), tais quais verificam a situação de altura mínima e largura mínima do elemento estrutural.

$$\frac{h - D_a}{2} \geq cob \quad (3.11)$$

$$\frac{b - n_a \cdot D_a}{n_a} \geq 2 \left[ \sqrt{\left(\frac{D_a}{2} + cob\right)^2 - \left(\frac{D_a}{2}\right)^2} - \frac{D_a}{2} \right] \quad (3.12)$$

### 3.3.2 Verificação de tensões normais nas fases construtivas e em serviço (ELS-SN)

Para as análises desta seção, será adota a convenção de sinais como compressão positiva e tração negativa. Para todas etapas construtivas, as tensões normais no Estádio I devem respeitar os limites de tração e compressão, conforme as equações (3.13) e (3.14).

$$\sigma \leq \sigma_c \quad (3.13)$$

$$\sigma_T \leq \sigma \quad (3.14)$$

Sendo:

$\sigma$  Tensão normal de projeto nas fases de análise no Estádio I;

$\sigma_c$  Limite de compressão prescrito para a tensão normal no concreto;

$\sigma_T$  Limite de tração prescrito para a tensão normal no concreto.

As combinações e os limites utilizados para as verificações de tensões normais, são apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** - Condições, combinações e limites para verificação de tensões normais.

Condições a serem verificadas				Limites	
				$\sigma_c$	$\sigma_t$
Durante a construção				$0,85 \cdot f_{ckj}$	$\frac{f_{ct,m}}{1,2}$
				$\gamma_c$	
Em serviço	Concreto Protendido nível 2 (protensão limitada)	ELS-F	Combinação frequente (CF)	$0,85 \cdot f_{ckj}$	$\frac{f_{ct,m}}{1,2}$
		ELS-D	Combinação quase permanente (CQP)		0
	Concreto Protendido nível 3 (protensão completa)	ELS-F	Combinação rara (CR)		$\frac{f_{ct,m}}{1,2}$
		ELS-D	Combinação frequente (CF)		0

Fonte: Adaptado Vasconcelos (2014)

Sendo:

ELS-F Estado limite de serviço de formação de fissuras.

ELS-D Estado limite de serviço de descompressão.

As equações (3.15) e (3.16) apresentam o cálculo da tensão nas fibras inferior ( $\sigma^I$ ) e superior do painel ( $\sigma^S$ ).

$$\sigma^I = \frac{P(t)}{A_c} - \frac{P(t) \cdot e_p}{W_i} - \delta_{g1} \frac{M_{g1}}{W_i} - \delta_{g2} \frac{M_{g2}}{W_i} - \delta_{g3} \frac{M_{g3}}{W_i} - \delta_{q1} \frac{\Psi_{q1} \cdot M_{q1}}{W_i} - \delta_{q2} \frac{M_{q2}}{W_i} \quad (3.15)$$

$$\sigma^S = \frac{P(t)}{A_c} - \frac{P(t) \cdot e_p}{W_s} + \delta_{g1} \frac{M_{g1}}{W_s} + \delta_{g2} \frac{M_{g2}}{W_s} + \delta_{g3} \frac{M_{g3}}{W_s} + \delta_{q1} \frac{\Psi_{q1} \cdot M_{q1}}{W_s} + \delta_{q2} \frac{M_{q2}}{W_s} \quad (3.16)$$

Sendo:

$P(t)$  Força de protensão para cada etapa analisada, correspondente a uma idade  $t$  do concreto;

$M_{g1}$  Momento devido carga permanente parcela número 1;

$M_{g2}$  Momento devido carga permanente parcela número 2;

$M_{g3}$  Momento devido carga permanente parcela número 3;

$M_{q1}$  Momento devido carga variável parcela número 1;

$M_{q2}$  Momento devido carga variável parcela número 2;

$\Psi_{q1}$  Fator de redução nas combinações de serviço;

$\delta_{gi}$  Fator indicativo da presença ou ausência da carga permanente  $i$ ;

$\delta_{qi}$  Fator indicativo da presença ou ausência da carga variável  $i$ .

Os fatores que indicam presença ou ausência de carregamentos e os coeficientes utilizados, conforme a etapa analisada, são apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** - Coeficientes  $\delta_{gi}$ ,  $\delta_{qi}$  e  $\Psi_{q1}$  em cada etapa da análise

Etapa		$\delta_{g1}$	$\delta_{g2}$	$\delta_{g3}$	$\delta_{q1}$	$\delta_{q2}$	$\Psi_{q1}$
Construção	Corte dos fios	1	0	0	0	0	0
	Içamento e transporte na indústria	$\beta_{a1}$ ou $\beta_{a2}$	0	0	0	0	0
	Içamento e transporte na obra	$\beta_{a1}$ ou $\beta_{a2}$	0	0	0	0	0
	Montagem	1	1	0	0	1	0
	Revestimento	1	1	1	0	1	0
ELS	Em serviço	1	1	1/0	1	0	$\Psi_{ELS-F}$ ou $\Psi_{ELS-D}$

Fonte: Adaptado Vasconcelos (2014)

Sendo:

$\Psi_{ELS-F}$  Fator de redução de combinação para verificação do ELS-F;

$\Psi_{ELS-D}$  Fator de redução da combinação para verificação do ELS-D;

Os fatores  $\Psi_{ELS-F}$  e  $\Psi_{ELS-D}$ , seus valores tem correlação com concreto utilizado e consequentemente da combinação de ação verificada, conforme a Tabela 3.3. Considerando o valor igual a 1 para combinações raras,  $\Psi_1$  para combinações frequentes e  $\Psi_2$  para combinações quase permanentes. Os valores de  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  são apresentados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** - Valores do coeficiente  $\gamma_{r2}$ .

Ações		$\gamma_{r2}$		
		$\Psi_0$	$\Psi_1^{1)}$	$\Psi_2$
Cargas acidentais de edifício	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>2)</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas <sup>3)</sup>	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

<sup>1)</sup> Para os valores de  $\Psi_1$  relativos às pontes e principalmente aos problemas de fadiga.

<sup>2)</sup> Edifícios residenciais.

<sup>3)</sup> Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos

Fonte: Adaptado NBR 6118 (ABNT, 2014)

Em fases de transporte e retirada da fôrma, deve-se levar em consideração o efeito dinâmico devido a vibração, conforme orientação da NBR 9062 (ABNT, 2017). Caso a análise dinâmica não possa ser executada, a solicitação dinâmica pode ser considerada de forma aproximada, por uma análise estática equivalente, adotando-se um coeficiente de amplificação dinâmica conforme a equação (3.17).

$$g_{ed} \geq \beta_a \cdot g_k \quad (3.17)$$

Sendo:

$g_k$  Carga estática característica de natureza permanente;

$g_{ed}$  Carga estática equivalente para a consideração do efeito dinâmico;

$\beta_a$  Coeficiente de amplificação dinâmica.

A NBR 9062 (ABNT, 2017) mostra que os valores para cada tipo de situação transitória. Nesse caso será utilizado o valor de  $\beta_a = 1,30$  em circunstâncias desfavoráveis como ato de saque da fôrma, transporte, manuseio no canteiro e montagem do elemento. Já para situações favoráveis de segurança na ocasião do transporte será utilizado o valor  $\beta_a = 0,80$ .

### 3.3.3 Verificação do ELS de deformações (ELS-DEF)

Para o estado limite de serviço são necessárias três verificações relativas à flecha nos painéis alveolares. As duas primeiras estão relacionadas a aceitabilidade sensorial conforme uma formulação proposta por Vasconcelos (2014). Essas dizem respeito aos deslocamentos visíveis em elementos estruturais e às vibrações sentidas no piso e são dadas pelas equações (3.18) e (3.19).

$$(f_{p6} + f_{g1})(1 + \Phi_{(T_1, \infty)}) + f_{g2}(1 + \Phi_{(T_4, \infty)}) + f_{g3}(1 + \Phi_{(T_5, \infty)}) + \psi_A \cdot f_q \leq \frac{L}{250} \quad (3.18)$$

$$f_q \leq \frac{L}{350} \quad (3.19)$$

Sendo:

$\psi_A$  Ponderador para carga acidental;

$T_1$  Tempo relativo ao corte dos fios;

$T_4$  Tempo relativo à execução da capa;

$T_5$  Tempo relativo à execução do revestimento.

As equações (3.20) a (3.24) apresentam as parcelas de flecha devido a cada tipo de carregamento imposto.

$$f_p = -\frac{2 \cdot M_p \cdot L^2}{9\sqrt{3}E_{cs}I_p} \quad (3.20)$$

$$f_{g1} = \frac{5 \cdot M_{g1} \cdot L^2}{48E_{cs}I_p} \quad (3.21)$$

$$f_{g2} = \frac{5 \cdot M_{g2} \cdot L^2}{48E_{cs}I_p} \quad (3.22)$$

$$f_{g3} = \frac{5M_{g3}L^2}{48E_{cs}I_{sc}} \quad (3.23)$$

$$f_q = \frac{5M_{q1}L^2}{48E_{cs}I_{sc}} \quad (3.24)$$

A última verificação de flecha refere-se à tolerância de fabricação de elementos pré-fabricados, visando à linearidade desses painéis, conforme a formulação proposta por Vasconcelos (2014). Para efeito de cálculo deve-se considerar deslocamentos positivos e negativos, conforme Equação (3.25).

$$f_p + f_{g1} \leq \pm \frac{L}{1000} \quad (3.25)$$

### 3.3.4 Verificação de solicitações normais (ELU-SN)

Para obter a área de aço a flexão de qualquer peça de concreto composta de armadura protendida deve-se considerar os efeitos da deformação causada pela carga de protensão. Logo em uma situação de ELU a deformação total terá três parcelas, são elas:

- a) a deformação devido a distensão provocada pelo macaco já descontadas as perdas ou não (o que for mais desfavorável).
- b) a movimentação do concreto (já aderente a armadura) até que a tensão na fibra inferior do concreto seja nula (descompressão da peça).
- c) a deformação correspondente à  $\epsilon_s$ , necessária para haver equilíbrio do sistema (CARVALHO, 2017).

A parte da deformação ocasionada pela protensão é dada pela equação (3.26) que é denominada como deformação de pré-alongamento.

$$\epsilon_{pnd} = \frac{P_{nd}}{A_p \cdot E_p} \quad (3.26)$$

$$P_{nd} = \left( P_{\infty} + \sigma_{cp,\infty} \cdot A_p \cdot \frac{E_p}{E_{cs}} \right) \cdot \gamma_p \quad (3.27)$$

$$\sigma_{cp,\infty} = \frac{P_{\infty}}{A_{spm}} + \frac{P_{\infty} \cdot e_p^2}{I_{spm}} \quad (3.28)$$

Sendo:

$P_{\infty}$  Força de protensão após ocorrerem todas as perdas;

$\sigma_{cp,\infty}$  Tensão no concreto na fibra do centro de gravidade da armadura, já computada todas as perdas de protensão.

A deformação no aço pode ser calculada pela seguinte condição, mostrada pelas equações (3.29) e (3.30).

$$\text{Para } \varepsilon_p < \frac{f_{pyd}}{E_p} \quad \sigma_{pd} = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (3.29)$$

$$\text{Para } \varepsilon_p \geq \frac{f_{pyd}}{E_p} \quad \sigma_{pd} = f_{pyd} + \left( \frac{f_{pd} - f_{pyd}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{yd}} \right) \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_{yd}) \quad (3.30)$$

A quantidade de aço  $A_p$  utilizada necessária para suportar os carregamentos atuantes nas combinações referentes ao ELU deve ser obtida similarmente ao dimensionamento à flexão composta reta para seções de concreto em formato Tê (Ver equação (3.31)). Porém para o caso desse trabalho será realizada uma extensão desse conceito para uma seção poligonal de laje alveolar protendida submetida a um momento fletor de cálculo  $M_d$ .

$$M_d = \gamma_f \cdot (M_g + M_q) \quad (3.31)$$

Sendo:

$M_d$  Momento resistente de cálculo;

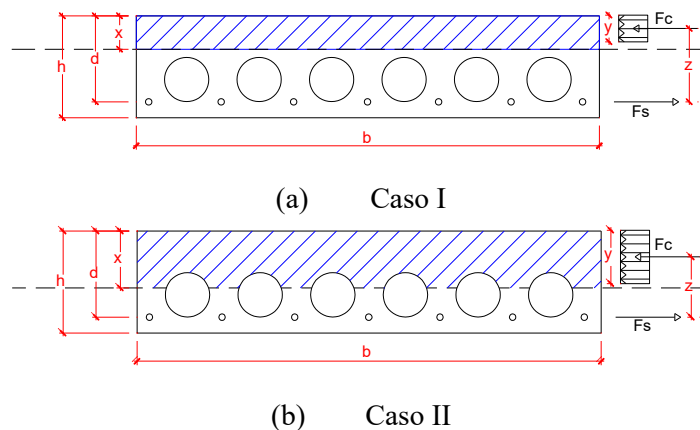
$M_g$  Momento permanente característico;

$M_q$  Momento acidental característico.

Quanto os ponderadores de esforços  $\gamma_f$  e  $\gamma_p$  devem ser determinados em função combinação utilizada, fazendo a observação se seu efeito é desfavorável ou favorável a segurança do sistema estrutural.

Como no caso de seções em formato Tê as lajes alveolares vão possuir dois casos básicos: (a) Caso I quando a linha neutra estiver posicionada na área acima dos alvéolos; e (b) Caso II quando a linha neutra se posiciona em uma região intermediária dos alvéolos, conforme indica a Figura 3.4.

**Figura 3.4** - Seção transversal de uma laje alveolar com a apresentação do diagrama de forças resistentes



**Fonte:** Próprio Autor (2020)

Considerando que o Caso I de dimensionamento no qual as forças resistentes do concreto acima do alvéolo são contabilizadas pode-se determinar a equação de equilíbrio para as solicitações normais ( $\sum F = 0 \rightarrow F_s - F_c = 0 \therefore F_s = F_c$ ) para uma seção em formato retangular. A força normal resistente do concreto dada na equação (3.32).

$$F_c = (\alpha_c \cdot f_{cd}) \cdot (b \cdot \lambda \cdot x) \quad (3.32)$$

Sendo:

$F_c$  Força normal resistente do concreto.

A distância  $z$  (braço de alavanca) entre o binário de forças acaba gerando um momento na seção, definidos pelas equações (3.33) a (3.34).

$$z = d - 0,5 \cdot \lambda \cdot x \quad (3.33)$$

$$M_c = F_c \cdot z \quad (3.34)$$

$$M_s = F_s \cdot z \quad (3.35)$$

Sendo:

$z$  Braço de alanca;

$d$  Altura útil;

$\lambda$  Parâmetro que define o fator de profundidade da linha neutra do diagrama parábola-retângulo;

$x$  Posição da linha neutra;

$M_c$  Momento atuante do concreto;

$M_s$  Momento atuante do aço protendido;

$F_s$  Força resistente do aço protendido.

O fator de profundidade da linha neutra é determinado pela equação (3.36) e (3.37). Em que varia de acordo com a classe do concreto. Quanto ao coeficiente redutor das tensões resistentes do concreto, seus valores também são definidos em função da classe de resistência do concreto.

$$\lambda = 0,80, \alpha_c = 0,85 \quad f_{ck} \leq 50\text{MPa} \quad (3.36)$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}, \alpha_c = 0,85 \left[ 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \quad 50\text{MPa} < f_{ck} \leq 90\text{MPa} \quad (3.37)$$

Onde

$\alpha_c$  Coeficiente redutor das tensões resistentes do concreto.

Obtendo o braço de alavanca e da força resistente do concreto, pode-se obter o momento resistente da seção de concreto em relação ao centro de gravidade das armaduras dispostas nessa mesma seção, conforme equação (3.38).

$$M_{res} = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda \cdot x \cdot (d_p - 0,5 \lambda \cdot x) \quad (3.38)$$

Sendo:

$M_{res}$  Momento resistente do concreto.

Com o auxílio de operações algébricas é possível obter a área de aço protendido necessária para a seção devido a um momento solicitante  $M_d$ , conforme equação (3.39).

$$A_p^N = \frac{M_d}{z \cdot \sigma_{Pi,\infty}} \quad (3.39)$$

Sendo:

$\sigma_{Pi,\infty}$  Tensão resistente da armadura de protensão já descontada as perdas.

É importante destacar que para determinar a tensão  $\sigma_{Pi,\infty}$  o valor da deformação de pré- alongamento deve ser computado para o correto cálculo da armadura. Visto isto, a determinação da posição da linha neutra pela equação (3.38), deve-se verificar o nível de deformação da peça gerando o valor da deformação total de tração na armadura protendida dada pela equação (3.40).

$$\varepsilon_{Pi,\infty} = \varepsilon_{pnd} + \varepsilon_s \quad (3.40)$$

Sendo:

$\varepsilon_s$  Deformação do aço.

A verificação da linha neutra pode ser feita baseada nos valores da deformação do aço e a deformação específica do concreto na ruptura pode ser feita através da equação (3.41). Vale frisar que os valores de  $\varepsilon_{cu}$  e  $\varepsilon_s$  são determinados em função do domínio em que a peça se encontra.

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{cu}} \quad (3.41)$$

Onde

$\varepsilon_{cu}$  Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.

Em casos no qual a linha neutra está localizada em uma posição intermediária dos alvéolos o procedimento de cálculo é similar ao feito para seções em Tê. A atuação do momento resistente será dividida entre a “mesa” e as nervuras da laje alveolar, podendo então o momento resistente da mesa ser dado pela equação (3.42) e o momento resistente da alma será uma extensão da equação (3.38) porém considerando todas as  $n_{nerv}$  nervuras formadas pela laje alveolar.

$$M_{mesa} = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot h_f \cdot (b - n_{nerv} \cdot b_{nerv}) \cdot \left(d - \frac{h_f}{2}\right) \quad (3.42)$$

$$M_{res} = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot (n_{nerv} \cdot b_{nerv}) \cdot \lambda \cdot x \cdot (d - 0,5 \lambda \cdot x) \quad (3.43)$$

Sendo:

$M_{\text{mesa}}$  Momento atuante na mesa;

$M_{\text{res}}$  Momento resistente de concreto.

Conseqüentemente no caso a área de aço necessária da peça é dada pela soma da área de aço necessária para mesa e nervura respectivamente, conforme a equação (3.44).

$$A_p^N = \frac{M_{\text{mesa}}}{\left(d - \frac{h_f}{2}\right) \cdot \sigma_{P_i, \infty}} + \frac{M_{\text{nerv}}}{z \cdot \sigma_{P_i, \infty}} \quad (3.44)$$

Sendo:

$h_f$  Altura da mesa.

Com isso, para a verificação de projeto a armadura  $A_p^N$  necessária deverá ser menor que a armadura real  $A_p$  utilizada na peça logo deve-se valer a equação (3.45).

$$A_p \geq A_p^N \quad (3.45)$$

### 3.3.5 Verificação de solicitações tangenciais (ELU-ST)

Conforme a NBR 14861 (ABNT, 2011) orienta que duas condições sejam verificadas para o caso de lajes alveolares, expressas pelas equações (3.46) e (3.47).

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (3.46)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (3.47)$$

Sendo:

$V_{sd}$  Esforço cortante solicitante de cálculo;

$V_{Rd1}$  Esforço cortante resistente de cálculo 1;

$V_{Rd2}$  Esforço cortante resistente de cálculo 2.

A equação (3.46) apresenta a verificação do valor de resistência ao cisalhamento ( $V_{Rd1}$ ) da laje sem utilização de armadura específica para esse fim, sendo  $V_{sd}$  o valor do cortante de cálculo atuante na peça. A NBR 14861 (ABNT, 2011) orienta que a posição de cálculo desse esforço cortante deve ser na sessão mais crítica da peça situada a partir de uma distância de  $0,5 \cdot h$  da extremidade do seu apoio. As equações (3.48) e (3.49) apresentam os valores de  $V_{sd}$  e  $V_{Rd1}$ .

$$V_{sd} = \frac{b \cdot L(g + q)}{2} \frac{L - h}{L} \gamma_f \quad (3.48)$$

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp\_cisa}] \cdot b_w \cdot d \quad (3.49)$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 \frac{f_{ctk}}{1,4} \quad (3.50)$$

$$k = |1,6 - d_p|, \text{ sendo } k \geq |1| \quad (3.51)$$

$$\rho_1 = \frac{A_p}{b_w \cdot d_p} \text{ sendo } \rho_1 \leq |0,02| \quad (3.52)$$

$$b_w = b - (D_a \cdot n_a) \quad (3.53)$$

$$\sigma_{cp\_cisa} = \frac{P_\infty}{A_c} \cdot \alpha \quad (3.54)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1, \text{ sendo } l_x = 0,5 \cdot h \quad (3.55)$$

$$l_{pt2} = 85 \cdot \phi \quad (3.56)$$

Sendo:

$l_{pt2}$	Comprimento de transmissão da força de protensão;
$l_x$	Distância entre apoios da seção em análise;
$b_w$	É a soma da largura das nervuras;
$d$	Altura útil;
$g$	Cargas permanentes;
$h$	Altura da seção;
$L$	Largura da seção transversal;
$q$	Cargas variáveis;
$\gamma_f$	é o coeficiente de majoração de esforços;
$\rho_1$	Taxa de armadura;
$\sigma_{cp\_cisa}$	Tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido;
$\tau_{Rd}$	Tensão resistente de cálculo.

A equação (3.47) garante que a força cortante solicitante não ultrapasse a resistência de cálculo das diagonais comprimidas do concreto  $V_{Rd2}$ , obtida através da equação (3.57).

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d_p \quad (3.57)$$

$$\alpha_{v1} = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200}, \text{ sendo } \alpha_{v1} \geq 0,5 \quad (3.58)$$

### 3.3.6 Verificação de fendilhamento longitudinal

Concluindo é necessário a verificação na fase de elaboração do painel alveolar a possibilidade de fissuração longitudinal ou fendilhamento nas nervuras. Tal verificação deve

garantir que a tensão na nervura mais solicitada ( $\sigma_{sp}$ ) seja inferior à tensão de tração do concreto ( $f_{ctk,inf}$ ) conforme equação (3.59).

$$\sigma_{sp} \leq f_{ctk,inf} \quad (3.59)$$

$$\sigma_{sp} = \frac{P_0}{b_w^{nerv} \cdot e_p} \cdot \frac{15 \cdot \alpha_e^{2,3} + 0,07}{1 + \left(\frac{l_{pt1}}{e_p}\right)^{1,5} \cdot (1,3 \cdot \alpha_e + 0,1)} \quad (3.60)$$

$$\alpha_e = \frac{(e_p - k)}{h_n} \quad (3.61)$$

$$k = \frac{W_{nerv}}{A_{c,nerv}} \quad (3.62)$$

Sendo:

$A_{c,nerv}$  Área da seção transversal da nervura;

$b_w$  É a soma da largura das nervuras;

$h_n$  Altura da nervura;

$k$  Coeficiente calculado pela razão entre o módulo resistente da nervura;

$l_{pt1}$  Valor inferior de projeto para o comprimento de transmissão (nesse caso fixado em  $60 \phi$ );

$P_0$  Força aplicada na nervura;

$W_{nerv}$  Módulo resistente da nervura.

#### 4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Neste trabalho serão utilizadas como variáveis de projeto: a altura do painel  $h$ ; o diâmetro dos alvéolos  $D_a$  e a área da seção transversal do cabo de aço. As outras grandezas envolvidas na análise são parâmetros de projeto, logo, não haverá variação durante o processo de otimização. Para as aplicações presentes neste trabalho serão utilizadas como função objetivo o peso do painel. A equação (4.1) apresenta a função objetivo representando o peso do painel.

$$\text{Peso} = \left( \left( bh - \frac{n_a \pi D_a^2}{4} - n_c A_p \right) \gamma_{cs} + n_c A_p \gamma_a \right) \quad (4.1)$$

Sendo:

$n_c$  número de cordoalha;

$\gamma_{cs}$  Peso específico do concreto;

$\gamma_a$  Peso específico do aço da cordoalha.

Em painéis alveolares protendidos tem-se o total de 37 restrições. O problema de otimização pode então ser descrito na forma geral apresentada na equação (4.2).

Obter  $h$ ,  $D_a$  e  $A_p$  que

$$\text{minimiza Peso} = \left( \left( bh - \frac{n_a \pi D_a^2}{4} - n_c A_p \right) \gamma_{cs} + n_c A_p \gamma_a \right)$$

Tal que

$$RC_i \leq 0 \quad \rightarrow \quad i = 1, 2$$

$$RTN_j \leq 0 \quad \rightarrow \quad j = 1, \dots, 28$$

$$RELU_k \leq 0 \quad \rightarrow \quad k = 1, \dots, 3$$

$$RELSD_l \leq 0 \quad \rightarrow \quad l = 1, \dots, 3$$

$$RFEND_m \leq 0 \quad \rightarrow \quad m = 1$$

(4.2)

Sendo:

RC Restrições construtivas;

RTN Restrições de tensões normais nas fases construtivas e nos ELS;

RELU Restrições do ELU;

RELSD Restrições do ELS-D;

RFEND Restrição de fendilhamento.

A representação geométrica do painel, juntamente com o sistema de eixos adotado em projeto estão representados na Figura 3.3.

Para o presente trabalho serão utilizadas as seguintes especificações para a peça assim como mostrado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Parâmetros de projeto**

PARÂMETRO	VALOR
Abatimento	0 a 4 cm
Cobrimento (cob)	2,5 cm
Coefficiente de amplificação dinâmica desfavorável ( $\beta_{a1}$ )	1,3
Coefficiente de amplificação dinâmica favorável ( $\beta_{a2}$ )	0,8
Comprimento da pista de protensão ( $L_{pista}$ )	120 m
Comprimento do cabo que excede a pista ( $L_{grade}$ )	70 cm
Deslizamento da ancoragem ( $\delta_{anc}$ )	4 mm
Fator de redução de combinação frequente ( $\psi_1$ )	0,4
Fator de redução de combinação quase permanente ( $\psi_2$ )	0,3
Módulo de elasticidade do aço ( $E_p$ )	202.000 MPa
Peso específico do aço ( $\gamma_a$ )	78,5 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico do concreto armado ( $\gamma_{ca}$ )	25 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico do concreto simples ( $\gamma_{cs}$ )	24 kN/m <sup>3</sup>
Resistência à tração do aço ( $f_{ptk}$ )	1864,97 MPa
Temperatura de projeto	30 °C
Tempos para fluência e retração do concreto para cada etapa	1,00/2,00/28/31/35 dias
Tempos para relaxação do aço para cada	2,00/3,00/29/32/36 dias
Tensão de escoamento do aço ( $f_{pyk}$ )	1666,31 MPa
Tipo de aço	RB
Tipo de cimento	CPV-ARI
Tipo de protensão	Protensão Limitada (nível 2)
Umidade relativa (U)	40% - ambiente seco
Comprimento do painel (L)	10,00 m
Largura (b)	1,20 m
Número de alvéolos (na)	6
Espessura da capa de regularização ( $h_c$ )	5,0 cm
Espessura do revestimento ( $h_{pav}$ )	1,0 cm
Resistência à compressão do painel ( $f_{ck}$ )	60 MPa
Resistência à compressão da capa de regularização ( $f_{ck,capa}$ )	30 MPa
Carga permanente do revestimento ( $g_3$ )	0,24 kN/m <sup>2</sup>
Carga variável de utilização ( $q_1$ )	3,00 kN/m <sup>2</sup>
Carga variável de montagem ( $q_2$ )	0,50 kN/m <sup>2</sup>
Tipo de painel	Sem capa estrutural
Tipo de perdas diferidas	Cálculo médio

Fonte: Próprio Autor (2020)

O problema apresentado neste trabalho se trata de um problema de variáveis contínuas. A Tabela 4.2 apresenta os valores possíveis para as variáveis contínuas de projeto que foram empregados no algoritmo ACV.

**Tabela 4.2** – Variáveis de projeto

NOME DA VARIÁVEL	VARIÁVEL	INTEVALO VARIÁVEIS
Altura do painel (h)	$x_1$	[15;25] *
Diâmetro do alvéolo ( $D_a$ )	$x_2$	[5;10] *
Área do cabo de protensão ( $A_p$ )	$x_3$	[33,18;193,59] **

\*unidade em centímetros (cm)  
\*\*unidade em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>)

**Fonte:** Próprio Autor (2020)

#### 4.1.1 Previsão das perdas de protensão via modelos normativos

As perdas de protensão foram calculadas por meio de planilhas eletrônicas tomando como base o texto de Vasconcelos (2014) . Foi definido um grupo de 20 lajes, onde as lajes obedeciam ao intervalo das variáveis de projeto e então as perdas de protensão foram calculadas. A Tabela 4.3 apresenta a perda média para essas lajes estudadas e então essas perdas foram utilizadas na construção do problema no formato de perdas estimadas. Deve-se salientar que esse modelo de cálculo de perdas já considera a interação entre as perdas progressivas conforme estabelecido no item 9.6.3.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Tabela 4.3** – Perda média para cada etapa

Etapa	Processo	Perda (%)	Perda acumulada (%)
1	Corte dos fios	5,42	5,42
2	Içamento e transporte na indústria	3,46	8,88
3	Içamento e transporte na obra	3,46	12,35
4	Montagem	3,46	15,81
5	Revestimento	3,46	19,27
6	Em serviço	3,46	22,74

**Fonte:** Próprio autor

Após a verificação do *setup* do algoritmo ele será empregado em modelos de lajes alveolares para determinação das variáveis de projeto, que minimizam o peso da peça estrutural mediante verificações em ELU e ELS.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio da otimização pelo Algoritmo Colônia de Vagalume (ACV) para verificação das peças estruturais.

### 5.1 Calibração do Algoritmo através de problemas de *benchmark*

Para calibração do algoritmo foram utilizados três teste de *benchmark*: treliça 2D de 10 barras proposto por Li *et al.* (2007), Aminifar (2013) e Camp e Farshchin (2014), viga soldada proposto por Gandomi *et al.* (2011) e mola proposto por Gandomi *et al.* (2011).

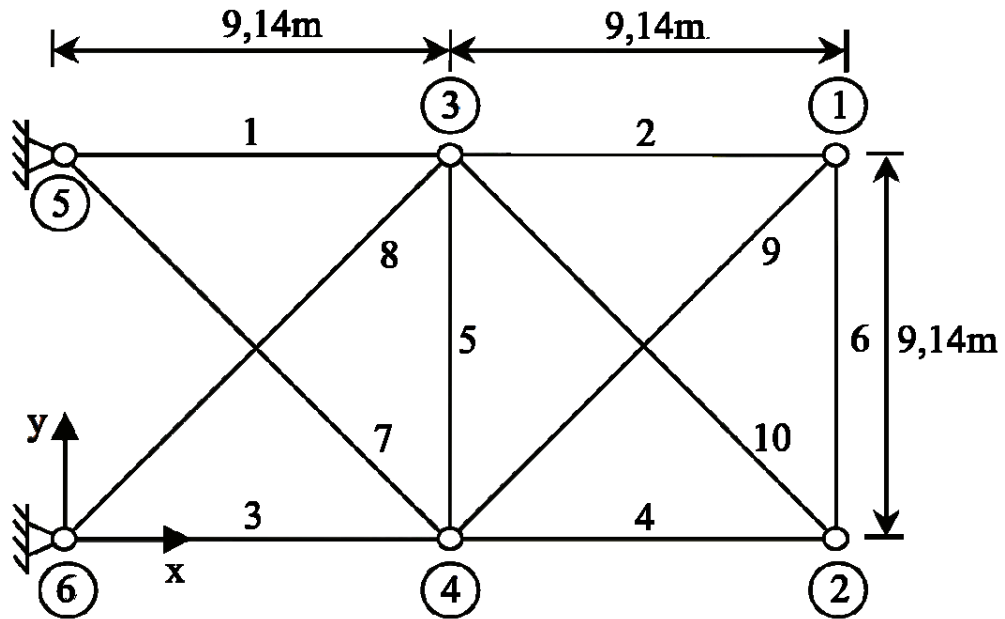
#### 5.1.1 *Setup* padrão

Foram definidos os seguintes parâmetros para a execução dos testes: número da população ( $N_{pop}$ ) igual a 20 indivíduos; número de iterações ( $N_{ite}$ ) igual a 600; parâmetro de aleatoriedade ( $\alpha$ ) igual a 0,8, fator de atratividade ( $\beta$ ) igual a 0,9 e para efeitos estatísticos e consolidação do resultado o número de repetições adotado para todos os testes foi 30.

#### 5.1.2 Treliça 2D 10 barras

O primeiro problema de *benchmark* foi executado com base em uma treliça de 10 barras de alumínio onde o intuito é otimizar o peso da mesma aplicando restrições de tensão e deslocamento vertical. O modelo da treliça é mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Modelo da treliça 2D de 10 barras



Fonte: Próprio Autor (2020)

Foram utilizadas as propriedades descritas a seguir: densidade do material da treliça  $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ , módulo de elasticidade do material  $E = 69 \text{ GPa}$ , tensão admissível  $\sigma_{lim} = \pm 172 \text{ MPa}$ , o limite de deslocamento vertical  $\delta_{lim} = \pm 5,08 \text{ cm}$ . Para o carregamento foram aplicadas as condições apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Cargas aplicadas na treliça

Nó	Eixo	Carga (kN)
2	y	-450
4	y	-450

Fonte: Próprio Autor (2020)

Onde a Função Objetivo (FO) do problema da treliça 2D de 10 barras é mostrada nas equações (5.1) a (5.4).

$$W = \sum_{i=1}^n A_i \cdot L_i \cdot \rho \quad (5.1)$$

$$A_{min} \leq A_i \leq A_{max} \quad (5.2)$$

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{lim}} - 1 \leq 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\delta_n}{\delta_{lim}} - 1 \leq 0 \quad (5.4)$$

Na treliça de 10 barras  $x$  representa o vetor de variáveis de projeto onde cada  $x$  corresponde a sua respectiva numeração das barras como mostrado na Figura 5.1, compondo o vetor das variáveis de projeto  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10})$ .

Após a execução e validação feita no algoritmo obteve-se os resultados mostrados na Tabela 5.2 sendo feita uma comparação com outras bibliografias. Nota-se que os resultados obtidos se aproximaram com os de outros autores, demonstrando a eficiência do método de otimização aplicado.

**Tabela 5.2** – Resultados da otimização da área da seção transversal das barras para a treliça de 2D 10 barras.

<b>Autor</b>	<b>Presente trabalho</b>	<b>LI et al (2007).</b>	<b>LI et al (2009)</b>	<b>Aminifar et al (2013)</b>	<b>Camp e Farshchin (2014)</b>
<b>Método</b>		<b>PSO</b>	<b>PSO</b>	<b>AGA</b>	<b>TBLO</b>
$x_1$ (cm <sup>2</sup> )	207,15	215,90	193,50	197,00	216,10
$x_2$ (cm <sup>2</sup> )	0,65	0,70	10,50	0,65	10,50
$x_3$ (cm <sup>2</sup> )	162,68	149,50	193,50	180,00	147,70
$x_4$ (cm <sup>2</sup> )	94,78	99,90	87,10	87,90	91,60
$x_5$ (cm <sup>2</sup> )	0,65	23,50	10,50	0,65	10,50
$x_6$ (cm <sup>2</sup> )	0,65	0,80	11,60	0,65	10,50
$x_7$ (cm <sup>2</sup> )	57,58	54,10	74,20	51,00	51,40
$x_8$ (cm <sup>2</sup> )	133,27	150,60	121,30	125,00	147,70
$x_9$ (cm <sup>2</sup> )	0,65	1,20	11,60	0,65	10,50
$x_{10}$ (cm <sup>2</sup> )	123,09	148,50	141,90	124,00	141,90
<b>FO (kg)</b>	<b>2312,987</b>	<b>2508,10</b>	<b>2509,30</b>	<b>2260,00</b>	<b>2490,60</b>

**PSO**-Particle Swarm Optimization, **AGA** -Augmented Genetic Algorithm, **TBLO**, Teaching-learning-based optimization

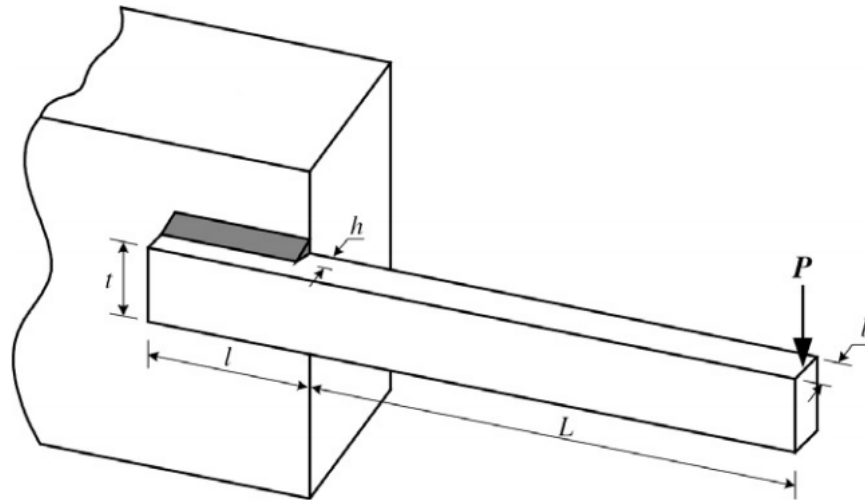
**Fonte:** Próprio Autor (2020)

### 5.1.3 Viga Soldada

O teste da viga soldada consiste num problema de otimização assim como proposto por Gandomi (2011) apresentada na Figura 5.2, e consiste em uma viga de aço carbono, que está carregada com uma carga  $P$  atuando na ponta livre, com a espessura de solda ( $h$ ), comprimento da conexão da peça ( $l$ ), altura da viga ( $t$ ) e espessura da viga ( $b$ ) onde  $x$  representa o vetor de

variáveis de projeto  $x = (h, l, t, b) = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ . A função objetivo segue a equação (5.5) e com as restrições descritas da equação (5.6) à equação (5.10).

**Figura 5.2 – Modelo da viga**



**Fonte:** Gandomi (2011)

$$\text{Minimizar: } f(h, l, t, b) = (1 + C_1)h^2l + C_2tb(L + l) \quad (5.5)$$

$$g_1(x) = \tau_d - \tau(x) \geq 0 \quad (5.6)$$

$$g_2(x) = \sigma_d - \sigma(x) \geq 0 \quad (5.7)$$

$$g_3(x) = b - h \geq 0 \quad (5.8)$$

$$g_4(x) = P_c - P \geq 0 \quad (5.9)$$

$$g_5(x) = \delta_d - \delta(x) \geq 0 \quad (5.10)$$

$$\tau(x) = \sqrt{\tau'(x)^2 + \tau''(x)^2 + \frac{l\tau'(x)\tau''(x)}{\sqrt{0,25(l^2 + (h + t)^2)}}} \quad (5.11)$$

$$\sigma(x) = \frac{504000}{t^2b} \quad (5.12)$$

$$P_c(x) = 4746(1 - 0,0282346t)tb^3 \quad (5.13)$$

$$\delta(x) = \frac{2,1952}{t^3b} \quad (5.14)$$

$$\tau' = \frac{6000}{\sqrt{2}hl} \quad (5.15)$$

$$\tau'' = \frac{6000(14 + 0,5l)\sqrt{0,25(l^2 + (h + t)^2)}}{2\left(0,707hl\left(\frac{l^2}{12} + 0,25(h + t)^2\right)\right)} \quad (5.16)$$

Os limites das variáveis aplicadas a este problema foram:  $0,125 \text{ in} \leq h \leq 5 \text{ in}$ ,  $0,1 \text{ in} \leq l, t \leq 10 \text{ in}$  e  $0,1 \text{ in} \leq b \leq 5 \text{ in}$ . As constantes descritas na função objetivo e nas restrições são apresentadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Parâmetros envolvidos no problema da viga.

Constante	Descrição	Valor	Unidades
$C_1$	Custo por volume de material de solda	0,10471	\$/in <sup>3</sup>
$C_2$	Custo por volume de material da viga	0,04811	\$/in <sup>3</sup>
$\tau_d$	Tensão de cisalhamento admissível de cálculo	13600	psi
$\sigma_d$	Tensão Normal admissível de cálculo	30000	psi
$\delta_d$	Deslocamento admissível de cálculo	0,25	in
$E$	Modulo de elasticidade	$30 \times 10^6$	psi
$G$	Modulo de elasticidade transversal	$12 \times 10^6$	psi
$P$	Condição de carregamento	6000	lb
$L$	Comprimento da viga livre	14	in

**Fonte:** Próprio Autor (2020)

A otimização resultou nos dados apresentados na Tabela 5.4 comparando-as com outras bibliografias e validando os resultados, onde nota-se que os mesmos se aproximaram dos resultados de outros autores demonstrando a eficiência do método de otimização aplicado.

**Tabela 5.4** – Resultados da otimização para a viga soldada

<b>Autor</b>	<b>Presente trabalho</b>	<b>Hwang e He (2006)</b>	<b>Leite e Topping (1998)</b>	<b>Lemonge Barbosa (2004)</b>	<b>Akhtar <i>et al</i> (2002)</b>
<b>Método</b>		<b>SA-GA -</b>	<b>AGA</b>	<b>AGA</b>	<b>SBM - Socio- behavioral model</b>
<i>h</i> (in)	0,219377	0,223100	0,248900	0,244300	0,240700
<i>l</i> (in)	7,573943	1,581500	6,109700	6,211700	6,485100
<i>t</i> (in)	9,096450	12,846800	8,248400	8,301500	8,239900
<i>b</i> (in)	0,219141	0,224500	0,248500	0,244300	0,249700
<i>FO</i> (US\$)	2,472957	2,250000	2,400000	2,381600	2,442600

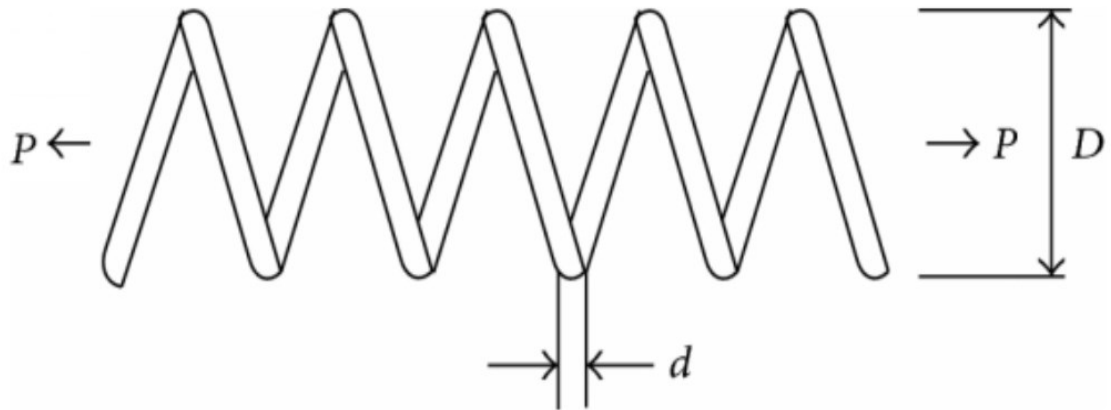
*AGA* - *Augmented Genetic Algorithm*, *SA-GA* - *Simulated annealing - Genetic Algorithm*, *SBM* - *Socio-behavioral model*

**Fonte:** Próprio Autor (2020)

#### 5.1.4 Mola

O teste da mola é um problema de otimização assim como proposto por Kohli e Aroura (2018) apresentada na Figura 5.3, consiste em uma mola, que está carregada com uma carga  $P$  atuando na ponta livre, onde as variáveis do problema são diâmetro da mola ( $d$ ), diâmetro médio da bobina ( $D$ ), e número de voltas na bobina ( $N$ ) onde  $x$  representa o vetor de variáveis de projeto  $x = (d, D, N) = (x_1, x_2, x_3)$ . A função objetivo segue a equação (5.17) e com as restrições descritas da equação (5.6) à equação (5.21).

**Figura 5.3 – Modelo da mola**



**Fonte:** Kohli e Aroua (2018)

$$\text{Minimizar: } f(x) = (N + 1)Dd^2 \quad (5.17)$$

$$g_1(x) = 1 - \frac{D^2 N}{717584d^4} \leq 0 \quad (5.18)$$

$$g_2(x) = \frac{4D^2 - dD}{12566(Dd^3 - d^4)} - \frac{1}{5108d^2} \leq 0 \quad (5.19)$$

$$g_3(x) = 1 - \frac{14045d}{D^2 N} \leq 0 \quad (5.20)$$

$$g_4(x) = \frac{d + D}{1,5} - 1 \leq 0 \quad (5.21)$$

Os limites das variáveis aplicadas a este problema foram:  $0,05 \text{ in} \leq d \leq 2 \text{ in}$ ,  $0,25 \text{ in} \leq D \leq 1,30 \text{ in}$  e  $2,00 \leq N \leq 15,00$ .

Em seguida foram processados e os resultados obtidos são mostradas na Tabela 5.5 e os mesmos foram comparados com diversas bibliografias, onde nota-se os resultados obtidos se aproximaram aos de outros autores demonstrando a eficiência do método de otimização aplicado.

**Tabela 5.5** – Resultados da otimização para o problema da mola

<b>Autor</b>	<b>Este trabalho - melhor combinação de parâmetros</b>	<b>Mahdavi et al. (2007)</b>	<b>Lobato and Valder (2014)</b>	<b>Zou et al. (2011)</b>	<b>Bulatovic et al. (2014)</b>
<b>Método</b>		<b>IHS</b>	<b>FSO</b>	<b>DSO</b>	<b>ICS</b>
$d$ (in)	5,000E-02	5,115E-02	5,174E-02	5,171E-02	5,170E-02
$D$ (in)	3,167E-01	3,499E-01	3,578E-01	3,573E-01	3,570E-01
$N$	1,415E+01	1,208E+01	1,156E+01	1,126E+01	1,127E+01
$g_1(x)$	-2,361E-03	-5,220E-02	-2,870E-02	-5,156E-09	-1,285E-07
$g_2(x)$	-1,694E-03	1,367E-02	-6,450E-04	-2,809E-10	0,000E+00
$g_3(x)$	-3,946E+00	-3,860E+00	-3,911E+00	-4,055E+00	-4,054E+00
$g_4(x)$	-7,555E-01	-7,326E-01	-7,270E-01	-7,273E-01	-1,091E+00
$FO$ (in <sup>3</sup> )	1,279E-02	1,289E-02	1,279E-02	1,267E-02	1,267E-02

*IHS* – Improved Harmony Search algorithm, *FSO* – Fish Swarm Optimization algorithm, *DSO* – Directed saearching optimization algorithm, *ICS* – Improved Cuckoo Search algorithm

**Fonte:** Próprio Autor (2020)

## 5.2 Análise da laje alveolar pré-fabricada e protendida

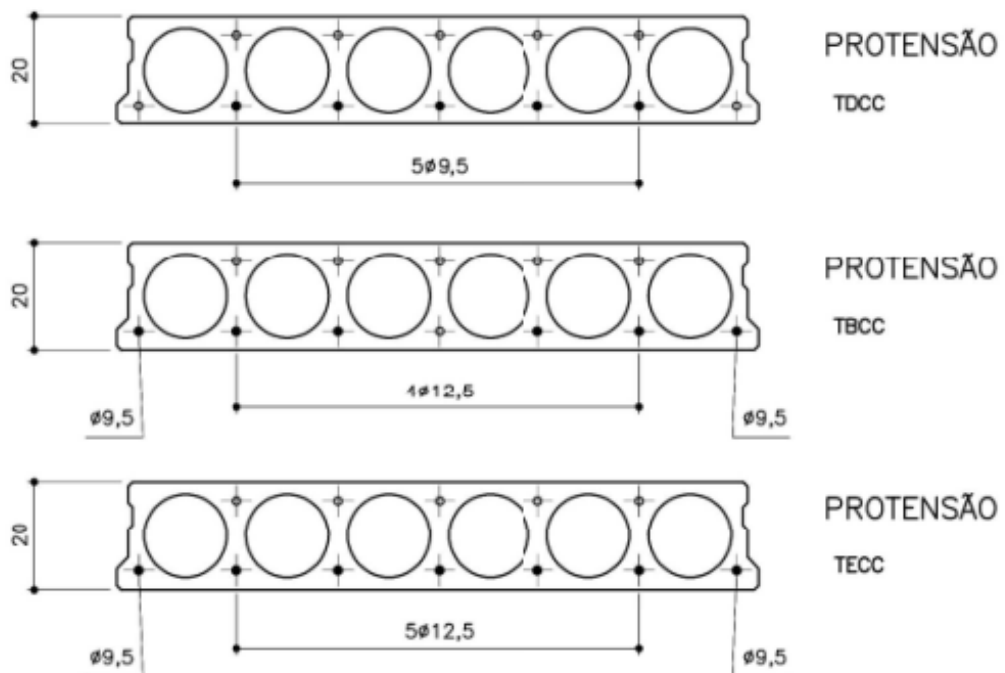
Após a verificação de *setup* do algoritmo são empregadas ferramentas de otimização para verificação de um painel protendido conforme a Figura 3.3. Para as análises apresentadas nesse item foram estabelecidos três modelos de laje: TBCC, TDCC e TECC que tem como diferença a quantidade de cabos na seção transversal.

Para a análise direcionada das lajes foram escolhidos alguns modelos para a avaliação do algoritmo seguindo o padrão do Manual Munte (MELO, 2007), tendo como base 3 lajes executáveis para uma comparação efetiva, que são as lajes mostradas na Figura 5.4. As lajes escolhidas para a análise apresentam diferenças quanto ao número de cordoalhas e ao diâmetro da cordoalha de protensão, mantendo a altura e o número de alvéolos padrão. A diferença entre elas são: TDCC com 5 cordoalhas, TBCC com 6 cordoalhas e TECC com 7 cordoalhas e todas elas tem 6 alvéolos como mostrado na Figura 5.4 e representado na Tabela 5.7.

**Tabela 5.6** – Parâmetros envolvidos no problema da viga.

Laje	Número de Alvéolos ( $n_a$ )	Número de cordoalhas ( $n_c$ )
TBCC	6	$n_a$
TDCC	6	$n_a - 1$
TECC	6	$n_a + 1$

Fonte: Próprio Autor (2020)

**Figura 5.4** – Características geométricas dos painéis alveolares

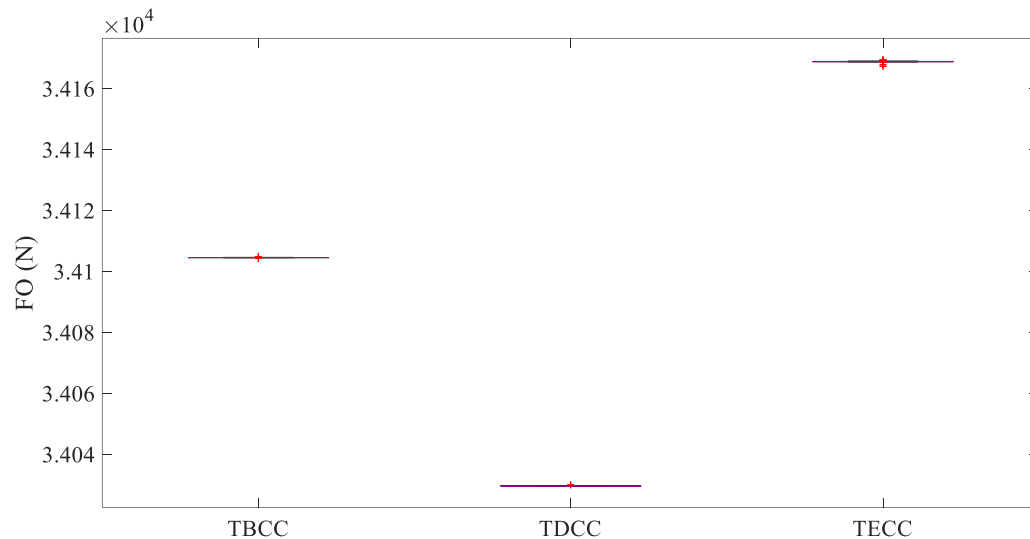
Fonte: Melo (2007)

Ao final do processo de otimização (30 repetições) foram extraídos os resultados da FO mínima, amplitude, média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) as quais são apresentados na Tabela 5.7. Assim como produziu-se o gráfico do tipo caixa (boxplot) (ver Figura 5.5) que representa graficamente os dados presentes na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** – Resumo dos resultados da FO penalizada para a otimização para o problema da laje

Tipo	FO <sub>min</sub> (N)	Amplitude	$\mu$ (N)	$\sigma$ (N)
TBCC	34104,32022	0,65341466	34104,60085	0,11551072
TDCC	34029,64323	0,46147373	34029,70755	0,11073498
TECC	34167,34480	2,21799509	34168,81149	0,47248026

Fonte: Próprio Autor (2020)

**Figura 5.5** – Gráfico de variação de FO penalizada para cada tipo de Laje

Fonte: Próprio Autor (2020)

Conforme apresentado, a laje que teve a menor variação foi a laje TDCC apresentado uma amplitude de 0,46147 N e desvio padrão de 0,11073 N, e obteve o menor resultado de FO com o valor médio de 34,029 kN.

A laje TBCC apresentou um resultado médio ficando entre os demais valores, obtendo o valor médio para FO de 34,10460 kN, uma amplitude com o valor de 0,65341 N e o desvio padrão de 0,11551 N.

Assim como apresentado na Tabela 5.7 o resultado de maior FO foi a laje TECC que apresentou o valor médio de 34,1688 kN, resultando na maior amplitude com o valor de 2,21799 N e o maior desvio padrão de 0,47248 N.

Tendo em vista, os dados apresentados na Tabela 5.7 e Figura 5.5 elaborou-se a Tabela 5.8 que apresentam os valores da variáveis de projeto, FO e porcentagem de restrição atendidas e não atendidas ( $G_a$ ,  $G_{na}$ ), para os melhores resultados de cada laje em estudo.

**Tabela 5.8** – Resultados da otimização para o problema da laje

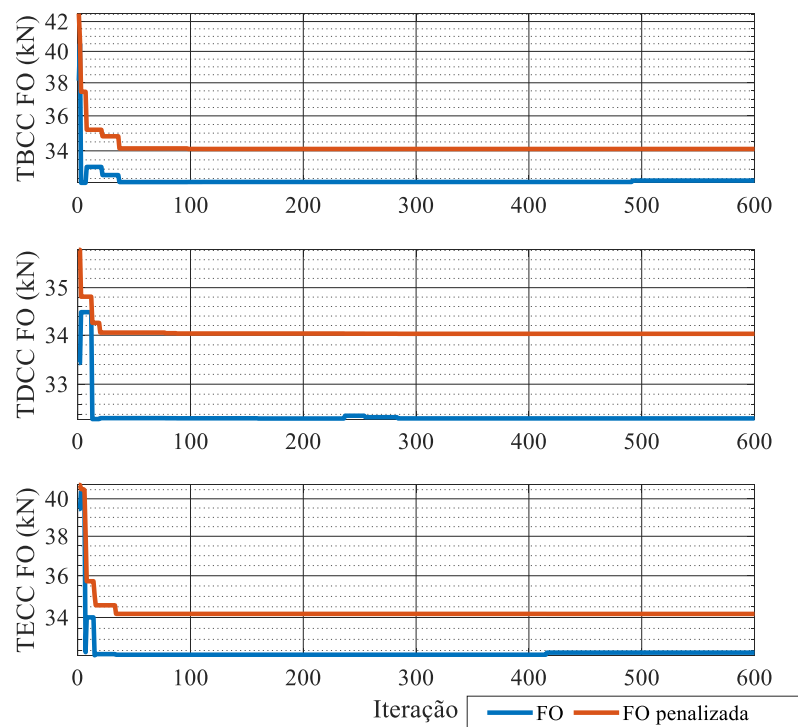
Variáveis e Resultados	Tipos de laje utilizadas		
	TBCC	TDCC	TECC
h (m)	0,150256	0,150000	0,150324
D <sub>a</sub> (m)	0,100000	0,100000	0,100000
A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	0,000129	0,000157	0,000110
FO penalizada (N)	34104,320221	34029,643231	34167,344802
FO (N)	32386,85007	32318,46796	32403,08143
G <sub>a</sub>	89,19%	86,49%	89,19%
G <sub>na</sub>	10,81%	13,51%	10,81%

G<sub>a</sub> – Restrição atendida, G<sub>na</sub> – Restrição não atendida

Fonte: Próprio Autor (2020)

Nos cálculos as restrições que não são atendidas são as restrições de verificações de tensões, flechas de vibração no piso, flechas de serviço e solicitações tangenciais para o ELU para as três lajes analisadas.

Para melhor representar o comportamento da FO ao longo das interações nas lajes, foram produzidos gráficos onde mostram o comportamento da FO e FO penalizada, a partir das amostras apresentadas na Tabela 5.8 apresentado na Figura 5.6.

**Figura 5.6** – Gráfico do comportamento da FO ao longo das iterações para laje tipo TBCC

Fonte: Próprio Autor (2020)

Com o gráfico de FO *versus* iterações, pode-se observar a rápida estabilização da FO assim como a diferença entre a FO penalizada e FO. Observando a Figura 5.6 pode-se perceber que a estabilização da FO penalizada e FO acontece por volta da iteração 50 para a laje TBCC, iteração 80 para a laje TDCC, iteração 50 para laje TECC.

É possível perceber que o total de restrições não atendidas foi de aproximadamente 10% e estão relacionadas a tensão normal na fase de protensão, devido ao fato de se utilizar para verificação da peça 100% da força de protensão para o cálculo. Portanto após utilizar a otimização como uma estimativa inicial das variáveis relativas ao dimensionamento estrutural de uma peça serão estabelecidos, por meio do sistema de tentativa e erro, novos parâmetros para que as restrições supracitadas sejam atendidas.

A primeira adequação se trata do estabelecimento das variáveis de projeto para aplicação em projeto. Portanto os valores encontrados na Tabela 5.8 devem ser adequados para valores reais empregados em projeto. Normalmente dimensões geométricas que são número múltiplos de 5 e que respeitem as restrições construtivas equações (3.11) e (3.12). Além das dimensões geométricas, a área do cabo de protensão deve ser corrigida em função dos diâmetros comerciais de forma que essa seja exequível.

Como as restrições não atendidas dizem respeito a solicitações normais na fase de protensão e a verificação em ELU a geometria foi reverificada de forma que essas condições fossem atendidas. Para isso foi empregada a influência da capa estrutural de 5 cm na seção resistente. A consideração da capa nas verificações permitiu eliminar as flechas devido à vibração excessiva e também de momento resistente da peça. Para evitar o procedimento de cálculo de seções compostas no ELU a laje alveolar foi verificada com uma altura total do painel levando em consideração a capa. Essa seção de concreto foi delimitada com o mesmo  $f_{ck}$  da capa, ou seja 30 MPa, fato que está a favor da segurança visto que o painel tem um  $f_{ck}$  de 60 MPa. Tal fato permitiu que a restrição de ELU em solicitações normais (ELU-SN) seja atendida.

Para a questão das verificações em etapas construtivas iniciais a força de protensão inicial empregada foi reduzida em relação ao valor obtido nas equações (2.10) a (2.14). No caso desse trabalho a força de protensão empregada inicialmente foram reduzidas em 8% a 20% do valor inicial.

Após emprego de todas as alterações e com base nos resultados obtidos foi possível construir a Tabela 5.9 com os valores do projeto de lajes alveolares pré-fabricadas que respeitam 100% das restrições.

**Tabela 5.9** – Resultados da otimização para o problema da laje após a adequação de projeto

<b>Variáveis e Resultados</b>	<b>Tipos de laje utilizadas</b>		
	<b>TBCC</b>	<b>TDCC</b>	<b>TECC</b>
$x_1$ (cm)	16,5	16,5	16,5
$x_2$ (cm)	10	10	10
$x_3$ (m <sup>2</sup> )	0,000122718	0,000181458	0,000122718
$D_p$ (mm)	12,5	15,2	12,5
$\sigma_{pi}$ (MPa)	1303,055	1133,091	1133,091
$P_i$ (kN)	959,453	1028,045	973,359
Perda Total (%)	22,74	22,74	22,74
FO (N)	36611,55582	36704,74056	36678,43738
$G_a$	100 %	100 %	100 %
$G_{na}$	0 %	0 %	0 %

$G_a$  – Restrição atendida,  $G_{na}$  – Restrição não atendida

**Fonte:** Próprio Autor (2020)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Primeiramente é possível afirmar que o algoritmo de otimização empregado foi capaz de ser utilizado como um estimador inicial para projeto de um sistema estrutural em laje alveolar pré-fabricada e protendida. Tal fato corrobora com que as técnicas de otimização podem ser boas alternativas para escolha inicial dos parâmetros de projeto. Lembrando que essa avaliação não substituirá o engenheiro projetista mais sim contribuirá como uma ferramenta de escolha inicial dos parâmetros de projeto visto o grau de dificuldade de tal tarefa.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram atingidos a partir de uma busca que tem como objetivo alcançar os mínimos da FO, tendo assim reduzido o peso das lajes sendo respeitadas aproximadamente 90% das restrições impostas ao problema, alcançando resultados próximo a valores viáveis, mostrando os resultados como um valor inicial a se utilizar e a partir do mesmo fazer o dimensionamento. Contribuindo assim positivamente para utilização como ferramenta de projeto, para uso por parte de projetistas.

A otimização proposta neste trabalho baseia-se num processo de verificação completa da laje, portanto ao final do processo de otimização foram necessárias pequenas intervenções para encontrar um ponto onde 100% das restrições sejam atendidas. Portanto encontra-se um valor exequível baseado em um *start* obtido a partir do algoritmo.

### 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de funções de custo que definam melhor o processo de fabricação e transporte das estruturas.
- Consideração de várias cordoalhas ou cabos em uma mesma nervura, no caso das lajes alveolares.
- No caso das lajes alveolares, consideração da possibilidade de outras formas de alvéolos, que não apenas a circular.
- Extensão da metodologia para outros tipos de estruturas, como:
  - vigas pré-moldadas protendidas com cabo curvo;
  - estruturas submetidas a pós-tração;
  - estruturas hiperestáticas.

## REFERÊNCIAS

- ACKER, Arnold Van. **Prefabrication of concrete structures**. Delft, Holand: Delft, 1990.
- AKHTAR, Shamim; TAI, Kang; RAY, Tapabrata. A socio-behavioural simulation model for engineering design optimization. **Engineering Optimization**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 341–354, 2002. DOI: 10.1080/03052150212723.
- ALBERO, V.; SAURA, H.; HOSPITALER, A.; MONTALVÀ, J. M.; ROMERO, Manuel L. Optimal design of prestressed concrete hollow core slabs taking into account its fire resistance. **Advances in Engineering Software**, [S. l.], v. 122, p. 81–92, 2018. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.05.001.
- AL-GAHTANI, A. S.; AL-SAADOUN, S. S.; ABUL-FEILAT, E. A. Design optimization of continuous partially prestressed concrete beams. **Computers & Structures**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 365–370, 1995. DOI: 10.1016/0045-7949(94)00481-H.
- ALVES, Lucas Lincoln Oliveira. **ROTINA DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE ARMADURAS ATIVAS DE VIGAS CONTÍNUAS DE CONCRETO PROTENDIDO**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO, ANGICOS-RN, 2018.
- AMÍNÍFAR, Farzin; AMÍNÍFAR, Farrokh; NAZARPOUR, Daryoush. Optimal design of truss structures via an augmented genetic algorithm. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 56–68, 2013. DOI: 10.3906/muh-1203-13.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cordoalhas de aço para concreto protendido - Procedimento: NBR 7483**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2008. a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fios de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação: NBR 7482**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2008. b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido — Requisitos e procedimentos. NBR 14861**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento: NBR 6118**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado: NBR 9062**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações para o cálculo de estruturas de edificações NBR 6120**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento: NBR 8681**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2003.
- AURICH, Mauren. Modelo da ligação entre concreto e armadura na análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos. [S. l.], 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2119>. Acesso em: 13 set. 2019.

AZAD, Saeid Kazemzadeh; BYBORDIANI, Milad; AZAD, Sina Kazemzadeh; JAWAD, Farqad K. J. Simultaneous size and geometry optimization of steel trusses under dynamic excitations. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, [S. l.], v. 58, n. 6, p. 2545–2563, 2018. DOI: 10.1007/s00158-018-2039-7.

BASTOS, PAULO SÉRGIO DOS SANTOS. **ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP - Campus de Bauru/SP, , 2018. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/pre-moldados/Pre-Moldados%20Livro%20Mounir%20Cap.%201.pptx>. Acesso em: 16 set. 2019.

BITTARELLO, Guilherme. COLAPSO PROGRESSIVO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ- MOLDADO. [S. l.], p. 103, 2013.

BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. **Swarm intelligence: from natural to artificial systems**. New York, NY: Oxford Univ. Press, 1999.

BULATOVIC, Randoven R.; GORANBOSKOVIC; SAVKOVIC, Mile M.; GASIC, Milomir M. Improved Cuckoo Search (ICS) algorithm for constrained optimization problems. [S. l.], 2014.

BULL, John W. An analytical solution to the design of precast concrete pavements. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 115–123, 1986. DOI: 10.1002/nag.1610100202.

CAMP, C. V.; FARSHCHIN, M. Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 62–63, p. 87–97, 2014. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.

CARVALHO, Camila Campos. Desenvolvimento de um algoritmo de otimização evolutivo auto-adaptativo para a resolução de problemas de otimização com variáveis mistas. [S. l.], 2018.

CARVALHO, Roberto Chust. **ESTRUTURAS EM CONCRETO PROTENDIDO: PÓS-TRAÇÃO, PRÉ-TRAÇÃO E CÁLCULO E DETALHAMENTO**. São Paulo - SP: PINI, 2017.

CASTILHO, Vanessa Cristina De. **Otimização de componentes de concreto pré-moldado protendidos mediante algoritmos genéticos**. 2003. text - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2003. DOI: 10.11606/T.18.2003.tde-14102003-113629.

CASTILHO, Vanessa Cristina De; CARMO NICOLETTI, Maria Do; EL DEBS, Mounir Khalil. An investigation of the use of three selection-based genetic algorithm families when minimizing the production cost of hollow core slabs. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [S. l.], v. 194, n. 45, p. 4651–4667, 2005. DOI: 10.1016/j.cma.2004.12.008.

DIMOPOULOS, George G. Mixed-variable engineering optimization based on evolutionary and social metaphors. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [S. l.], v. 196, n. 4, p. 803–817, 2007. DOI: 10.1016/j.cma.2006.06.010.

DUGENCI, Muharrem; AYDIN, Mehmet Emin. A honeybees-inspired heuristic algorithm for numerical optimisation. **Neural Computing & Applications**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1007/s00521-019-04533-x.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto Pré-moldado Fundamentos e Aplicações**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo.

ELLIOTT, Kim S.; DAVIES, Gwynne; GORGUN, Halil; ADLPARVAR, Mohammed Reza. The stability of precast concrete skeletal structures. **PCI journal**, [S. l.], v. 43, p. 42–61, 1998.

GANDOMI, Amir Hossein; YANG, Xin-She; ALAVI, Amir Hossein. Mixed variable structural optimization using Firefly Algorithm. **Computers & Structures**, [S. l.], v. 89, n. 23, p. 2325–2336, 2011. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.08.002.

GUSTANI, Paulo Henrique Ferreira. LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA: ROTEIRO DE IMENSIONAMENTO E PANORAMA DE PRODUÇÃO NAS REGIÕES SUDOESTE E CENTRO-SUL DO PARANÁ. [S. l.], p. 200, 2017.

HANNA, Amir N.; NUSSBAUM, Peter J.; ARRIYAVAT, Pichet; TSENG, Jeenan; FRIBERG, Bengt F. TECHNOLOGICAL REVIEW OF PRESTRESSED PAVEMENTS. In: 1976, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.]

HUAXIA GRUOP. **Fabricantes de guindastes Derrick de China 4060 e fábrica - produtos - Shandong Huaxia Group Co., Ltd.** 2019. Disponível em: <http://pt.huaxiacrane.com/derrick-crane/4060-derrick-crane.html>. Acesso em: 16 set. 2019.

HWANG, Shun-Fa; HE, Rong-Song. A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization. **Advanced Engineering Informatics**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 7–21, 2006. DOI: 10.1016/j.aei.2005.09.001.

KOHLI, Mehak; ARORA, Sankalap. Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. **Journal of Computational Design and Engineering**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 458–472, 2018. DOI: 10.1016/j.jcde.2017.02.005.

LEITE, JPB; TOPPING, BHV. Improved genetic operators for structural optimization. [S. l.], 1998.

LEMONGE, Afonso C. C.; BARBOSA, Helio J. C. An adaptive penalty scheme for genetic algorithms in structural optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [S. l.], v. 59, n. 5, p. 703–736, 2004. DOI: 10.1002/nme.899.

LI, L. J.; HUANG, Z. B.; LIU, F. A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables. **Computers & Structures**, [S. l.], v. 87, n. 7–8, p. 435–443, 2009. DOI: 10.1016/j.compstruc.2009.01.004.

LI, L. J.; HUANG, Z. B.; LIU, Felix; WU, Q. H. A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. **Computers & Structures**, [S. l.], v. 85, p. 340–349, 2007. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.11.020.

LOBATO, Fran Sérgio; STEFFEN JR., Valder. Fish swarm optimization algorithm applied to engineering system design. **Latin American Journal of Solids and Structures**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 143–156, 2014. DOI: 10.1590/S1679-78252014000100009.

MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, [S. l.], v. 188, n. 2, p. 1567–1579, 2007. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.033.

MARKA. **Empresa | Marka | Soluções Pré-fabricadas**. 2019. Disponível em: <http://www.markaweb.com.br/empresa/>. Acesso em: 16 set. 2019.

MELO, Carlos Eduardo Emrich. **Manual Munte de Projetos em Pré-Fabricados de Concreto**. Edição: 2<sup>a</sup> ed. [s.l.] : Pini, 2007.

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION. **Precast Forecast 2019: Public Works Could Fuel Positive Year in Precast**. 2019. Disponível em: <https://precast.org/2019/03/precast-forecast-2019-public-works-could-fuel-positive-year-in-precast/>. Acesso em: 14 set. 2019.

NAVARRO-RUBIO, Jorge; PINEDA, Paloma; GARCÍA-MARTÍNEZ, Antonio. Sustainability, prefabrication and building optimization under different durability and re-using scenarios: Potential of dry precast structural connections. **Sustainable Cities and Society**, [S. l.], v. 44, p. 614–628, 2019. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.045.

PARK, Min-Kook; LEE, Deuck Hang; HAN, Sun-Jin; KIM, Kang Su. Web-Shear Capacity of Thick Precast Prestressed Hollow-Core Slab Units Produced by Extrusion Method. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 7, 2019. DOI: 10.1186/s40069-018-0288-x.

PEDERIVA JÚNIOR, Paulo Fernando. DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA. [S. l.], p. 65, 2009.

PINHEIRO, Gregory Lee; CARVALHO, Roberto Chust; ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes De. Lajes alveolares pré-fabricadas: estudo da influência do número e do instante de preenchimento de alvéolos no ganho de resistência à força cortante. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S. l.], v. 22, n. 4, 2017. DOI: 10.1590/s1517-707620170004.0235.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI Manual for the Design of Hollow Core Slabs and Walls - Third Edition**. 3. ed. Chicago, USA: PCI, 2015.

R4 TECNO. **R4 Laje Alveolar e Pré-fabricados de Concreto**. 2019. Disponível em: <https://www.r4tecno.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2019.

RUSSELL, Henry G.; RALLS, Mary Lou; TANG, Benjamin M. Prefabricated Bridge Elements and Systems in Japan and Europe. **Transportation Research Record**, [S. l.], v. 1928, n. 1, p. 102–109, 2005. DOI: 10.1177/0361198105192800111.

SANTOS, Filipe de Lima; RODRIGUES, Lara. **PROJETO DE PAINÉIS ALVEOLARES PROTENDIDOS COM MÉTODO DE BUSCA AUTOMÁTICA DA SOLUÇÃO**. 2010. Universidade Federal de Goiás, GOIÂNIA, 2010.

SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B. N. Evolução dos pré-fabricados de Concreto. **Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos**, [S. l.], 2005.

SHEIKHOLESLAMI, Razi; KHALILI, Behnam Gholipour; SADOLLAH, Ali; KIM, JoongHoon. Optimization of reinforced concrete retaining walls via hybrid firefly algorithm with upper bound strategy. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 2428–2438, 2016. DOI: 10.1007/s12205-015-1163-9.

SOTO, Ricardo; RODRIGUEZ-TELLO, Eduardo; MONFROY, Eric. **Recent Advances on Swarm Intelligence for Solving Complex Engineering Problems**. Research article. 2018. DOI: 10.1155/2018/5642786. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/5642786/>. Acesso em: 22 nov. 2019.

VASCONCELOS, Augusto. **O Concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações. Volume III**. 2002.

VASCONCELOS, Rebeca Freitas. Otimização de elementos pré- moldados de concreto: lajes alveolares e vigas com cabo reto. *[S. l.]*, 2014. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5678>. Acesso em: 8 out. 2019.

WHITE, Tony; PAGUREK, Bernard. ASGA: Improving the Ant System by Integration with Genetic Algorithms. *[S. l.]*, 2000.

YANG, Xin-She. Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation. *[S. l.]*, 2010. a. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1003.1409v1>. Acesso em: 30 set. 2019.

YANG, Xin-She. Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation. *[S. l.]*, 2010. b. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1003.1409v1>. Acesso em: 30 set. 2019.

YANG, Xin-She. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms: Second Edition**. Edição: 2nd Revised ed. ed. Frome: Luniver Press, 2010. c.

ZOU, Dexuan; LIU, Haikuan; GAO, Liqun; LI, Steven. Directed searching optimization algorithm for constrained optimization problems. **Expert Systems with Applications**, *[S. l.]*, v. 38, n. 7, p. 8716–8723, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.079.

ZUBEN, Fernando J. Von; ATTUX, Romis R. F. **Inteligência de Enxame**. 2003. Disponível em: [ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006\\_03/topico4\\_03.pdf](ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006_03/topico4_03.pdf). Acesso em: 22 nov. 2019.