



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MATHEUS SOARES CABRAL

**DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES INTERMEDIÁRIOS DE
CONCRETO ARMADO SEGUINDO OS PRECEITOS DA NORMA NBR 6118/14**

Caruaru
2023

MATHEUS SOARES CABRAL

**DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES INTERMEDIÁRIOS DE
CONCRETO ARMADO SEGUINDO OS PRECEITOS DA NORMA NBR 6118/14**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Campus Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo
científico, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Profa. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono

Caruaru
2023

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por ser suficiente em minha vida, sem Ele nada disso seria possível. Aos meus pais e noiva, pelo cuidado e dedicação. E ao meu irmão, pela paciência e apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que em sua infinita bondade e misericórdia, mesmo eu não merecendo, me concede sabedoria, me capacita e se faz presente em toda minha vida, sem Ele nada disso teria acontecido.

Aos meus pais, Marluce e Nazareno, heróis que me deram amor, carinho, apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Além disso, por ter colocado na minha vida a educação como prioridade.

A minha noiva Isabella, que sempre me deu apoio, carinho, amor e incentivo nas horas que mais precisei.

Ao meu irmão, Marllon, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus sogros e cunhado por todo apoio, incentivo e cuidado.

Agradecimento particular a minha professora e orientadora, Giuliana Furtado Franca Bono, por toda compreensão e paciência, pelo incentivo e apoio, pelos valiosos ensinamentos e reflexões, e por ser fonte de inspiração.

Agradecimento a Geovane, por todo suporte e ajuda na elaboração de uma rotina otimizada, utilizada neste trabalho.

Aos meus melhores amigos (Célio, Kaio, Everta, Deivid, Evelyn, Luiz Felipe, Karen, Danilo e Thalita), por fazerem das minhas conquistas e alegrias motivo de felicidade para si.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

A universidade, seu corpo docente, por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação de caráter e ética no processo de formação profissional.

A todos os professores que contribuíram para minha formação, especialmente aos que tive durante a graduação.

"A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo."

(Albert Einstein)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
ELU	Estado Limite Último
M	Momento Fletor
MATLAB	MATrix LABoratory
N	Esforço Normal
NBR	Norma Brasileira
PE	Pernambuco
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama parábola-retângulo.	14
Figura 2 - Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas	15
Figura 3 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal para a ABNT NBR 6118:2014.	16
Figura 4 - Esquema de um AG	20
Figura 5 - Fluxograma do dimensionamento otimizado dos pilares	26
Figura 6 - Diagrama de equivalência entre esforços atuantes e resistentes.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo unitário do Aço tabela SINAPI 02/2023.....	21
Tabela 2 – Custos unitários da Fôrma tabela SINAPI 02/2023	21
Tabela 3 – Custos unitários do Concreto em Composição própria criada por composições retiradas da SINAPI 02/2023 (COLOCAR EM APÊNDICE).....	21
Tabela 4 - Equações de equilíbrio, para cálculo de armaduras simétricas, presente em Campos Filho (2014)....	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dimensionamento dos pilares intermediários.....	28
Quadro 2 - Dimensionamento otimizado dos pilares intermediários.....	29
Quadro 3 - Otimização dos pilares P1 a P10.....	32
Quadro 4 - Otimização dos pilares P10 a P19.....	32
Quadro 5 - Otimização de pilares P1 a P19, quantidade de barras e diâmetro	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Custo total dos pilares otimizados.....	34
Gráfico 2 - Custo unitário dos insumos por pilar P1 à P9	34
Gráfico 3 - Custo unitário dos insumos por pilar P10 à P19.....	35
Gráfico 4 - Custo unitário dos insumos que compõe os pilares P1 a P9.....	35
Gráfico 5 - Custo unitário dos insumos que compõe os pilares P10 a P19.....	36

Otimização de pilares de concreto armado utilizando algoritmos evolucionários

Optimization of reinforced concrete columns using evolutionary algorithms

Matheus Soares Cabral¹

RESUMO

Os pilares constituem um campo bastante fértil na aplicabilidade de técnicas de otimização, em função da grande diversidade de configurações possíveis. Utilizando-se de processos computacionais, otimiza-se o pilar, reduzindo o seu peso ou volume e principalmente diminuindo seu custo final. Através do desenvolvimento e aplicação de Algoritmos Genéticos (AG), os quais são algoritmos matemáticos inspirados nos mecanismos de evolução natural e recombinação genética, no dimensionamento de pilares intermediários de concreto armado, seguindo os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014), este trabalho tem como objetivo a busca por parâmetros ótimos que nos levem a projetos reais otimizados. Neste programa de otimização, implementado no MATLAB, a função objetivo é composta pelo custo das fôrmas, concreto e armaduras presentes no pilar. As variáveis de projeto, consideradas discretas, são representadas pelas dimensões da seção transversal dos pilares e a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}). Valida-se o programa otimizado, adaptado de Silvas Júnior (2022), comparando os resultados do mesmo com os apresentados na literatura, em seguida, através dos resultados obtidos do dimensionamento, realizou-se um estudo paramétrico para analisar o comportamento das variáveis de projeto e custo dos materiais dos pilares otimizados em diferentes situações de projeto, onde, constata-se que o programa optou por utilizar as menores dimensões possíveis para a seção transversal do pilar, tornando mais econômico dar prioridade ao aumento do f_{ck} e a taxa de área de aço do pilar. Logo, a rotina adaptada permite o dimensionamento ótimo de pilares intermediários de concreto armado, gerando resultados satisfatórios para identificação de parâmetros ótimos que ajudem na tomada de decisões em projetos estruturais reais, promovendo uma diminuição no desperdício de materiais, aumentando a lucratividade da empresa e contribuindo para uma maior sustentabilidade na indústria da construção civil.

Palavras-chave: otimização estrutural; pilares; concreto armado.

¹Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail:matheus.scabral@ufpe.br

ABSTRACT

Columns constitute a very fertile field in the applicability of optimization techniques, due to the great diversity of possible configurations. Using computational processes, the column is optimized, reducing its weight or volume and mainly reducing its final cost. Through the development and application of Genetic Algorithms (GA), which are mathematical algorithms inspired by the mechanisms of natural evolution and genetic recombination, in the design of intermediate columns of reinforced concrete, following the precepts of NBR 6118 (ABNT, 2014), this work aims to search for optimal parameters that lead us to real optimized projects. In this optimization program, implemented in MATLAB, the objective function is composed by the cost of formwork, concrete and reinforcement present in the column. The design variables, considered discrete, are represented by the dimensions of the cross-section of the columns and the characteristic compressive strength of concrete (f_{ck}). The optimized program, adapted from Silvas Júnior (2022), is validated, comparing its results with those presented in the literature, then, through the results obtained from the design, a parametric study was carried out to analyze the behavior of the design variables and cost of columns materials optimized in different design situations, where it appears that the program chose to use the smallest possible dimensions for the cross section of the column, making it more economical to give priority to increasing the f_{ck} and the area rate of column steel. Therefore, the adapted routine allows the optimal dimensioning of intermediate columns of reinforced concrete, generating satisfactory results for the identification of optimal parameters that help in decision-making in real structural projects, promoting a reduction in the waste of materials, increasing the company's profitability and contributing for greater sustainability in the construction industry.

Keywords: structural optimization; columns; reinforced concrete.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria de Construção Civil é um importante setor que traz benefícios, não apenas de âmbito econômico, mas também de caráter social, contribuindo para o contínuo desenvolvimento do país. Em contrapartida, é um setor onde os impactos ambientais podem ser notados em todas as etapas de sua cadeia produtiva, ou seja, desde a extração dos insumos até a geração do produto final. Logo, é de suma importância, a busca por novas técnicas que minimizem o desperdício de materiais, uma vez que, a redução de custos em obras associados aos materiais dos elementos estruturais acarretará a redução do orçamento da construção, aumentando a lucratividade da empresa e promovendo a sustentabilidade no setor.

A evolução da Engenharia de Estruturas está intimamente ligada à evolução tecnológica. Desde os primeiros modelos estruturais simplificados até atualmente, na elaboração de modelos mais complexos, se torna imprescindível a utilização de ferramentas computacionais para agilizar e obter resultados mais precisos, ocasionando projetos econômicos e sustentáveis (REGINATO e KRIPKA, 2018).

Em geral, o projeto estrutural é definido como o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais (lajes, vigas, pilares e fundações) necessários para dar suporte à edificação. Ele possui grande importância, visto que proporciona durabilidade, economia, segurança e agilidade produtiva. Neste cenário, o método convencional para dimensionamento de estruturas em concreto armado é um processo iterativo, associado à concepção estrutural, experiência e intuição do projetista, onde as dimensões dos elementos estruturais são estimadas em função de critérios de segurança, desempenho e durabilidade estabelecidos pelas normas regulamentadoras.

Vale ressaltar que, os resultados obtidos deste processo, não resultará obrigatoriamente na melhor solução econômica e estrutural. Sendo assim, torna-se imprescindível a implementação de técnicas matemáticas de otimização, visando obter a melhor combinação dentre inúmeras soluções possíveis, promovendo um suporte ao projetista nas tomadas de decisões, eliminando o processo de tentativa e erro e diminuindo o tempo de elaboração de projeto.

A otimização consiste na elaboração de um planejamento estratégico e adequado de um determinado problema em que se busca a maximização ou minimização de uma função que o rege, denominada de função objetivo, que pode ser definida como uma expressão matemática que quantifica a solução de um dado problema. Em um processo de otimização estrutural esta

função representa o custo total do elemento analisado, considerando o valor do concreto, aço e fôrmas.

A técnica dos Algoritmos Genéticos (AG) fornece um mecanismo de busca adaptativa inspirada no princípio Darwiniano da evolução natural das espécies e recombinação genética. Os AG são particularmente aplicados em problemas complexos de otimização, onde possuem um amplo espaço de busca, diversos parâmetros e restrições aplicados às variáveis.

Esta pesquisa representa uma continuidade dos estudos do Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM), do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco. No LECOM, foram realizados estudos sobre otimização de vigas (BEZERRA, 2017; MONTEIRO, 2019; CORREIA, 2020), pilares (NASCIMENTO, 2017), lajes nervuradas de concreto armado (NUNES, 2018), otimização topológica (PEREIRA, 2018; SALVADOR, 2018; SILVA, 2021), vigas (CORREIA, 2020) e sobre pórticos (SILVA JÚNIOR, 2022).

Nascimento (2017), em seu estudo de otimização de pilares, obteve as dimensões da seção transversal do pilar e área de aço que minimizassem os custos. O autor utilizou como variáveis de projeto a linha neutra, área de aço, base e altura do pilar. Além disso, o autor considerou apenas pilares intermediários que estão sujeitos a flexo-compressão normal. Através do estudo de vários exemplos, o autor comprovou a eficiência da otimização por meio do MATLAB.

Silva Júnior (2022), em seu trabalho de otimização de pórticos, implementou um programa computacional no ambiente MATLAB para realizar o dimensionamento ótimo de pórticos planos de concreto armado, atendendo aos critérios impostos na NBR 6118 (ABNT, 2014), por meio de Algoritmos Genéticos (AG) cuja função objetivo é o custo total dos materiais da estrutura (concreto, fôrmas e aço). O autor utilizou como variáveis de projeto as dimensões das seções transversais dos pilares e vigas, e a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) dos elementos estruturais. Realizou-se um estudo paramétrico, e com base na análise dos dados, o autor concluiu que as ferramentas de otimização permitem a obtenção de soluções mais econômicas.

É neste cenário que este trabalho pretende utilizar a rotina de dimensionamento e detalhamento otimizado de pilares de concreto armado, implementada por Silva Júnior (2022), adaptando a mesma para o dimensionamento e detalhamento otimizado de pilares intermediários de concreto armado, de seção transversal retangular, submetidos à flexo-compressão normal e atendendo às restrições de funcionalidade, durabilidade e segurança impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Em seguida, obter resultados de seções retangulares otimizadas para diversas situações de projeto, de modo a realizar um estudo paramétrico para

analisar o comportamento das variáveis de projeto e custo dos materiais, buscando a identificação de parâmetros ótimos que conduzam a projetos otimizados, contribuindo na tomada de decisões em projetos estruturais reais.

2 DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO

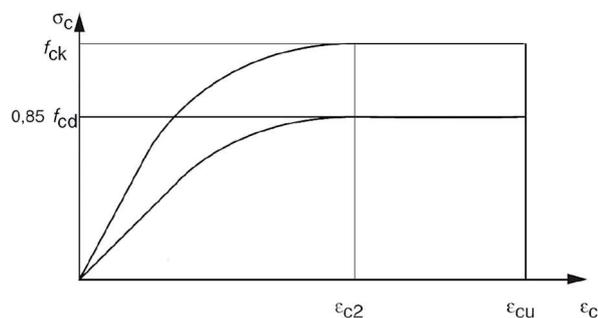
O dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado, em especial de pilares, será tratado de forma resumida neste trabalho sobre como a NBR 6118 (ABNT, 2014) e alguns autores como CARVALHO e PINHEIRO (2009), FUSCO (1995), CAMPOS FILHO (2014) entre outros, tratam no sentido de explicar hipóteses, metodologias e conceitos utilizados no dimensionamento e detalhamento das peças.

2.1 Hipóteses aceitas no dimensionamento

Ao dimensionar os elementos sujeitos a flexo-compressão reta são aceitas algumas hipóteses básicas tratadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para poder validar toda a metodologia de cálculo que será abordada em seguida:

- as seções transversais permanecem planas após aplicação das tensões normais até o estado limite último (ELU);
- as tensões de tração na qual o concreto está submetido podem ser desprezadas já que têm valores muito pequenos e estando o material sujeito a fissuração, essa resistência será muito prejudicada;
- o aço e o concreto deformam-se do mesmo modo, ou seja, sua deformação específica é idêntica. Para isso, deve-se assumir que a aderência entre estes materiais seja absoluta;
- a distribuição de tensões no concreto ocorre de acordo com o diagrama tensão-deformação, com tensão máxima igual a $0,85f_{cd}$, sendo f_{cd} a resistência à compressão de cálculo, conforme a figura 1.

Figura 1 - Diagrama Tensão-Deformação do Concreto



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

O diagrama tensão-deformação é representado pelas seguintes expressões:

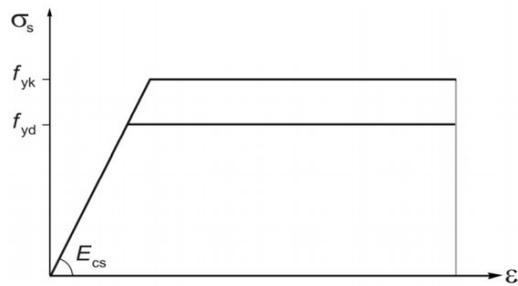
$$\sigma_c = 0,85f_{cd} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right], \text{ se } \varepsilon_c \leq \varepsilon_o \quad (1)$$

$$\sigma_c = 0,85f_{cd}, \text{ se } \varepsilon_o \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_u \quad (2)$$

$$\sigma_c = 0, \text{ se } \varepsilon_c \geq \varepsilon_u \quad (3)$$

- adota-se o diagrama tensão-deformação do aço, indicado na figura 2, admitindo-se um comportamento igual em tração e compressão. Vale ressaltar que no trabalho, foi adotado um $E_s = 21.000kN/cm^2$.

Figura 2 - Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Assim, a relação tensão-deformação para os aços pode ser descrita como:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \text{ se } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \quad (4)$$

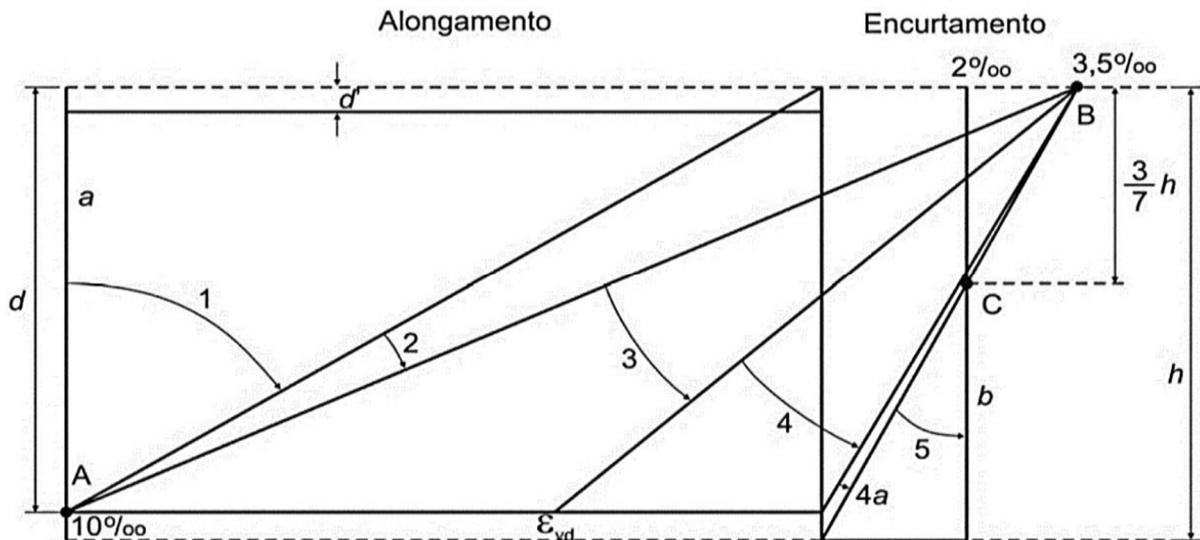
$$\sigma_s = f_{yd}, \text{ se } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (6)$$

2.2 Domínios do E.L.U.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta o estado limite último, o qual corresponde à ruína de uma seção transversal, ela também apresenta dois estados de ruptura possíveis, a ruptura por encurtamento limite do concreto ou por ruptura convencional por deformação específica plástica excessiva da armadura. Esses estados são tais que a condição deformação específica na seção do elemento considerado esteja em uma das condições (A, B ou C) do gráfico da Figura 3. Conforme pode-se perceber na Figura 3, o gráfico ainda subdivide os estados limite últimos em oito domínios – reta a, domínios 1, 2, 3, 4, 4a, 5 e reta b – de acordo com seu tipo carregamento aplicado à peça e estado de deformação específica.

Figura 3 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal para a NBR 6118 (ABNT, 2014).



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.3 Excentricidades

A NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda a consideração de excentricidades em todos os casos envolvendo o dimensionamento de elementos de concreto. Essa excentricidade pode ser dividida em dois grupos: de primeira e de segunda ordem. Este último caso será considerado somente em algumas hipóteses. A excentricidade de primeira ordem é composta pela soma da parcela da excentricidade inicial com a acidental. A excentricidade inicial ocorre quando existe uma distância do centro geométrico da seção transversal ao ponto de aplicação da força, gerando assim um momento aplicado no centro da seção. A excentricidade acidental ocorre pelo fato de não conhecer a posição exata do ponto de aplicação da força, e pela eventualidade de imperfeições locais e globais na execução dos elementos.

Nas excentricidades de segunda ordem estão englobadas as excentricidades devido aos efeitos de segunda ordem de fato e as devido à fluência do concreto. Os efeitos de segunda ordem ocorrem devido às solicitações provenientes da posição deformada da estrutura. Para tanto se considera um aumento na excentricidade total, incluindo-se a de segunda ordem. A fluência do concreto ocorre devido à característica do concreto de se deformar ao longo do tempo. A NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que o efeito da fluência seja considerado em cálculos de dimensionamento quando a esbeltez dos pilares estiver acima de 90.

2.4 Efeitos de segunda ordem

Os efeitos de segunda ordem são os esforços provenientes da deformação da estrutura, a qual estará sujeita a solicitações diferentes dos inicialmente impostos devido aos momentos gerados pelas forças iniciais aplicadas às deformações ou excentricidades geradas por essas.

A NBR 6118:2014 considera as excentricidades adicionais de acordo com o índice de esbeltez do pilar. Para pilares com índice de esbeltez $\lambda \leq 90$ a norma permite que sejam utilizados métodos aproximados para determinação desses efeitos. Em contrapartida, para pilares com índice de esbeltez $\lambda > 90$ deve-se utilizar métodos mais refinados, e para pilares com índice de esbeltez $\lambda < 140$ os métodos dos pilares-padrão acoplados a diagramas M, N, 1/r. Por sua usualidade nas edificações e simplificação dos cálculos, este trabalho tem como objetivo estudar pilares com índice de esbeltez menores que 90. Dessa forma será tratado apenas o método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada (item 15.8.3.3.3) da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os esforços locais de 2ª ordem podem ser descartados quando o índice de esbeltez for menor que o valor limite λ_1 , dado pela expressão

$$\lambda_1 = \frac{25+1,5\left(\frac{e_1}{h}\right)}{\alpha_b} \quad (7)$$

Onde

$$35 \leq \lambda_1 \leq 90 \quad (8)$$

$$\alpha_b = 1, \text{ para pilares intermediários} \quad (9)$$

2.4.1 - Método do pilar padrão com rigidez κ aproximada

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), item 15.8.3.3.3, o método pode ser empregado apenas no cálculo de pilares com $\lambda \leq 90$, com seção transversal retangular constante e armadura simétrica constante ao longo do eixo do pilar. A não linearidade geométrica deve ser considerada de forma aproximada, supondo-se que a deformação da barra seja senoidal. A não linearidade física deve ser considerada através de uma expressão aproximada da rigidez. O momento total máximo no pilar deve ser calculado a partir da majoração do momento de 1ª ordem pela expressão

$$M_{Sd,tot} = \frac{\alpha_b M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120\kappa/v}} \quad (10)$$

sendo a rigidez adimensional κ dada pela expressão aproximada

$$\kappa_{aprox} = 32 \left(1 + 5 \frac{M_{Rd,tot}}{h \cdot N_d} \right) \nu \quad (11)$$

e a força adimensional ν é dada por:

$$\nu = \frac{N_d}{A_c f_{cd}} \quad (12)$$

A_c = área da seção transversal do pilar;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto ($f_{cd} = f_{ck} \cdot \gamma_c^{-1}$).

No dimensionamento, toma-se $M_{Rd,tot} = M_{Sd,tot}$. Em um processo de verificação, onde a armadura é conhecida, $M_{Rd,tot}$ é o momento resistente calculado com essa armadura e com $N_d = N_{Sd} = N_{Rd}$. Substituindo a Eq. 11 na Eq. 10 obtém-se uma equação do 2º grau, útil para calcular diretamente o valor de $M_{Sd,tot}$, sem a necessidade de iterações, apresentadas por

$$A \cdot M_{Sd,tot}^2 + B \cdot M_{Sd,tot} + C = 0 \quad (13)$$

$$A = 5h \quad (14)$$

$$B = h^2 \cdot N_d - \frac{N_d \cdot l_e^2}{320} - 5h \cdot \alpha_b \cdot M_{1d,A} \quad (15)$$

$$C = -N_d \cdot h^2 \cdot \alpha_b \cdot M_{1d,A}$$

(16)

$$M_{1d,A} \geq M_{1d,min} \quad (17)$$

$$M_{Sd,tot} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2A} \quad (18)$$

Onde

α_b – coeficiente de ponderação do momento de primeira ordem em função do diagrama de momento solicitante;

$M_{1d,A}$ – momento de primeira ordem atuante na seção crítica do pilar.

Através do momento máximo total, é possível obter o valor da excentricidade total, dada pela soma da parcela referente à excentricidade de 1ª ordem e 2ª ordem. A mesma pode ser calculada através da razão entre o $M_{d,tot}$ e o esforço normal majorado, observe a expressão abaixo:

$$e_{tot} = \frac{M_{Sd,tot}}{N_d} \quad (19)$$

Mediante as expressões de momento máximo total e excentricidade total, ambas ilustradas anteriormente, determina-se os esforços de segunda ordem atuantes no pilar, em que e_2 e o M_{2d} representam, respectivamente, a excentricidade e momento de 2ª ordem atuantes no pilar, observe a expressões abaixo:

$$e_2 = e_{tot} - e_1 \quad (20)$$

$$M_{2d} = M_{Sd,tot} - M_{1d,A} \quad (21)$$

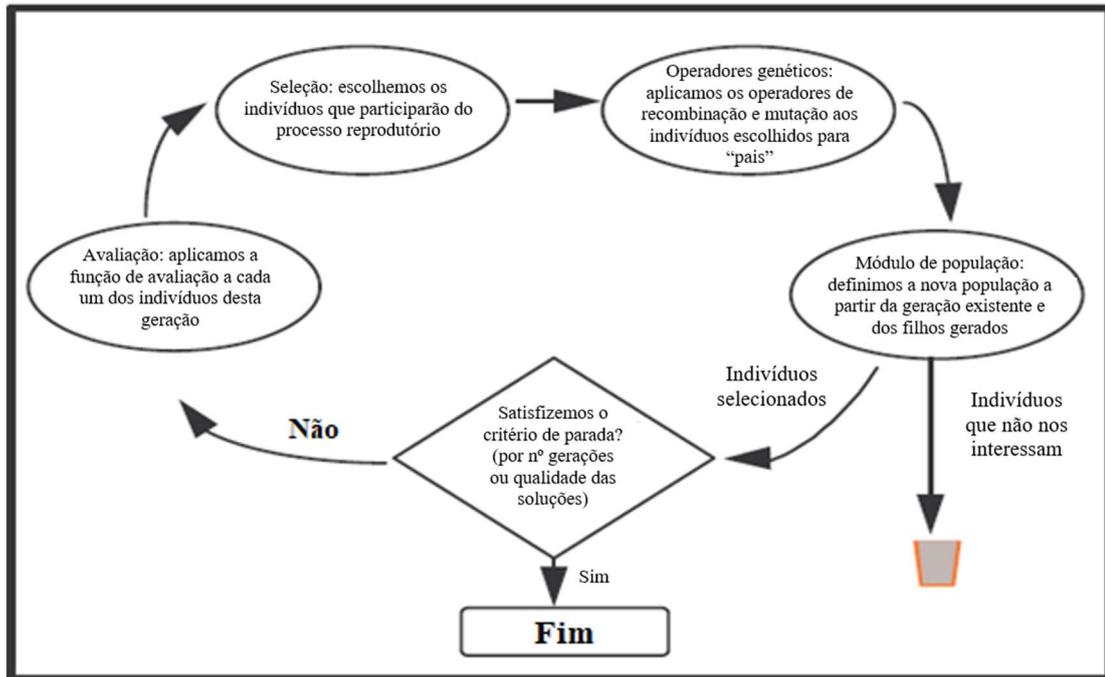
3 ALGORITMOS GENÉTICOS

O Algoritmo genético (AG) pode ser definidos como uma técnica de busca fundada numa metáfora do processo biológico de evolução natural. Eles misturam a sobrevivência entre os melhores indivíduos da população como uma forma de troca de informação genética entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca, visto que, eles não ficarão estagnados simplesmente pelo fato de terem encontrado um máximo local.

Nos algoritmos genéticos populações de indivíduos são criados e sujeitos aos operadores genéticos. Os operadores utilizam uma quantificação da qualidade de cada indivíduo como solução do problema em questão chamada de avaliação deste indivíduo e vão gerar um processo de evolução natural destes indivíduos, que ocasionalmente gerará indivíduos com melhores características que seus antecessores, representando um bom resultado, ou então o melhor resultado possível.

Os AGs são técnicas probabilísticas, e não técnicas determinísticas. Algoritmos Genéticos são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Na figura 1, apresenta-se um esquema de um AG.

Figura 4 – Esquema de um AG



Fonte: Linden, Ricardo (2008).

4 OTIMIZAÇÃO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO

A otimização é um importante processo para determinar a melhor solução para um problema dado. Este problema pode ser descrito através de uma expressão denominada função objetivo que deve ser minimizada e estar sujeita a restrições que descrevem situações a qual deve-se evitar em projetos estruturais. As restrições limitam as variáveis de projeto, que se alteram ao longo do processo de otimização. Segundo Correia (2020), uma forma usual de se formular um problema de otimização é a seguinte:

Minimizar:

$$f(x) \tag{1}$$

Sujeito a:

$$a_j(x) = 0, j = 1, \dots, m \tag{2}$$

$$b_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, p \tag{3}$$

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, i = 1, \dots, n \tag{4}$$

Em que, $f(x)$ é a função objetivo a ser otimizada, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ é um vetor que engloba as variáveis de projeto denominadas como x_i , que estão impostas a limites laterais representados por x_i^{min} e x_i^{max} , por fim, n é o número de variáveis de projeto. A expressão

$a_j(x)$ são as restrições de igualdade, onde m é o número total de restrições de igualdade e $b_k(x)$ são as restrições de desigualdade, sendo p é o número total de restrições de desigualdade.

Neste trabalho, será minimizado o custo dos pilares de concreto armado, utilizando a técnica de algoritmos genéticos, tomando como variáveis de projeto as dimensões da seção transversal do pilar, base (b) e altura (h), e a resistência característica do concreto a compressão (f_{ck}). Onde todas as variáveis são discretas. Além disso, todas as variáveis estão sujeitas a limitações de projeto e restrições de funcionalidade, durabilidade e segurança impostas pela norma brasileira ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014).

A função objetivo expressa o custo total de cada pilar, dado pela soma das parcelas do custo unitário do aço, fôrmas e concreto utilizados na fabricação, incluindo a mão de obra. Nas Tabelas 1, 2 e 3, encontram-se os custos unitários dos insumos extraídos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI 2023) para o estado de Pernambuco.

Tabela 1 – Custo unitário do Aço tabela SINAPI 02/2023

CÓDIGO SINAPI	INSUMO	PREÇO
00092762	<i>Cca50 (10.0 mm)</i>	R\$ 13,35/kg
00092763	<i>Cca50 (12.5 mm)</i>	R\$ 11,33/kg
00092764	<i>Cca50 (16.0 mm)</i>	R\$ 11,05/kg
00092765	<i>Cca50 (20.0 mm)</i>	R\$ 12,68/kg
00092766	<i>Cca50 (25.0 mm)</i>	R\$ 12,56/kg
00092759	<i>Cca60 (5.0 mm)</i>	R\$ 15,83/kg

Fonte: O autor (2023).

Tabela 2 – Custos unitários da Fôrma tabela SINAPI 02/2023

CÓDIGO SINAPI	INSUMO	PREÇO
00001358	<i>cfor</i>	R\$ 0,022627/cm ²

Fonte: O autor (2023).

Tabela 3 – Custos unitários do Concreto em Composição própria criada por composições retiradas da SINAPI 02/2023 (COLOCAR EM APÊNDICE)

CÓDIGO SINAPI	INSUMO	PREÇO
COMP1_TCC	<i>custcon (fck = 20MPa)</i>	R\$ 458,82/m ³
COMP2_TCC	<i>custcon (fck = 25MPa)</i>	R\$ 473,39/m ³
COMP3_TCC	<i>custcon (fck = 30MPa)</i>	R\$ 487,96/m ³

COMP4_TCC	<i>custcon</i> ($fck = 35MPa$)	R\$ 502,52/m ³
COMP5_TCC	<i>custcon</i> ($fck = 40MPa$)	R\$ 517,09/m ³
COMP6_TCC	<i>custcon</i> ($fck = 45MPa$)	R\$ 540,29/m ³
COMP7_TCC	<i>custcon</i> ($fck = 50MPa$)	R\$ 577,27/m ³

Fonte: O autor (2023).

4.1 Variáveis de projeto

Para elaboração da rotina, no que se diz respeito aos parâmetros de resistência e custo relacionados ao dimensionamento dos pilares retangulares de concreto armado, foi introduzido no programa as variáveis de projeto. Logo, através dessas, serão elaboradas as restrições e função objetivo a qual deseja-se minimizar.

São elas:

h - altura da seção transversal do pilar;

b - largura da base da seção transversal do pilar;

fck - resistência característica do concreto à compressão.

4.2 Restrições de projeto segundo Norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014)

As restrições impostas às variáveis de projeto, estão apresentadas a seguir:

- Restrições referentes à armadura

Segundo o item 17.3.5.3.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), recomenda-se que a armadura longitudinal mínima (A_s, \min) deve ser dada pela Eq. (11).

$$A_s, \min = \left(0,15 \cdot \frac{N_d}{f_{yd}} \right) \geq 0,004 \cdot A_c \quad (5)$$

No item 17.3.5.3.2, a norma delimita uma área máxima de armadura na seção transversal. A armadura máxima da seção transversal deve ser de 8% da área do concreto, entretanto, devido a região de transpasse das armaduras entre os pavimentos, considera-se como limite de área máxima de aço apenas 4% da área de concreto, dada pela Eq. (12).

$$A_s, \max = 0,04 \cdot b \cdot h \quad (6)$$

- Restrições referentes à geometria do elemento

Em conformidade com o item 13.2.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), as dimensões da seção transversal do pilar não devem ultrapassar valores menores que 14 cm e a área da seção transversal não pode ser inferior a 360 cm².

$$b * h \geq 360 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

$$b \geq 14 \text{ cm} \quad (8)$$

$$h \geq 14 \text{ cm} \quad (9)$$

Desconsidera-se o dimensionamento de pilares parede, conforme ilustra o item 18.5 da NBR 6118 (ABNT, 2014), logo, a maior dimensão do pilar não deve exceder cinco vezes a menor dimensão.

$$b \leq 5. h \quad (10)$$

O diâmetro das barras de armaduras longitudinais deve ser igual ou superior a 10mm e inferior 1/8 da menor dimensão transversal, de acordo com o item 18.4.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$\varnothing \geq 10.0\text{mm} \quad (11)$$

$$\varnothing \leq 1/8 \text{ da menor dimensão} \quad (12)$$

Deve-se considerar no mínimo 4 barras longitudinais, segundo o item 18.4.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$\text{num barras} \geq 4 \text{ barras} \quad (13)$$

O item 18.3.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) destaca a distribuição transversal das barras longitudinais no pilar. O espaçamento livre entre as faces das barras de armaduras longitudinais, medido no plano da seção transversal, deve ser igual ou superior ao espaçamento mínimo.

$$\text{Esp. } H \geq \text{Esp. } H \text{ mín} \quad (14)$$

$$\text{Esp. } V \geq \text{Esp. } V \text{ mín} \quad (15)$$

Em conformidade com o item 18.4.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), destaca a distribuição transversal das barras de armaduras transversais no pilar. O espaçamento

livre entre os estribos deve ser menor ou igual ao espaçamento máximo presente na norma.

$$Esp.Est \leq Esp.Est \text{ máx} \quad (16)$$

- Índice de esbeltez

Para fins de dimensionamento, segundo o item 15.8.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), será utilizado pilares com índice de esbeltez menor que 90, isto, pela sua utilidade e simplificação dos cálculos, desconsiderando os efeitos de fluência.

4.3 Função objetivo

Tem-se o custo total do aço Ca , incluindo as despesas com insumos e mão de obra, composto pela soma das parcelas referente ao custo das barras longitudinais e das barras transversais, conforme a Eq. (5).

$$Ca = CusBarLong + CusBarTrans \quad (17)$$

Em que,

$$CusBarLong = 7.85. asf. L. Cca50 \quad (18)$$

$$CusBarTrans = 7.85. CCa60. (asfEst. CompEst + asfEstSup. CompEstSup) \quad (19)$$

Onde, asf é a área da seção transversal da armadura longitudinal (cm^2), L é o comprimento total do pilar (cm), $Cca50$ é o custo unitário da armadura longitudinal ($\text{R\$/kg}$), $CCa60$ é o custo unitário da armadura transversal ($\text{R\$/kg}$), $asfEst$ é a área da seção transversal da armadura transversal (cm^2), $asfEstSup$ é a área da seção transversal da armadura transversal suplementar e $CompEstSup$ é o comprimento total das barras de armadura transversal suplementar.

Lembrando que, neste trabalho, utiliza-se apenas pilares com seções retangulares. O custo total do concreto (Cc), é calculado conforme a Eq. (8).

$$Cc = ct. b. h \quad (20)$$

Na qual, ct é o custo unitário do concreto ($\text{R\$/cm}^3$), b é a menor dimensão (base) e h é a maior dimensão (altura) da seção transversal do pilar.

O custo das fôrmas (Cf) é especificado de acordo com a quantidade de área de fôrma utilizada na fabricação do pilar. Logo, o custo total das fôrmas por unidade de comprimento do pilar é dado pela Eq. (9).

$$Cf = 2.(b + h).Cforun \quad (21)$$

Onde, $Cforun$ é o custo unitário da fôrma (R\$/cm²), b é a menor dimensão (base) e h é a maior dimensão (altura) da seção transversal do pilar.

Definido todos os parâmetros utilizados para a composição final do custo do pilar, obtém-se a função objetivo (f), dada pela soma dos custos unitários do Aço, Concreto e Fôrma, expressa pela Eq. (10), expondo o custo total do pilar por unidade de comprimento, em que, para todos os parâmetros estabelecidos, foram utilizados insumos e mão de obra para composição dos custos.

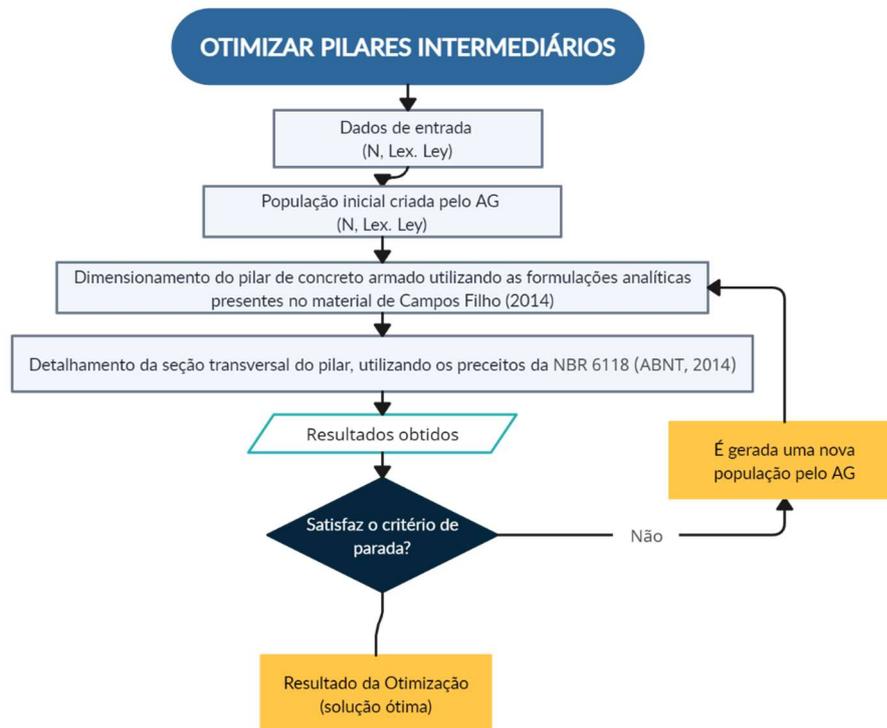
$$f = b.h.L.ct + 2.(b + h).L.Cforun + CusBarLong + CustBarTrans \quad (22)$$

4.4 Etapas do dimensionamento otimizado

As etapas do dimensionamento otimizado serão descritas a seguir. É introduzido os parâmetros de entrada: N sendo o esforço normal aplicado nas extremidades do pilar, Le_x o comprimento efetivo na direção x do pilar e Le_y o comprimento efetivo na direção y do pilar. Com uma população inicial (b, h, fck), arbitrada pela função ga presente no MATLAB, dar-se início ao dimensionamento e detalhamento otimizado do pilar. Obtido os resultados, é verificado se a solução ótima foi encontrada. Caso sim, salva-se em arquivo de texto os resultados obtidos do indivíduo ótimo. Caso não, é criada uma população gerada através da existente, repetindo o processo até convergir para o indivíduo ótimo.

Na sequência é realizada a plotagem da seção transversal ótima do pilar otimizado. As etapas do dimensionamento otimizado se encontram esquematizadas na Figura 2.

Figura 5 - Fluxograma do dimensionamento otimizado dos pilares

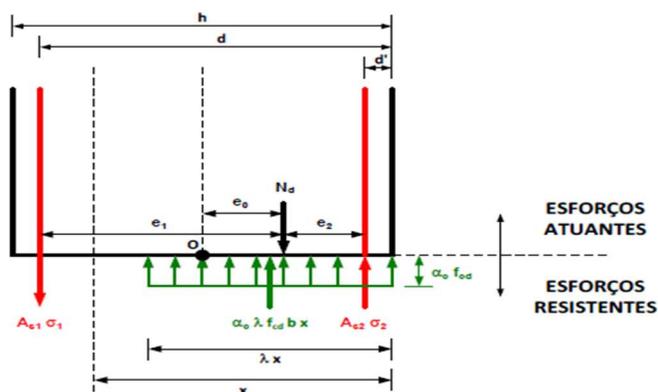


Fonte: O autor (2023).

4.5 Implementação de pilares

A criação de uma rotina para o dimensionamento otimizado dos pilares foi dividida em três partes. Primeiramente, foi escrito um código para o dimensionamento de pilares intermediários e de extremidade, onde, para o cálculo da área de aço, utilizou-se as formulações analíticas presentes no material de Campos Filho (2014), as quais foram transpostas e implementadas na ferramenta MATLAB, acrescentando os preceitos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Na Figura 3, Campos Filho (2014) apresenta o diagrama para a determinação das relações de equivalência entre esforços atuantes e resistentes.

Figura 6 - Diagrama de equivalência entre esforços atuantes e resistentes



Fonte: Campos Filho (2014)

Através do diagrama da figura 3, Campos Filho (2014) propôs quatro casos de dimensionamento para pilares de armaduras simétricas sujeitos a flexo-compressão normal, representados pelas formulações analíticas que se encontram esquematizadas na tabela 4.

Tabela 4 - Equações de equilíbrio, para cálculo de armaduras simétricas, presente em Campos Filho (2014)

Casos	Equações de equilíbrio
Caso 1	$N_d = \alpha_c \lambda f_{cd} b x + A_s (\sigma_2 - \sigma_1)$ $N_d e_1 = \alpha_c \lambda f_{cd} b x (d - 0,5 \lambda x) + A_{s2} \sigma_2 (d - d')$ $N_d e_2 = -\alpha_c \lambda f_{cd} b x (0,5 \lambda x - d') + A_{s1} (d - d')$
Caso 2	$N_d = \alpha_c \lambda f_{cd} b x + A_s (\sigma_2 - \sigma_1)$ $N_d e_1 = \alpha_c \lambda f_{cd} b x (d - 0,5 \lambda x) + A_{s2} \sigma_2 (d - d')$ $N_d e_2 = \alpha_c \lambda f_{cd} b x (0,5 \lambda x - d') - A_{s1} (d - d')$
Caso 3	$N_d = \alpha_c \lambda f_{cd} b x + A_s (\sigma_2 + \sigma_1)$ $N_d e_1 = \alpha_c \lambda f_{cd} b x (d - 0,5 \lambda x) + A_{s2} \sigma_2 (d - d')$ $N_d e_2 = \alpha_c \lambda f_{cd} b x (0,5 \lambda x - d') + A_{s1} \sigma_1 (d - d')$
Caso 4	$N_d = \alpha_c \lambda f_{cd} b h + A_s (\sigma_2 + \sigma_1)$ $N_d e_1 = \alpha_c \lambda f_{cd} b h (d - 0,5 h) + A_{s2} \sigma_2 (d - d')$ $N_d e_2 = \alpha_c \lambda f_{cd} b h (0,5 h - d') + A_{s1} \sigma_1 (d - d')$

Fonte: O autor (2023).

A validação da rotina criada foi a segunda etapa a ser realizada, seguida da implementação do detalhamento da seção transversal e do algoritmo genético para otimizar os pilares. Toda implementação realizada neste trabalho está ilustrada no fluxograma presente na figura 7, em que, o autor criou uma rotina de dimensionamento de pilares intermediários e extremidade, ambos em concreto armado e em seguida, a implementação do algoritmo genético na rotina já criada foi realizada por Silva Júnior (2022).

Figura 7 - Fluxograma da implementação da rotina no MATLAB



Fonte: O autor (2023).

4.6 Validação da rotina

A validação da rotina de dimensionamento de pilares de concreto armado foi realizada através de uma análise comparativa de exemplos conhecidos na literatura com os resultados obtidos pelo programa. Uma vez que, este trabalho busca realizar o dimensionamento otimizado de pilares intermediários, para efeitos de validação, será utilizado exemplos de pilares intermediários presentes na literatura de Campos Filho (2014) e Bastos (2020), desprezando a validação da rotina em relação a pilares de extremidade.

Para determinação da área de aço, foram utilizadas as equações de equilíbrio, presentes no material de Campos Filho (2014), ilustradas na tabela 4. Neste trabalho, embora utilize-se o método da rigidez K aproximada para o cálculo do momento fletor total, para efeito de comparação e validação, utilizou-se também, o método da curvatura aproximada.

Os resultados do dimensionamento retirados da literatura pelos autores citados e os resultados obtidos pela rotina de cálculo analítica, encontram-se no Quadro 1, lembrando que, ao contrário do dimensionamento otimizado que utiliza a base, altura e fck como variáveis de projeto, no dimensionamento feito pela rotina de cálculo analítica, os parâmetros citados anteriormente são mantidos fixos e introduzidos como dados de entrada.

Quadro 1 - Dimensionamento dos pilares intermediários

EXEMPLO 1 - ÁBACO			EXEMPLO 2 - ÁBACO		
BASTOS (15.1.1 Ex 1) Pág. 78	ÁREA TOTAL DO AÇO LITERATURA (cm ²)		BASTOS (15.1.2 Ex 2) Pág. 85	ÁREA TOTAL DO AÇO LITERATURA (cm ²)	
PROGRAMA DESENVOLVIDO	CURV. APROXIMADA	K APROXIMADA	PROGRAMA DESENVOLVIDO	CURV. APROXIMADA	K APROXIMADA
b=hx= 50cm	10,84	6,40	b= 50cm	31,03	27,09
h=hy= 20cm	ÁREA TOTAL DO AÇO PROGRAMA (cm ²)		h= 20cm	ÁREA TOTAL DO AÇO PROGRAMA (cm ²)	
d'= 4cm	CURV. APROXIMADA	K APROXIMADA	d'= 4cm	CURV. APROXIMADA	K APROXIMADA
CA50	9,51	5,41	CA50	30,64	27,36
Max=0 MBx=0	DOMÍNIO LITERATURA	DOMÍNIO PROGRAMA	Max=0 MBx=0	DOMÍNIO LITERATURA	DOMÍNIO PROGRAMA
May=0 MBy=0	4	4	May=0 MBy=0	4	4
N= 1000kN	CASO EQUAÇÃO PROGRAMA		N= 1000kN	CASO EQUAÇÃO PROGRAMA	
le= 280cm	CASO 3		le= 480cm	CASO 1	
C30	MEDIANAMENTE ESBELTO		C30	MEDIANAMENTE ESBELTO	
Esforços 2º ordem					

EXEMPLO 3 - EQ. EQUILÍBRIO		
AMÉRICO (6. Ex 1) Pág. 21	ÁREA TOTAL DO AÇO LITERATURA (cm ²)	
PROGRAMA DESENVOLVIDO	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	
b= 30cm	16,42	
h= 40cm	ÁREA TOTAL DO AÇO PROGRAMA (cm ²)	
d'= 5cm	ROTINA	
CA50	16,44	
Max=0 MBx=0	DOMÍNIO LITERATURA	DOMÍNIO PROGRAMA
May=0 MBy=0	5	5
N= 1500kN	CASO EQUAÇÃO PROGRAMA	
le= 260cm	CASO 3	
C25	PILAR CURTO	
Esforços 1º ordem		

Fonte: O autor (2023).

Analisando os resultados das áreas de aço obtidas de Bastos (2020), nota-se uma diferença de -12,26% da área presente na literatura para área encontrada pelo programa, isto se dá pelo método do cálculo utilizado na obtenção da área de aço necessária, uma vez que o autor Bastos (2020) utiliza ábacos em seu dimensionamento, enquanto, no programa criado utiliza-se as equações de equilíbrio apresentadas na Tabela 4. Logo, constata-se que, se comparada a área de aço da literatura de Campos Filho (2014) e do programa existe uma diferença de menos de 0,1% da taxa de aço das armaduras devido a utilização das equações de equilíbrio para o dimensionamento da área de aço pelo autor.

Além disso, o uso de diferentes métodos para obtenção do momento fletor de cálculo tem influência sobre o resultado final no cálculo da área de aço, onde o método da curvatura aproximada apresentou uma taxa de área de aço superior aos outros métodos.

4.7 Validação da rotina de otimização de pilares intermediários

Após a implementação e validação do dimensionamento de pilares intermediários de concreto armado, foi realizado a implementação do algoritmo genético no código de dimensionamento criado, lembrando que, todo esse processo de implementação do algoritmo genético no código foi realizado por Silva Júnior (2022). Logo, neste item, será apresentado a validação do programa de otimização. Vale ressaltar que raramente são encontradas pesquisas com formulações e considerações idênticas. Portanto, para fins de validação, utilizamos de exemplo presente no trabalho de Nascimento (2017) que se encontra no Quadro 2.

Quadro 2 - Dimensionamento otimizado dos pilares intermediários

Pavimento	Carga (kN)	Modelo	B	h	As	DOM	Custo total (R\$/m)	Diferença	
			(cm)	(cm)	(cm ²)			%	R\$/m
COBERTA	144,00	NASCIMENTO	19	19	3,14	4	169,94	-1,46%	-R\$ 2,51
		PROGRAMA	15	24	3,14	4	172,45		
TIPO 4	366,90	NASCIMENTO	21,27	21,27	3,14	4	184,46	0,65%	R\$ 1,19
		PROGRAMA	21	20	3,14	4	183,27		
TIPO 3	590,60	NASCIMENTO	25,98	25,98	3,14	4a	221,81	0,95%	R\$ 2,09
		PROGRAMA	25	25	3,45	4	219,72		
TIPO 2	815,70	NASCIMENTO	27,9	32,79	3,74	4a	262,77	0,38%	R\$ 0,98
		PROGRAMA	27	32	3,94	4	261,79		
TIPO 1	1042,00	NASCIMENTO	29,66	38,29	4,74	4a	302,56	2,46%	R\$ 7,27
		PROGRAMA	31	32	5,08	5	295,29		

Fonte: O autor (2023).

Analisando o Quadro 2, constata-se que os resultados obtidos pelo programa de otimização foram bem próximos se comparado com o de Nascimento (2017), mesmo sendo duas implementações diferentes e o código desenvolvido neste trabalho utilizar números inteiros para as dimensões da seção transversal do pilar.

4.8 Considerações utilizadas para o dimensionamento otimizado

Para o dimensionamento otimizado realizado neste trabalho, foram utilizadas as seguintes considerações:

- Foram considerados apenas números inteiros para os valores das dimensões da seção transversal do pilar.
- No detalhamento das armaduras longitudinais, foram considerados diâmetros comerciais de até 16 mm para o aço CA-50.
- Para este trabalho será adotado o método do pilar padrão com rigidez k aproximada, aplicado em pilares com seção transversal retangular constante ao longo do perfil e armadura simétrica constante ao longo do eixo do pilar.
- O dimensionamento da área de aço longitudinal dos pilares de concreto armado, utilizou-se como base de cálculo as equações de equilíbrio apresentadas por Campos Filho (2014).
- Serão dimensionados apenas pilares intermediários, desconsiderando os pilares de extremidade e de canto, que estão submetidos, respectivamente, à flexo-compressão composta e oblíqua, carregamento que não será tratado neste trabalho.
- O método de otimização encontra-se implementado no Toolbox do MATLAB, utilizou-se a função “*ga*” presente no programa. Logo, foi utilizado as mesmas variáveis, função objetivo e restrições apresentadas neste trabalho.
- Por sua usualidade nas edificações, foi utilizado para fins de cálculo o dimensionamento de pilares de concreto armado com armaduras simétricas, tratando-se de um problema de dimensionamento à compressão simples, de uma seção transversal sujeita à força normal N , utilizando os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014).
- No dimensionamento da área de aço do pilar, foram considerados valores de resistência característica do concreto à compressão de 20MPa até 50MPa com o intervalo de 5MPa.
- No detalhamento das barras longitudinais do pilar, foram considerados barras comerciais de 10 mm até 25 mm.
- No dimensionamento da seção transversal do pilar, a base (b) e a altura (h) possuem valores no intervalo de 14 cm até 100 cm de comprimento.

- Foi adotado a massa específica do aço como $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ conforme sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De modo a comprovar a importância da rotina de otimização, nessa seção serão apresentados os resultados referentes ao dimensionamento otimizado de pilares intermediários de concreto armado, seguindo os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Inicialmente, foi realizado a otimização de 19 pilares, apresentados no Quadro 3, sujeitos às variáveis de projeto, função objetivo, restrições e custos unitário dos materiais que compõe o pilar, conforme apresenta o capítulo 4 deste trabalho. Para dimensionamento otimizado dos pilares, utilizou-se de pilares com 300cm de comprimento efetivo e classe de agressividade II, que conforme a Tabela 7.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), apenas é permitido o uso de f_{ck} maior ou igual a 25MPa.

A finalidade destas otimizações é estabelecer um padrão de comportamento das variáveis em pilares com solicitações baixas e altas. Logo, para essas análises paramétricas foram considerados os seguintes intervalos: o esforço normal a qual estão sujeitos os pilares variam entre 100 kN e 1000 kN com incrementos de 100 kN; em seguida, iniciam em 2000 kN e terminam em 10.000 kN com incrementos de 1000kN; a resistência característica do concreto à compressão tem seu valor variando entre 25 MPa e 50 MPa com intervalos de 5 MPa. Os 19 pilares encontram-se listados na Tabela 5, em função do esforço normal aplicado no mesmo.

Os resultados numéricos obtidos pelo programa de otimização desenvolvido estão dispostos no Quadro 3 e 4. Apresenta-se o número do pilar, o esforço normal (Carga) aplicado em kN, os valores da seção transversal do pilar, base (B) e de altura (H) em cm, o f_{ck} em MPa, área de aço necessária (A_{sN}), o domínio de deformação (DO), o custo total (Total), custos do concreto (Conc.), fôrma (For.), aço (Aço), estribo (Est.) e custo do estribo suplementar (E. Sup.) em R\$.

Quadro 3 - Otimização dos pilares P1 a P10

Pilar	Carga (kN)	B	H	fck	AsN	DO	Custos (R\$/m)					
							Total	Conc.	For.	Aço	Estr.	E. Sup.
P1	100	20	18	25	3,14	3	247,05	28,33	171,97	32,92	13,83	0,00
P2	200	19	19	45	3,14	3	251,48	32,76	171,97	32,92	13,83	0,00
P3	300	23	16	40	3,14	4	254,72	31,08	176,49	32,92	14,23	0,00
P4	400	23	16	50	3,14	4	258,63	34,99	176,49	32,92	14,23	0,00
P5	500	19	19	45	3,14	4	251,48	32,76	171,97	32,92	13,83	0,00
P6	600	24	20	40	3,14	4	288,84	40,53	199,12	32,92	16,27	0,00
P7	700	21	21	50	3,38	4	288,02	41,93	190,07	43,66	12,36	0,00
P8	800	23	21	50	3,86	4	301,71	45,92	199,12	43,66	13,01	0,00
P9	900	24	22	50	4,35	4	315,70	50,20	208,17	43,66	13,67	0,00
P10	1000	24	24	50	4,83	4	329,96	54,76	217,22	43,66	14,32	0,00

Fonte: O autor (2023).

Analisando os resultados dos pilares P1 a P10 pode-se observar que o domínio de deformação ótimo para esse intervalo é o 4, além disso, constata-se que o programa optou por utilizar as menores dimensões possíveis para a seção transversal do pilar, tornando mais econômico dar prioridade ao aumento do fck e a taxa de área de aço à medida que o esforço normal é aumentado. Este comportamento do fck e área de aço é presumível, uma vez que, ao diminuir as dimensões da seção transversal do pilar, necessita-se elevar o valor destes parâmetros para suportar os esforços solicitantes. Vale destacar que para carregamentos até 100kN, os pilares ótimos apresentaram fck abaixo de 30 MPa.

Quadro 4 - Otimização dos pilares P10 a P19

Pilar	Carga (kN)	B	H	fck	AsN	DO	Custos (R\$/m)					
							Total	Conc.	For.	Aço	Estr.	E. Sup.
P11	2000	32	30	50	9,81	5	478,03	91,27	280,57	87,32	18,87	0,00
P12	3000	44	32	50	16,07	5	644,08	133,86	343,93	139,52	18,74	8,02
P13	4000	46	41	50	19,32	5	774,20	179,31	393,70	174,41	21,60	5,18
P14	5000	54	42	50	27,03	5	934,11	215,63	434,43	244,17	23,95	15,93
P15	6000	62	44	50	31,10	5	1066,94	259,36	479,70	279,05	26,55	22,28
P16	7000	75	42	50	39,63	5	1238,88	299,48	529,47	348,67	29,41	31,86
P17	8000	80	47	50	38,64	5	1348,77	357,47	574,73	348,80	32,01	35,76
P18	9000	90	46	50	43,47	5	1467,93	393,60	615,47	383,70	34,35	40,81
P19	10000	99	46	50	49,98	5	4385,07	788,67	1968,50	1360,40	110,09	157,41

Fonte: O autor (2023).

Observando o Quadro 4, constata-se que, o domínio de deformação ótimo é o 5. Ou seja, para carregamento de até 1.000kN, os pilares ótimos encontram-se dentro do domínio 4, em contrapartida, pilares com carregamento superior à 2.000kN, tendem a estar no domínio 5. Ao considerar os dezenove casos presentes nos Quadros 3 e 4, a maioria dos casos analisados

encontram-se no domínio 4 e 5 (aproximadamente 89,47% dos casos), enquanto 10,53% se encontram no domínio 3. Os valores de fck se mantêm na maioria das situações entre 40 MPa e 50 MPa, cerca de 94,74% do total de casos (19), onde 73,68%, 10,53% e 10,53% são referentes a um fck de 50MPa, 45MPa e 40MPa, respectivamente. Foi determinado o fck ótimo de 50 MPa para os pilares com esforços normais acima de 700 kN, visto que permite uma grande redução no uso de concreto necessário para resistir aos esforços solicitantes.

No Quadro 5, apresenta-se o número do pilar, o esforço normal (Carga) aplicado em kN, área de aço necessária (AsN) em cm², o número de barras longitudinais (NB), o diâmetro de cada barra longitudinal (D) em mm, e o número de estribos (NumEst). Analisando o Quadro 5, observa-se um aumento significativo de área de aço necessária entre dois intervalos, são eles P10-P11 e P11-P12, aumentando cerca de 203,10% e 163,81%, respectivamente. Além disso, para pilares sujeitos a esforços de 700kN até 2000kN, a barra ótima é 12.5mm. Pilares com carregamento igual ou acima de 3000kN, a barra considerada pela rotina otimizada é 16mm. O número de barras de aço e seus diâmetros foram determinados como o mínimo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) até o P6. Sendo necessário o uso de um diâmetro comercial maior para os P7 a P19.

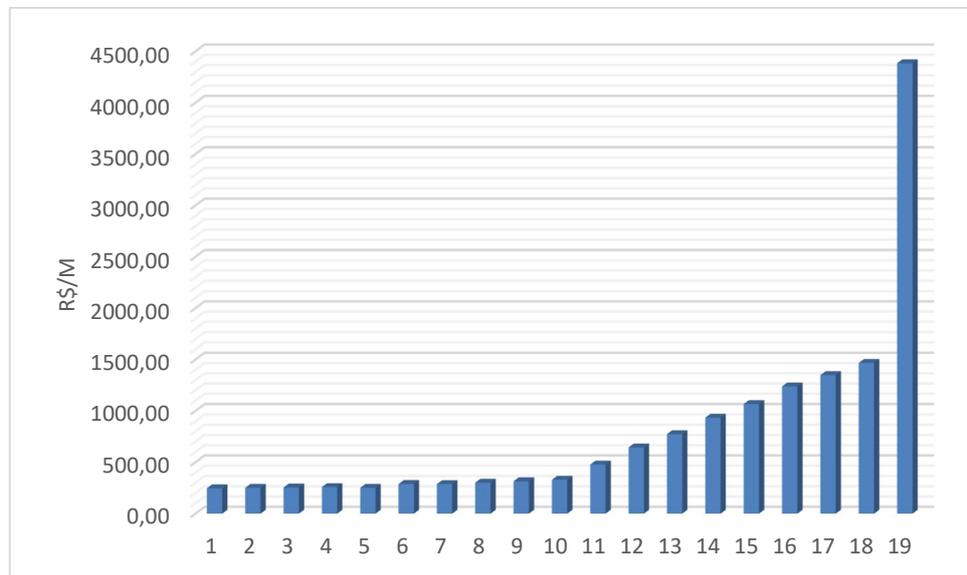
Quadro 5 - Otimização de pilares P1 a P19, quantidade de barras e diâmetro

Pilar	Carga	AsN	NB	D	NumEst
P1	100	3,14	4	10	25
P2	200	3,14	4	10	25
P3	300	3,14	4	10	25
P4	400	3,14	4	10	25
P5	500	3,14	4	10	25
P6	600	3,14	4	10	25
P7	700	3,38	4	12,5	20
P8	800	3,86	4	12,5	20
P9	900	4,35	4	12,5	20
P10	1000	4,83	4	12,5	20
P11	2000	9,81	8	12,5	20
P12	3000	16,07	8	16	16
P13	4000	19,32	10	16	16
P14	5000	27,03	14	16	16
P15	6000	31,10	16	16	16
P16	7000	39,63	20	16	16
P17	8000	38,64	20	16	16
P18	9000	43,47	22	16	16
P19	10000	49,98	26	16	16

Fonte: O autor (2023).

O Gráfico 1 mostra o custo total de cada pilar otimizado em função do esforço normal aplicado no pilar.

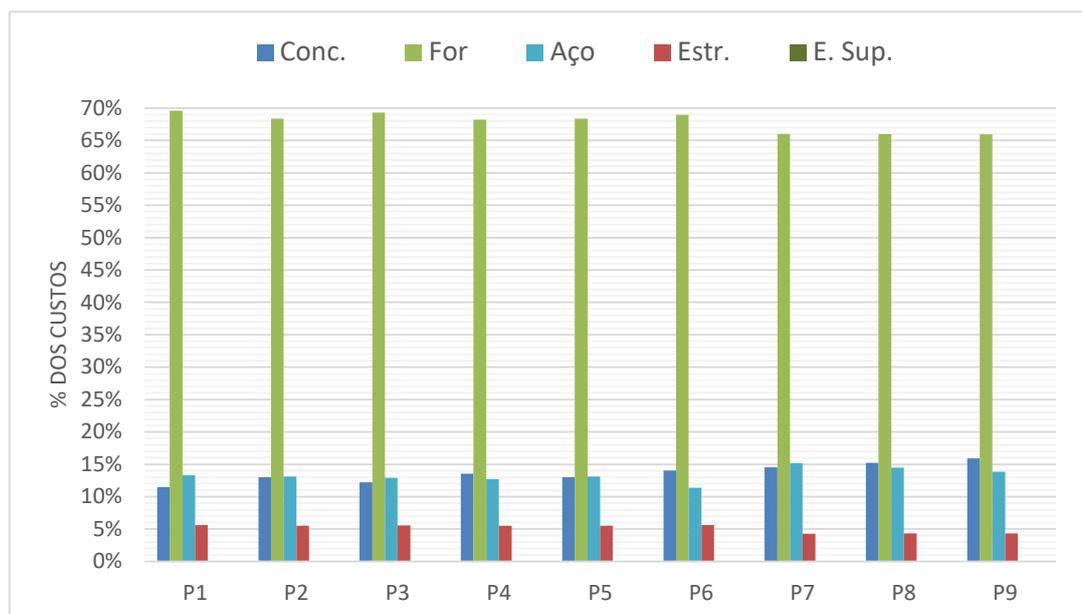
Gráfico 1 - Custo total dos pilares otimizados



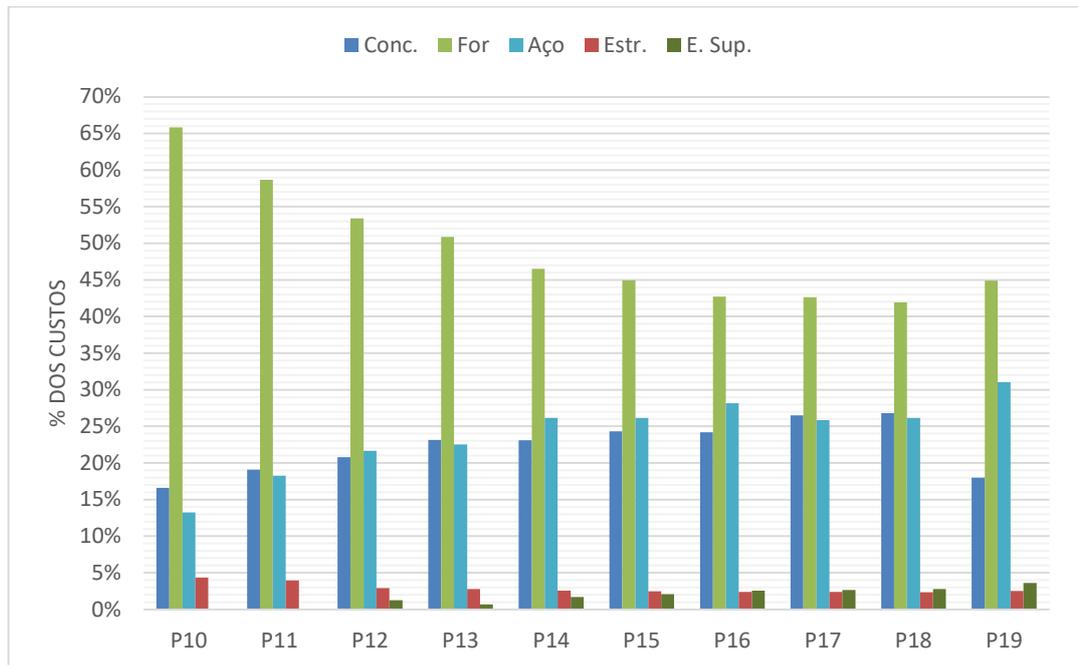
Fonte: O autor (2023).

Nos Gráficos 2 e 3, estão distribuídos os custos individuais de cada material que compõem os pilares, constata-se que o material responsável pela maior parcela do custo é as fôrmas, seguido das fôrmas, aço, concreto e os estribos.

Gráfico 2 - Custo unitário dos insumos por pilar P1 à P9

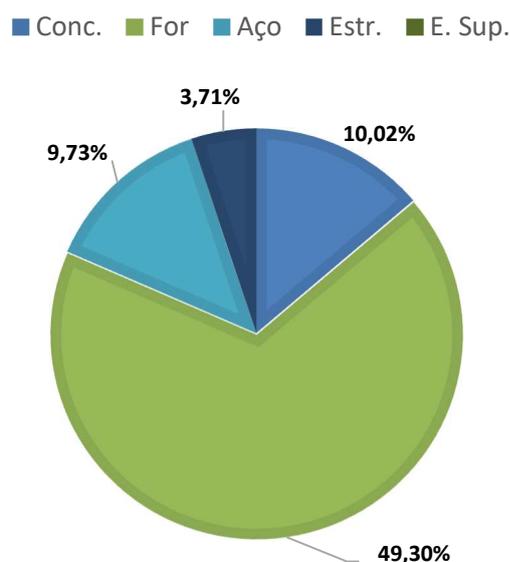


Fonte: O autor (2023).

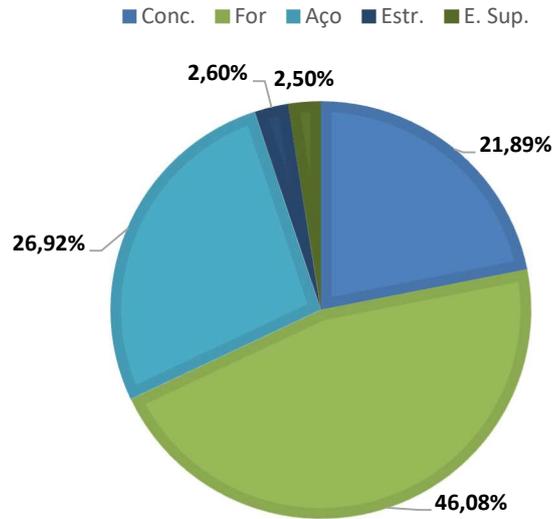
Gráfico 3 - Custo unitário dos insumos por pilar P10 à P19

Fonte: O autor (2023).

Através do Gráfico 3, observa-se a presença de estribos suplementares apenas para pilares com carregamento igual ou superior a 3000kN. O Gráfico 4 e o Gráfico 5 apresentam a distribuição geral destes custos unitários presentes nos pilares P1 à P9 e P10 à P19, respectivamente, utilizados como exemplo neste trabalho.

Gráfico 4 - Custo unitário dos insumos que compõe os pilares P1 a P9

Fonte: O autor (2023).

Gráfico 5 - Custo unitário dos insumos que compõe os pilares P10 a P19

Fonte: O autor (2023).

O custo relacionado as fôrmas, em média, representam 49,30% e 46,08% do custo total dos pilares P1 à P9 e P10 à P19, respectivamente, sendo o insumo de maior custo nos dois intervalos.

Ao examinar os custos individuais dos materiais que compõem estes pilares, verifica-se que, entre os pilares P1 e P18, as fôrmas foi o material com maior porcentagem de custo entre os insumos estudados.

Neste âmbito, através dos resultados de dimensionamento otimizado de pilares intermediários de concreto armado, seguindo os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014), obtidos neste trabalho, foram identificados e analisados diversos parâmetros que nos levem a elaboração de projetos estruturais otimizados, todos dispostos no item 5 deste trabalho, sendo um deles o aumento do fck do concreto, proporcionando uma maior rigidez ao pilar, diminuindo assim as dimensões da seção transversal e o custo referente a parcela das fôrmas, o qual se mostrou ser o material com maior parcela de custo. Logo, conclui-se que a rotina em andamento gerou resultados satisfatórios para a análise e otimização de pilares em concreto armado, promovendo a elaboração de um projeto eficiente, sustentável e dentro dos preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014).

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado o dimensionamento otimizado de pilares de concreto armado com o objetivo de reduzir o custo final dos pilares, analisar o comportamento das variáveis que envolvem o dimensionamento ótimo e insumos que compõe os pilares estruturais, buscando a identificação de parâmetros ótimos que ajudem na tomada de decisões em projetos estruturais reais. Todos os pilares avaliados são de concreto armado e estão sujeitos aos preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para o dimensionamento dos pilares, foi implementado no MATLAB uma rotina de cálculo, onde, para o cálculo da área de aço, utilizou-se as equações de equilíbrio de Campos Filho (2014). Para a otimização estrutural, Silva Júnior (2022) aplicou o método dos Algoritmos Genéticos (AGs), presente no MATLAB, no programa de dimensionamento criado pelo autor. A rotina em andamento gerou resultados satisfatórios para a análise e otimização de pilares em concreto armado.

As variáveis de projeto utilizadas neste trabalho foram a base e altura da seção transversal e o f_{ck} do pilar. A variável de maior influência sobre o resultado ótimo dos pilares foi o f_{ck} . Pilares ótimos sujeitos a esforços normais entre 700kN a 9000kN, apresentaram f_{ck} igual a 50 MPa.

Ao tratar do custo dos pilares, as formas representam o maior índice se comparado com o custo total, representando em média 49,30% e 46,08% do custo total dos pilares P1 à P9 e P10 à P19, respectivamente, sendo o insumo de maior custo nos dois intervalos. O programa optou por aumentar o valor do f_{ck} e taxa de área de aço a medida que o esforço normal é aumentado, de modo a utilizar as menores dimensões possíveis para a seção transversal do pilar, promovendo uma diminuição na parcela da forma que apresenta um peso maior no custo total do pilar. Ou seja, pilares ótimos tornam-se mais econômicos ao dar preferência ao aumento do f_{ck} e taxa de aço a medida que o esforço normal é aumentado.

Pilares ótimos tendem a estar no domínio 4 e 5, em que, para pilares com carregamento entre 300kN a 1000kN, o domínio ótimo é o 4, enquanto que, para carregamentos superiores a 2000 kN, o domínio ótimo escolhido pela rotina é o 5. O surgimento de estribos suplementares surgem para pilares com carregamento superior a 3000 kN.

Este trabalho colaborou para o avanço na área de otimização estrutural, evidenciando o comportamento e a influência das variáveis de projeto no custo total dos pilares.

Em conclusão, este trabalho resultou na adaptação e utilização de uma rotina que realiza o dimensionamento otimizado e tradicional de pilares intermediários de concreto armado.

Podendo ser utilizado para identificação de parâmetros ótimos que ajudem na tomada de decisões em projetos estruturais reais, evitando os desperdícios de insumos, aumentando a lucratividade da empresa e promovendo uma maior sustentabilidade na indústria da construção civil. Logo, através dos resultados obtidos neste trabalho, torna-se imprescindível o investimento de entidades públicas e privadas em pesquisas que assim como esta, busque desenvolver programas de otimização em projetos de estruturas de concreto armado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **Projetos de Estruturas de Concreto – Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. S. S. **Flexão composta e pilares de concreto armado**, 179p. Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru/SP. 2020.

BEZERRA, L. A. **Emprego de Algoritmos Genéticos para Otimização de Vigas de Concreto Armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Pernambuco - UFPE-CAA, Caruaru-PE, 2017.

CAMPOS FILHO, A. **Dimensionamento de seções retangulares de concreto armado à flexão composta normal**. Notas de aula da disciplina de concreto armado II, 36p. Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2014.

CAMPOS FILHO, A. **Projeto de pilares de concreto armado**. Notas de aula da disciplina de concreto armado II, 36p. Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2014.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4ª ed, São Carlos: EdUFScar, 2014.

CORREIA, R. S. **Avaliação da Confiabilidade de Vigas Otimizadas de Concreto Armado**. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

FUSCO, PÉRICLES BRASILIENSE. **Estruturas de concreto – Solicitações normais**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1981.

JUNIOR, G. S. S. **Otimização de pórticos planos de concreto armado utilizando algoritmo genético**. 2022. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2022.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos teoria e implementação**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Ciência Moderna, 3ª Edição, 2012.

MONTEIRO, J. M. A. **Dimensionamento Otimizado de Vigas em Pórticos Planos de Concreto Armado Utilizando Algoritmos Genéticos**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

NASCIMENTO, K. M. B. **Dimensionamento otimizado de pilares de concreto armado utilizando Algoritmos Genéticos**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

NUNES, J. P. A. **Otimização de lajes nervuradas de concreto armado, utilizando Algoritmo Genético**. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

PEREIRA, R. E. L. **Otimização topológica de sistema de contraventamento em edificações, considerando os efeitos do vento**. 2018. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

REGINATO, L. H. e KRIPKA, M. **Dimensionamento otimizado da estrutura de um edifício em concreto armado: validação através de software comercial**. Revista de engenharia e tecnologia, v. 10, n. 2, p. páginas 144-159, 2018.

SALVADOR, S. M. B. **Estudo do efeito dos parâmetros algorítmicos nos critérios de resolução OC, SAO e MMA em problemas tridimensionais com o método de otimização SIMP**. 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

SIAS, F. M. e ALVES, É. C. **Dimensionamento ótimo de pilares de concreto armado**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 9, n. 3, 2014.

SILVA, L. J. **“Otimização topológica de edifícios considerando a influência das cargas de vento”**. 2021. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

**SINAPI – SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA
CONSTRUÇÃO CIVIL.** Caixa Econômica Federal, fevereiro, 2023.

APÊNDICE A – Composição de custos do pilar

Código/ Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit (R\$)	Total (R\$)
COMP1_TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 20 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	772,91	772,91
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEANTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF_06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF_06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034492 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C20, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	450,00	496,35
COMP2_TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 25 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	786,89	786,89
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEANTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF_06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF_06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034493 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C25, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	462,68	510,33
COMP3_TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 30 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	803,90	803,90
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEANTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF_06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF_06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034494 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C30, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	478,10	527,34
COMP4_TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 35 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	820,91	820,91
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,450	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEANTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63

90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF 06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF 06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034495 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C35, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	493,52	544,35
COMP5 TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 40 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	844,41	844,41
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF 06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF 06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034496 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C40, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	514,83	567,85
COMP6 TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 45 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	907,56	907,56
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,450	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF 06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF 06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034481 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C45, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	572,08	631,00
COMP7 TCC Próprio	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 50 MPA, COM USO DE BALDES - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF 02/2022	m³	1,000	950,73	950,73
88262 SINAPI	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,00	61,47
88309 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	2,459	25,38	62,40
88316 SINAPI	SERVEENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	7,377	20,42	150,63
90586 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF 06/2015	CHP	1,042	1,31	1,36
90587 SINAPI	VIBRADOR DE IMERSÃO, DIÂMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF 06/2015	CHI	1,417	0,50	0,70
00034483 SINAPI	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C50, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	m³	1,103	611,22	674,17

Fonte: O autor (2023)

MATHEUS SOARES CABRAL

**DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES INTERMEDIÁRIOS DE
CONCRETO ARMADO SEGUINDO OS PRECEITOS DA NORMA NBR 6118/14**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Área de concentração: Estruturas

Aprovado em 12 de maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Bono (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

Geovane Sercundes da Silva Junior Nascimento (Avaliador externo)
Universidade Federal de Pernambuco