

ALGORITMO DE VERIFICAÇÃO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO POR SCILAB

VINÍCIUS NAVARRO VARELA TINOCO¹, ISABELLA SILVA MENEZES², ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO³, FLORISVALDO CARDOZO BONFIM JUNIOR⁴ e TARNIÊ VILELA NUNES NARQUES⁵

¹Mestrando PPGECiv e Bolsista CAPES, UFSCAR, São Carlos-SP, navarrotinoco@gmail.com;

²Mestranda PPGECiv, UFSCar, São Carlos-SP, ec.isabellasm@gmail.com;

³PhD. em Engenharia de Estruturas e Prof. UFSCar, São Carlos-SP, christoforoal@yahoo.com.br;

³Msc. em Engenharia Elétrica, Prof. do Programa de Pós Graduação em Inteligência Artificial, Uniube, Uberaba-MG, florisvlado.bonfim@gmail.com;

⁴Msc. em Estruturas e Geotecnia PPGECiv, UFSCAR, São Carlos-SP, tarnienarques@outlook.com.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este trabalho objetivou a criação de um programa de verificação para pilares retangulares e simétricos de concreto armado baseado na NBR 6118 e nos conceitos de resistência dos materiais. A metodologia abordou a possibilidade da construção do algoritmo com linguagem SciLab para verificação de sessões de concreto armado, avaliando questões normativas como espaçamentos, diâmetros e seções mínimas, majoração de cargas, e também a resistência da seção utilizando o conceito de limites e domínios. Para tal, o software varia a linha neutra nas direções vertical e horizontal da seção transversal do pilar, gerando momentos resistentes em ambas as direções e para diferentes resistências normais que podem ser comparadas aos esforços solicitantes. O resultado demonstra a viabilidade da construção de um software de verificação baseado na norma e que pode ter metodologia replicada para diversas outras peças de concreto. Os gráficos de envoltória obtidos são condizentes com os previstos em literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de concreto armado, Programação, Engenharia Civil, Dimensionamento.

ALGORITHM FOR VERIFICATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY SCILAB

ABSTRACT: This work aimed to create a verification program for rectangular and symmetric reinforced concrete columns based on NBR 6118:2014 and on the concepts of materials science. The methodology addressed the possibility of constructing the algorithm with SciLab language to verify reinforced concrete sections, evaluating normative issues such as spacing, minimum diameters and sections, load increase, and also the section strength using the concept of limits and domains. For that, the software varies the neutral line in the vertical and horizontal directions of the column transversal section, generating resistance flexion moments in both directions and for different normal resistances that can be compared to the solicitant forces. The result demonstrates the feasibility of building a verification software based on the standardization and that this methodology can be replicated to several other concrete pieces. The envelope graphics obtained are consistent with those provided for in the literature.

KEYWORDS: Reinforced Concrete Structures, Programming, Civil Engineering, Design.

INTRODUÇÃO

O concreto armado, produto manufaturado mais utilizado do globo, é dimensionado por meio de diversas metodologias que se encontram tanto em livros de ciência dos materiais como em normatizações das diferentes regiões do mundo. A NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas

Técnicas [ABNT], 2014) determina que pilares são “elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes”. Seu dimensionamento, portanto, deve ser dado principalmente em função dessa característica, de forma que a principal outra consideração é a da excentricidade na qual esta é aplicada, gerada por considerações construtivas de desaprumos, absorção de momentos advindos das vigas, considerações de efeitos de segunda ordem ou fluência.

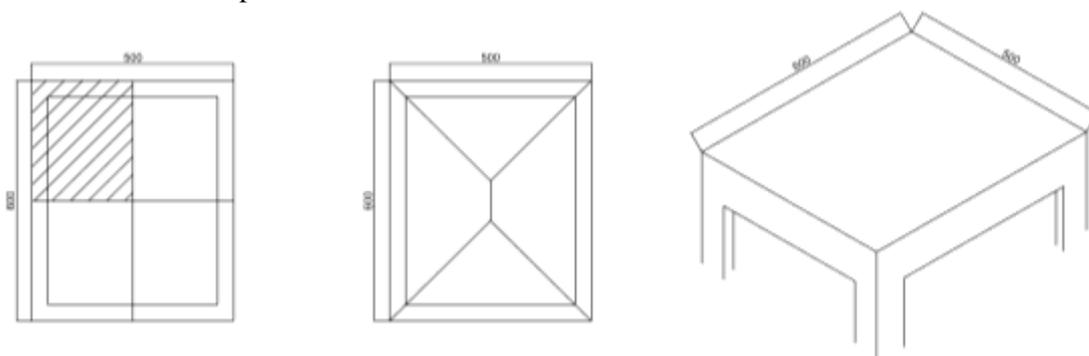
O modelo de dimensionamento de pilares apresentado por Carvalho e Pinheiro (2013) utiliza-se de equações aproximadas para definir a seção requerida, ábacos para disposições específicas do aço na seção de concreto que recebem esforços adimensionais. Esta forma de dimensionamento, na medida que dá a liberdade do profissional de direcionar o dimensionamento a uma geometria desejada, normalmente utilizada em decorrência de questões construtivas ou arquitetônicas, pode não dar a possibilidade de desenvolvimento de técnicas para a otimização da peça, ou seja, a redução de sua seção ou do seu custo. O cálculo visto em Araújo (2014) apresenta o dimensionamento puro e analítico onde equações diferenciais de maior complexidade são utilizadas para obter-se a área de aço necessária, processo normalmente não reproduzido por projetistas do meio prático. A alta complexidade destes processos se dá em fator da posição da linha neutra se fator determinante para as resistências da seção e também vice-versa.

A necessidade de otimização de pilares é uma preocupação sempre presente na engenharia, tendo vista que o papel do projetista é garantir a segurança com recursos limitados. Tendo em vista a complexidade envolvida no dimensionamento de pilares e a necessidade de engenheiros e projetistas tomarem decisões hábeis quanto às capacidades de peças de concreto armado, o presente trabalho tem como objetivo principal a criação de um programa de verificação para pilares retangulares e simétricos de concreto armado baseado na NBR 6118:2014 e nos conceitos de resistência dos materiais. Analisa-se também as potencialidades deste tipo de programa.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho traz o estudo de caso apresentado por meio da Figura 1 para consideração dos esforços a serem analisados. Tem-se um pilar de canto de 2 metros de altura que recebe vigas biapoiadas de dimensões de 20 centímetros por 40 centímetros, que, por sua vez, apoiam uma laje de 10 centímetros de altura com dimensões de 5 metros por 6 metros. O pilar está no térreo de uma edificação com 10 pavimentos. Para considerar a carga característica por pavimento, calcula-se a força peso das peças de concreto armado e a carga da ocupação pelos dados da NBR 6120 (ABNT, 2019). Calcula-se as cargas na vigas, momentos transmitidos das mesmas aos pilares e todas as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014). Ao considerar as excentricidades mínimas, calculadas de primeira ordem (iniciais e acidentais) e de segunda ordem (esbeltez, curvatura e fluência), chega-se aos principais dados para esforços solicitantes como sendo a força normal solicitante característica de 40,78 kN, excentricidade na direção x e na direção y respectivamente de 4,98 cm e 4,40cm.

Figura 1. Dimensões do problema estudo de caso.



Utilizando a linguagem de programação do SciLab, desenvolve-se um software de engenharia baseado na definição dos domínios do estado limite último da NBR 6118 (ABNT, 2014) para calcular os esforços resistentes de um pilar de concreto armado retangular e simétrico. O método baseia-se em receber a geometria (altura, base, camadas de aço nas direções x e y, diâmetro do aço transversal e

longitudinal) e as propriedades dos materiais (resistência característica do concreto e tensão de escoamento do aço) do pilar e gerar um gráfico de envoltória de força normal de projeto aplicada versus momentos resistentes para os sentidos x e y, obtido ao variar a linha neutra de zero até um valor maior que a seção estudada. A questão do real esforço de flexão ser oblíquo e não normal foi simplificado pela redução dos esforços resistentes em ambas as direções receberem uma redução em função da menor linha neutra encontrada, ou seja, do caso mais crítico entre as duas direções (Araújo, 2014). Os parâmetros solicitantes de projeto, força normal característica e excentricidades, são comparados aos resistentes da envoltória e a outros parâmetros normativos para saber se a seção possui erros para projeto.

Inicialmente, definem-se as constantes necessárias aos cálculos utilizados. Todas as constantes são retiradas de parâmetros de projeto ou da disponibilidade de materiais do engenheiro responsável. São estas: força solicitante (kN); excentricidades nas duas direções (cm); cobrimento (cm) de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014); diâmetro máximo do agregado (cm); resistência característica aos 28 dias do concreto (kN/cm²); resistência característica do aço ao escoamento (kN/cm²); módulo de elasticidade do concreto armado em (kN/cm²); número de pavimentos; custo do concreto (R\$/m³); custo do aço (R\$/kg); densidade do aço (kg/m³); altura da laje (cm); e altura do pilar (cm). O diâmetro do aço transversal (cm) e diâmetro do aço longitudinal (cm) devem ser informados de acordo com os valores de produção comercial.

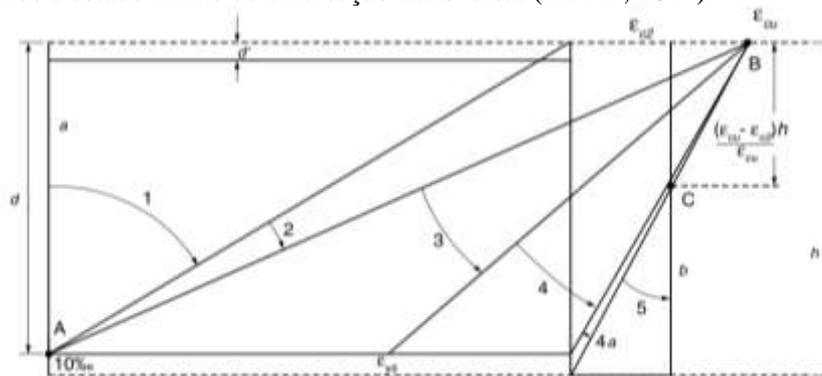
Calcula-se a solicitante normal de projeto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) pelo fator multiplicativo de 1,4 para a força multiplicado por um fator de carga caso alguma das dimensões seja menor que 19 centímetros, definido por $1,95 - 0,05$ vezes a menor dimensão. A verificação da área também advém da NBR 6118 (ABNT, 2014), diz que a seção mínima do pilar deve ser de 360 centímetros quadrados. A verificação da bitola longitudinal diz que esta deve ser maior que 5 milímetros e que um quarto da bitola longitudinal. A verificação da bitola transversal diz que esta deve ser maior que 10 milímetros e menor que um oitavo da menor dimensão. A taxa de armadura longitudinal mínima é de 0,4% da seção de concreto ou 15% da normal solicitante dividido pela resistência de projeto do aço, e a taxa mínima é de 8% da seção de concreto. O número máximo de camadas longitudinais é dado pela dimensão da seção subtraído os cobrimentos, diâmetros das bitolas transversais e um diâmetro longitudinal (distância até o eixo) dividido pelo espaçamento mínimo, sendo este definido pela bitola longitudinal somada ao maior valor entre 1,2 vezes o diâmetro do agregado, a própria bitola longitudinal e 2 centímetros. Baseado nas dimensões da seção, calcula-se a necessidade de estribos suplementares caso a região que está entre o eixo da bitola longitudinal mais externa e 20 vezes o diâmetro da bitola transversal não contemple alguma bitola, deve-se utilizar estribo suplementar neste local. As constantes definidas para os cálculos das envoltórias são: os momentos definidos pela normal de projeto multiplicado pelas excentricidades; tensão do concreto definida por 1,4 normal de projeto dividido por 0,85 da área; e a distância até o centroide da bitola mais tracionada, definido pelo cobrimento somado à bitola transversal e à metade da bitola longitudinal. Para realizar o cálculo da envoltória, primeiro calcula-se a área de aço de cada camada da seção variando o valor da variável i de 1 a quantidade de camadas, sendo na primeira e última camada a quantidade de bitolas igual ao número de camadas na outra direção.

Os esforços resistentes são definidos conforme a Figura 2, apresentando os domínios para o dimensionamento de peças de concreto armado no estado-limite último, como devem ser considerados para projetos, representando o alongamento (à esquerda) e o encurtamento (à direita) da seção de concreto armado. Para definir os esforços resistentes, varia-se a linha neutra de 0 até o limite de $4/3$ do tamanho da seção na direção considerada com intervalos de 0,01, assumindo o valor do limite vezes 100, ou seja, se a altura for 30 centímetros, a linha neutra assume 4000 valores progressivos. O fator g varia então de 1 a 100 vezes o limite descrito, paralelamente à variação do valor da linha neutra. A linha neutra define, baseado nos domínios observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os valores das reações do concreto e do aço, que definem também a normal resistente e os momentos resistentes para cada normal. Considerando os limites dos domínios, as reações são definidas por (sendo a variável d a distância da face mais comprimida à bitola mais tracionada):

- Para linha neutra maior que 1,25 vezes a dimensão analisada: a força do concreto é 0,85 da área vezes a resistência a compressão de projeto. A força é aplicada no centro da seção.

- Para a linha neutra inferior ao limite descrito e maior que $3,5*d/13,5$: a força do concreto é 0,8 da área (valor da linha neutra vezes a outra dimensão) vezes a resistência a compressão de projeto. A força é aplicada em 0,4 da linha neutra.
- Para a linha neutra inferior aos limites descritos acima: a força do concreto é 0,8 da área (valor da linha neutra vezes a outra dimensão) vezes a resistência a compressão de projeto ponderada pelo fator da linha neutra dividido por $3,5*d/13,5$. A força é aplicada em 0,4 da linha neutra.
- Para a linha neutra inferior a $3,5*d/13,5$: a tensão do aço em cada camada abaixo da linha neutra é proporcional a distância entre a bitola mais tracionada (inferior, com tensão de escoamento máxima de projeto) até a linha neutra. A força é aplicada no centroide proporcional das forças (tensão constante na deformação 1%).
- Para a linha neutra superior ao limite descrito acima e inferior $3,5*d/5,5704$: a tensão do aço em cada camada abaixo da linha neutra é proporcional a distância entre a bitola mais tracionada (inferior, com tensão de escoamento máxima de projeto) até a linha neutra. A força é aplicada no centroide proporcional das forças (deformação variando de 1% a 0,30704%).
- Para a linha neutra superior aos limites descritos acima e inferior ao tamanho de d : a tensão do aço em cada camada abaixo da linha neutra é proporcional a distância entre a bitola mais tracionada até a linha neutra. A força é aplicada no centroide proporcional das forças (tensão variando do escoamento com deformação 0,30704% linearmente até tensão nula em 0%).
- Para a linha neutra superior a d , a reação do aço é nula.

Figura 2. Domínios e estado-limite de uma seção transversal (ABNT, 2014).



A normal resistente em função da linha neutra é dada pelo somatório de forças, no caso, reação do concreto menos reação do aço. O momento resistente em função da linha neutra é dado pela reação do concreto e do aço multiplicado pelas respectivas distâncias de aplicação, somado à reação normal resistente multiplicado pelo valor da linha neutra. Minora-se, portanto, o normal resistente em função da proporção do valor da linha neutra dividido pela dimensão d para cada valor da linha neutra, obtendo-se o gráfico minorado nas duas direções, porém, só não realiza-se a minoração caso a linha neutra seja superior ao tamanho da seção analisado. Plota-se um gráfico da normal minorada pelos momentos resistentes. Para a força normal resistente minorada que seja igual à força solicitante de projeto, adota-se o momento resistente naquela direção, que também é comparada a solicitante. Caso o momento não passe nessa verificação, indica-se erro no aço no sentido analisado.

Por fim, é possível também calcular o valor esperado do pilar, mensurando-se o volume do pilar em concreto e multiplica-se pelo valor do concreto previamente definido. O valor do aço é simplesmente definido pelo somatório dos pesos das bitolas longitudinais, transversais e estribos suplementares multiplicados pelo valor do aço em função do peso. Ao fim, soma-se para adquirir o valor final. O software foi testado utilizando os ábacos e softwares paralelos e comerciais para dimensionamento de estruturas de concreto armado.

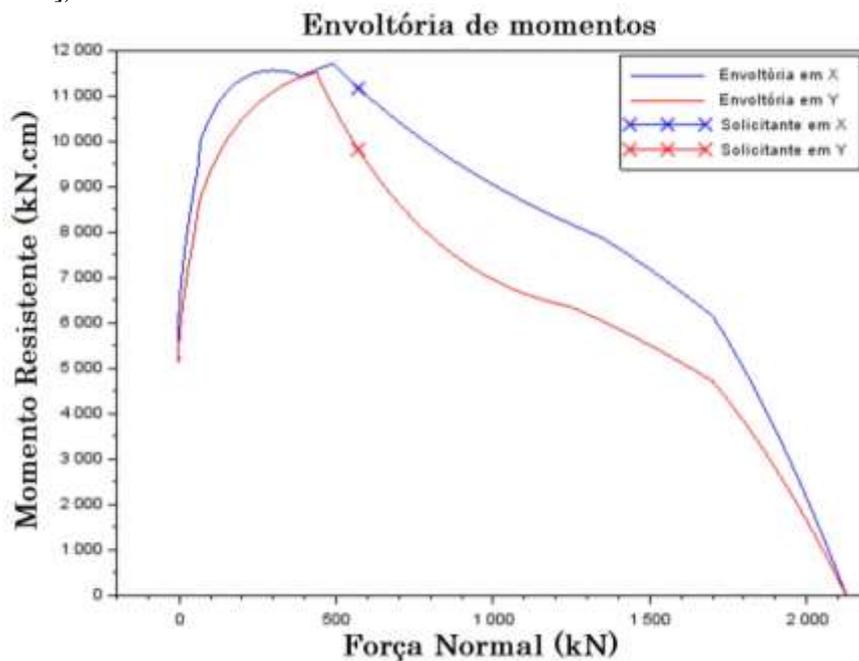
RESULTADOS E DISCUSSÃO

O software apresentava qualquer erro dada a determinação da norma e plotava os gráficos das envoltórias dos esforços resistentes. Indicava também se a seção era suficiente para resistência dos esforços. O teste de mais de 50 seções geradas aleatoriamente sem erros de dimensionamento tiveram resultados iguais quanto à possibilidade de capacidade resistente do pilar indicado. As características

inseridas foram: Normal solicitante característica de 40,78 kN; excentricidade em x de 4,98 cm; excentricidade em y de 4,40 cm; cobrimento de 3,0 cm; diâmetro do agregado de 1,2 cm; resistência característica do concreto de 3,5 kN/cm²; resistência característica do aço de 50 kN/cm²; Módulo de elasticidade secante do concreto de 21000 kN/cm²; 10 pavimentos; custo de R\$ 270,00 por metro cúbico de concreto; custo de R\$ 8,49 /kg de aço; e densidade do aço de 7800 kg/m³.

Os parâmetros e resultados de uma seção de concreto armado analisada, são: Normal solicitante de projeto (Nrd) de 570,9200 kN; Momento resistente em x (Mrdx) de 9808,5089 kN.cm; Momento resistente em y (Mrdy) de 11168,2050 kN.cm; Verificação da área; Verificação de bitolas; Verificação da área de aço; Verificação de espaçamento; e preço do pilar de R\$ 138,74. A Figura 3 apresenta a envoltória de momentos, resultado da análise da seção dada pela configuração geométrica determinada.

Figura 3. Envoltória de momentos da seção de concreto armado (Força Normal [kN] vs. Momento resistente [kN.cm]).



CONCLUSÃO

O algoritmo pode ser implementado para verificação e precificação de pilares simétricos de concreto armado. A metodologia aplicada por meio do SciLab pode ser replicada na verificação e precificação de outras peças de concreto armado, como vigas e lajes. O programa construído pode ser replicado para verificações de campo, auxílio ao dimensionamento e busca por seções otimizadas em busca da economia de recursos.

AGRADECIMENTOS

À Capes pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- Araújo, J. M. (2014). Curso de Concreto Armado (vol. 1, ed. 4). Rio Grande: Dunas.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.
- Carvalho, R. C., & Pinheiro, L. M. (2013). Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado (vol. 2). São Paulo: PINI.