**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO UTILIZANDO FUNÇÃO CUSTO**

FLÁVIO MACÊDO DE AMORIM NOBRE1, REBECA LÍSIA BENTO GERMANO2

1Bacharel em Engenharia Civil, UFAL, São Luís do Quitunde-AL, flaviomanobre@gmail.com;

2Discente em Engenharia Civil, UFAL, Maceió-AL, rebeca.germano@ctec.ufal.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC

15 a 17 de setembro de 2021

**RESUMO**: Com o avanço da tecnologia, as estruturas de obras civis têm se tornado cada vez mais complexas e, consequentemente, sujeitas a carregamentos que acarretam grandes esforços. Este tipo de comportamento tem se tornado mais um entre os diversos desafios da engenharia, onde deve-se assegurar a segurança, através de elementos estruturais que suportem tais esforços, além de se levar em consideração aspectos econômicos, no contexto de projetos estruturais. Desta forma, aspectos econômicos são fatores decisivos no ambiente da construção civil, sendo de grande importância que um modelo estrutural obtido através de uma arquitetura seja economicamente viável. Neste sentido, este trabalho visou a elaboração de um algoritmo na linguagem de programação Python que proporcione a otimização de vigas em concreto armado, sujeitas aos esforços da estrutura como um todo. Assim, foi estabelecida uma função objetivo, denominada de Função Custo, para ser obtido um valor correspondente ao custo para a execução de uma viga em concreto armado. Deste modo, com base em dados arbitrados em prévia análise estrutural, foi realizada a otimização da Função Custo, também utilizando-se da linguagem de programação Python, para uma viga de concreto armado, sendo obtido o valor mínimo ótimo para a execução desta.

**PALAVRAS-CHAVE:** análise estrutural, algoritmo, viés econômico.

**OPTIMIZATION OF BEAMS IN REINFORCED CONCRETE USING THE COST FUNCTION**

**ABSTRACT**: With the advancement of technology, civil works structures have become increasingly complex and, consequently, subject to loads that entail great efforts. This type of behavior has become one of the many engineering challenges, where safety must be ensured through structural elements that support such efforts, in addition to taking economic aspects into account in the context of structural projects. In this way, economic aspects are decisive factors in the civil construction environment, being of great importance that a structural model obtained through an architecture is economically viable. In this sense, this work aimed at the elaboration of an algorithm in the Python programming language that provides the optimization of reinforced concrete beams, subject to the efforts of the structure as a whole. Thus, an objective function was established, called the Cost Function, so that a value corresponding to the cost for the execution of a beam in reinforced concrete could be obtained. Thus, based on arbitrated data in a previous structural analysis, the optimization of the cost function was carried out, also using the Python programming language, for a reinforced concrete beam, obtaining the optimal minimum value for its execution.

**KEYWORDS:** structural analysis, algorithm, economic bias.

**INTRODUÇÃO**

No contexto da aplicação dos conceitos de engenharia civil, a engenharia de estruturas é vital para que sejam concebidos projetos estruturais que garantam o conforto do usuário, mantendo também a sua integridade, visto que se trata de uma parte estritamente ligada à segurança e responsável por grande parte do custo da obra, em sua execução. É a partir da engenharia de estruturas que são realizados os cálculos matemáticos inerentes à parte portante que possibilitam que as construções mantenham a sua integridade perante as cargas aplicadas e seus efeitos. Logo, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem em processos de elaboração delas, seja através da realização de uma análise estrutural mais precisa e mais econômica, ou até mesmo no desenvolvimento de novos materiais.

Por sua vez, um dos desafios encontrados pela engenharia de estruturas é o processo de otimização, pois existe a necessidade do atendimento às condições instituídas na análise estrutural, porém com a implementação do olhar econômico sobre o processo construtivo. Desta forma, a otimização de estruturas busca determinar uma solução que torne o custo mínimo e que atenda às exigências de segurança e desempenho da estrutura (Valente, 2020). Assim sendo, é essencial que em projetos de estruturas, o engenheiro projetista investigue técnicas para otimizar o dimensionamento das seções transversais de vigas, uma vez que as mesmas têm um papel fundamental no suporte de carregamentos em geral de uma estrutura (Liu et al., 2007).

Com o avanço tecnológico, e também com o surgimento de novas técnicas construtivas, as edificações têm passado por um processo de evolução em sua concepção, partindo de arquiteturas arrojadas, que geram modelos estruturais mais arrojados ainda, o que torna imprescindível a realização de uma análise minuciosa, para garantir a segurança daqueles que irão utilizar tal ambiente, com a implementação do viés econômico. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo buscar a otimização do custo para a execução de uma viga em concreto armado, com a utilização da linguagem de programação Python e da Função Custo.

**MATERIAL E MÉTODOS**

 Para a realização da otimização de uma viga de concreto armado, foram usados dados obtidos previamente por análise estrutural de um pórtico plano, e houve a elaboração de um algoritmo que recebe dados de entrada necessários para cálculos preliminares. Desta forma, para posterior comparação com o custo otimizado de uma viga de concreto armado, sucedeu-se o seu dimensionamento à flexão. Ademais, foram contabilizados os esforços internos solicitantes atuantes no pórtico, obtidos na análise estrutural, uma vez que são relevantes para o cálculo do custo ótimo, pois a viga em estudo carrega informações oriundas da interação pilar-viga presente no pórtico.

 Neste ínterim, iniciaram-se os procedimentos necessários para a otimização de uma viga de concreto armado. Leite & Pereira Junior (2019) definem a otimização como sendo a parte da ciência que procura encontrar, de forma sistematizada, a melhor solução para um determinado problema, atendendo às condições que limitam o espaço das soluções viáveis, denominada restrições do problema, segundo um critério que mede a qualidade de cada solução, denominado função objetivo. As técnicas de otimização direcionam uma busca sistematizada da solução ótima, onde o processo, possa ser executado de forma automatizada, sem que seja necessário pesquisar todas as possíveis soluções por processo de tentativa e erro. Ademais, a chamada função objetivo é aquela que representa o que se quer otimizar, em função das variáveis de projeto escolhidas.

Neste sentido, a escolha do método de otimização depende do problema de otimização a ser resolvido, e para isso existem diferentes técnicas de otimização, sendo divididos em métodos gráficos, analíticos e numéricos. No presente trabalho, foi utilizado um método numérico, onde este pode ser subdivido nos tipos determinísticos e probabilísticos. Deste modo, foi utilizado um método determinístico para a resolução do problema, também chamado de DDO (Deterministic Design Optimization, em inglês), pois a segurança é dada pelas restrições previamente estabelecidas.

Deste modo, sucedeu-se a implementação do algoritmo na linguagem Python para a otimização de vigas de concreto armado. Assim, para a realização da otimização, foi definida uma função objetivo, chamada de Função Custo 𝐶(𝑏𝑤, 𝑑, 𝐴𝑠) = Cc + Ca + Cf, onde se pretende minimizar o custo total para a execução de uma viga em concreto armado, considerando-se: Cc como sendo o custo do concreto, Ca o custo do aço e Cf o custo da forma, em que:

Cc - Custo do concreto,

Ca - Custo do aço;

Cf - Custo da forma.

Matematicamente, as variáveis supracitadas tem como parâmetros os seguintes:

Cc = Pc × bw × h × Lef;

Ca = Pa× As × ρa × Lef,

Cf = Pf × (b+2h) × Lef

Em que: Pc – Preço do concreto (R$/m³), de acordo com valores disponíveis no SINAPI;

Pa – Preço do aço (R$/kg);

Pf – Preço das formas (R$/m²);

As – Área de aço;

Lef – Vão efetivo da viga, neste caso, 4m;

𝜌𝑎 – Peso específico do aço, dado por 7850 kg/m³;

𝑏𝑤 – Largura da base da seção transversal da viga;

h – Altura da viga.

A fim de se obter o resultado otimizado para a função definida anteriormente, foram estabelecidas algumas restrições. Para fins de cálculo, a otimização seguiu apenas os passos referentes ao dimensionamento de vigas em concreto armado à flexão, apenas com armaduras simples. Sendo assim, podemos expressar as restrições as quais a Função Custo C(x) está sujeita, matematicamente tem-se:

- Minimizar 𝐶 (𝑏𝑤, 𝑑, 𝐴𝑠);

 - Sujeita a:

 $As\leq 0,04Ac$

$$As\geq \frac{15}{1000} bw×h$$

$$\frac{bw×d²}{Md}-\frac{1}{αc×fcd×λ×ξ×(1-λ×\frac{ξ}{2})}\geq 0$$

$$As-\frac{Md}{fyd×d×(1-λ×\frac{ξ}{2})}\geq 0$$

$$25\leq h\leq 60$$

$$12\leq b\leq 20$$

Sendo assim, o algoritmo buscou otimizar as dimensões da seção transversal, bw e h, bem como As, para que se fosse calculado o custo otimizado para a execução da viga em estudo.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para a realização da otimização do custo da viga em estudo, foi elaborado um algoritmo, com auxílio da biblioteca SciPy, em sua versão 1.9.3. Os valores de entrada para o momento de cálculo foram obtidos a partir de análise estrutural realizada previamente e também considerando-se o concreto com fck = 35 MPa e aço CA-50. Com o valor de Md devidamente majorado pelo seu fator, que possui valor de 1,4, o usuário pode alimentar a entrada de dados para os cálculos realizados no algoritmo. Em seguida, são definidas as restrições como sendo funções, para que sejam retornados valores pertinentes ao estudo.

Então, foram definidos os limites, respectivamente, bw, h e As. E por fim, foi definida a Função Custo, com os valores estabelecidos para os preços e para cada valor presente na função objetivo, sujeita às restrições supracitadas.

Sendo assim, pode-se perceber que a Função Custo recebe os valores citados como sendo um chute inicial, estabelecido dentro dos limites definidos, e a partir daí pode-se chamar a função de otimização, chamada de minimize, para que sejam realizadas as interações necessárias para se chegar a um valor mínimo para a viga em estudo. Vale ressaltar que os valores foram retirados de uma base de dados confiável, o SINAPI, sendo assim foram obtidos os seguintes valores:

Pf = R$302,78, código SINAPI: 92446, em 09/2022;

Pa = R$8,51, código SINAPI: 43055, em 09/2022;

Pc = R$506,98, código SINAPI: 94972, em 09/2022.

 Assim, foram feitas as seguintes considerações para efeitos de cálculo:

Md = 30,1 kN.m

Fck = 3 kN/cm²

Fyk = 50 kNcm²

12 ≤ bw ≤ 20 cm

25 ≤ h ≤ 60 cm 1 ≤ As ≤ 25 cm²

Lef = 400 cm

Portanto, partindo-se de um “chute” inicial, o algoritmo pôde otimizar a Função Custo (C (bw, h, As)), gerando um vetor que contém valores ótimos não inteiros para cada uma das variáveis, bem como o custo total para a execução da viga em análise. O resultado obtido foi para um “chute” inicial em que bw =15 cm, h = 40 cm e As = 32 cm².

Figura 1. Evolução do custo da viga de concreto armado ao longo do tempo. Fonte: Autores (2022).

Figura 2. Área de aço para a viga de concreto armado correspondente a cada resistência. Fonte: Autores (2022).

Observa-se, na Fig. 1, que partindo de valores de chute inicial fornecido com base nos dados utilizados para a análise estrutural, que a viga em estudo tem um custo inicial entre R$2190,00 e R$2180,00. Após a execução da rotina de otimização, percebemos que a função converge a partir da segunda iteração, chegando-se a um valor total para a execução da viga, dadas as condições citadas ao longo do presente trabalho, de R$2109,25, com valores de bw = 20 cm, h = 49,54 cm e As = 17,43 cm², como era esperado.

Já na Fig. 13, é possível observar que, para os concretos com resistência até 40 MPa, os valores calculados de 𝐴𝑠 foram maiores, isso se deve ao fato de que foram necessárias dimensões maiores para a seção transversal em cada caso. Para os concretos com resistências de 45 MPa e 50 MPa, podemos observar um comportamento contrário, com valores de 𝐴𝑠 diminuindo a partir da segunda iteração, podendo-se ligar este fato ao de que, em relação ao chute inicial, as dimensões finais foram menores.

**CONCLUSÃO**

 Desta forma, pode-se concluir que a busca por elementos estruturais mais econômicos e que atendam aos critérios de segurança faz-se necessária, pois em um mundo pós pandêmico, houve um aumento no preço dos insumos, o que pode acarretar em dificuldades tanto em empresas quanto aumento no preço para o usuário final. A otimização do custo de uma viga no presente trabalho buscou retratar o mundo real de forma simplificada, porém trazendo parâmetros que retratam o mundo real, como o preço dos materiais, de forma que tais dimensões otimizadas resistam aos esforços que os elementos estruturais estarão sujeitos, custando menos do que o convencional. Através dela, pôde-se atingir o objetivo de obter o custo mínimo para a execução de uma viga em concreto armado, respeitando-se as condições de segurança, o que pode ser bastante útil no dia-a-dia da construção civil.

**AGRADECIMENTOS**

Ao Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

**REFERÊNCIAS**

Leite, M. B.; Pereira Júnior, W. M. Utilização de Técnicas de Otimização no Dimensionamento de

 Vigas de Concreto Armado. HOLOS. 2019.

Liu, S.; An, X.; Jia, H. Topology optimization of beam cross-section considering warping deformation.

 Structural and Multidisciplinary Optimization, 35 (5), 403-411. 2007.

Valente, E. C. M. Otimização em problemas de Engenharia Civil. Universidade do Porto – FEUP. Porto-

 PT. 2020. 156p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil)