



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPARATIVA NO USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS E
BASEADOS EM GRADIENTE APLICADOS À OTIMIZAÇÃO
ESTRUTURAL**

HEITOR MOURA DIAS RIBEIRO

POMBAL – PB

2022

HEITOR MOURA DIAS RIBEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA NO USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS E BASEADOS
EM GRADIENTE APLICADOS À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros

POMBAL – PB

2022

R484a Ribeiro, Heitor Moura Dias.

Análise comparativa no uso de algoritmos genéticos e baseados em gradiente aplicados à otimização estrutural / Heitor Moura Dias Ribeiro. – Pombal, 2022. 19 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2022.

“Orientação: Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros”.

Referências.

1. Construção civil - Otimização de estruturas. 2. Dimensionamento de estruturas. 3. Viga de concreto. 4. Barragem de concreto. 5. Rotinas computacionais. 6. Deterministic Design Optimization. 7. Reliability-Based Design Optimization. 8. *Fmincon*. 9. *Particle Swarm Optimization*. I. Medeiros, Eduardo Morais de. II. Título.

CDU 69.058(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

HEITOR MOURA DIAS RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA NO USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS E
BASEADOS EM GRADIENTE APLICADOS À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente HEITOR MOURA DIAS RIBEIRO **APROVADO** em 20 de dezembro de 2022 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por EDUARDO
MORAIS DE MEDEIROS:06778859466
Razão: Eu atesto a precisão e a
integridade deste documento
Localização: Pombal-PB
Data: 2023.02.08 07:22:44-03'00'

Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros
(Orientador – UFCG)

Prof^ª. Me. Railson de Medeiros Nóbrega Alves
(Membro Interno – UFCG)

Prof. Dr. Paulo Xavier Pamplona

(Membro Externo – UFCG)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar e proteger das dificuldades que encarei nesta jornada.

Aos meus pais, Rogiane e Gilderley, pelo apoio, incentivo e amor, e ao meu irmão Hugo, que mesmo longe, me apoiou nessa trajetória.

A minha amada esposa, Sabrina, que além de companheira e mãe do meu filho, sempre acreditou em mim e meu futuro.

Ao meu filho, Heitor Filho, em quem eu busco forças e coragem para seguir.

Ao meu orientador, professor Dr. Eduardo Moraes de Medeiros, por me apresentar o ramo da confiabilidade estrutural, pela paciência, ensinamentos e dedicação ao buscar sempre transmitir seus conhecimentos.

Aos professores e profissionais do curso responsáveis por minha formação na instituição, em especial, os do Curso de Engenharia Civil da UFCG.

Muito Obrigado!

ANÁLISE COMPARATIVA NO USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS E BASEADOS EM GRADIENTE APLICADOS À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL
COMPARATIVE ANALYSIS ON THE USE OF GENERIC AND GRADIENT-BASED ALGORITHMS APPLIED TO STRUCTURAL OPTIMIZATION

Heitor Moura Dias Ribeiro, e-mail: ribeiroheitor10@gmail.com

Dr. Eduardo Morais de Medeiros, e-mail: eduardo.morais@ufcg.edu.br

RESUMO

No dimensionamento de estruturas é crucial que sejam atendidas as condições de segurança e ação durante a sua vida útil a fim de garantir sua estabilidade sem causar danos e deformações excessivas. Oferecendo uma melhor concepção estrutural, considerada a partir de uma função, respeitando os parâmetros e as limitações que cada elemento impõe, a otimização vem sendo um dos temas bastante estudados nas últimas décadas para sanar as contrariedades nos projetos de estrutura. Este estudo tem como objetivo comparar resultados de otimização de uma barragem e uma viga de concreto a partir de diferentes métodos matemáticos, quais sejam, DDO (*Deterministic Design Optimization*) e o RBDO (*Reliability-Based Design Optimization*), utilizando rotinas do *software Matlab*. Para a formulação dos algoritmos, foram implementados as rotinas baseadas em gradientes (*fmincon*) e os algoritmos heurísticos (*particle swarm optimization - PSO*). Os resultados alcançados demonstram que o uso do *fmincon* para solucionar problemas RBDO pode ser ineficaz, podendo variar o valor da função conforme o chute inicial. Já o PSO, obteve um desempenho confiável, sempre convergindo para o valor ótimo global nos problemas DDO e RBDO. Ainda sim, nas análises RBDO, houve um acréscimo, esperado, no valor da função objetivo em relação às análises DDO, de modo a garantir pela estabilidade e segurança da edificação já que estará sujeita a uma probabilidade de falha. Por fim, com os resultados alcançados na utilização do método PSO/RBDO, juntamente com o *Matlab*, mostrou-se uma eficiente alternativa para encontrar as melhores soluções de otimização, com uma metodologia simples e com baixo custo de processamento, contribuindo na obtenção de medidas que garantem a estabilidade da estrutura e redução de custos.

Palavras-chave: Otimização de estruturas. Deterministic Design Optimization. Reliability-Based Design Optimization. *Fmincon*. *Particle Swarm Optimization*

ABSTRACT

When designing structures, it is crucial that safety and action conditions are met during their useful life in order to guarantee their stability without causing damage and excessive deformation. Offering a better structural design, considered from a function, respecting the parameters and limitations that each element imposes, optimization has been one of the themes that has been extensively studied in recent decades to remedy the setbacks in structural design. This study aims to compare results of optimization of a dam and a concrete beam from different mathematical methods, namely, DDO (Deterministic Design Optimization) and RBDO (Reliability-Based Design Optimization), using Matlab software routines. For the formulation of algorithms, routines based on gradients (*fmincon*) and heuristic algorithms (particle swarm optimization - PSO) were implemented. The achieved results demonstrate that the use of *fmincon* to solve RBDO problems can be ineffective, being able to vary the value of the function according to the initial guess. The PSO, on the other hand, obtained a reliable performance, always converging to the global optimal value in the DDO and RBDO problems. Even so, in the RBDO analyses, there was an expected increase in the value of the objective function in relation to the DDO analyses, in order to guarantee the stability and safety of the building since it will be subject to a probability of failure. Finally, with the results achieved using the PSO/RBDO method, together with Matlab, it proved to be an efficient alternative to find the best optimization solutions, with a simple methodology and low processing cost, contributing to obtaining measurements that guarantee structure stability and cost reduction.

Keywords: Optimization of structures. Deterministic Design Optimization. Reliability-Based Design Optimization. *Fmincon*. *Particle Swarm Optimization*

1. INTRODUÇÃO

Para a elaboração de projetos estruturais é de fundamental importância a realização de uma análise estrutural, cuja solução de problemas é a resposta da estrutura a um determinado carregamento. Devido às peculiaridades geométricas, o comportamento dos materiais, das cargas e da complexidade da estrutura, torna-se inviável obter soluções analíticas. Sendo assim, utiliza-se de métodos numéricos para encontrar resultados aproximados, e viabilizar a concepção do projeto (CAVALCANTI NETO, 2019).

O modelo DDO (*Deterministic Design Optimization*) é aquele que não leva em conta, de forma explícita, as incertezas nas ações e nas resistências. O efeito destas incertezas é contornado através do uso de valores nominais para as ações, valores característicos para as resistências, e através de fatores parciais de segurança. O RBDO (*Reliability-based Design Optimization*) é aquele em que se substituem as restrições de projeto determinístico por restrições em termos de probabilidade de falha admissíveis ou confiabilidade alvo, levando em consideração as incertezas e seus efeitos de forma explícita (BECK, 2019).

Segundo Beck (2012), existe uma probabilidade de falha inerente aos sistemas de engenharia, a qual acarretará em custos, e toda probabilidade de falha pode ser verificada se é aceitável ou não. Desta forma, quando consideradas as incertezas no elemento estrutural, é realizada uma análise de probabilidade de falha do elemento de acordo com a Simulação de Monte Carlo. Trata-se de um método que associa números aleatórios e probabilidades para solucionar problemas (SARAIVA JUNIOR; RODRIGUES; COSTA, 2010).

As barragens são elementos construídos há milênios pelo homem para a contenção de água e até de resíduos, além disso, são de grande importância na produção de energia elétrica. O US Army Corps of Engineers (1995) define as barragens de gravidade como estruturas sólidas de concreto que mantêm a sua estabilidade contra as cargas a que está sujeita pela sua forma, massa e resistência do concreto. Para seu projeto e construção, são necessários estudos dos esforços, carregamentos e situações as quais a mesma estará sujeita após entrar em operação, para verificação de sua estabilidade e segurança.

Uma viga compreende um elemento estrutural linear, que dispõem de comprimento longitudinal notadamente maior que as dimensões da seção transversal, é estimado para resistir às cargas verticais, que são representadas pelos esforços do momento fletor e o cortante (CARDOSO, 2013). Deste modo, o processo utilizado neste estudo buscou as melhores medidas da seção transversal da viga, possibilitando reduzir o seu peso de maneira econômica e segura.

O dimensionamento de uma estrutura que garanta segurança, baixos custos e tempo de análise de projeto reduzido é uma tarefa que necessita testar infinitas possibilidades. Desta forma, podem ser utilizados softwares que viabilizem o processo analítico a partir de códigos computacionais. Neste caso, o programa utilizado foi o Matlab que é uma ferramenta que permite a criação de algoritmos e o seu processamento para a obtenção dos resultados requeridos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver rotinas computacionais para otimização de uma viga e uma barragem de concreto, comparando os resultados de diferentes métodos matemáticos, utilizando o MATLAB como ferramenta computacional.

2.2. Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos estão:

- Realizar uma análise da função objetivo e das restrições dos problemas;
- Formular os algoritmos;
- Obter os resultados para uma viga e uma barragem de concreto utilizando o DDO/RBDO com as ferramentas *fmincon* e PSO;
- Realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos por cada algoritmo computacional;
- Fazer uma análise da influência do tempo de processamento no custo computacional.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste processo, foram aplicados dois métodos matemáticos distintos: o modelo determinístico DDO (*Deterministic Design Optimization*) no qual são usados parâmetros exatos, sem levar em conta as incertezas do problema, e o modelo de confiabilidade RBDO (*Reliability-based Design Optimization*) em que as incertezas do problema são levadas em conta analisando a probabilidade de falha do sistema por meio da Simulação de Monte Carlo.

Inevitavelmente, a resposta de sistemas estruturais é afetada por incertezas. Modelos de ações e seus efeitos, e modelos de resistência são imperfeitos e imprecisos (BECK, 2019). Desta forma, esses métodos matemáticos foram escolhidos com o intuito de mostrar como a probabilidade de falha impacta no resultado final dos problemas a serem solucionados.

Os algoritmos foram desenvolvidos no *software Matlab*, versão 2021b, o qual possibilita a criação de sistemas que são facilmente solucionados por meio de custos computacionais com eficiência e confiabilidade (MATSUMOTO, 2004).

As rotinas utilizadas na formulação dos problemas estão contidas na *toolbox* do *Matlab*, nas quais são o método baseado nos gradientes (*fmincon*) e o método PSO (*particle swarm optimization*).

O *fmincon* é uma rotina mais simples e propensa a equívocos, onde dependendo do chute inicial terá variações no resultado final devido aos mínimos globais. Já o PSO é um método mais robusto em que o seu processamento evita os mínimos locais da função objetivo e se aproxima ao máximo dos mínimos globais. A Figura 1 traz um fluxograma da metodologia utilizada no processo de otimização.

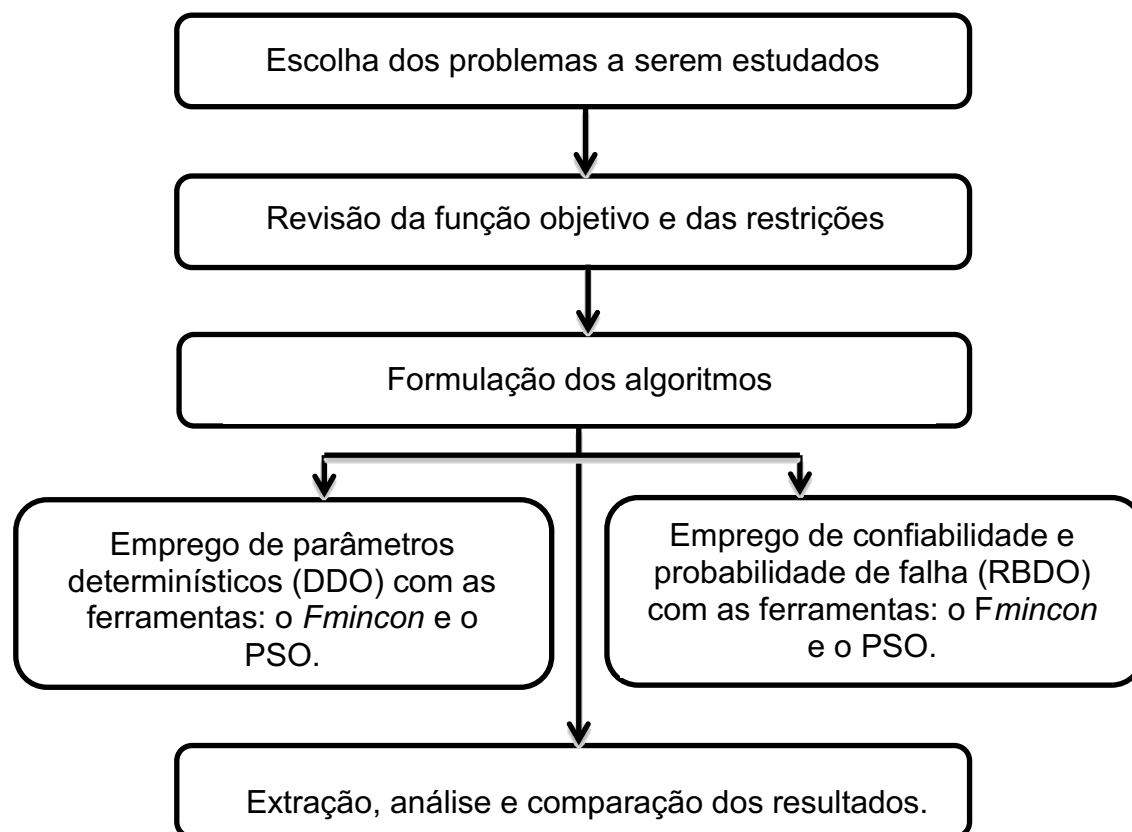


Figura 1- Fluxograma da metodologia. (Fonte: O autor; 2022)

Diante disso, foram selecionados dois problemas usuais na Engenharia Civil, para aplicação, obtenção dos resultados e análise da utilização e relevância da otimização no dimensionamento de estruturas complexas. A saber, esses problemas são: a barragem de gravidade de concreto e a viga de concreto.

3.1. Funcionamento do *fmincon* e do *PSO*

3.1.1. O *fmincon*

Esse comando fornece uma solução para um problema de otimização no qual a função objetivo pode ser do tipo não-linear e as restrições podem ser lineares e não lineares. Basicamente, esse comando usa um esquema iterativo para encontrar a solução ótima de uma função, onde cada passo se torna a direção do gradiente, que corresponde à direção de declive máxima. Desde modo, pode ser encarado como o método seguido por um curso da água, na sua descida pela força da gravidade. A Figura 2 ilustra o método do gradiente no qual as linhas em azul correspondem a curvas de nível, e as setas a vermelho correspondem a 4 iterações do método.

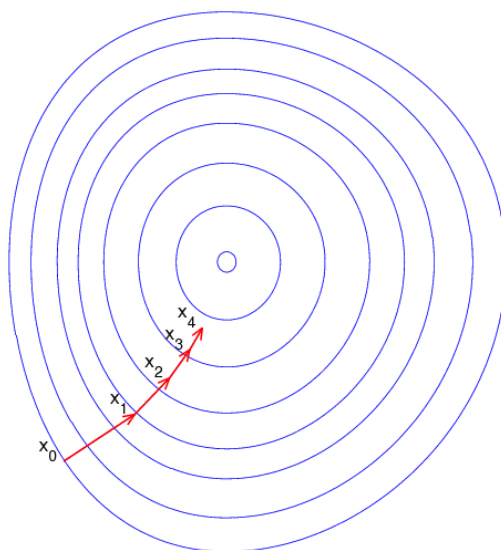


Figura 2- Método do gradiente. (Fonte: Wikipedia; 2022)

A Figura 3 apresenta o *script* para o desenvolvimento da rotina de otimização *fmincon* da viga de concreto.

```

5      %Exemplo de chamada da função objetivo
6 -   fun =@(x) (x(1)*x(2)); %onde x1 é a base e x2 é a altura
7      %estimativa inicial
8 -   x0 = [0.4,0.4];
9      %Define os limites inferior e superior
10 -  lb = [0 0];
11 -  ub = [2 2];
12     %restrições lineares
13 -  A = [];
14 -  B = [];
15 -  Aeq = [];
16 -  Beq = [];
17     %restrições não-lineares
18 -  nonlcon = @fgs;
19     %Chamada do algoritmo numérico de otimização
20 -  [x, fun] = fmincon(fun,x0,A,B,Aeq,Beq,lb,ub,nonlcon)

```

Figura 3- Algoritmo de otimização *fmincon*. (Fonte: O autor; 2022)

Nesse *script*, é necessário escrever a função objetivo (**fun**) e estimar chutes iniciais (**x0**) seja quantas forem as variáveis do projeto. Além disso, também é possível inserir limites superiores e inferiores, denominados de *upper bounds* (vetor **ub**) e *lower bounds* (vetor **lb**). As restrições podem ser lineares e não-lineares, sendo esta definida por meio do comando **nonlcon**. Neste caso, como não houve restrição linear, os colchetes não são preenchidos com valores. O último comando utilizado é o **fmincon** que será responsável por unir todas as etapas do algoritmo criado e propor o valor ótimo do problema.

3.1.2. O PSO

O PSO é um enxame de partículas que pode ser aplicado para resolver problemas que não se encaixam bem com algoritmos de otimização padrão, incluindo problemas em

que a função objetivo é descontínua, não diferenciável, estocástica ou altamente não linear. A este respeito, é semelhante ao algoritmo genético. Ou seja, uma coleção de indivíduos, chamados partículas se move em etapas por toda uma região. A cada passo, o algoritmo avalia a função objetivo em cada partícula. Após esta avaliação, o algoritmo decide sobre a nova velocidade de cada partícula. As iterações continuam até que o algoritmo atinja um critério de parada. A Figura 4 apresenta o *script* para o desenvolvimento da rotina de otimização PSO da viga de concreto.

```

5      %% Limites Inferiores e Superiores
6 -    lb = [0 0];
7 -    ub = [2 2];
8 -    nvars = 2 ;
9      %% Otimização
10 -   options = optimoptions('particleswarm','Display','Iter','FunctionTolerance',1e-06,...
11 -                          'MaxIterations',100,'MaxStallIterations',15,'SwarmSize',20);
12 -   [x,fval] = particleswarm(@fun3,nvars,lb,ub,options)

```

Figura 4- Algoritmo de otimização PSO. (Fonte: O autor; 2022)

Nesse *script*, também é possível inserir delimitações através de limites inferiores (**lb**) e superiores (**ub**) e o informativo da quantidade de variáveis que será necessário otimizar (**nvars**). Vale salientar que *script* não é necessário estimar valores para chutes iniciais. Além disso, sua composição terá por base o comando **options** que encaminha os parâmetros específicos para a otimização. O último comando utilizado é o **particleswarm** que será responsável por unir todas as etapas do algoritmo criado e propor o valor mínimo global do problema.

3.2. Processamento da Barragem

O problema trabalhado neste estudo é de uma barragem de gravidade de concreto. Segundo Jesus (2011), a barragem de gravidade é uma “estrutura maciça, com a secção transversal triangular dimensionada para que o peso próprio permita mobilizar grande parte da resistência necessária às forças que sobre ela atuam”. Alguns elementos, como galerias de drenagem, uma passagem interna utilizada para levantamentos e inspeções, podem surgir ao longo de trechos da barragem. Neste estudo, para facilitar a análise de cargas e efeitos desestabilizadores, optou-se por um modelo com drenos inexistentes ou não funcionais.

Na verificação da estabilidade da barragem são levadas em consideração duas condições importantes: a segurança contra o deslizamento e a segurança contra o tombamento. Há também o monitoramento contra a flutuação, mas conforme recomendado por manuais como USACE (1995), optou-se por não fazer a verificação dessa condição, considerando que a probabilidade de falha nesta condição costuma ser muito baixa. A análise de estados limites foi baseada Krüger (2008), utilizando as seguintes equações:

Para o deslizamento:

$$\lambda_d = \frac{(y_c A + V) \operatorname{tg}(\phi) + CL}{H} \quad (1)$$

$$(y_c A + V) \operatorname{tg}(\phi) + CL \geq \lambda_d H \quad (2)$$

$$g(x) = (y_c A + V) \operatorname{tg}(\phi) + CL - H \quad (3)$$

Onde:

λ_d é o fator de segurança para o deslizamento;

$g(x)$ é a equação do estado limite do deslizamento;

γ_c é o peso específico do concreto;

A é a área da seção transversal da barragem;

V é a soma das componentes verticais das forças hidrostáticas;

$\text{tg}(\phi)$ é a tangente do ângulo de atrito interno do solo;

C é a coesão;

L é o comprimento da base da barragem;

H é a soma das componentes horizontais das forças hidrostáticas;

Para o tombamento:

$$\lambda_t = \frac{M_e}{M_t} \quad (4)$$

$$M_e = \lambda_t M_t \quad (5)$$

$$f(x) = M_e M_t \quad (6)$$

Onde:

λ_t é o fator de segurança para o tombamento;

$f(x)$ é a equação do estado limite do tombamento;

M_e é a soma dos momentos estabilizadores;

M_t é a soma dos momentos tombadores.

As equações de estados limites envolvem quatro variáveis: densidade do concreto, coesão do material, ângulo de atrito e pressão dos poros. Todos os dados de variáveis necessários para a determinação das ações de projetos desse estudo foram obtidos de García (2012). As variáveis possuem incertezas e por isso foram usadas distribuições de probabilidade. Foi considerada para todas as variáveis a distribuição Log-normal. Na Tabela 1 estão alocados os valores, com médias e desvios padrão.

Tabela 1 – Variáveis usadas na otimização da barragem

Variável	Unidade	Distribuição	Média	Desvio Padrão
Densidade do concreto	Kg/m ³	Log-normal	2400	470
Coesão	Mpa	Log-normal	0,420	0,188
Ângulo de atrito	°	Log-normal	50	5
Pressão dos poros	-	Log-normal	0,2	0,04

Fonte: Adaptado de García, 2012.

Para que a estrutura funcione corretamente, deve haver uma margem de segurança entre a parte resistente e a parte solicitante. Essa margem é o fator de segurança determinado pelas normas de segurança de barragens, definido com base no grau de incerteza associado à análise. Nesse estudo, foi levado em consideração o manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), que apresenta para uma Condição de Carregamento Normal: $\lambda_d = 1.5$ e $\lambda_t = 1.5$.

Para a densidade da água foi utilizado o valor de 1000 kg/m³ e as demais variáveis de projeto utilizadas no estudo foram baseadas no modelo de García (2012). Foram adotados os seguintes valores: $H=92$ m (altura da barragem), $h_m=82.5$ m (nível da água à montante) e $h_j=26$ m (nível da água à jusante) (García, 2012). Um esquema da seção

transversal da barragem, apresentando suas medidas e as principais forças estabilizantes e desestabilizadoras, está representado na Figura 5.

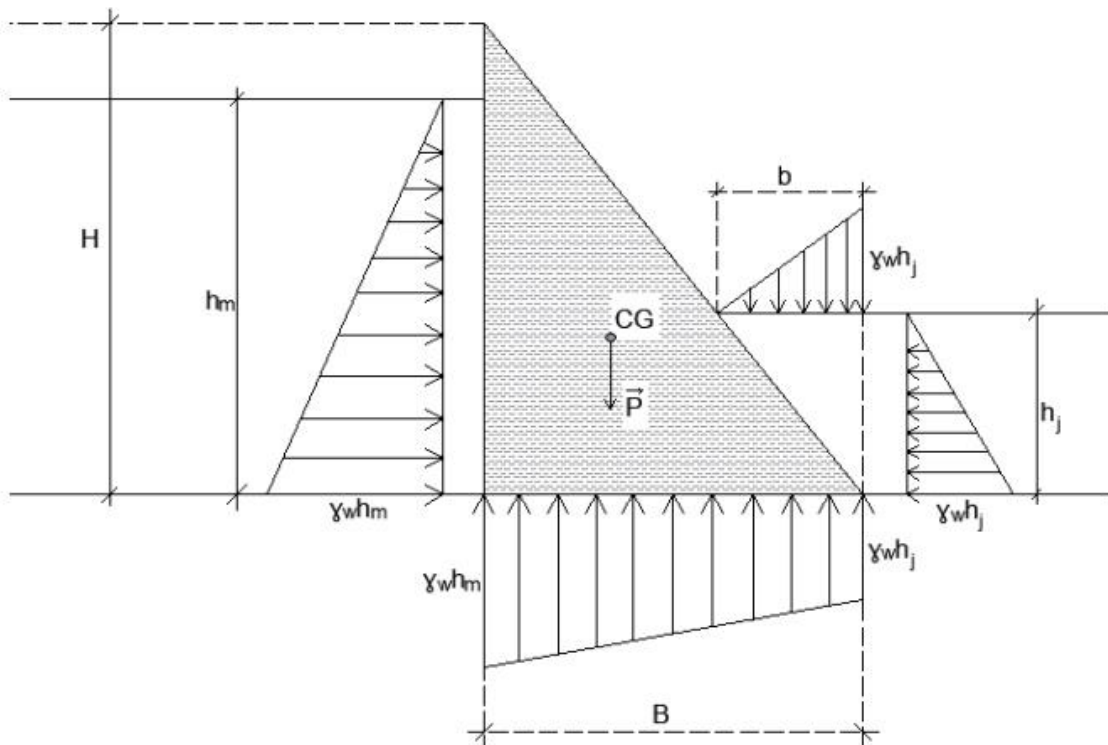


Figura 5- Esquema da seção transversal da barragem. (Fonte: Carvalho et al. ; 2020)

As forças envolvidas são o peso do concreto, pressão das colunas de água à montante e à jusante e a pressão dos poros na base. Apenas a base foi avaliada para verificação de segurança contra o deslizamento. Para isto, consideramos a inexistência de estacas ou outra fundação. Ademais, para o cálculo de equilíbrio foi utilizado um comprimento unitário. A única variável de projeto é a largura da base da barragem (B). Assim, a função objetivo tem como intuito otimizar a área da barragem, conforme equação (7) :

$$f_{objetivo}(B) = \frac{BH}{2} \quad (7)$$

Segundo Badimuená (2017), para novas estruturas, considerando uma baixa consequência de falha e vida útil de 50 anos, são utilizados valores próximos de 3 para índice de confiabilidade alvo. Sendo assim, nesse estudo nas análises RBDO foi considerada um índice de confiabilidade alvo igual a 3, que corresponde a uma probabilidade de falha de aproximadamente $1,35 \times 10^{-3}$.

Para simulação de Monte Carlo, foram realizadas 10^5 simulações. No *fmincon* foram feitas duas análises utilizando como chute inicial (x_0) o valor igual a 10m e 100m, de modo, a saber, se o valor sempre convergiria para o mínimo global. No PSO foi considerado um número máximo de 100 iterações para um total de 20 partículas de enxame. As considerações de chute inicial (*fmincon*), bem como o número máximo de iteração e partículas de enxame (PSO) foram baseadas em experiências empíricas durante o período de estudo.

3.3. Processamento da Viga

O problema trabalhado foi baseado e adaptado de Arora (2012), e compreende na definição da seção transversal de uma viga de concreto, fazendo utilização das variáveis de tensão de escoamento em flexão e em cisalhamento, e sujeita a ações do momento fletor e força cortante, conforme Tabela 2. A seção transversal é regular com dimensões b x h , sendo b (base) e h (altura) variáveis do projeto a serem dimensionadas e otimizadas.

Tabela 2 – Variáveis usadas na otimização da viga

Variável	Unidade	Distribuição	Média	Desvio Padrão
Momento fletor (M)	kN.m	Normal	40	8
Força cortante (V)	Kn	Normal	100	20
Tensão de escoamento em flexão (S_y)	Mpa	Normal	20	2
Tensão de escoamento em cisalhamento (τ_y)	Mpa	Normal	6	0,6

Fonte: Adaptado de Arora, 2012.

Com os parâmetros iniciais apresentados acima, tem-se por objetivo minimizar a área da viga através da função, descrita na equação (8).

$$f(b, h) = bh \quad (8)$$

Para tal função objetivo, existem restrições que devem ser respeitadas para o correto funcionamento da viga. As duas primeiras são, respectivamente, a resistência ao momento fletor (g_s) e a resistência ao cisalhamento (g_τ) que consistem na análise de estado limite último a que um determinado material está sujeito e que servirá para o dimensionamento das suas seções resistentes. As funções de estado limite g_s e g_τ são descritas, respectivamente, na equação (9) e equação (10), tiradas de Arora (2012).

$$g_s = S_y b h^2 - 6M = 0 \quad (9)$$

$$g_\tau = 2\tau_y b h - 3V = 0 \quad (10)$$

É imposto também, que a altura da seção transversal não seja maior que duas vezes a largura da base, conforme equação (11).

$$h \leq 2b \quad (11)$$

Quando consideradas as incertezas foi necessário inserir no algoritmo a simulação de Monte Carlo, possibilitando que sejam gerados números aleatórios para posterior análise de falha.

A probabilidade de falha P_f é obtida calculando a média entre a razão do número de falhas (n_f) e o número total de simulações (n_{si}), de acordo com equação (12).

$$P_f = \frac{n_f}{n_{si}} \quad (12)$$

Para a formulação das restrições foi considerada uma probabilidade de falha admissível de ordem 10^{-3} .

Para simulação de Monte Carlo, foram realizadas 10^5 simulações. No *fmincon* foram feitas duas análises utilizando como chute inicial (x_0) o valor igual a 10cm e 40cm, de modo, a saber, se o valor sempre convergiria para o mínimo global. Além disso, foram utilizados limites inferiores e superiores iguais, respectivamente, a 0m e 2m. No PSO foi considerado um número máximo de 100 iterações para um total de 20 partículas de enxame. As considerações de chute inicial (*fmincon*), bem como o número máximo de iteração e partículas de enxame (PSO) foram baseadas em experiências empíricas durante o período de estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados da Barragem

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos após o processamento dos dados e o tempo de operação gasto pelo programa *Matlab*.

Tabela 3 – Comparação entre os valores obtidos na análise da barragem

Resultados	DDO			RBDO		
	fmincon (CI=10m)	fmincon (CI=100m)	PSO	fmincon (CI=10m)	fmincon (CI=100m)	PSO
Base (m)	46,3246	46,3246	46,3246	0,0022	99,01	67,2379
Área (m ²)	2130,9	2130,9	2130,9	0,10	4554,5	3092,9
Tempo (s)	3,63	0,48	37,21	7,22	8,06	9482,04

Fonte: O Autor, 2022

Dessa forma, pode-se analisar que no método DDO a função convergiu para o valor mínimo global tanto no *fmincon* quanto no PSO. Isso mostra que nesse tipo de solução, existe apenas uma solução considerada ótima que satisfaz as restrições do problema.

Quando consideradas as incertezas do problema, no método do *fmincon*, a função objetivo convergiu para um valor próximo de zero quando o chute inicial (x_0) foi de 10m e para um valor de área maior quando o x_0 foi 100m. Isso ocorre, pois o *fmincon* pode variar o mínimo da função conforme o x_0 , demonstrando que nem sempre é possível encontrar o valor ótimo utilizando essa ferramenta. Porém, o PSO na análise RBDO teve um acréscimo na base da seção transversal da barragem de 20,9133 metros, a fim de zelar pela sua estabilidade geral, obtendo, por efeito, um aumento na área. Esse acréscimo de área já era esperado e representa uma maior segurança e estabilidade para a estrutura uma vez que é levado em consideração um índice de confiabilidade alvo. Desta forma, segundo BECK (2012), “a maior parte das técnicas desenvolvidas na literatura endereça a solução de problemas de RBDO”, juntamente com o PSO.

Além disso, é notado um maior tempo de processamento no modelo RBDO utilizando a ferramenta PSO em decorrência das várias iterações necessárias para realizar a simulação de Monte Carlo, assim como a maior robustez de processamento de dados apresentada no algoritmo genérico.

4.2. Resultados da Viga

Nesse problema, buscou-se aperfeiçoar a seção transversal da viga de concreto levando em consideração as variáveis: base e altura. A Tabela 4 apresenta os resultados do problema, além de mostrar o tempo gasto pelo programa para a obtenção do resultado em cada análise.

Tabela 4 – Comparação entre os valores obtidos na análise da viga

Resultados	DDO			RBDO		
	fmincon (CI=10cm)	fmincon (CI=40cm)	PSO	fmincon (CI=10cm)	fmincon (CI=40cm)	PSO
Base (cm)	19,37	20,95	19,79	90,74	44,55	30,32
Altura (cm)	38,73	35,81	37,90	13,05	30,89	44,31
Área (cm ²)	750	750	750	1185	1376	1343
Tempo (s)	1,88	3,50	5,59	7,65	9,19	143,80

Fonte: O Autor, 2022

De acordo com a Tabela 4, percebe-se que sem levar em consideração as incertezas (DDO) do problema, os resultados da base e da altura foram diferentes para o *fmincon* e PSO, no entanto, a área permaneceu a mesma. Isso mostra que nesse tipo de solução, existem várias soluções ótimas que satisfazem as restrições do problema, não sendo possível inferir, nessas condições, qual seriam a Base e a Altura apropriada para viga.

Quando consideradas as probabilidades de falha do problema, com o auxílio da ferramenta *fmincon*, os valores da Base e da Altura, não satisfizeram as restrições inerentes ao problema. Porém, o PSO na análise RBDO apresentou estabilidade do ponto de vista computacional e obteve um resultado da área maior que o encontrado no DDO, a fim de zelar pela estabilidade da peça.

Com isso, percebe-se que o uso do *fmincon* para resolução de problemas RBDO pode ser impreciso e, muitas vezes, não convergindo para um valor, diferentemente do PSO que se manteve estável tanto para o DDO quanto para o RBDO. De igual modo ao exemplo da barragem, o tempo de processamento da viga foi maior para o algoritmo PSO, reforçando a ideia de maior amplitude e eficiência na busca do valor ótimo do problema. De igual modo ao analisado na barragem, seria adequado a utilização do RBDO/PSO como solução do problema da viga.

5. CONCLUSÕES

Em virtude dos aspectos considerados, a utilização de métodos numéricos tem se tornado interessante na análise estrutural, pois cada vez mais se busca construir edificações onde os projetos tenham menores custos, menor massa estrutural, mas sempre atentando para a qualidade e segurança que irá apresentar a construção. Outra questão é que, o engenheiro, ao se deparar com problemas dessa natureza, pode se deparar com inúmeras possibilidades para obter a solução mais eficaz. Diante disso, faz-se necessário o uso de métodos numéricos a fim de se obter maior agilidade e economia de tempo nos negócios.

Como foi possível perceber no exemplo da barragem, quando consideradas as incertezas inerentes ao problema no PSO, houve um aumento em sua base. Isso revela que se o algoritmo RBDO continuar com as mesmas dimensões encontradas na análise DDO, a probabilidade de que a estrutura não satisfaça a função de comportamento

atribuída pelo projetista pode aumentar. No entanto, a rotina via *fmincon* teve problemas para resolver situações de RBDO, ao contrário do PSO que se manteve sempre estável e convergente. É importante esclarecer que, o modelo de barragem adotado para esta análise assume o comportamento de um corpo rígido e não leva em consideração a deformabilidade da fundação, havendo, portanto, outros critérios que também podem ser testados.

Como resultado, no exemplo da viga, também foi observado que o uso do *fmincon* não é adequado para a obtenção de resultados confiáveis nas situações RBDO, pois o algoritmo pode ser ineficaz e não retornar respostas satisfatórias. No PSO foi observado um desempenho confiável, de modo a significar que a utilização desta rotina é o mais recomendado em todos os casos e este tipo de otimização heurística deve ser algo mais explorado.

Em relação ao tempo de processamento dos algoritmos, o PSO, em relação ao *fmincon*, consumiu um maior intervalo de tempo para encontrar as soluções do problema, sobretudo, no modelo RBDO. Nesse sentido, mesmo esse tempo sendo maior para o PSO, seria necessário processar várias vezes o *fmincon* para identificar se o resultado sempre iria convergir para o valor ótimo da função, havendo, assim, um retrabalho e perda no tempo de análise. Deste modo, o PSO demonstrou ser um algoritmo eficiente e robusto com baixo custo computacional para realização de análises de otimização estrutural.

Por fim, a otimização de estruturas é um método crucial não apenas para que haja economia na obra, mas também para garantir a sua estabilidade e segurança. Portanto, foi possível analisar a viabilidade do uso de dois métodos números apresentados acima em problemas usuais, concluindo que a escolha de algoritmos genéricos é mais recomendada para tal feito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARORA, J. S. Introduction to Optimum Design. 3rd ed. Waltham, Elsevier, 2012.

BADIMUENA, B. L. Avaliação da Confiabilidade de Estruturas Existentes: Influência da Resistência à Compressão do Concreto. 2017. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

BECK, A. Confiabilidade e Segurança das Estruturas. 1. ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2019.

BECK, A. T. Apostila do Curso de Confiabilidade Estrutural. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 2012. Disponível em: <<https://docslide.com.br/documents/curso-de-confiabilidade-estrutural-2012-10-15-hq.html>>. Acesso em: 25 nov. 2022.

CARDOSO, R. Projeto estrutural em concreto armado. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CARVALHO, J. et al. OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO BASEADO EM CONFIABILIDADE UTILIZANDO O MATLAB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis.

CAVALCANTI NETO, I, T. Otimização do peso de estruturas treliçadas metálicas utilizando algoritmos genéticos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S. A.). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. 2003.

GARCÍA, L. A.; BUENO, I. E.; LOMBILLO, A. S.; ORTUÑO, M. G. M. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. *Journal Structural Safety*, v. 36-37, p. 1-13, 2012.

JESUS, R. D. Otimização da Forma Estrutural de Uma Barragem. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

KRÜGER, C. M. Análise de Confiabilidade Estrutural Aplicada às Barragens de Concreto. 2008. 146 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MATSUMOTO, E. Y. MATLAB® 7: Fundamentos. São Paulo: Editora Érica, 2004.

MÉTODO DO GRADIENTE. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023.

SARAIVA JUNIOR, A. F.; RODRIGUES, M. V.; COSTA, R. P. D. Simulação de Monte Carlo Aplicada à Decisão de Mix de Produtos. *Produto & Produção*, v. 11, n. 2, p. 26- 54, 2010.

USACE. Gravity Dam Design. Washington, DC – U.S. Army Corps of Engineers, 1995.