



VERIFICAÇÃO DOS EFEITOS SÍSMICOS EM PÓRTICO DE HABITAÇÃO POPULAR EM CONCRETO ARMADO OTIMIZADO PARA SEU CUSTO DE CONSTRUÇÃO

Palavras-Chave: HABITAÇÃO POPULAR, OTIMIZAÇÃO, ABALO SÍSMICO

Autores/as:

INGRID XAVIER DE OLIVEIRA, FECFAU, UNICAMP

Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE SIQUEIRA (orientador), FECFAU, UNICAMP

Prof. Dr. LUIZ CARLOS MARCOS VIEIRA JUNIOR (coorientador), FECFAU, UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O artigo 6º da Constituição Federal de 1988 assegura à população o direito à moradia (CONSTITUINTE, 1988). Ao encontro desse ideal estão os objetivos 11 e 12 da agenda 2030 da Organização Mundial das Nações Unidas (ONU), que se referem a Cidades e Comunidades Sustentáveis e Consumo e Produção Responsáveis, respectivamente (NAÇÕES UNIDAS, 2022). Porém, de acordo com o levantamento realizado pela Fundação João Pinheiro (FJP), com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PnadC) e o Cadastro Único (CadÚnico), em 2019, o Brasil possuía um déficit habitacional de 5.876.699 moradias (FJP, 2021). De acordo com os dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), de 2016 a 2021, o custo médio do metro quadrado de uma obra aumentou 47,43%, atingindo o valor de R\$ 1.514,52, considerando-se apenas despesas com mão de obra e material (CASTRO, 2022). Isto posto, a otimização de estruturas surge como uma aliada para diminuir os custos com a construção e proporcionar estruturas que utilizem menos material, estando em consonância com a demanda por construções mais sustentáveis, como defendido pela ONU. Entretanto, para a otimização ser efetiva, ela deve atender aos critérios de segurança e qualidade da obra, levando em consideração que os custos de reparos também podem vir a ser altos. Com essa perspectiva, faz-se necessário a consideração de abalos sísmicos na verificação da estrutura, campo pouco explorado no dimensionamento no Brasil e que se mostra extremamente relevante para prevenir acidentes. Essa importância é observada no estudo sobre confiabilidade sísmica de um pórtico feito em concreto armado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, posto que a consideração de sismicidade aponta um desempenho inaceitável para Segurança à Vida (LS) e Prevenção ao Colapso (CP) (PEREIRA et al., 2021). Visto que em residências o emprego de pórticos como estrutura fundamental é largamente empregado e que esses são constituídos de concreto armado, o estudo desse sistema para a otimização torna-se vantajoso, como visto na pesquisa de Juliani e Gomes (2021). Tal estudo otimizou a seção retangular de dois tipos de pórtico encontrados na literatura, tendo como parâmetros o custo de material e os fatores de segurança da ABNT NBR 6118:2014. Considerando que a norma ABNT NBR 15421:2023 - Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento é

relativamente recente, ela possui lacunas em relação a normas internacionais. Dessa forma, a otimização de pórtico em concreto armado vai ao encontro da temática sísmica, uma vez que, ao analisar o pórtico para terremoto, considera-se uma maior gama de cenários e, em consequência disso, um aumento na segurança da estrutura, auxiliando na demonstração da importância da consideração do abalo sísmico na Construção Civil no Brasil e agregando valor na busca por diminuir o déficit habitacional brasileiro.

METODOLOGIA:

Revisão bibliográfica

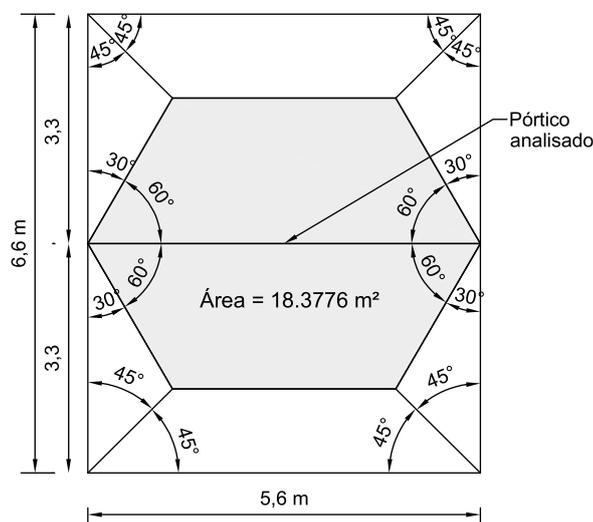
A engenharia de estruturas conta, em geral, com três áreas de otimização: programação matemática, método dos critérios de otimização e os métodos de buscas heurísticas ou métodos genéticos (CAMP; PEZESHK; CAO, 1998). O Método de Programação é subdividido em programação linear e não linear, sendo que para uma análise não linear é empregado as condições de Kuhn-Tucker (KUHN; TUCKER, 1951). Uma vez que a aplicação direta dessa é muito complexa, desenvolveu-se o método dos critérios de otimização (VIANNA, 2003). Porém, observa-se que é amplamente empregado os métodos de busca heurísticas (VIANNA, 2003), como o *Big Bang-Big Crunch*, o qual se baseia em uma das teorias de desenvolvimento do universo, isto é, a teoria do *Big Bang* e do *Big Crunch*. A principal característica da fase denominada *Big Bang* é a dissipação de energia que produz a desordem e a aleatoriedade. Já na fase do *Big Crunch* há a organização das partículas que antes estavam distribuídas aleatoriamente. Tal método pode superar o algoritmo genético em alguns casos (EROL; EKSIN, 2006), observando-se seu emprego na otimização de pórtico em concreto armado com vistas a diminuição da emissão de dióxido de carbono (CAMP; HUQ, 2013). Outro método é o de algoritmo de colônia artificial de abelhas, o qual apresenta duas características fundamentais, auto-organização e divisão do trabalho, configurando sistemas distribuídos de resolução de problemas que se auto-organizam e se adaptam ao ambiente. Nessa lógica, o algoritmo emprega o mecanismo de organização da colmeia para encontrar a solução do problema (posição da fonte de alimento), indicando a qualidade da solução (qualidade do néctar) (KARABOĞA et al., 2005). Essa técnica foi posta a prova em otimização de pórtico de concreto armado e constatou-se que o algoritmo ABC (*Artificial Bee Colony*) foi mais eficiente que o

BB-BC (*Big Bang-Big Crunch*) para essa otimização (TAPAO; CHEERAROT, 2017). Há também o algoritmo *Water Evaporation Optimization (WEO)*, conceito que imita a evaporação de uma pequena quantidade de moléculas de água dispostas em uma superfície sólida com diferentes molhabilidades, as quais são estudadas por Dinâmica Molecular. Tal disciplina apresenta, por meio de simulações, que a velocidade de evaporação varia com a alteração da superfície, oscilando entre características de hidrofobicidade (repele água) e hidrofildade (retém água). Assim, as moléculas de água são tidas como os indivíduos do algoritmo e a superfície sólida (ou substrato com molhabilidade variável) é considerado como espaço de busca (KAVEH; BAKHSHPOORI, 2016). A aplicação dessa técnica foi feita em pórticos de aço juntamente com a comparação com outros seis tipos de algoritmos meta-heurísticos (Colônia de Abelhas Artificiais, *Big Bang-Big Crunch*, Algoritmo de Partenogênese Cíclica (CPA), Pesquisa de Cucos (CS), Otimização de Troca Térmica (TEO) e Otimização Baseada em Ensino-Aprendizagem (TLBO)), concluindo-se que, no geral, os algoritmos WEO, CS e TEO obtêm melhores pesos e as curvas de convergência com velocidade mais alta (KAVEH et al., 2020). Porém, o método mais recorrente para otimização de pórtico em concreto armado é o Algoritmo Genético, o qual foi inspirado na Teoria da Evolução das espécies de Charles Darwin no século XIX. Com tal motivação, em 1975 John Holland descreveu maneiras de relacionar esse conceito com problemas de otimização (HOLLAND, 1992) e os primeiros códigos genéticos foram criados. Dessa forma, busca-se a melhor resposta possível variando parâmetros ao longo de cada iteração. Tal método é interessante na medida em que possibilita a entrada de vários parâmetros, selecionando-se aqueles que apresentaram melhor resultado, o que gera uma convergência de resposta ótima. A seleção de respostas diminui o número de contas necessárias e, assim, entrega uma otimização mais rápida. Porém, uma desvantagem do método é que nem sempre se pode garantir a convergência de resposta, encontrando-se uma resposta muito próxima do que seria a real, mas não a exata. Portanto, a eficiência de tal método depende do erro associado, necessitando-se avaliar se tal erro é relevante ou não para o problema.

Definição do pórtico

Para as cargas, considerou-se as dimensões do Projeto padrão da Caixa Econômica Federal (GIDUR/VT, 2007).

Figura 1: Área de influência da laje.



Fonte: Autoria própria.

O Método das Charneiras foi modelo de cálculo para a determinação da área de influência da laje sobre o pórtico.

Tabela 1: Dados dos elementos.

Área de influência da laje [m ²]	18,3776
Espessura da laje [m]	0,09
Peso específico da laje (γ) [kN/m]	25
Massa das caixas d'água [kg]	17,6
Densidade da água (d) [kg/L]	1
Volume de água [L]	858
Telhado [kN/m ²]	0,7

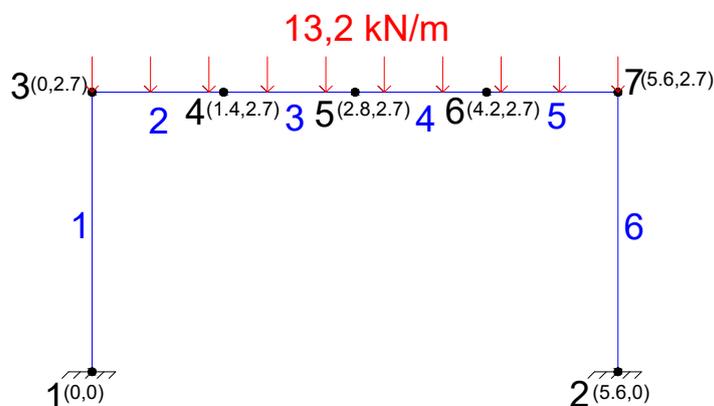
Fonte: Autoria própria.

Sendo a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s², obteve-se uma carga distribuída sobre o pórtico de 13,2 kN/m.

Otimização do pórtico

O algoritmo escolhido foi o algoritmo genético devido ao seu recorrente uso em situações de otimização. Para a otimização do pórtico em questão foi empregado o código desenvolvido durante o mestrado da pesquisadora Marcela Alejandra Juli-ani, a qual cedeu o algoritmo para aplicação na presente pesquisa. Tendo em vista algumas diferenças entre o pórtico considerado e os programados no código cedido, foram efetuadas modificações para compatibilizar o algoritmo com o pórtico a ser otimizado. Tal otimização foi feita no MATLAB[®] com o auxílio do Algoritmo Genético (GA) fornecido pelo *software*. Tendo em vista as características da estrutura, os pilares foram considerados como um elemento finito e a viga foi dividida em quatro elementos finitos. O modelo utilizado está descrito na Figura 2.

Figura 2: Pórtico discretizado em 7 nós, 6 elementos. Coordenadas referentes às distâncias em metro.



Fonte: Autoria própria.

O objetivo da otimização em questão é encontrar o menor custo para o pórtico, sendo essa a função objetivo. Assim, tal função é definida em (1) e os custos de referências foram os de Julho de 2023 disponibilizados pelo SINAPI.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n_{elem}} (V_c \cdot C_c + M_s \cdot C_s + M_{sw} \cdot C_{sw} + A_f \cdot C_f) \quad (1)$$

Sendo,

V_c = Volume de concreto (m³);

C_c = Custo unitário do concreto (R\$/m³);

M_s = Massa do aço da armadura longitudinal (kg);

C_s = Custo unitário da armadura longitudinal (R\$/kg);

M_{sw} = Massa do aço da armadura transversal (kg);

C_{sw} = Custo unitário da armadura transversal (R\$/kg);

A_f = Área de forma (m²);

C_f = Custo unitário da forma (R\$/m²);

n_{elem} = Número de elementos estruturais do pórtico (vigas e pilares).

Com tal estrutura, tem-se 29 variáveis, sendo 6 para cada pilar (base (b), altura (h), número de barras da armadura longitudinal (n_s), diâmetro da armadura longitudinal (ϕ_s), número de estribos (n_{sw}), diâmetro dos estribos (ϕ_{sw})) e 17 para a viga (base (b), altura (h), número de barras da armadura longitudinal inferior (n_s^{inf}), número de barras da armadura longitudinal superior (n_s^{sup}), diâmetro da armadura longitudinal inferior (ϕ_s^{inf}), diâmetro da armadura longitudinal superior (ϕ_s^{sup}), número de estribos (n_{sw}) e diâmetro do estribo (ϕ_{sw})). Dessa forma, há um espaço de busca pré-definido, no qual as variáveis são discretas para obter valores construtivamente exequíveis, como diâmetro de bitolas existentes no mercado.

Tabela 2: Valores possíveis para a otimização.

	Vigas							
	b (cm)	h (cm)	n_s^{inf} (un)	n_s^{sup} (un)	ϕ_s^{inf} (mm)	ϕ_s^{sup} (mm)	n_{sw} (un)	ϕ_{sw} (mm)
Mínimo	12	30	2	2	10	10	6	6,3
Máximo	26	60	10	10	10	10	13	6,3
Incremento	2	2	1	1	-	-	1	-
	Pilares							
	b (cm)	h (cm)	n_s (un)	ϕ_s (mm)	n_{sw} (un)	ϕ_{sw} (mm)		
Mínimo	19	19	2	10	20	6,3		
Máximo	31	51	8	10	36	6,3		
Incremento	2	2	1	-	2	-		

Fonte: (JULIANI, 2018).

Uma vez definida a configuração inicial e delimitado o espaço de busca, o algoritmo verifica as condições da estrutura criada, com as 29 variáveis, e aquelas que atenderem aos requisitos da ABNT NBR 6118, e tiverem a melhor função objetivo, seguem para a próxima geração, perpetuando a melhor configuração até se chegar a um limite de 500 gerações sem modificação na função objetivo, o que indica a convergência do método. Foram testados outros limites de gerações, sendo 500 gerações suficiente para a convergência de resposta.

Pórtico controle

Aspirando comparar a diferença entre o pórtico otimizado e o não otimizado, lançou-se mão do dimensionamento tradicional de estruturas em concreto armado. Dessa forma, adotou-se a seção dos pilares como sendo de (19cmx19cm) uma vez que as paredes são feitas de tijolos com 19 cm de largura. Da mesma maneira, empregou-se a viga com base de 19 cm, com o intuito de promover o encaixa entre os elementos. Com tais escolhas, dimensionou-se a armadura do pórtico no software TQS[®], amplamente empregado no mercado.

Análise sísmica

Para realizar a análise da capacidade estrutural foi utilizado o software SAP2000[®], sendo feita uma análise estática não linear do tipo *Pushover*. Essa é caracterizada como uma análise estática sob forças gravitacionais constantes, e incrementos de carga horizontais aplicados de forma gradual, podendo ser aplicada para a verificação do desempenho estrutural de edifícios novos e de edifícios existentes (PORTUGUESA, 1998). Assim, é construída a curva de capacidade que contém a relação entre o esforço cortante total na base do pórtico e o deslocamento global no topo da estrutura, ou algum outro ponto de controle (FEMA, 2005). Para realizar a análise *Pushover* o pórtico foi modelado no *software* respeitando os redutores de inércia (0,4EI para vigas e 0,8EI para pilares) recomen-

dado pela ABNT NBR6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Definiu-se o material como concreto C25 e o aço como CA-50, em consonância com o adotado no TQS[®] e na otimização. Devido ao uso do concreto, considerou-se o apoio como uma ligação rígida, adotando-se o engaste. Diafragma é a parte horizontal de um sistema estrutural sismorresistente, usualmente composto pelas lajes de uma elevação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023). Admitiu-se o conceito de diafragma rígido, impondo que a viga e os pilares são infinitamente rígidos axialmente e, assim, garante-se que os pilares deslocam-se igualmente. Tal adoção é respaldada pelo uso da laje maciça na consideração de projeto. Em relação aos graus de liberdade, definido como o número de deslocamentos independentes necessários para definir as posições deslocadas de todas as massas em relação à sua posição original (CHOPRA, 2017), é tido que uma viga geralmente consiste em uma alma e uma laje que é muito rígida no eixo longitudinal. Neste caso, pode-se considerar rígido no sentido longitudinal em relação à rigidez à flexão do pilar. Além disso, para estruturas baixas, as deformações longitudinais da coluna podem ser negligenciadas com muito pouco impacto sobre precisão. Ademais, os efeitos da inércia rotacional podem ser desprezíveis e os efeitos da deformação longitudinal também são insignificantes. Pode-se assumir que as massas dos pilares são desprezíveis em relação à massa estrutural total, que se concentra na laje. Portanto, a estrutura é reduzida a um sistema com um único grau de liberdade na direção horizontal (PAULTRE, 2011). Visto que há a inserção da viga do pilar, foi considerado o fator de zona rígida no modelo como 0,5 (valor tido como padrão entre projetistas) para considerar a transferência de esforços da viga para o pilar mais próxima do real. Para monitorar o comportamento da estrutura, será admitido rótulas plásticas, as quais concentram a plasticidade apenas em determinadas regiões, mantendo o resto do elementos com comportamento linear. Para a viga, foi definido como iteração o momento e para os pilares foi considerado a força axial e o momento. A aplicação dessas propriedades não lineares foram feitas em relação a extremidade dos elementos. A carga inserida foi de 13,2 kN/m, uma vez que essa é a carga permanente total. Para a análise *Pushover* há algumas configurações possíveis para o padrão de carga, sendo listado pelo ATC-40 (COUNCIL, 1996) 5 possibilidades, das quais empregou-se o item 1 e 3 descritos a seguir:

- Aplicação de uma única força horizontal concentrada no topo da estrutura. (Geralmente, só se aplica a um edifício de um andar);
- Aplicação de forças laterais em proporção ao produto das massas do piso e da forma do primeiro modo do modelo elástico da estrutura. A curva de capacidade é geralmente construída para representar o primeiro modo de resposta da estrutura com base na suposição de que o modo fundamental de vibração é a resposta predominante da estrutura. Isso geralmente é válido para edifícios com períodos fundamentais de vibração de até cerca de um segundo.

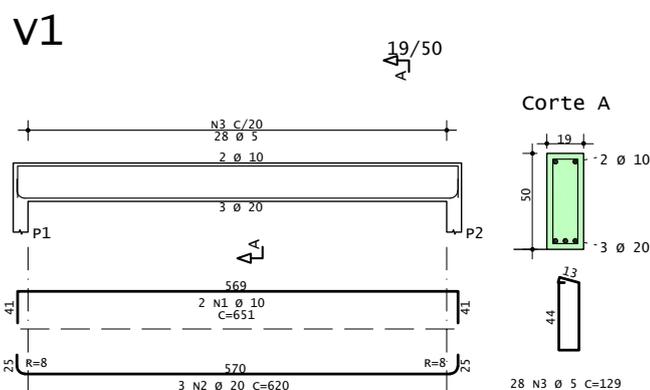
Assim, foi definido uma força unitária no topo do pórtico na consideração do carregamento total. Para os casos de carregamento, primeiramente aplicou a carga permanente como não linear na condição de repouso e em seguida a carga unitária horizontal da análise *Pushover* também como não linear, sendo essa iniciada após a aplicação do carregamento permanente. Foi monitorado o deslocamento do topo até 50 cm, pois tal medida já era suficiente para observar a curva de capacidade. A análise modal tem o intuito de determinar os modos de

vibração de uma estrutura, sendo obtidos os perfis de movimento da estrutura e as frequências associadas a cada modo de vibração (MARCHETTI, 2019). Os modos foram obtidos por meio da análise modal considerando os autovetores e autovalores generalizados. Dessa forma, por se tratar de uma análise elástico linear com as rigidezes iniciais, não foi avaliado o amortecimento. Como descrito anteriormente, a estrutura pode ser representada apenas pelo primeiro modo (modo fundamental), pois há 1 deslocabilidade predominante. Nesses pórticos foram realizadas análises transientes (*time-history*) com o acelerograma (histórico temporal de aceleração no solo) do registro histórico do terremoto ocorrido na cidade californiana de El Centro em 1940.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

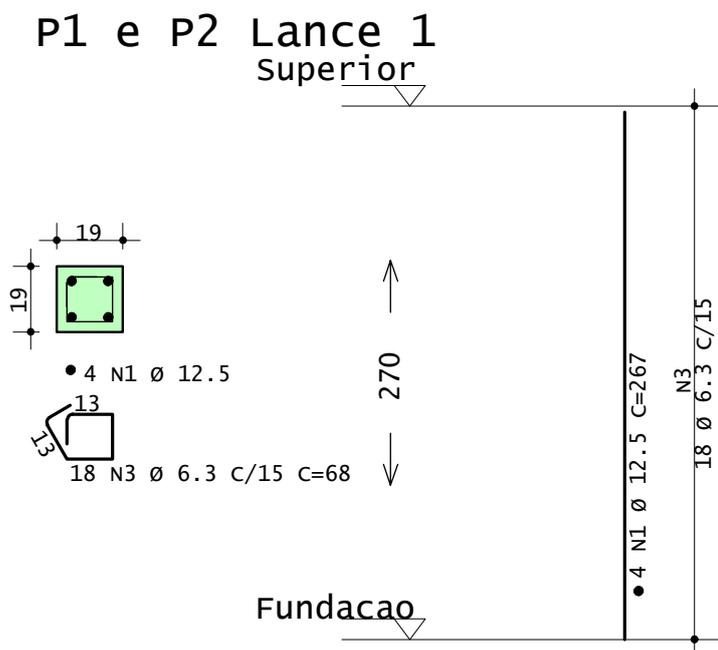
As Figuras 3 e 4 contêm as sessões transversais e as armaduras do pórtico controle e as Figuras 5 e 6 a do otimizado, sendo observado que as armaduras de aço diferiram entre o pórtico controle e o otimizado, juntamente com a seção transversal da viga.

Figura 3: Dimensionamento da viga.



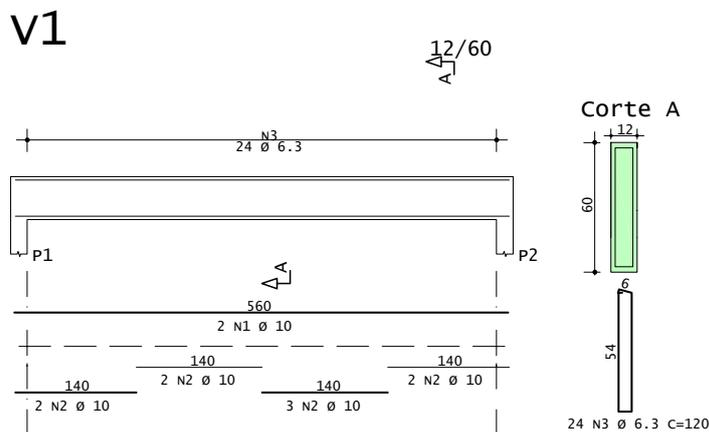
Fonte: Resultado do TQS.

Figura 4: Dimensionamento dos pilares.



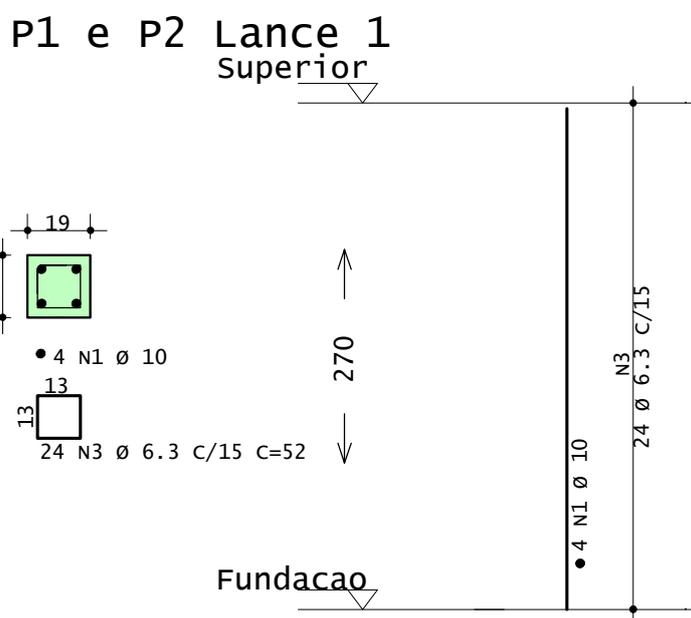
Fonte: Resultado do TQS.

Figura 5: Viga otimizada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6: Pilares otimizados.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que a altura da viga para o pórtico otimizado foi maior do que a do controle devido ao mecanismo de funcionamento do algoritmo genético, que obteve essa configuração como ótima (função objetivo) e passou para as próximas gerações de pórticos tais seções que se perpetuaram.

Tabela 3: Custo do pórtico controle.

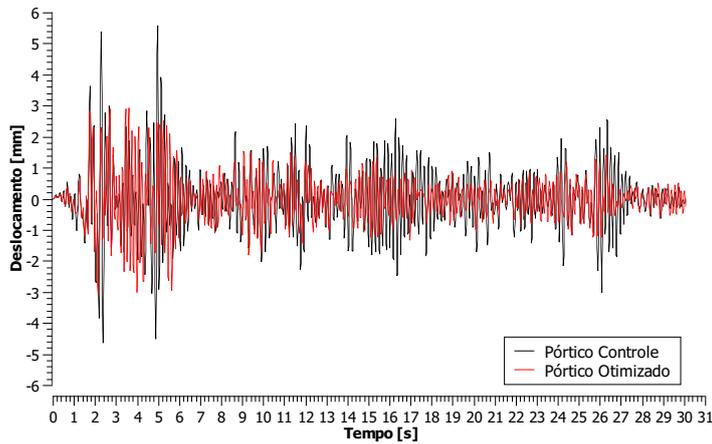
*Código	Material	Custo unitário	Custo total
00034493	Concreto [R\$/m³]	442,12	283,09
00043061	Aço CA-60 (ϕ_5) [R\$/kg]	7,88	42,88
00043058	Aço CA-50 ($\phi_{10}, \phi_{12.5}$ e ϕ_{20}) [R\$/kg]	7,91	643,59
00034449	Aço CA-50 ($\phi_{6.3}$) [R\$/kg]	9,33	56,18
00043677	Formas [R\$/m²]	53,62	658,88
Custo total do pórtico			R\$ 1684,62

*Código do SINAPI

Fonte: (SINAPI, 2023)

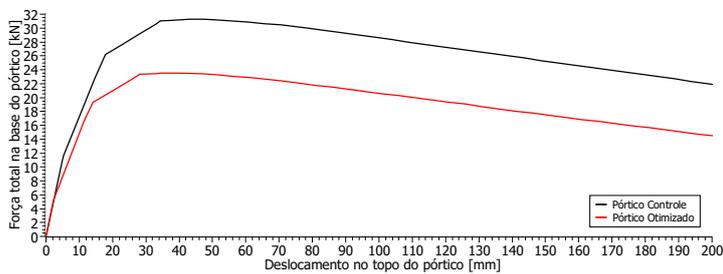
Para o pórtico otimizado o custo foi de aproximadamente R\$1225,01, função objetivo encontrada pelo algoritmo genético. O *Time-history* e as curvas de *Pushover* estão nas Figuras 7 e 9.

Figura 7: Time-history do terremoto EL Centro.



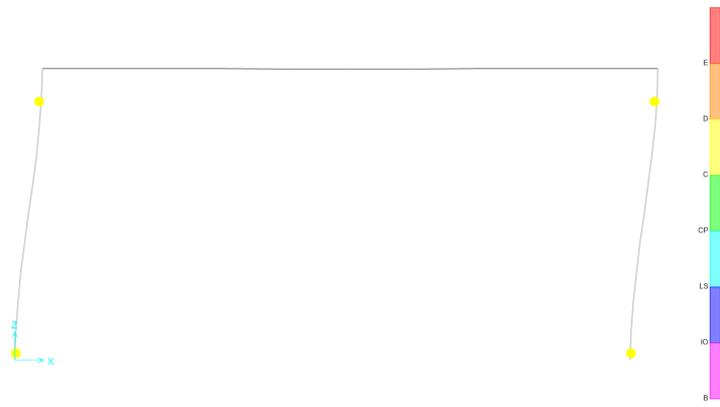
Fonte: Autoria própria.

Figura 8: Curvas de Capacidade (*Pushover*).



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: Evolução do padrão das rótulas plásticas.



Fonte: Resultado do SAP2000®.

Legenda:

- B: Before yielding (Antes do escoamento)
- IO: Initial yielding only (Apenas escoamento inicial)
- LS: Limited strength (Resistência limitada)
- CP: Full plasticity with reduced strength (Plasticidade total com resistência reduzida)
- C: Cyclic (Cíclico)
- D: Descending branch (Ramo descendente)
- E: End of analysis (Final da análise)

Ademais, o período do pórtico controle é de 0,17s e o do otimizado é de 0,15s, aproximadamente. Ao analisar o *time-history* aplicando o El Centro, obteve-se o deslocamento máximo do pórtico controle por volta de 5,6 mm e de 3,1 mm para o otimizado. Ao observar esse valores na curva de capacidade, percebe-se que ambos os pórticos estão no regime linear e estão longe da ruptura.

CONCLUSÕES

Conclui-se que ambos os pórticos não sofreram ruptura frente

a um sismo histórico e com capacidade destrutiva como o sinal do El Centro. O padrão de formação de rótulas plásticas observadas na curva *pushover*, porém, denotam que ambas as estruturas não seguem o preconizado em normas de dimensionamento e detalhamento sísmicos usuais, pois é necessário que os processos inelásticos se desenvolvam inicialmente na extremidade das vigas e depois se propaguem às extremidades dos pilares, garantindo assim, o nível de ductilidade necessária para resistir aos efeitos sísmicos de forma segura. Em relação à otimização, o valor economizado considerando o custo dos pórticos foi de aproximadamente R\$459,61, sendo interessante o estudo da otimização dessas estruturas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023. 32 p.
- CAMP, C.; PEZESHK, S.; CAO, G. Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm. *Journal of structural engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 124, n. 5, p. 551–559, 1998.
- CAMP, C. V.; HUQ, F. Co2 and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 48, p. 363–372, 2013.
- CASTRO, F. D. "Em 5 anos, construir casa no Brasil ficou quase 50% mais caro." 2022. Disponível em: (<https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2022/01/30/em-5-nos-construir-casa-no-brasil-ficou-quase-50-mais-carro.htm>). Acesso em: 18 abr. 2022.
- CHOPRA, A. K. **Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering**. Fifth edition. Hoboken, NJ: Pearson, 2017. (Pearson Always learning). ISBN 9780134555126.
- CONSTITUINTE, A. N. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. [s.n.], 1988. v. 30. 1–172 p. ISBN 978-85-402-0758-5. Disponível em: (http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm).
- COUNCIL, A. T. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. **Report No. SSC 96-01: ATC-40**, v. 1, 1996.
- EROL, O. K.; EKSIN, I. A new optimization method: Big bang–big crunch. *Advances in Engineering Software*, v. 37, n. 2, p. 106–111, 2006. ISSN 0965-9978. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997805000827>).
- FEMA. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. **FEMA 440, prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project)**, p. 392, 2005.
- FJP. Déficit habitacional e inadequação de moradias no brasil: Principais resultados para o período de 2016 a 2019. p. 51, 2021.
- GIDUR/VT. Cadernos caixa. projeto padrão-casas populares 42m². p. 42, 2007.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. [S.l.]: MIT press, 1992.
- JULIANI, M. A. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos**. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- JULIANI, M. A.; GOMES, W. J. d. S. Optimal configuration of rc frames considering ultimate and serviceability limit state constraints. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 14, 2021.
- KARABOGA, D. et al. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. [S.l.], 2005.
- KAVEH, A.; BAKHSHPOORI, T. Water evaporation optimization: A novel physically inspired optimization algorithm. *Computers Structures*, v. 167, p. 69–85, 2016. ISSN 0045-7949. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794916000092>).
- KAVEH, A.; Biabani Hamedani, K.; Milad Hosseini, S.; BAKHSHPOORI, T. Optimal design of planar steel frame structures utilizing meta-heuristic optimization algorithms. *Structures*, v. 25, p. 335–346, 2020. ISSN 2352-0124. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012420301168>).
- KUHN, H.; TUCKER, A. Nonlinear programming in proceedings of 2nd berkeley symposium (pp. 481–492). **Berkeley: University of California Press.**, 1951.
- MARCHETTI, T. **Avaliação do desempenho estrutural de edifício submetido a sismo pela análise pushover**. 2019. 186 p. Disponível em: (<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197484>).
- NAÇÕES UNIDAS. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: (<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>). Acesso em: 17 abr. 2022.
- PAULTRE, P. *Dynamics of structures*. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- PEREIRA, E. M. V.; CAVALCANTE, G. H. F.; RODRIGUES, I. D.; JÚNIOR, L. C. M. V.; SIQUEIRA, G. H. Seismic reliability assessment of a non-seismic reinforced concrete framed structure designed according to ABNT NBR 6118: 2014. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 15, 2021.
- PORTUGUESA, N. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismo parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. **NP EN**, v. 1, p. 2009, 1998.
- SINAPI. Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil: Julho de 2023 - Caixa Econômica Federal. São Paulo, 2023. Disponível em: (https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_664).
- TAPAO, A.; CHEERAROT, R. Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, v. 151, p. 802–820, 2017. ISSN 0141-0296. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617315493>).
- VIANNA, L. C. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos**. 127 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.