

Análise comparativa de dimensionamento otimizado de blocos de concreto sobre estacas de concreto

Thiago Tononi Turini¹, Matheus Abreu Kerkoff², Lucas Fadini Favarato³, Élcio Cassimiro Alves⁴, Acley Gabriel Thomaz⁵

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo comparativo do resultado do problema de otimização de blocos de concreto sobre estacas, através do método dos pontos interiores, sendo analisadas as tensões limites nas estacas e no pilar conforme as normas ABNT NBR 6118:2014 (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ACI (American Concrete Institute, 2011) e EHE (Instrucción Española del Hormigón Estructural, 2008). Além das dimensões dos blocos, seção de aço e da resistência à compressão do concreto, o número de estacas para o projeto final será verificado como variável de projeto no problema de otimização. Exemplos numéricos de blocos de 2 a 6 estacas com os resultados da otimização serão apresentados para demonstrar a aplicabilidade da formulação. Por fim, fez-se uma análise da melhor solução, de modo que o melhor projeto seja escolhido.

Palavras Chaves: Blocos de concreto sobre estacas, otimização, análise comparativa.

¹Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, thiagoturini99@gmail.com

²Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, mkerkoff1@gmail.com

³Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, lucasffavarato@gmail.com

⁴Engenheiro Civil, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, elcio.calves1@gmail.com

⁵Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, aclei@vertiko.com.br

Endereço para correspondência: Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras – Vitória-ES – Brasil. CEP 29075-910.

1 INTRODUÇÃO

A partir do século XX, a evolução tecnológica proporcionou o aparecimento de materiais mais resistentes no mercado, bem como metodologias e equipamentos antes desconhecidos pelo mercado da construção. Somando-se a isso a constante busca pela redução dos custos globais dos empreendimentos e o arrojo dos engenheiros, novas técnicas foram aprimoradas, possibilitando o aparecimento de edifícios cada vez mais altos e pesados, muitas vezes erguidos em região de solo sem qualidade compatível. Isso foi possível graças à utilização de blocos de fundação.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, blocos de fundação são estruturas de volume usadas na transmissão de cargas às estacas e aos tubulões, consideradas rígidas ou flexíveis, classificação que depende, em geral, da disposição das estacas.

Por conta de sua geometria, os blocos são elementos tridimensionais, não sendo permitida a analogia com vigas e/ou lajes. A hipótese de Bernoulli não é válida e, portanto, seu comportamento estrutural é mais complexo (Tanno, 2012). No Brasil, o dimensionamento segue uma rotina simplificada como consta na ABNT NBR 6118:2014, fazendo uso de dois métodos para cálculo das armaduras: sendo Blévy e Frémy (1967) e CEB-FIB (1970).

No entanto, para uma mesma solicitação de projeto, diversas alternativas estruturais são possíveis, dependendo da experiência e arrojo do projetista, podendo-se variar as dimensões (geometria) e características do material (f_{ck} do concreto, por exemplo). Lourenção, Andrião e Alves (2017) afirmam ser possível determinar uma solução considerada ótima, minimizando algum parâmetro relacionado ao bloco, como seu custo total, prazo de execução ou peso.

As rotinas de otimização, advindas da pesquisa operacional (PO), têm sido largamente utilizadas na engenharia de estruturas atualmente, momento em que tanto se fala em economia de recursos e redução de custos. Tomaz e Alves (2015) apresentam um estudo onde apontam a viabilidade da formulação do problema de otimização para o bloco com até 4 estacas.

Tomaz (2016) desenvolveu um programa com interface gráfica na plataforma do MATLAB baseado no método dos pontos interiores para a otimização do dimensionamento de blocos sobre estacas. Neste programa, permite-se variar a resistência característica à compressão do concreto, altura útil do bloco e distância entre estacas, simultaneamente ou não, para conduzir ao mínimo

custo final, com base nos critérios das normas brasileira, americana, europeia e espanhola, baseado no método das bielas e tirantes.

O presente estudo objetiva realizar uma análise comparativa acerca do dimensionamento otimizado de blocos, levando em consideração as tensões limites nas estacas e no pilar estabelecidas pelas normas ABNT NBR 6118:2014, ACI (2011), EHE (2008) e pelos critérios definidos por Blévot e Frémy (1967). Exemplos de casos reais de projetos de blocos (de 2 a 6 estacas) onde a solução foi obtida com o programa comercial CAD/TQS são apresentados e comparados com os resultados da otimização através do software de Tomaz (2016).

2 DIMENSIONAMENTO DO BLOCO E DAS ARMADURAS

2.1 Método das Bielas e Tirantes

A formulação deste método é baseada nos ensaios de Blévot e Frémy conduzidos em 1967, que verificaram o modelo de treliça espacial para simular o bloco, composta por barras unidas por nós (Figura 1). O cálculo é desenvolvido através do equilíbrio de forças, de modo que os esforços de compressão são resistidos pelas bielas de concreto e os esforços de tração são resistidos pela armadura adicionada ao bloco. Segundo Munhoz (2004), mais de 100 ensaios foram realizados em blocos sobre 2, 3 e 4 estacas, variando a disposição das armaduras e analisando o estado limite de formação de fissura e estado limite último.

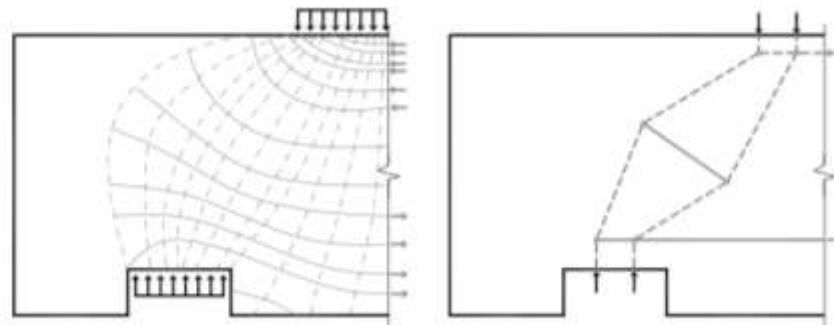


Figura 1: Esquema de distribuição de tensões nos blocos de concreto pelos modelos elástico linear (a) e simplificado de bielas e tirantes (b). Fonte: Adebar et al. (1990).

A área de aço é calculada de posse da força de tração e também são verificadas as tensões de compressão nas bielas junto ao pilar e às estacas (Figura 2). Este método é recomendado para blocos que estão submetidos a cargas centradas e com todas as estacas igualmente afastadas do centro do pilar. Conforme Oliveira (2009), este método pode ainda ser empregado também no caso de ações que não são centradas, desde que se admita que todas as estacas comprimidas estejam submetidas ao maior carregamento transferido.

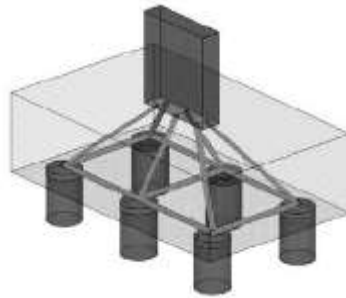


Figura 2: Esquema simplificado do método das bielas e tirantes – barras horizontais tracionadas e inclinadas comprimidas. Fonte: Oliveira et al. (2014).

Por fim, conforme Blévy e Frémy (1967), o ângulo das bielas de compressão do concreto deve estar entre 45° e 55° . Por este motivo, este método, embora mais difundido, não se aplica ao cálculo de blocos com estacas posicionadas exatamente abaixo do pilar.

2.2 Recomendações das normas técnicas

O método utilizado para obtenção das forças nas bielas de concreto e na armadura principal tracionada foi apresentado no item 2.1. Para o dimensionamento do bloco, no entanto, é necessário seguir prescrições normativas no tocante às tensões admissíveis nos nós. Cada norma técnica sugere um valor diferente para este limite, que varia conforme o número de estacas sobre as quais o bloco se apoia.

Para o dimensionamento, podem ser utilizadas três diferentes normas: ACI 318-11 (2011), EHE (2008) e ABNT NBR 6118 (2014). As tensões admissíveis, dadas em função do f_{ck} utilizado em projeto, estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Tensões limites nos nós para blocos sobre estacas.

Modelo	2 estacas		3 estacas		4 estacas		5 ou mais estacas	
	Pilar	Estaca	Pilar	Estaca	Pilar	Estaca	Pilar	Estaca
ACI (2011)	$0,85f_{cd}$	$0,68f_{cd}$	$0,85f_{cd}$	$0,51f_{cd}$	$0,85f_{cd}$	$0,51f_{cd}$	$0,85f_{cd}$	$0,51f_{cd}$
EHE (2008)	f_{cd}	$0,70f_{cd}$	$3,30f_{cd}$	$0,70f_{cd}$	$3,30f_{cd}$	$0,70f_{cd}$	$3,30f_{cd}$	$0,70f_{cd}$
ABNT NBR 6118 (2014)	$0,85v_{fcd}$	$0,72v_{fcd}$	$0,85v_{fcd}$	$0,60v_{fcd}$	$0,85v_{fcd}$	$0,60v_{fcd}$	$0,85v_{fcd}$	$0,60v_{fcd}$
	$v=(1-f_{ck}/250)$							

2.3 A formulação do problema de otimização

Utilizando o método das bielas para o dimensionamento de blocos sobre estacas e adequando para a formulação de problema de otimização, obtêm-se as seguintes equações, cujas variáveis estão indicadas na Figura 3.

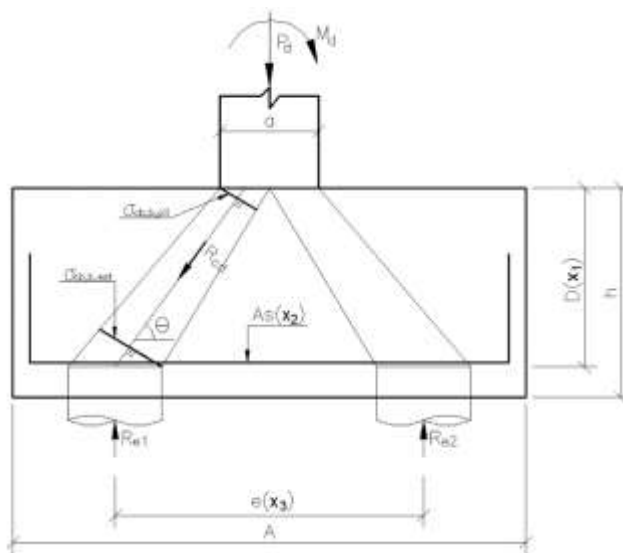


Figura 3: Bloco sobre duas estacas, variáveis do problema pelo método das bielas. Fonte: Tomaz (2016).

Variáveis do problema:

- x_1 - Altura útil do bloco (D);
- x_2 - Área de aço principal (A_s);
- x_3 - Espaçamento entre estacas na direção x (e_x);

x_4 - Espaçamento entre estacas na direção y (e_y).

x_5 - Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck});

Função objetivo (minimizar):

$$f(x) = V_b \cdot pc + Af \cdot pf + As \cdot \gamma_a \cdot pa + pe * ne \quad (\text{custo do bloco}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

V_b - volume do bloco;

pc - preço por metro cúbico do concreto;

Af - área de fôrma do bloco;

pf - preço por metro quadrado da fôrma;

γ_a - peso específico do aço;

pa - preço por kg do aço;

As - área de aço principal.

pe - o custo da estaca de acordo com o tipo de estaca utilizada;

ne - número de estacas;

Sujeita às seguintes restrições:

$$\left\{ \begin{array}{l} c1: \quad h - \frac{A-a}{3} \leq 0 \\ c2: \quad 45^\circ - \theta \leq 0 \\ c3: \quad \theta - 55^\circ \leq 0 \\ c4: \quad \sigma_{cb,pil} - \sigma_{cb,lim,pil} \leq 0 \\ c5: \quad \sigma_{cb,est} - \sigma_{cb,lim,est} \leq 0 \\ c6: \quad R_{e,máx} - R_{e,lim} \leq 0 \\ c7: \quad e_x - e_{x,mín} \leq 0 \\ c8: \quad e_y - e_{y,mín} \leq 0 \\ ceq1: \quad A_s - \frac{R_{sd}}{f_{yd}} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

h - altura do bloco;

A - largura do bloco;

a, b - dimensões do pilar;

θ - ângulo da biela de compressão;

$\sigma_{cb,pil}$ - tensão da biela comprimida (pilar);

$\sigma_{cb,est}$ - tensão da biela comprimida (estaca);

$\sigma_{cb,lim,pil}$ - tensão limite da biela comprimida (pilar);

$\sigma_{cb,lim,est}$ - tensão limite da biela comprimida (estaca);

$R_{e,máx}$ - reação máxima das estacas;

$R_{e,lim}$ - carga limite na estaca;

$e_{x,mín}$ - espaçamento mínimo entre estacas na direção x;

$e_{y,mín}$ - espaçamento mínimo entre estacas na direção y (para blocos com mais de duas estacas);

A_s - área de aço principal;

R_{sd} - força de tração de cálculo no tirante.

Acerca das restrições de cálculo, utilizam-se as equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** conforme a quantidade de estacas no bloco.

Tabela 2: Equações para o método das bielas e tirantes.

Bloco 2 estacas			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$
$\arctg\left(\frac{D}{e/2 - a/4}\right)$	$\frac{P_d}{8} \cdot \frac{(2e - a)}{D}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{2 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$
Bloco 3 estacas			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$
$\arctg\left(\frac{D}{e\sqrt{3}/3 - 0,3b}\right)$	$\frac{P_d}{9} \cdot \frac{(e\sqrt{3} - 0,9 \cdot b)}{D} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{3 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$
Bloco 4 estacas			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$
$\arctg\left(\frac{D}{e\sqrt{2}/2 - b\sqrt{2}/4}\right)$	$\frac{P_d}{20} \cdot \frac{(2 \cdot e - b)}{D}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{4 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$
Bloco 5 estacas (retangular)			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$

$\arctg\left(\frac{D}{e\sqrt{2}/2 - b\sqrt{2}/4}\right)$	$\frac{P_d}{20} \cdot \frac{(2 \cdot e - b)}{D}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{5 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$
Bloco 5 estacas (pentagonal)			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$
$\arctg\left(\frac{D}{e/2 \cdot \sin(36^\circ) - b/4}\right)$	$\frac{0,725 \cdot P_d \left(e - \frac{a}{3,4}\right)}{5d}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{5 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$
Bloco 6 estacas (hexagonal)			
θ	R_{sd}	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$
$\arctg\left(\frac{D}{e - b/4}\right)$	$\frac{P_d \left(e - \frac{a}{4}\right)}{6d}$	$\frac{P_d}{A_p \cdot \sin^2\theta}$	$\frac{P_d}{6 \cdot A_e \cdot \sin^2\theta}$

A primeira restrição (c_1) é imposta pela ABNT NBR 6118:2014, conforme visto no item 2.2, que define a altura mínima para que o bloco seja considerado rígido e possa ser utilizada a teoria de bielas e tirantes para o dimensionamento.

O intervalo do ângulo da biela válido para a aplicação do método das bielas e tirantes é entre 45° e 55° (c_2 e c_3). A tensão da biela comprimida no pilar e na estaca deve ser menor ou igual à tensão limite definida por norma (c_4 e c_5).

A sexta restrição (c_6) se refere à carga máxima suportada pela estaca, cuja reação não deve ultrapassá-la.

A sétima e oitava restrições (c_7 e c_8) determinam o espaçamento mínimo entre estacas. A necessidade de ter um valor mínimo para tal se deve sobretudo pelo efeito de grupo das estacas. De acordo com Oliveira (2009), alguns autores adotam o espaçamento mínimo entre eixos das estacas da ordem de 2,5 vezes o diâmetro de estacas pré-moldadas e 3,0 vezes para estacas moldadas “*in loco*” (este valor não deve ser inferior a 60 cm para ambos os casos). O valor do espaçamento mínimo adotado para este trabalho foi de duas vezes e meia o diâmetro da estaca.

A última restrição, por fim, é uma igualdade (c_{eq1}) para o cálculo da área de aço, numericamente igual à força de tração no tirante dividido pela resistência de cálculo do aço.

2.4 Programa utilizado nas análises

Tomaz (2016) desenvolveu um programa em MATLAB para o dimensionamento otimizado de blocos sobre estacas. O código é capaz de calcular geometrias de 2 a 6 estacas, com 2

configurações possíveis para blocos sobre 5 e 6 estacas. Dentre as variáveis possíveis para otimização, incluem-se o número e a distância entre estacas, as dimensões do bloco e o f_{ck} adotado.

Para o correto funcionamento do programa, é preciso fornecer os demais dados da geometria do bloco (além daqueles otimizados), tensão de escoamento do aço (f_{yk}), carga admissível na estaca, método de cálculo (bielas e tirantes ou CEB-FIP), tensões limites nos nós conforme a norma desejada e dados financeiros (custo unitário do m^3 de concreto de 20 a 90 MPa, em R\$/ m^3 ; custo do quilograma do aço, em R\$/kg; e custo das formas, em R\$/ m^2).

De posse dos esforços característicos solicitantes no bloco – força normal e momentos fletores (N_k , M_{kx} e M_{ky}), por fim, é possível dimensionar o bloco de forma otimizada, obtendo também as áreas de aço principais. As principais telas do programa utilizado se encontram nas Figuras 4 e 5.

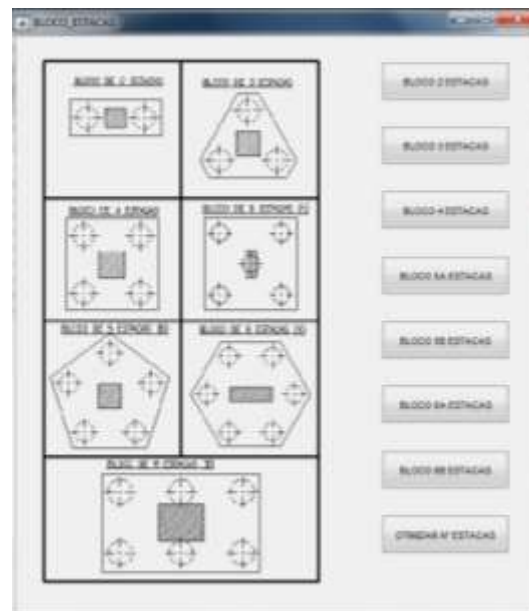


Figura 4: Tela inicial do programa de dimensionamento otimizado de blocos sobre estacas.

Fonte: Tomaz (2016).

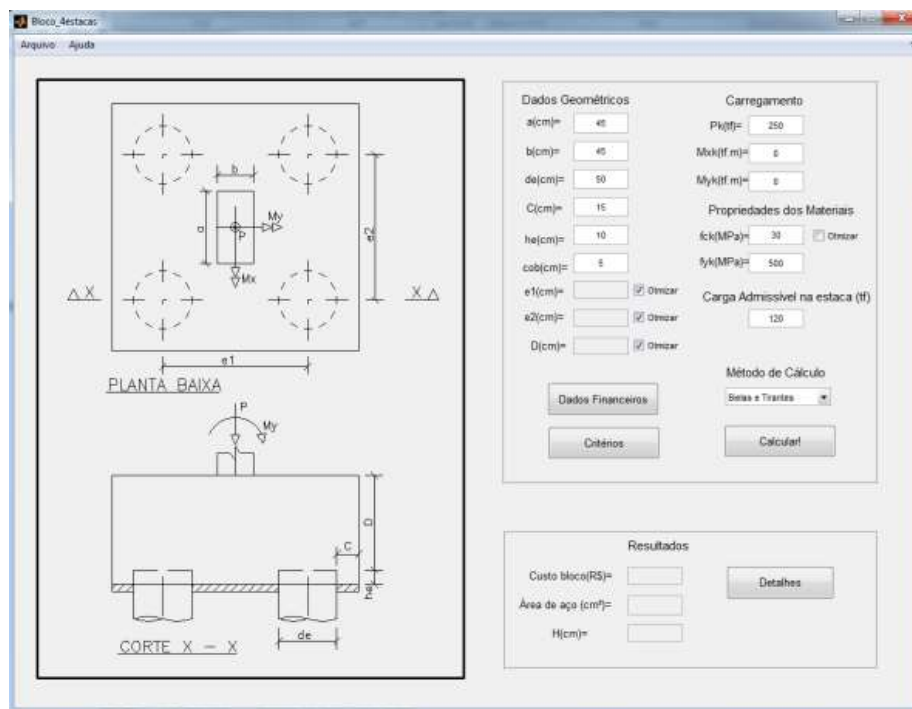


Figura 5: Interface para utilização de bloco de 4 estacas. Fonte: Tomaz (2016).

3 EXEMPLOS E RESULTADOS ANALISADOS

Nesta seção serão apresentados exemplos obtidos de casos reais e calculados com o programa comercial CAD/TQS. Este resultados foram obtidos baseados na experiência do projetista. Os resultados do problema de otimização serão analisados, de forma que possa ter uma referência da redução do custo nesses casos estudados.

3.1 Dados Financeiros

Após uma prévia pesquisa de mercado, os seguintes dados referentes aos custos de materiais foram coletados e inseridos no código do programa, a fim de viabilizar a análise financeira comparativa (Figura 6).

CONCRETO			
Fck (MPa)	(R\$/m³)	Fck (MPa)	(R\$/m³)
20	245	60	300
25	250	65	310
30	255	70	320
35	260	75	340
40	265	80	360
45	270	85	380
50	280	90	400
55	290		

AÇO (R\$/Kg)= 3.5475
 FORMA (R\$/m³)= 38.78

Figura 6: Dados financeiros dos materiais utilizados pelo programa. Fonte: Tomaz (2016).

3.2 Carregamentos impostos aos blocos

Os exemplos analisados são blocos variando de 2 a 6 estacas de fundação e estão submetidos aos carregamentos apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Carregamentos (valores característicos).

Número de estacas sobre o qual se apoia o bloco	Pk (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
2	538,6	0	0
3	1412,15	137,29	29,42
4	1765,8	19,62	29,43
5	2923,38	19,62	49,05
6	3060,72	49,03	107,91

Em que:

P_k – Carga axial aplicada no centro geométrico do bloco;

M_x – Momento em relação ao eixo x;

M_y – Momento em relação ao eixo y.

Nos itens seguintes, são apresentados os resultados. Para o correto entendimento das tabelas, deve-se saber que f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão; As_1 e As_2 são as

áreas de aço nas direções x e y , respectivamente; e_1 e e_2 são os espaçamentos entre as estacas nas direções x e y , respectivamente; e D é a altura útil do bloco.

3.3 Exemplo 1 - Blocos sobre 2 estacas

Para o primeiro exemplo foi verificado um bloco sobre 2 estacas. Os resultados do programa são mostrados na Figura 7:

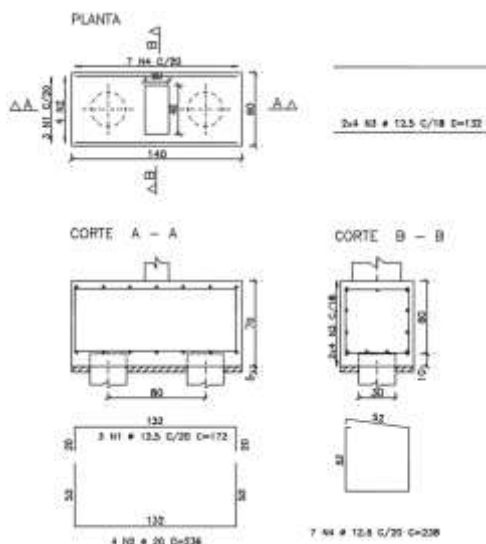


Figura 7: Projeto de bloco de fundação de 2 estacas.

Os resultados da otimização são mostrados na Tabela 4.

Tabela 1: Resultados da otimização para bloco sobre 2 estacas.

2 ESTACAS	Geometria: retangular		Materiais	Área de aço	Dimensões do bloco (cm)		Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_s (cm ²)	e_1	D	
	REAL		30	8,59	80	60	322,77
	Blévo & Frémy	OTIMIZADO	25	13,22	75	27,5	224,00
	NBR 6118	OTIMIZADO	40	12,34	75	28,4	229,42
	ACI	OTIMIZADO	40	12,34	75	28,4	229,42
	EHE	OTIMIZADO	35	13,22	75	27,5	227,16

Observa-se que a área de aço aumentou em todos os casos, acompanhada pela diminuição das dimensões e_1 e D , cuja diferença chega a -54,2 % na medida D , garantindo os limites de tensões impostos por Blévo&Frémy. Já para a dimensão e_1 do bloco de concreto, observa-se uma diminuição de -6,25 % para todas as limitações de tensões analisadas. O aumento do f_{ck} nos resultados de ABNT NBR 6118:2014 e ACI (2011) é consequência da diferença dos coeficientes dos limites de tensões da Tabela 1, visto que o projeto real utiliza os coeficientes impostos por Blévo & Fremy, como se verifica também nos casos de 3 a 6 estacas. Observe, por fim, que a redução no custo do bloco, desprezando a parcela referente às estacas, variou -30,6 % para Blévo & Frémy a -28,9 % para a ABNT NBR 6118:2014 e ACI (2011).

3.4 Exemplo 2 - Bloco sobre 3 estacas

O segundo exemplo é um bloco sobre 3 estacas, que após análise pelo programa o resultado é o mostrado na Figura 8:

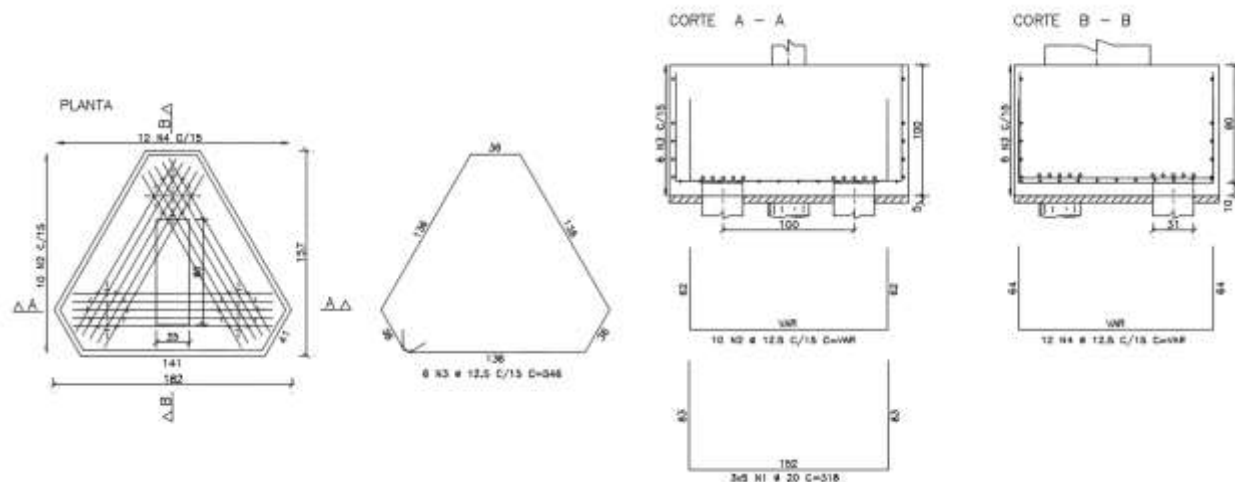


Figura 8: Projeto de bloco de fundação de 3 estacas.

Os resultados da otimização são mostrados na Tabela 5.

Tabela 2: Resultado da otimização para bloco sobre 3 estacas.

3 ESTACAS	Geometria: triangular		Materiais	Área de aço		Dimensões do bloco (cm)			Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	e_1	e_2	D	
	REAL		30	15,71	15,71	100	86,60	90	1128,20
	Blévt & Frémy	OTIMIZADO	45	12,86	11,80	78,22	81,42	40,86	692,67
	NBR 6118	OTIMIZADO	60	12,43	11,53	79,73	80,95	42,15	724,59
	ACI	OTIMIZADO	70	12,35	11,50	80,34	80,74	42,38	795,24
	EHE	OTIMIZADO	55	12,88	11,86	78,64	81,22	40,73	713,52

Observa-se uma diminuição da área de aço em todas as direções, para todos os limites de tensões. A área de aço foi reduzida em até -21,4 % para os limites de tensões impostos pela ACI (2011), da mesma forma que as dimensões diminuíram consideravelmente. Para o caso de Blévt & Frémy, caso com maior redução, houve um decréscimo -38,6 % no preço final.

3.5 Exemplo 3 - Bloco sobre 4 estacas

O projeto do bloco sobre 4 estacas verificado pelo programa é mostrado na Figura 9:

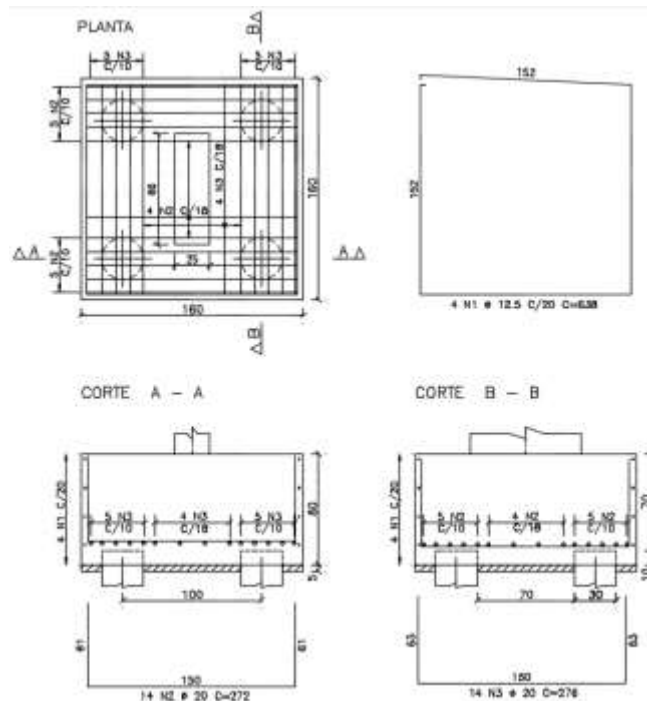


Figura 9: Projeto de bloco de fundação de 4 estacas.

Os resultados da otimização são mostrados na Tabela 6.

Tabela 3: Resultado da otimização para bloco sobre 4 estacas.

4 ESTACAS	Geometria: retângular		Materiais	Área de aço		Dimensões do bloco (cm)			Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	e_1	e_2	D	
	REAL		30	43,80	43,80	100	100	70	1399,93
	Blévtot & Frémy	OTIMIZADO	35	14,97	8,38	75	75	38,7	622,01
	NBR 6118	OTIMIZADO	45	13,45	7,53	75	75	43,1	658,04
	ACI	OTIMIZADO	55	14,07	7,88	75	75	41,2	673,36
	EHE	OTIMIZADO	40	14,07	7,86	75	75	41,3	641,07

Ocorre a diminuição da área de aço em todas as direções, sendo a máxima de aproximadamente de -82,8 % na direção de A_{s2} , analisando os limites de tensões impostos por Blévtot & Frémy, compensada, por outro lado, pelo aumento na resistência do concreto. Também se pode observar a diminuição do volume de concreto, para todos os casos, e uma redução no custo de -55,5 % para o mesmo critério.

3.6 Exemplo 4 - Blocos sobre 5 estacas

O quarto exemplo é um projeto de um bloco sobre 5 estacas verificado pelo programa com os resultados apresentados na figura 10.

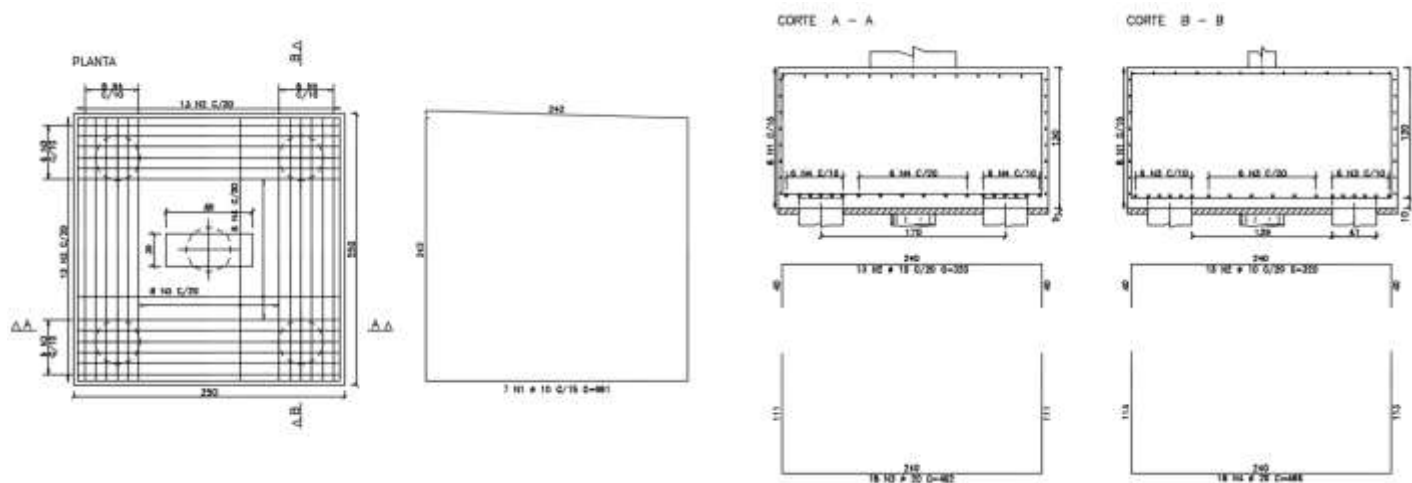


Figura 10: Projeto de bloco de fundação sobre 5 estacas.

Os resultados da otimização são mostrados na Tabela 7.

Tabela 4: Resultado da otimização para bloco sobre 5 estacas.

5 ESTACAS	Geometria: retângular		Materiais	Área de aço		Dimensões do bloco (cm)			Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	e_1	e_2	D	
	REAL		30	56,55	56,55	170	170	120	4131,24
	Blévet & Frémy	OTIMIZADO	30	21,11	12,19	177,5	102,5	87,5	2360,61
	NBR 6118	OTIMIZADO	70	20,3	11,72	177,5	102,5	91,1	2827,03
	ACI	OTIMIZADO	70	20,3	11,72	177,5	102,5	91,1	2827,03
	EHE	OTIMIZADO	35	21,11	12,19	177,5	102,5	87,5	2385,18

Ocorreu em todos os casos a diminuição da área de aço, podendo chegar a -79,3 % em uma das direções, para os limites de tensões da ACI (2011) e da ABNT NBR 6118:2014. Pode ser observada também uma redução de -42,8 % no custo final do bloco calculado com os critérios de Blévet & Frémy.

3.7 Exemplo 5 - Bloco sobre 6 estacas

O projeto do bloco sobre 6 estacas utilizado pelo programa é mostrado na Figura 11.

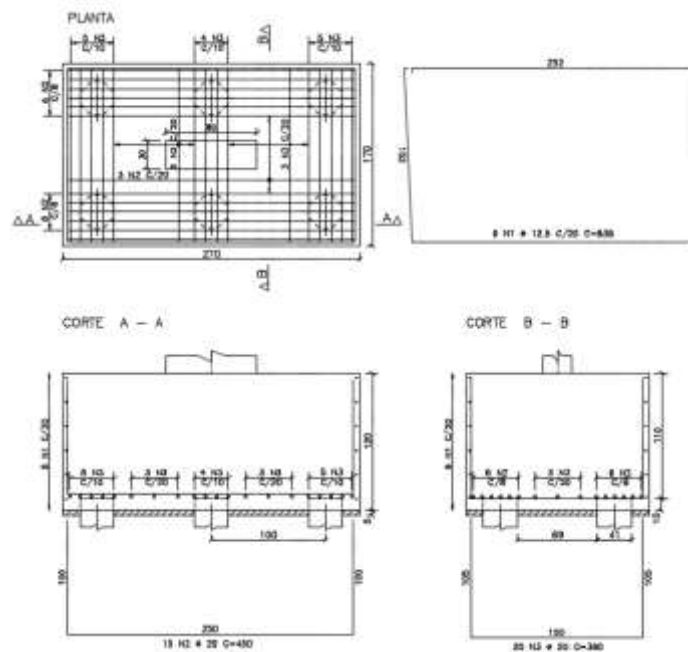


Figura 11: Projeto de bloco de fundação sobre 6 estacas.

Os resultados da otimização são demonstrados através da Tabela 8.

Tabela 5: Resultado da otimização para bloco sobre 6 estacas.

6 ESTACAS	Geometria: retângular		Materiais	Área de aço		Dimensões do bloco (cm)			Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	e_1	e_2	D	
	REAL		30	47,12	62,83	100	100	120	3091,76
	Blénot & Frémy	OTIMIZADO	35	8,67	19,90	102,5	102,5	107,1	2133,62
	NBR 6118	OTIMIZADO	70	7,54	17,3	102,5	102,5	123,9	2715,90
	ACI	OTIMIZADO	70	7,54	17,3	102,5	102,5	123,9	2715,90
	EHE	OTIMIZADO	30	8,67	19,9	102,5	102,5	107,1	2102,12

Foi verificada uma redução da área de aço de até -84 %, comparando-se o bloco real com aquele otimizado, para os limites de tensão impostos tanto pela ACI (2011) como pela ABNT NBR 6118:2014. O amplo aumento do f_{ck} nos resultados das otimizações é consequência da variação dos coeficientes dos limites de tensões (Tabela 1), visto que o projeto real utiliza os coeficientes impostos por Blénot & Fremy. A redução no volume de concreto chegou a -10,75 % para os critérios de Blénot & Frémy e EHE (2008). Por fim, a diminuição percentual no custo chegou a -32 % para este último critério.

3.7 Otimização do número de estacas

Além de otimizar os parâmetros f_{ck} , áreas de aço, espaçamentos entre estacas e altura útil, neste exemplo foi também considerado como variável de otimização o número estacas. O bloco utilizado como modelo possui geometria quadrada, 290x290 cm, apoiado sobre 4 estacas com diâmetro de 70 cm, espaçamento entre estacas de 180 cm nas duas direções, pilar 80 x 80 cm, altura útil de 120 cm e áreas de aço e f_{ck} mostrados na Tabela 9. O bloco está submetido a uma força normal característica de 4125 kN e momentos fletores nas duas direções de 780 kN.m e 140 kN.m. Diferente das análises anteriores, esta inclui o preço da estaca (R\$800,00/unidade) na composição do custo final, uma vez que este parâmetro é passível de modificação.

Tabela 9: Resultado da otimização do número de estacas.

Geometria: retângular		Número de estacas	Materiais	Área de aço		Dimensões do bloco (cm)			Custo (R\$)
			f_{ck} (MPa)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	e_1	e_2	D	
REAL		4	30	30,11	30,11	180	180	120	7537,43
Blévyot & Frémy	OTIMIZADO	3	25	36,41	34,25	196,9	199,8	109,2	5685,55
NBR 6118	OTIMIZADO	3	45	36,44	34,33	197,5	199,5	109,0	5829,69
ACI	OTIMIZADO	3	45	37,71	37,71	221,2	191,6	103,7	5892,07
EHE	OTIMIZADO	3	30	36,41	34,27	197,1	197,8	109,2	5721,59

Como se pode observar, ocorreu a redução do número de estacas, segundo todos os critérios, acompanhada pelo aumento das áreas de aço nas duas direções. O custo foi reduzido, chegando a -24,6 % para o critério de Blévyot & Frémy, de forma que parcela considerável deste percentual corresponde à dedução no valor total do custo de uma estaca. Por fim, observa-se em dois casos o aumento do f_{ck} em 50 %, em virtude da menor tensão admissível nos nós para os referidos critérios.

4 CONCLUSÕES

Foram apresentados e comparados resultados de dimensionamento de blocos de concreto armado sobre 2 a 6 estacas, segundo os procedimentos tradicionais das normas e pelas rotinas de otimização, com base no método dos pontos interiores. Buscou-se reduzir o custo final de produção dos blocos apresentados, variando a resistência característica do concreto à compressão, geometria do bloco, áreas de aço e número de estacas.

À exceção do bloco sobre duas estacas, os demais resultados foram unânimes em apresentar uma redução da área de aço, chegando a -80 % para blocos sobre quatro estacas, quando comparado ao bloco real executado. Por outro lado, essa atenuação no consumo de aço vem acompanhada pelo aumento do f_{ck} do concreto, a fim de melhorar a resistência das bielas de concreto à compressão para resistir aos esforços solicitantes no topo do bloco. Ainda no tocante a esse aspecto, deve-se ressaltar que alguns resultados desviaram muito em relação ao f_{ck} original

adotado em projeto, o que pode ser explicado devido à vasta variação dos coeficientes de tensões limites adotado em cada normatização. Essa diferença de tensões no nó do pilar pode ser observada entre a ABNT NBR 6118:2014 e a EHE (2008), sendo os coeficientes $0,85f_{cd}$ e $3,30f_{cd}$, respectivamente, ou seja, uma diferença mínima de quase quatro vezes. O projeto utilizado para realizar a otimização foi dimensionado aplicando os coeficientes de Blévy e Fremy, portanto a otimização mostrou-se mais eficaz quando comparado com o mesmo caso, o que pode ser também explicitado pelo custo, que sofreu as mais significativas reduções para este critério em todos os casos, à exceção do bloco sobre seis estacas.

Vale a pena salientar, que esta redução de custos poderá variar de acordo com o custos dos materiais para diferentes regiões do Brasil e do mundo, de tal forma que as conclusões aqui obtidas não são absolutas e sim apontam que soluções baseadas somente na experiência do projetista podem ser melhoradas quando do uso de ferramentas de otimização.

Por fim, o uso das técnicas de otimização, mostrou-se uma estratégia vantajosa para se utilizar em projetos de estruturas, uma vez que permite reduzir os custos finais do elemento projetado quando são modificadas as variáveis envolvidas.

5 REFERÊNCIAS

- Adebar, P.; Kuchma, D.; Collins, M. P.; *Strut-and-tie models for design of pile caps: an experimental study*. 1990. ACI Journal, v. 87, p. 81-91.
- American Concrete Institute. *Building code requirements for structural concrete and commentary*. Committee 318, ACI 318-11, Farmington Hills, 2011.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas – NBR6118. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos*. Rio de Janeiro, 2014. 238p.
- Comisión Permanente Del Hormigón. *EHE: Instrucción Española de Hormigón Armado*. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, Madrid, 2008.
- Lourenção, J. S.; Andrião, E. G. S.; Alves, E. C.; *Dimensionamento otimizado de sapatas rígidas isoladas*. XXXVIII CILAMCE – Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Florianópolis, 2017.

MATLAB. MATLAB Reference Guide. The Math Works Inc, 2016.

Munhoz, F. S.; *Análise do comportamento de blocos de concreto armado sobre estacas submetidos à ação da força centrada*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004. 160p.

Oliveira, D. S.; Barros, R.; Giongo, J. S.; “Blocos de concreto armado sobre seis estacas: simulação numérica e dimensionamento pelo método de bielas e tirantes. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais”, vol. 7, nº1. São Paulo. Fevereiro de 2014.

Oliveira, L. M.; *Diretrizes para projeto de blocos de concreto armado sobre estacas*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. 152p.

Tanno, D. C. S.; *Blocos de concreto sobre estacas posicionadas nas divisas de terrenos: estudo analítico e análise numérica linear*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012. 163p.

Tomaz, A. G. S.; *Dimensionamento ótimo de blocos sobre estacas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016. 129p.

Tomaz, A. G. S.; Alves, C. E.; *Dimensionamento ótimo de blocos sobre estacas*. 2015. Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v. 15 – n.1, p. 56-65.

Comparative analysis of optimum design of concrete blocks over concrete piles

ABSTRACT

The foundations project is one of the most important parts in structural design. In general, the design of the foundation elements is based on the experience of the designer and on the basis of the project parameters, such as requesting loads and characteristics of the terrain resistance. Recent studies, such as that of Tomaz and Alves (2015), Lourenção, Andrião and Alves (2017) point out that optimization techniques can be used in the design of the foundation elements in order to obtain a reduction in the final cost of the design of these elements. The present study proposes a comparative analysis of the result of the problem of optimization for piles cap, by the Internal Points Method, analyzing the limiting stresses on piles and on pillar in accordance with ABNT NBR 6118: 2014, ACI (2011), EHE (2008). For the dimensioning of the block the formulation proposed by Blévo & Frémy (1967) was used within the formulation of the

optimization problem. Beyond the dimensions of blocks, sections of steel and compressive strength of concrete, the number of piles for the final project will be analyzed as variables of the project in the problem of optimization. Numerical examples of 2 to 6 piles blocks with optimization results are presented to show the applicability of the formulation, as well as how the best analysis is done, so the best project can be defined. The results of the analyzed problems indicate that a considerable reduction of the cost can be obtained, when considering the optimization problem in addition to the dimensions of the block, sections of steel, also consider the concrete strength and the number of piles.

Keywords: Piles Caps, optimization, analysis.

CONCLUSIONS

In this article, the design of concrete blocks over concrete piles, from 2 to 6, has been explored, considering normative and optimized procedures, based on the Interior Points Method. The final cost of each block was reduced, considering the concrete compression strength, geometry of the blocks, steel reinforcements area and number of piles.

Except for the case of block under two piles, all the other results were unanimous to present the reduction of steel reinforcements area, reaching 80% for blocks over four piles, when compared to the real designed block. Although, this reduction in steel consumption leads to the increase of concrete characteristic compressive strength, in order to resist requesting loads at the top of the block. Besides, some results have conducted to a new f_{ck} , much different from the original one, which is explained by the difference in strength limits coefficients adopted by each standard. This difference can be specially noticed for the column node when the ABNT NBR 6118:2014 is compared to EHE (2008), which consider the coefficients of $0,85f_{cd}$ e $3,30f_{cd}$, respectively.

The project used as guideline has been designed according to Blévot&Frémy, whose optimization results were most efficient when compared to the same case, made explicit by the cost as well, a lot reduced in all the cases except for the block over six piles.

In this sense, the optimization is a powerful strategy that should be adopted for structures design, once it allows the reduction of costs by modifying all or some of the input variables.

