

PROJECTO ÓPTIMO DE RESERVATÓRIOS DE PRESSÃO HORIZONTAIS

C.M. MOTA SOARES*

C.A. MOTA SOARES*

e

H.C. MATEUS**

**Centro de Mecânica e Materiais da,
Universidade Técnica de Lisboa (CEMUL), IST,
Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codez, Portugal
** Escola Náutica Infante D. Henrique,
2780 Paço d'Arcos, Portugal*

SUMÁRIO

Pretende-se com este trabalho apresentar um modelo para optimização das dimensões de reservatórios horizontais suportados por berços. O objectivo é minimizar o peso do material dos fundos e da virola cilíndrica. As variáveis de projecto definem a geometria (comprimentos e espessuras), situam os apoios e determinam o ângulo de contacto dos apoios com o reservatório. Respeitam-se constrangimentos relacionados com as tensões admissíveis. Desenvolveu-se um programa de computador que associa a teoria de Zick, os procedimentos ditados pelos códigos de construção e técnicas de programação não linear. Apresentam-se alguns resultados conclusivos.

SUMMARY

The Optimal design of saddle supported horizontal cylindrical pressure vessels is presented. The objective function is the weight of the shell tiers and head closures. The design variables are the thicknesses and lengths of the shell tiers, thickness of head closures, saddle contact angle and the distance between the tangent line and the centre of adjacent saddle. The constraints are related with allowable stresses. A computer program has been developed which combines the Zick simplified theory, code design procedures and techniques of nonlinear mathematical programming to solve the optimal design program. Some conclusive results are presented and discussed.

INTRODUÇÃO

Uma finalidade comum aos projectos de equipamentos industriais é minimizar o seu custo mantendo as devidas margens de segurança e não violando os códigos de construção. Um factor importante para atingir o objectivo anterior é a redução do peso das estruturas.

Recibido: Septiembre 1989

Na continuação de trabalhos^{1,2,3}, referentes a reservatórios de pressão verticais, apresenta-se um modelo para optimização das dimensões de reservatórios horizontais. Estes assentam em dois berços e têm um corpo cilíndrico fechado por fundos copados.

Admite-se que a virola possa ser constituída por quatro troços de espessuras diferentes. Os comprimentos e espessuras desses troços, o ângulo de contacto do suporte com o reservatório e a distância da linha de tangência ao eixo dos apoios, constituem o conjunto das variáveis de projecto. O peso do material utilizado na construção dos fundos e da virola define a função objectivo a minimizar.

Os constrangimentos são funções explícitas das variáveis de projecto e dizem respeito^{4,5,6,7} às tensões provocadas no reservatório pelos suportes, à tensão longitudinal nos apoios e a meio vão e à tensão circunferencial de membrana. Prevê-se ainda uma flecha máxima.

O projecto óptimo é conseguido recorrendo a técnicas de optimização não linear^{8,9} disponíveis no programa ADS¹⁰ para microcomputadores. Compara-se o modelo proposto optimizado com o modelo tradicional⁶, e apresenta-se uma análise de sensibilidades, no ponto óptimo, para a função objectivo e para os constrangimentos activos.

O PROBLEMA DA OPTIMIZAÇÃO

Um problema de optimização, no espaço R^n , pode matematicamente apresentar a seguinte formulação geral:

Determinar, de entre elementos $\mathbf{x} \in R^n$, um elemento

$$\mathbf{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\} \quad (1)$$

que minimiza uma função

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

sujeita a constrangimentos de igualdade do tipo

$$h_k(\mathbf{x}) = h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

e a constrangimentos de desigualdades do tipo

$$g_j(\mathbf{x}) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

sendo f, h , e g aplicações de R^n em R .

Os elementos do conjunto $\mathbf{x}$, que se assumem reais e contínuos, constituem, do ponto de vista do projecto mecânico, as variáveis de projecto. As funções $h(\mathbf{x})$ e $g(\mathbf{x})$, dependentes de uma ou mais variáveis de projecto, consideram os constrangimentos impostos e definem o domínio admissível D . A função $f(\mathbf{x})$, função objectivo, pode ser encarada como um critério que permite tomar uma decisão ao escolher, de entre os elementos de D , aquele que realiza o projecto óptimo.

O gradiente de $f(\mathbf{x})$, ao definir a direcção máxima do crescimento de f , adquire uma importância fundamental em optimização passando-se o mesmo relativamente aos constrangimentos.

Uma função $f(\mathbf{x})$, definida em todos os pontos de uma vizinhança δ de $\mathbf{x}^*$, admite um mínimo relativo, em sentido estrito, no ponto $\mathbf{x}^*$ se

$$f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x}) \quad (5)$$

para todos os pontos $\mathbf{x}$ da referida vizinhança. Se $f(\mathbf{x}^*)$ é um mínimo de uma função f não sujeita a constrangimentos

$$\text{grad } f(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (6)$$

Esta condição, sendo apenas necessária, não garante a existência de mínimo. A condição suficiente exige que o hessiano H de f seja positivo definido em $\mathbf{x}^*$. Se $\text{grad } f(\mathbf{x}^*) = 0$ e H for positivo definido para todos os pontos $\mathbf{x}$ de um dado domínio, ao qual pertence $\mathbf{x}^*$, $f(\mathbf{x}^*)$ é mínimo global no conjunto considerado.

A existência de constrangimentos de igualdade e desigualdade obriga à transformação de problema inicial noutro representado pela função lagrangeana $L(\mathbf{x}; \lambda)$ sendo os coeficientes λ os respectivos multiplicadores de Lagrange.

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^p \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^m \lambda_{k+p} h_k(\mathbf{x}) \quad (7)$$

e as respectivas condições necessárias de minimização agrupam-se nas denominadas condições de Kuhn-Tucker⁸. Estas tornam-se suficientes e garantem a existência de um mínimo global se o domínio admissível é convexo e o mesmo acontece à função objectivo.

Não é fácil, do ponto de vista das técnicas de optimização, o uso directo destas condições não sendo muitas vezes possível garantir a convexidade do domínio admissível. Podem no entanto ser utilizadas para avaliar um mínimo local calculado por um processo numérico.

A confiança num dado valor para mínimo global poderá assentar numa análise dos resultados obtidos com diferentes algoritmos e com diferentes valores iniciais para as variáveis de projecto.

TÉCNICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OPTIMIZAÇÃO

A utilização de processos analíticos não é viável em face da natural complexidade dos problemas, nomeadamente em optimização estrutural. Este facto levou ao desenvolvimento de métodos numéricos^{8,9} para a resolução de problemas de optimização linear e não linear.

Minimização de funções com uma variável

Quase todos os problemas de optimização, e em particular os de engenharia, envolvem mais de uma variável. Apesar disso a minimização referida justifica-se por constituir um sub-problema em muitos algoritmos para problemas gerais.

Um método clássico é a aproximação polinomial da função a minimizar. A partir do conhecimento de alguns valores da função e eventualmente das suas derivadas, estima-se um polinómio que aproxima a função num dado intervalo. A informação disponível ou a facilidade em a obter, a natureza do problema, o grau de linearidade da função, o critério de convergência estabelecido etc., determinam o grau do polinómio a utilizar.

Um outro processo, conhecido pelo método da secção de ouro, procura o mínimo de uma função, num intervalo $[a, b]$, com o cálculo da função em dois pontos desse intervalo e a comparação das respectivas imagens. Esta técnica, aplicada sucessivamente, permite reduzir o intervalo de existência do mínimo até uma tolerância considerada aceitável.

Minimização de funções não constrangidas com mais de uma variável

Em geral, o algoritmo de optimização começa num ponto inicial $\mathbf{x}_0$ a partir do qual se obtém outro ponto a assim sucessivamente.

Em cada iteração q é usual utilizar a equação

$$\mathbf{x}_q = \mathbf{x}_{q-1} + \alpha S_q \quad (8)$$

a qual permite uma procura, no espaço n -dimensional, do mínimo de uma função na direcção determinada pelo vector S . O escalar α define a mudança pretendida na direcção S .

Admitindo que S_q define uma direcção para a qual a função $f(\mathbf{x})$ é reduzida calcula-se f para vários valores de α e com o mesmo ponto $\mathbf{x}$.

O problema é agora uni-dimensional e um dos processos anteriormente descritos permite a partir de $f(\alpha_1)$, $f(\alpha_2)$, $\dots$, $f(\alpha_k)$ determinar α^* que minimiza $f(\alpha)$ na direcção S_q .

Um método simples para o cálculo do vector S é considerar

$$S_q = -\text{grad } f(\mathbf{x}_{q-1}) \quad (9)$$

ou seja a direcção na qual $f(\mathbf{x})$ se reduz é determinada pelo vector simétrico do gradiente de f no ponto $\mathbf{x}_{q-1}$, transformando-se a equação (8) em

$$\mathbf{x}_q = \mathbf{x}_{q-1} - \alpha \cdot \text{grad } f(\mathbf{x}_{q-1}) \quad (10)$$

A eficiência aumenta significativamente se em cada iteração for utilizada informação anterior para obter uma direcção conjugada.

O método de Fletcher-Reeves inicia o processo com uma equação do tipo (8) e calcula S_q , nas iterações seguintes, de acordo com

$$S_q = -\text{grad } f(\mathbf{x}_{q-1}) + \beta_q S_{q-1} \quad (11)$$

sendo o parâmetro β definido por

$$\beta = \frac{|\text{grad} f(\mathbf{x}_{q-1})|^2}{|\text{grad} f(\mathbf{x}_{q-2})|^2} \quad (12)$$

Nos métodos de métrica variável, aumenta a quantidade de informação das iterações anteriores na interação actual, sendo agora a equação (11)

$$S_q = -H' \text{grad} f(\mathbf{x}_{q-1}) \quad (13)$$

em que H' na primeira iteração é a matriz identidade. Nas seguintes H' obtém-se recorrendo aos gradientes. Os algoritmos de Davidon-Fletcher-Powell e Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno baseiam-se no processo descrito.

É comum a qualquer processo iterativo o estabelecimento de critérios de convergência. Em primeiro lugar é necessário um número máximo de iterações para prevenir convergência excessivamente lentas, algoritmos inadequados, erros de programação etc. Em segundo lugar a convergência também deve ser avaliada pela variação absoluta e relativa da função objectivo entre duas iterações consecutivas. Finalmente as condições de Kuhn-Tucker são verificadas.

Minimização de funções constrangidas com mais de uma variável

Se as funções envolvidas são todas lineares é usual reduzir o problema à forma geral e minimizar

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (14)$$

constrangida com

$$\sum_{i=1}^n a_{ki} x_i = b_k \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

e

$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

sendo as restrições (15) e (16) facilmente ultrapassáveis. Estes problemas são habitualmente resolvidos recorrendo ao método "Simplex".

Se o problema é não linear um método possível é recorrer a uma estratégia de penalidade. O fundamento deste processo é a minimização de uma pseudo função objectivo do tipo

$$\Phi(\mathbf{x}, r_q) = f(\mathbf{x}) + r_q P(\mathbf{x}) \quad (17)$$

em que $f(\mathbf{x})$ é a função objectivo do problema original, $P(\mathbf{x})$ é uma função construída a partir dos constrangimentos, denominada função penalidade e r é um parâmetro variável. Para cada valor de r minimiza-se Φ , com técnicas descritas em 3.2, usando como $\mathbf{x}_0$ de partida o valor óptimo encontrado na iteração anterior.

Com o método ampliado dos multiplicadores de Lagrange obtém-se uma melhoria da estratégia anterior. A função a minimizar é a lagrangeana (7) associada a uma função de penalidade exterior resultando a forma ampliada.

$$L(\mathbf{x}, \lambda, r_q) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^P [\lambda_j \psi_j + r_q \psi_j^2] + \sum_{k=1}^m [\lambda_{k+p} h_k(\mathbf{x}) + r_q [h_k(\mathbf{x})]^2] \quad (18)$$

com

$$\psi_j = \max \left[g_j(\mathbf{x}), \frac{-\lambda_j}{2r_q} \right] \quad (19)$$

sendo os multiplicadores λ actualizados em cada iteração.

O algoritmo das direcções viáveis, partindo em cada iteração de um ponto da fronteira de um constrangimento activo, procura uma direcção para S da equação (8) que não viole o referido constrangimento e ao mesmo tempo reduza a função objectivo. Uma variante do método resolve o sub-problema anterior minimizando β sujeito a

$$\text{grad } f(\mathbf{x}_0) \cdot S + \beta \leq 0 \quad (20)$$

$$\text{grad } g_j(\mathbf{x}_0) \cdot S + \theta_j \beta \leq 0 \quad (21)$$

$$S \cdot S \leq 1 \quad (22)$$

é um problema linear envolvendo β e as componentes de S .

Um outro processo, a programação linear sequencial, obtém a solução de um problema não linear resolvendo uma sequência de sub-problemas lineares. Os constrangimentos e a função objectivo são linearizados com os termos de primeira ordem desenvolvimento de Taylor, num ponto $\mathbf{x}_0$. Da resolução deste sub-problema, usando programação linear ou outra técnica apropriada, resulta um ponto óptimo que será o ponto de partida para o sub-problema seguinte.

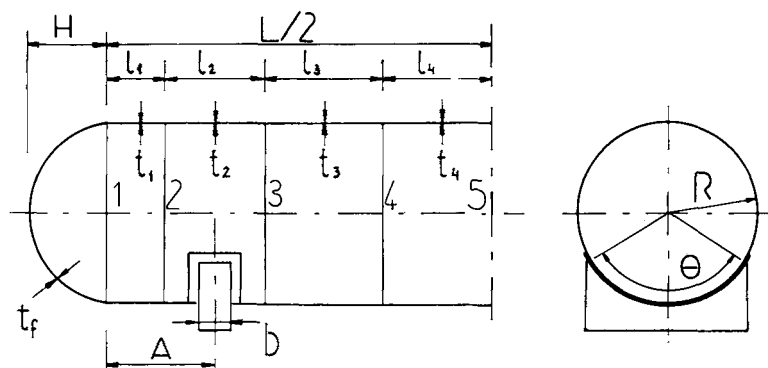
Por fim refira-se outra estratégia, a programação quadrática sequencial que define uma aproximação quadrática à função lagrangeana e linear aos constrangimentos. Este sub-problema, um problema de programação quadrática, é resolvido com técnicas próprias ou, por exemplo, com o algoritmo das direcções viáveis.

MODELO A OPTIMIZAR

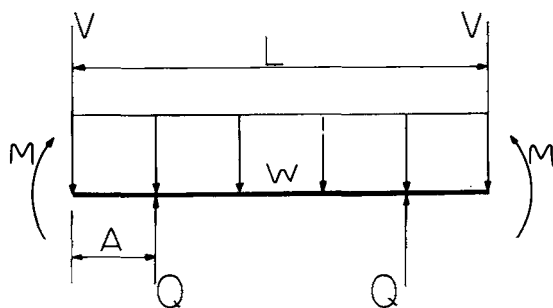
Geometria

A Figura 1a mostra um modelo geral e simplificado de um reservatório horizontal cujo comportamento se assume idêntico ao de uma viga bi-apoiada⁶, representada pela Figura 1b.

Os comprimentos L e H consideram-se constantes assim como o diâmetro interno nominal $D = 2 \times R$ (com o reservatório em novo). O comprimento H depende do tipo



a. Geometria



b. Solicitações

Figura 1. Reservatório horizontal.

de fundo. A distância A situa os suportes relativamente à linha de tangência. Admite-se que a virola cilíndrica pode ser constituída por quatro troços tendo cada um uma espessura nominal t_i e um comprimento l_i . A espessura nominal dos fundos o ângulo de contacto dos suportes com a virola são designado respectivamente por t_f e θ .

Variáveis de projecto e função objectivo

O conjunto de variáveis independentes

$$\mathbf{x} = (A, \theta, t_f, t_1, t_2, t_3, t_4, l_2, l_4) \quad (23)$$

permite caracterizar geometricamente o modelo atrás descrito e constitui o conjunto das variáveis de projecto. Os comprimentos l_1 e l_3 são dependentes e definem-se com

$$l_1 = A - l_2/2 \quad (24)$$

o que coloca a apoio no ponto médio de l_2 , e

$$l_3 = (L - 2A - l_2 - 2l_4)/2 \quad (25)$$

A função

$$f(\mathbf{x}) = 2\pi\gamma \left[\sum_{i=1}^4 l_i((R + t_i)^2 - R^2) + k((R + t_f)^3 - R^3) \right] \quad (26)$$

constitui a função que se pretende minimizar e representa o peso do material utilizado na construção da virola cilíndrica e dos fundos. Para fundos semi-elípticos $k = 1/3$ e para semi-esféricos $k = 2/3$. Outros tipos de fundos requerem expressões apropriadas.

Constrangimentos

O projecto dos reservatórios em estudo faz-se tendo em conta a tensão circunferencial de membrana e as tensões que ocorrem nas zonas dos apoios, derivadas da ovalização das respectivas secções, de acordo com a teoria de Zick⁴. Nas secções 1, 2, ..., 5 (Figura 1a) considera-se a tensão longitudinal, e o problema da encurvadura local. Prevê-se também a opção de limitar a flecha a meio vão. Tomou-se em consideração, para o cálculo, o funcionamento do reservatório em serviço e a situação de ensaio hidráulico.

Assume-se que o cilindro de comprimento L está sujeito ao carregamento indicado na Figura 1b onde Q é a reacção num apoio obtida com o peso de reservatório (onde se inclui o peso do fluido), w é a intensidade de carga constante repartida por um comprimento equivalente de $L + 4H/3$ e dada por

$$w = \frac{2Q}{L + 4H/3} \quad (27)$$

V é um esforço transversal, devido ao fundo

$$V = 2Hw/3 \quad (28)$$

e M é um momento flector também devido ao efeito dos fundos

$$M = w(R^2 - H^2)/4 \quad (29)$$

Os coeficientes k_j , nas equações (34) a (40), são funções da variável de projecto θ^5

Tensão Longitudinal

Os esforços anteriores permitem obter, nas secções $i = 1, \dots, 5$ e no apoio, os momentos flectores M_i e M_a respectivamente. Considerando a sobre-espessura de corrosão c , as expressões

$$\sigma_{2i-1} = \frac{|M_i|}{\pi R^2(t_i - c)} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (30)$$

$$\sigma_{2i} = \frac{|M_{i+1}|}{\pi R^2(t_i - c)} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (31)$$

e

$$\sigma_a = \frac{|M_a|}{\pi R^2(t_2 - c)k} \quad (32)$$

calculam a tensão de flexão à direita do ponto do ponto i ($i = 1, \dots, 4$), à esquerda do ponto i ($i = 2, \dots, 5$) e no apoio. O coeficiente k toma o valor 1 se $A \leq R/2$. Se for $A > R/2$ então k é função de θ e reduz o módulo de resistência à flexão assumindo valores diferentes em tracção e compressão⁵.

Estas tensões, de tracção e compressão, combinam-se⁶ com as tensões devidas à pressão interna, externa e ao líquido originando constrangimentos da forma

$$g(\mathbf{x}) = \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \quad (33)$$

em que σ_0 é tensão admissível (Apêndice A).

Tensão de corte

O cálculo da tensão de corte⁷ na zona dos apoios depende da rigidez local nomeadamente da posição dos fundos. As expressões

$$\tau = \frac{k'_2 Q}{R(t_2 - c)} \left(\frac{L - 2A - H}{L + H} \right) \quad (34)$$

para o caso em que os fundos estão afastados dos apoios ($A > R/2$) e

$$\tau = \frac{k''_2 Q}{R(t_2 - c)} \quad (35)$$

$$\tau = \frac{k''_f Q}{R(t_f - c)} \quad (36)$$

no caso contrário, permitem obter constrangimentos do tipo (33).

Tensões circunferenciais no plano dos apoios

Os momentos que surgem no plano dos apoios⁶ produzem tensões, que definem constrangimentos do tipo (33), dadas por

$$\sigma = \frac{k_s Q}{(t_2 - c)(b + 10(t_2 - c))} \quad (37)$$

no ponto inferior da secção

$$\sigma = \frac{Q}{4(t_2 - c)(b + 10(t_2 - c))} + \frac{3k_3 Q}{2(t_2 - c)^2} \quad (38)$$

$$\sigma = \frac{Q}{4(t_2 - c)(b + 10(t_2 - c))} + \frac{12k_3 Q R}{L(t_2 - c)^2} \quad (39)$$

no extremo do ângulo de contacto θ se $L > 8R$ ou $L \leq 8R$ respectivamente. Nas expressões b é a largura da placa de apoio. O uso de uma placa de reforço entre o apoio e a virola altera as expressões anteriores⁷.

Tensão adicional nos fundos

Se os apoios estão próximos dos fundos ($A \leq R/2$) são induzidos neste uma tensão de tracção⁶ calculada por

$$\sigma = \frac{k_4 Q}{R(t_f - c)} \quad (40)$$

que depois de combinada com a a tensão devida à pressão interna origina novo constrangimento do tipo (33)

Tensão circunferencial de Membrana

Para esta situação os constrangimentos têm a forma

$$g(\mathbf{x}) = 1 - \frac{t_i}{\frac{p(D + 2c)}{2\sigma_0 E_f - 1, 2p} + c} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (41)$$

onde p é a pressão total e E_f a eficiência das soldaduras.

Flecha a meio vão

A flecha a meio vão do modelo de viga bi-apoiada, de secção variável por troços (Figura 1), pode ser calculada, de um modo conservativo, pela expressão

$$f_v = -\frac{2}{E} \left[\sum_{j=1}^3 \frac{1}{(\Delta + \sin \Delta \cdot \cos \Delta) R^3 (t_j - c)} \left[\frac{M_j}{2} \left(\frac{l_j}{2} + l_{j-1} \right) l_j + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{Q_j}{2} \left(\frac{l_j}{3} + \frac{l_{j-1}}{2} \right) l_j^2 - \frac{w}{4} \left(\frac{l_j}{4} - \frac{l_{j-1}}{3} \right) l_j^3 \right] \right] \quad (42)$$

com $\Delta = (\pi + 5\theta/2)/6$, aplicada a metade do troço 2 ($j = 1$) e aos troços 3 e 4 ($j = 2, 3$).

Admitindo uma flecha admissível f_0 define-se

$$g(\mathbf{x}) = \frac{|f_v|}{f_0} - 1 \quad (43)$$

Comprimentos l_1 e l_3

Os constrangimentos $g(\mathbf{x}) = -l_1$ e $g(\mathbf{x}) = -l_3$ impedem os comprimentos l_1 e l_3 , definidos em (24) e (25), de serem negativos.

APLICAÇÕES

Com base na formulação referida desenvolveu-se um programa em FORTRAN, para ser usado em microcomputador, onde se inseriu a subrotina ADS. Apresentam-se alguns resultados referentes ao reservatório dimensionado na referência [6]. Os dados fundamentais do projecto mostram-se no apêndice B.

Caso 1

O projecto é optimizando utilizando processos que resultam de algumas combinações de algoritmos possíveis¹⁰. A tabela I indica os algoritmos constituintes de uma dada combinação (símbolo #) assim como o valor da função objectivo óptima. Atendendo à simplicidade da matemática envolvida na formulação do modelo a função objectivo óptima não depende grandemente da combinação utilizada e apresenta, relativamente ao projecto original, uma diminuição de 12 %. A Figura 2 mostra, de um modo gráfico, que a eficiência das diferentes combinações é no entanto diferente. O eixo x indica o número de vezes que é necessário calcular a função objectivo e o vector dos constrangimentos. Igualmente no eixo y mas relativamente à matriz dos gradientes. O eixo z indica o tempo de computação. As combinações 1,2,3 e 4 foram as mais eficientes sendo a 3 a mais rápida. Na optimização do modelo proposto não se mostra vantajoso o uso de uma estratégia prévia. O relativo sucesso da combinação 8 deve-se ao facto de os constrangimentos activos (tensão circunferencial de membrana) serem lineares.

Caso 2

Agora o projecto é novamente optimizado mas admitido uma pressão interna de 0.4 N/mm^2 . Resultou o peso mínimo de 226 kN e o conjunto óptimo das variáveis de projecto (23)

$$x = \{1098 \text{ mm}; 140^\circ; 9,3 \text{ mm}; 16,4 \text{ mm}; 19,2 \text{ mm}; 13,5 \text{ mm}; 20,6 \text{ mm}; 563 \text{ mm}; 0\} \quad (44)$$

Ficaram activos os constrangimentos resultantes de tensão longitudinal de tracção a meio vão e a tensão circunferencial no extremo da placa de reforço. O projectista pode pretender modificar os valores óptimos de x ; nomeadamente para obter medidas normalizadas. Interessa pois analisar a sensibilidade do peso e dos constrangimentos activos às alterações dos valores óptimos das variáveis. As Figuras 3,4 e 5 mostram as referidas sensibilidades. Tomando como referência o valor óptimo fez-se variar cada x_i de -25% a $+25\%$ com intervalos de 5% registando-se a consequente variação, em percentagem, do peso e das tensões. O peso mostra-se sensível, de um modo significativo relativamente às outras variáveis, à espessura t_3 . Uma diminuição de t_3 reduz o peso mas provoca a violação do constrangimento da Figura 4. Análises semelhantes podem ser feitas para outras variáveis.

CONCLUSÕES

Combinando os procedimentos referidos nos códigos com técnicas de optimização torna-se possível reduzir o peso dos reservatórios horizontais. O programa desenvolvido permite obter rapidamente, em microcomputadores, as dimensões fundamentais de um ante-projecto a partir do qual se poderá partir para projectos mais elaborados. O algoritmo das direcções viáveis⁸ é eficiente neste tipo de problemas. Mostra-se útil uma análise de sensibilidades do peso e dos constrangimentos activos no ponto óptimo. Uma das possíveis extensões deste trabalho será introduzir no modelo a existência de anéis.

Combinação nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estratégia previa:									
Nenhuma	#	#	#	#	.	.	.	.	.
Penalidade exterior	.	.	.	.	#	.	.	.	.
Penalidade Interior (linear) ...	.	.	.	.	.	#	.	.	.
Lagrange ampliado	.	.	.	.	.	.	#	.	.
Linear sequencial	.	.	.	.	.	.	.	#	.
Quadrático sequencial	.	.	.	.	.	.	.	.	#
Optimizador:									
Broydon-Fletcher	.	.	.	.	#	#	#	.	.
Direcções viáveis	.	.	.	#	.	.	.	#	#
Direcções viáveis (modificado)	#	#	#	.	.	.	.	.	.
Busca unidireccional:									
Secção de ouro	#	.	.	.	.	.	.	.	.
Interpolação polinomial	.	.	#	.	.	.	.	#	#
Extrapolação polinomial	.	.	.	#	#	#	#	.	.
Secção de ouro e interpolação	.	#	.	.	.	.	.	.	.
Função objectivo óptima (kN)	276	276	276	276	276	276	279	276	276

Tabela I. Caso 1.

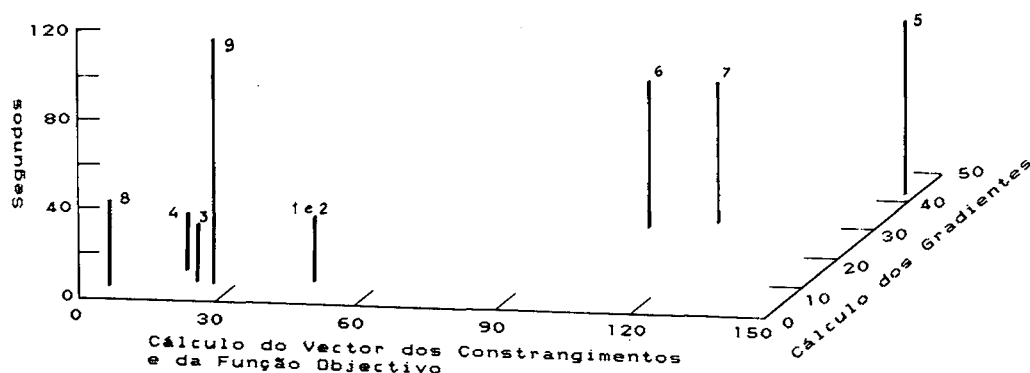


Figura 2. Eficiência das diferentes combinações - Caso 1.

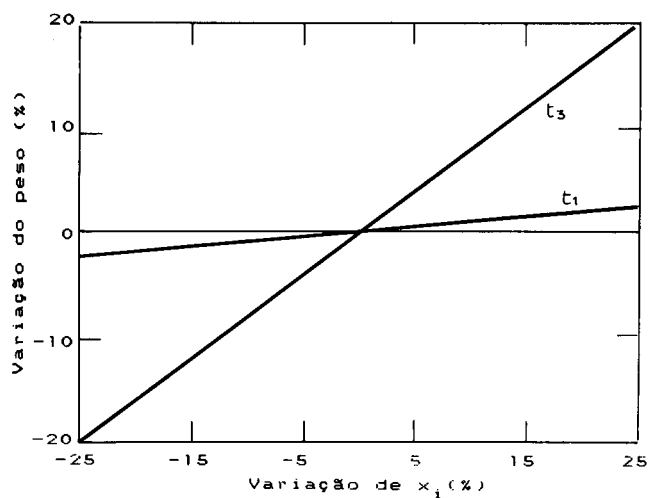


Figura 3. Caso 2- Sensibilidade da função objetivo

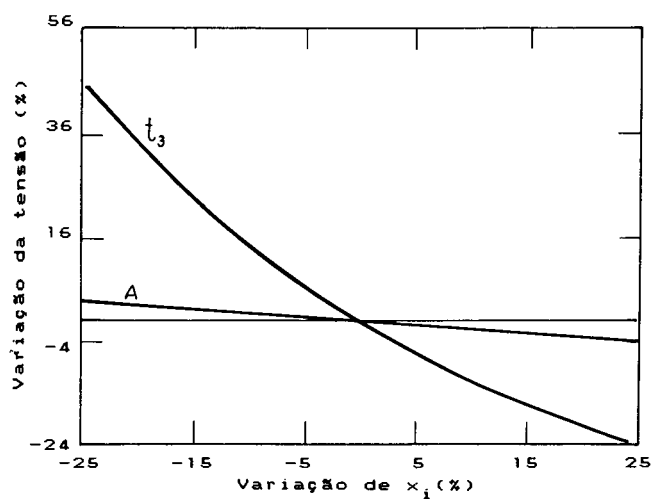


Figura 4. Caso 2- Sensibilidade da tensão longitudinal de tracção a meio vão.

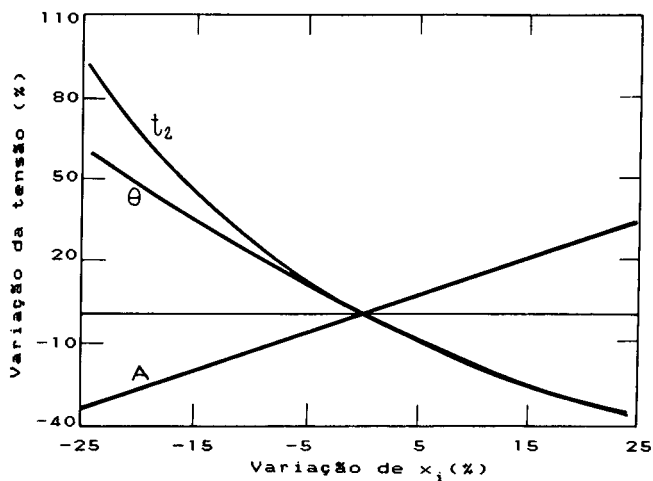


Figura 5. Caso 2- Sensibilidade da tensão circunferencial no extremo da placa de reforço.

APÊNDICES

Apêndice A - Tensões Admissíveis⁶

Tensões		Funcionamento	Ensaio
Longitudinal a meio vão e no apoio	tracção	$E_f \sigma_t$	$0,9 E_f y_s$
	compressão	mínimo (σ_t, σ_c)	mínimo (σ_t, σ_c)
Corte		$0.8 \sigma_t$	$0.7 y_s$
Circunferencial nos apoios		$1.25 \sigma_t$	$0.9 y_s$
Adicional nos fundos		$1.25 \sigma_t$	$0.9 y_s$
Circunferencial de membrana		σ_t	$0.9 y_s$

 σ_t – tensão admissível em tracção σ_c – tensão crítica de instabilidade y_s – tensão de cedência E_f – eficiência das soldaduras

Apêndice B – Dados fundamentais

Material	SA 285 Gr C	Pressão interna: funcionamento	0,62
Fundos	Semi-elípticos	[N/mm ²] ensaio	0,93
Diâmetro	3048	externa	0,1
Comprimentos [mm]: L	20726	Tensão admissível [N/mm ²]	95
H	762	Temperatura de cálculo [°C]	260
Largura da placa de apoio [mm]	254	Eficiência das soldaduras	0,8
Placa de reforço: largura	450	Flecha admissível [mm]	vão/400
[mm] espessura	10	Sobreespessura de corrosão [mm]	3,2
Peso volúmico do líquido:			
[N/mm ³] funcionamento	$0,94 \times 10^{-5}$	Número de variáveis de projecto	9
ensaio	$0,98 \times 10^{-5}$	Número de constrangimentos	52

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem os subsídios concedidos pelo Instituto Nacional de Investigação Científica e Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (Projecto n.º 811.86. 195).

REFERÊNCIAS

1. C.A. Mota Soares, C.M. Mota Soares y H.C. Mateus, "Projecto óptimo de Reservatórios de Pressão Verticais Suportados por Saia", Anais de 4^o Simpósio Brasileiro Sobre Tubulações e Vasos de pressão de A.C. Galeão, ABCM, Vol. 2, pp. 631-642, Salvador, (1986).
2. C.A. Mota Soares, C.M. Mota Soares y H.C. Mateus, "Optimal Design of Vertical Pressure Vessel with Supporting Cylindrical or Conical Skirt", *Journal of Engineering Optimization*, Vol. 11, pp. 217-225, Gordon and Breach- Science Publishers.
3. H.C. Mateus, "Projecto Óptimo de Reservatórios de Pressão Verticais Suportados por Saia", Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, (1987).
4. L.P. Zick, "Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports", *Welding Journal*, N.Y., Research Supplement, Vol. 3, pp. 435, (1951).
5. H.H. Bednar, "Pressure Vessel Design Handbook", Van Nostrand R. Company, New York, (1981).
6. L.E Brownell y E.H. Young, "Process Equipment Design", John Wiley, New York, (1959).
7. BS5500, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, (1982).
8. G.N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", Mc. Graw-Hill, New York, (1984).
9. R.T. Haftka y M.P. Kamat, "Elements of Structural Optimization", Martinus Nijhoff Publishers, (1985).
10. G.N. Vanderplaats, "ADS A Fortran Program for Automated Design Synthesis, Version 1.14", *User's Manual*, Engineering Design Optimization, Inc. St. Barbara, California.