DIMENSIONAMENTO OPTIMIZADO MULTI-CRITÉRIO DE SISTEMAS DE CONDUÇÃO DA ÁGUA CONSIDERANDO O CONCEITO DE BENEFÍCIO

Júlio F. Ferreira da Silva
Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica
Departamento Eng.ª Civil da Universidade do Minho

A Engenharia Hidráulica Urbana deve encontrar soluções racionais e optimizadas para a concepção, o dimensionamento e a gestão dos sistemas dos Sistemas de Condução da Água

1 - Introdução

No processo de dimensionamento duma conduta existem diversas incertezas, por exemplo:

- projecção das solicitações
- distribuição espacial das solicitações de água

Em geral, os engenheiros projectistas conseguem encontrar alternativas que tecnicamente satisfazem.
A procura da melhor solução para o problema em questão é tradicionalmente baseada no critério económico.

Com o desenvolvimento dos computadores e dos algoritmos de cálculo matemático-numéricos os estudiosos dos sistemas de condução da água viram nas técnicas optimização ferramentas para encontrar em as melhores soluções.

Após a euforia inicial, alguns investigadores começaram a acusar alguma decepção, na medida em que os resultados dos modelos de optimização, muitas vezes, não eram implementados.

Objectivos:

Estudar funções que caracterizassem de forma quantificada a preferência dos decisores por soluções que lhes permitem folga na gestão;

Definir o conceito benefício associado a uma conduta;

Ensaiar os efeitos nos resultados de dimensionamento de algumas expressões analíticas experimentadas para quantificarem o benefício;

Incluir dois critérios no processo de dimensionamento (o resultado económico e o benefício) com a participação prévia do decisor, designadamente na definição dos pesos que atribui aos dois critérios complementares.

2 - CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS CUSTOS E DO BENEFÍCIO ASSOCIADO À DISPONIBILIZAÇÃO DA ÁGUA POR UMA CONDUTA

2.1 - Caracterização e quantificação dos custos

O valor actual da globalidade dos investimentos, das despesas de exploração e dos benefícios pela disponibilidade e cedência de água:

$$VA = \sum_{j=1}^{n} \frac{B_j}{(1+r)^j} + \frac{Cl}{(1+r)^n} - \left[CI_i + \sum_{j=1}^{n} \frac{CM_j}{(1+r)^j} + \sum_{j=1}^{n} \frac{CE_j}{(1+r)^j} + \frac{CI_s}{(1+r)^s} \right]$$

B_j - Benefício pela cedência de água ano j; Cl - Valor residual da conduta; CI_i - Investimento inicial; CI_s - Investimento de substituição; CM_j - Custo de Manutenção ano j; CE_j - Custo com a energia no ano j; s - Ano de substituição dos equipamentos, r - Valor do dinheiro.

$$VA = CI_i + \frac{CI_s}{(1+r)^s} + \sum_{j=1}^{n} \frac{CE_j}{(1+r)^j}$$

$$CIA = \left(B_{A0} + B_{A1}D + B_{A2}D^2\right)\varepsilon_A L$$

$$VACE = \left\{ \sum_{e=1}^{n_e} \left[\sum_{a=n_{(e-1)}+1}^{n_{(e)}} Pot_e K_e S_e \right] \right\} \varepsilon_{VACE}$$

$$K_e = \frac{pe_0 (U_{mda})_{n_{(e-1)}} 365}{Q_e 3600} = \frac{pe_0 (tb_{mda})_{n_{(e)}} 365}{\left(1 + \alpha_e \left(n_{(e)} - n_{(e-1)}\right)\right)}$$

$$S_e = \sum_{a=n_{(e-1)}+1}^{n_{(e)}} \frac{\left(1 + \alpha_e . \left(a - n_{(e-1)}\right)\right)(1+\beta)^a}{(1+r)^a}$$

2.2 - **Caracterização e quantificação do benefício** associado à disponibilização da água

Walski (2001), apresenta uma curva de benefícios versus capacidade, que segundo este autor reflecte os interesses dos responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água. Essa curva é a seguinte:

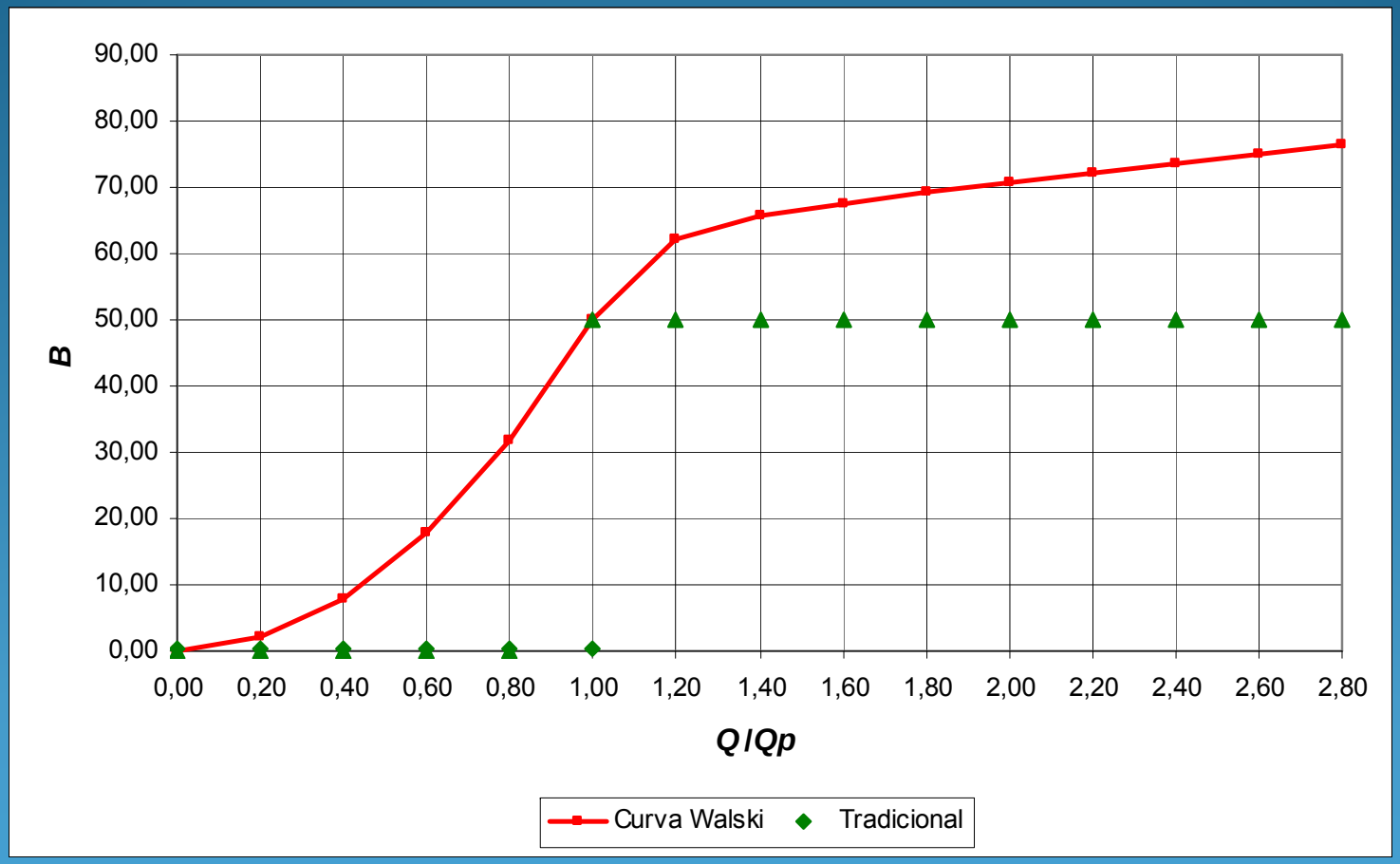

Figura 1 - Benefício versus capacidade segundo Walski (2001)

Modelação da curva Benefício *vs* relação entre o caudal disponibilizado e o caudal de projecto

O caudal disponibilizado deve ser o caudal máximo admissível para dado diâmetro. Este valor pode ser definido com razões práticas ou através de estudos técnico-económicos. Adoptando como critério a limitação da velocidade em função do diâmetro, então o caudal máximo é determinado por:

$$Q_{máx} = 1{,}581 D_i^{2,4}$$

$Q_{máx}$ - Caudal máximo admissível para o diâmetro D (m^3/s); D_i - Diâmetro interior (m)

A primeira proposta resulta do ajuste analítico através da curva logística

$$B = \left(\frac{1}{1{,}419} + 36{,}336 \text{x} 0{,}00928^{Q/Q_p} \right)^{-1}$$

B - Coeficiente de benefício; Q - Caudal disponibilizado, Q_p - Solicitação de projecto

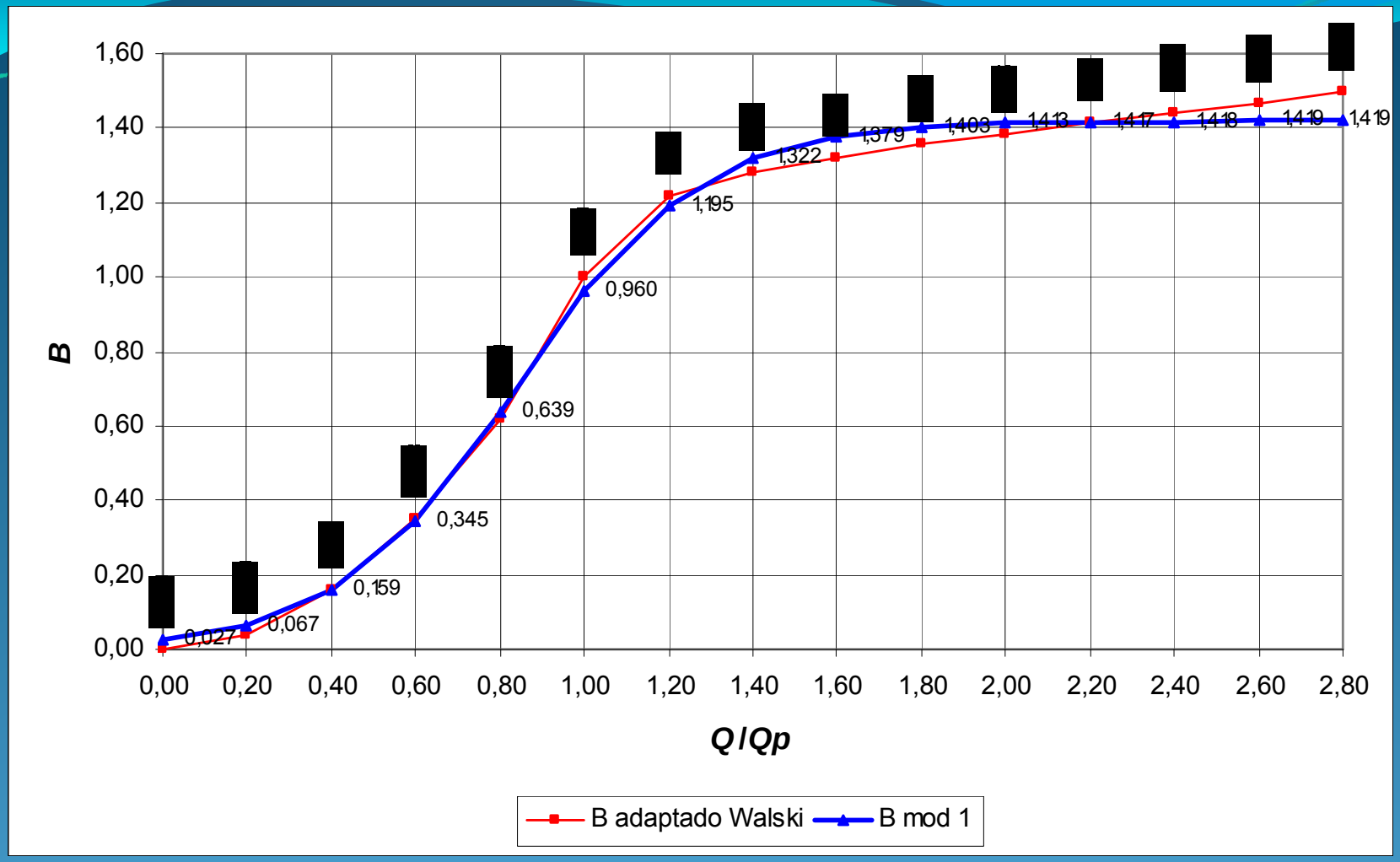

Figura 2 – Adaptação da curva e Walski e modelação do Benefício *vs Q/Qp* pela curva logística

Ensaios realizados mostram que a expressão anterior distingue muito pouco as alternativas

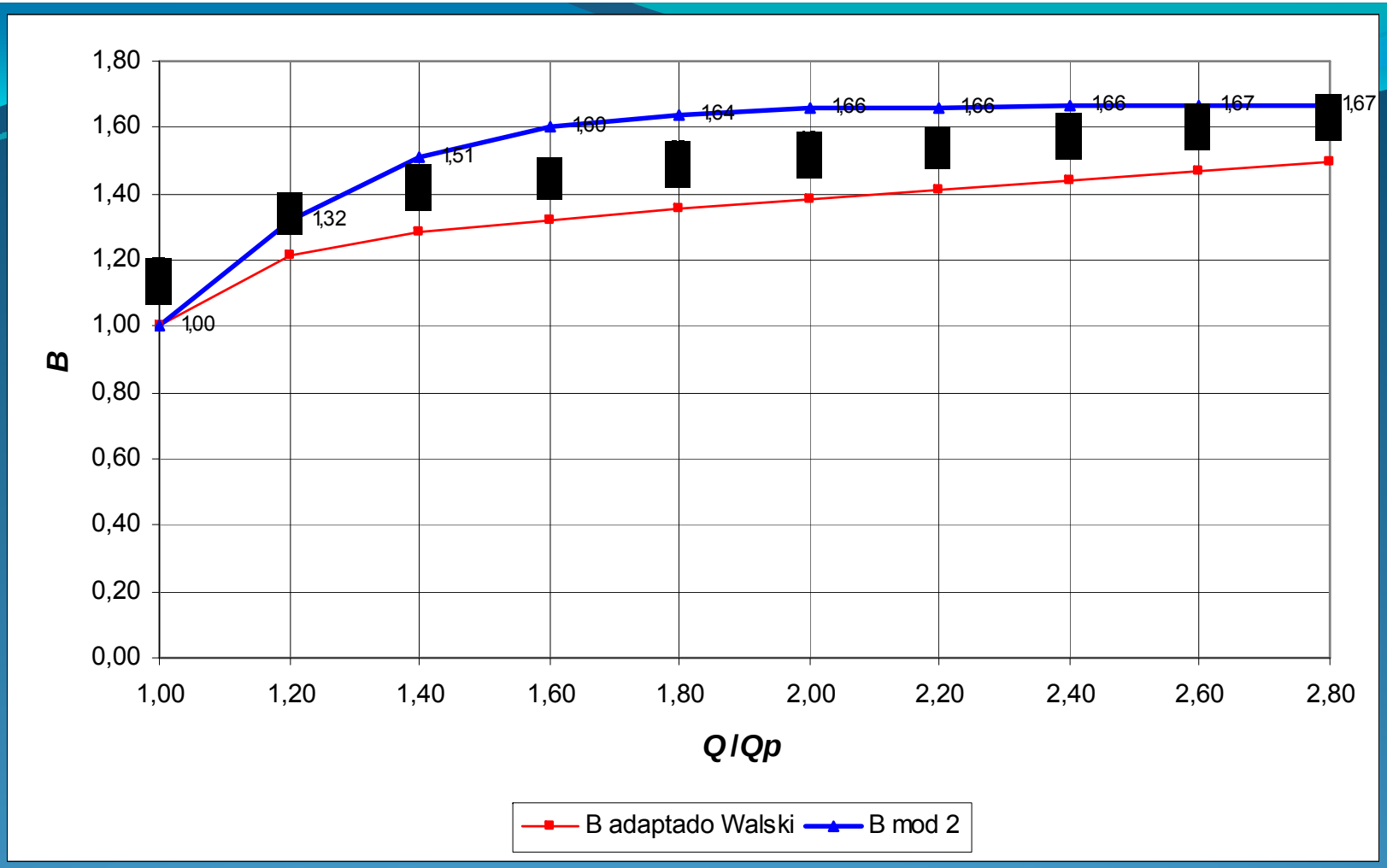

Figura 3 – Modelo 2 para curva Benefício versus $Q_{máx}/Qp$

A segunda expressão analítica proposta é:

$$B = \left(0{,}6 + 40 \text{x} 0{,}01^{Q_{máx}/Q_p} \right)^{-1}$$

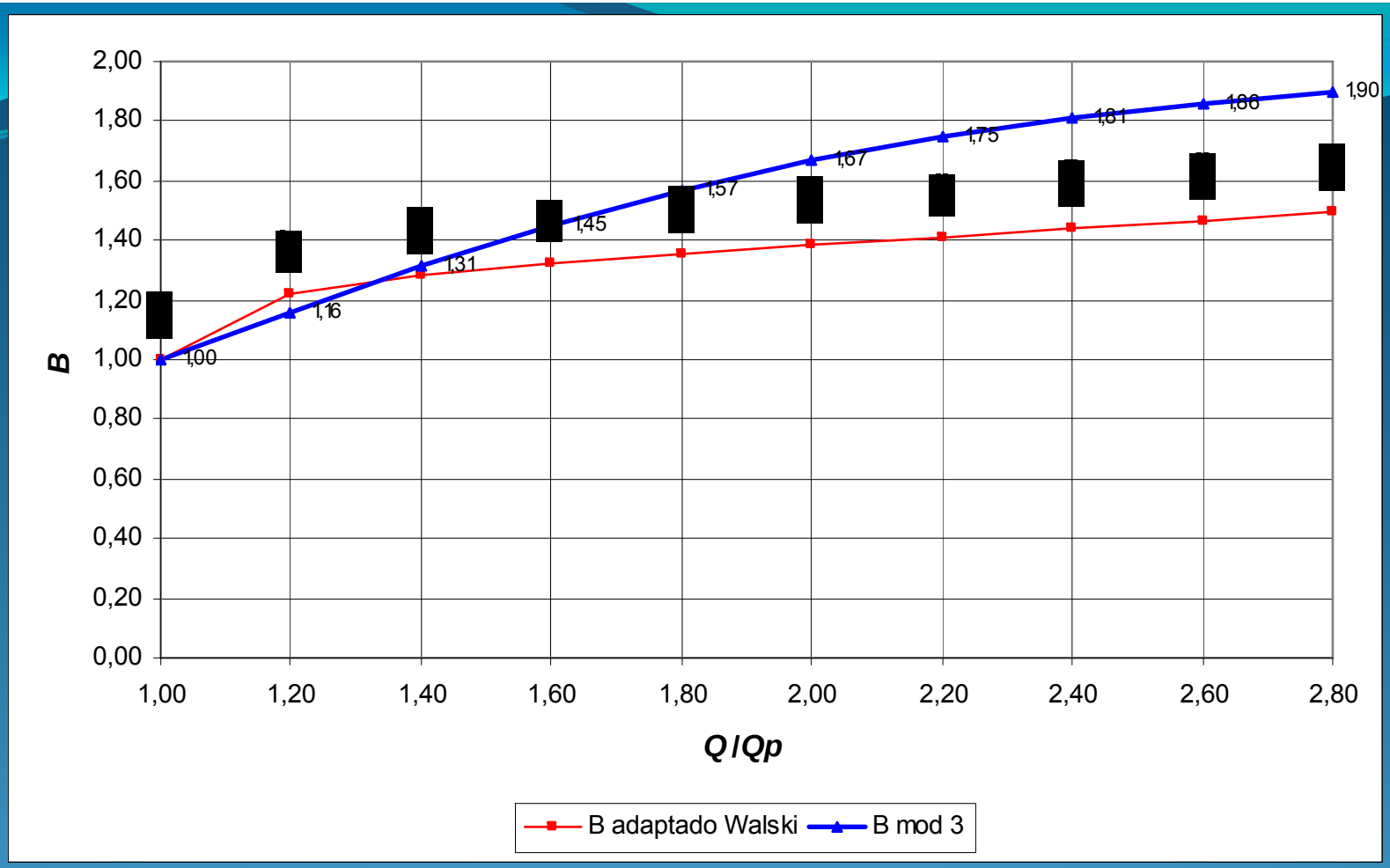

Figura 4 – Modelo 3 para curva Benefício versus $Q_{máx}/Qp$

A terceira expressão analítica proposta é:

$$B = \left(0{,}5 + 2{,}5 \text{x} 0{,}2^{Q_{máx}/Q_p} \right)^{-1}$$

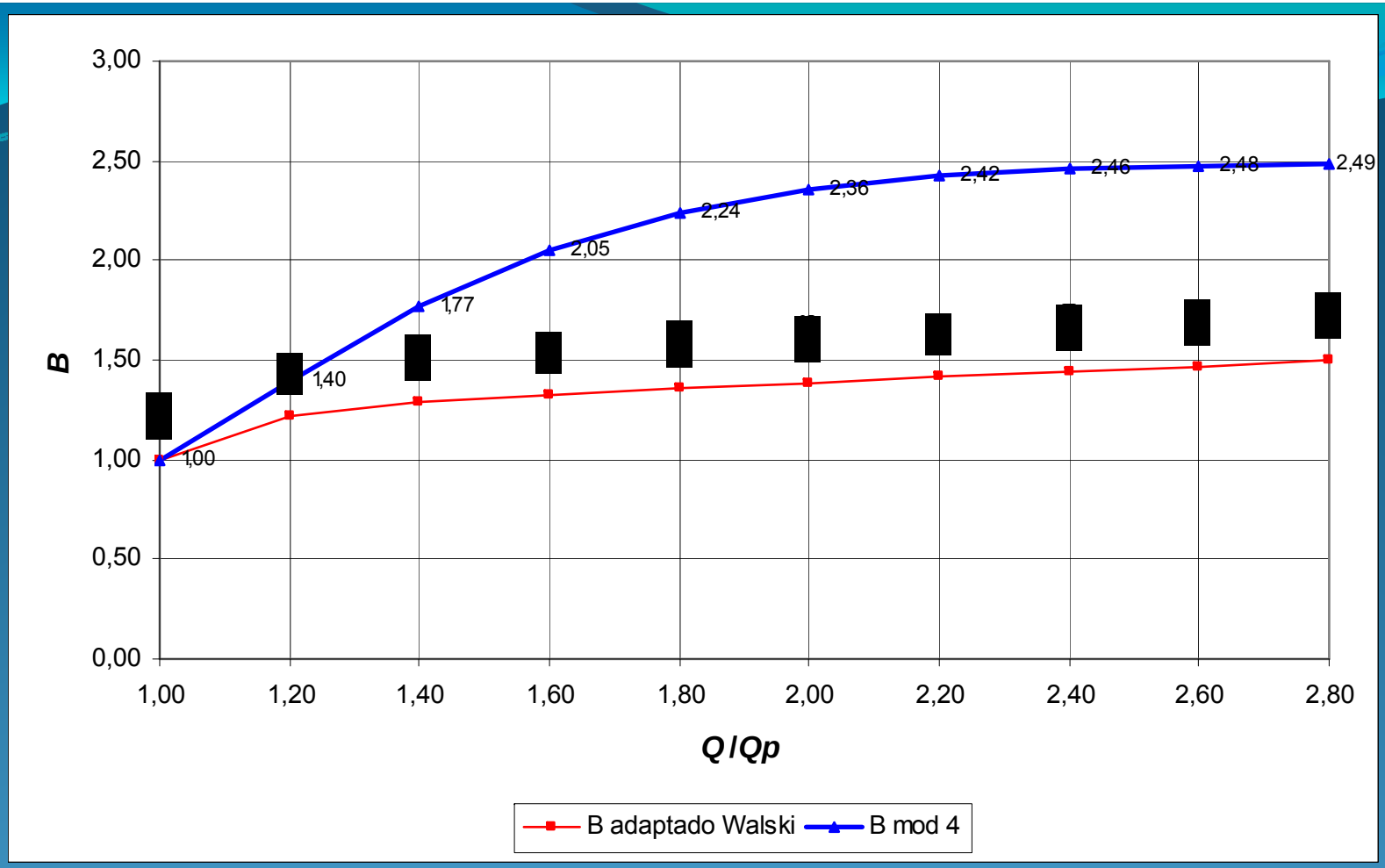

Figura 5 – Modelo 4 para curva Benefício versus $Q_{máx}/Qp$

A quarta expressão analítica proposta é:

$$B = \left(0{,}4 + 15 \text{x} 0{,}04^{Q_{máx}/Q_p}\right)^{-1}$$

3 - Inclusão dos dois critérios no procedimento de quantificação do mérito

Pode definir-se um custo reduzido por:

$$C_r = \frac{C_T}{B}$$

C_r - Custo reduzido, C_T - Custo total, B - Coeficiente de benefício.

$$C_{bc} = C_T\, p_{cc} + C_r\left(1 - p_{cc}\right)$$

C_{bc} - Custo sopesado pelos dois critérios, p_{cc} - peso que o decisor atribui ao critério custo.

4 - Descrição do procedimento de dimensionamento optimizado multi-critério

Optimizar $z = f(D)$

sujeito a: $D_{mín} \leq D \leq D_{máx}$

$V_{mín} \leq V \leq V_{máx}$

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{mín} \leq \left(\frac{p}{\gamma}\right)_{x} \leq \left(\frac{p}{\gamma}\right)_{máx}$$

Em geral, a função objectivo pode ser traduzir-se em:

$$Max\ R_{econ.} \Leftrightarrow Max\left(R_T - C_T\right)$$

No entanto, se todas as alternativas garantirem os mesmos proveitos então o objectivo será minimizar o custo total. Incluindo na formulação do problema dois critérios então o objectivo será:

$$Min\ C_{bc} = C_T\, p_{cc} + C_r\left(1 - p_{cc}\right)$$

Fazendo variar o peso do critério custo, simulando diversas alternativas de escolha do decisor, e correndo o programa de cálculo sucessivamente para cada um desses valores, ficamos com um conjunto de resultados cuja representação gráfica permite visualizar a curva do diâmetro óptimo versus critérios de decisão, vulgarmente designada por curva de Pareto.

5 - Aplicações

Pretende fazer-se um estudo para o dimensionamento optimizado duma adutora elevatória com o comprimento L=5000 m. Os elementos base usados são os seguintes: Tempo de funcionamento médio dos grupos de electrobomba (GEB) no mês de maior utilização 20 h; Rendimento dos GEB na 1ª fase η_1=65 % e 2ª fase η_2=70 %; Rugosidade de cálculo k = 0,2 mm; Viscosidade cinemática ν=1,16x10^{-6} m²/s; O desnível geométrico (Hg) é de 100,0 m; Preço médio actual da energia 0,085 €/kWh; taxa de crescimento do preço da energia eléctrica β = 2%, valor do dinheiro r = 5%; taxa de crescimento das utilizações em cada uma das duas fases α_1=3%, α_2=1,5%; Perda localizadas avaliadas com $\sum K_i$=20.

Os custos de construção da adutora são quantificados por:

$$CIA = (27{,}66+160{,}43D+361{,}74D^2).L$$

Quadro 1 - Exemplo de cálculo do diâmetro óptimo usando método do Gradiente Reduzido minimizando custo (ou seja *pcc* = 1)

D (m)	$v_{máx}$ (m/s)	CIA (€/m)	CIA (€)	*VACE* (10^3 €)	C_T (10^3 €)
0,348	1,320	127,47	637,37	1299,44	1.936,81

Quadro 2 - Cálculos relativos ao diâmetro óptimo minimizando custo (ou seja *pcc* = 1)

	Q	*v*	*f*	H_f	*H*	*Pot*	*K*	*S*	*VACE*
	(m^3/s)	(m/s)		(mca)	(mca)	(kW)	(10^3 €/kW)		(10^3 €)
1.ª fase	0,077	0,81	18,90E-3	9,66	109,66	127,31	0,29760	19,24	728,97
2.ª fase	0,100	1,05	18,56E-3	16,05	116,05	162,64	0,36628	9,58	570,47

Quadro 3 - Valor óptimo minimizando custo reduzido ou seja introduzindo o conceito de benefício definido pelo modelo 2 (ou seja $p_{cc} = 0$)

D (m)	$v_{máx}$ (m/s)	CIA (€/m)	CIA (€)	$VACE$ (10^3 €)	C_T (10^3 €)	C_r (10^3 €)
0,407	1,404	152,66	763,29	1222,56	1.985,85	1.209,48

Quadro 4 - Cálculos relativos ao diâmetro óptimo minimizando custo reduzido e benefício definido pelo modelo 2 (ou seja $p_{cc} = 0$)

	Q	v	f	H_f	H	Pot	K	S	$VACE$
	(m^3/s)	(m/s)		(mca)	(mca)	(kW)	(10^3 €/kW)		(10^3 €)
1.ª fase	0,077	0,59	18,71E-3	4,48	104,48	121,29	0,29760	19,24	694,53
2.ª fase	0,100	0,77	18,31E-3	7,42	107,42	150,54	0,36628	9,58	528,03

Quadro 5 - Valor óptimo minimizando custo reduzido usando o conceito de benefício definido pelo modelo 2 e também o critério custo com peso atribuído pelo decisor de 0,8, ou seja p_{cc} = 0,8.

D (m)	$v_{máx}$ (m/s)	CIA (€/m)	CIA (€)	$VACE$ (10^3 €)	C_T (10^3 €)	C_r (10^3 €)
0,373	1,357	137,90	689,52	1257,82	1.947,34	1.808,30

Quadro 6 - Cálculos relativos ao diâmetro óptimo usando o conceito de benefício definido pelo modelo 2 e também o critério custo com peso atribuído pelo decisor de 0,8, ou seja p_{cc} = 0,8

	Q	v	f	H_f	H	Pot	K	S	$VACE$
	(m^3/s)	(m/s)		(mca)	(mca)	(kW)	(10^3 €/kW)		(10^3 €)
1.ª fase	0,077	0,70	18,80E-3	6,86	106,86	124,05	0,29760	19,24	710,33
2.ª fase	0,100	0,91	18,43E-3	11,38	111,38	156,08	0,36628	9,58	547,49

Diâmetros comerciais óptimos versus peso do critério custo quando o caudal de projecto é Q_p = 0,1 m³/s

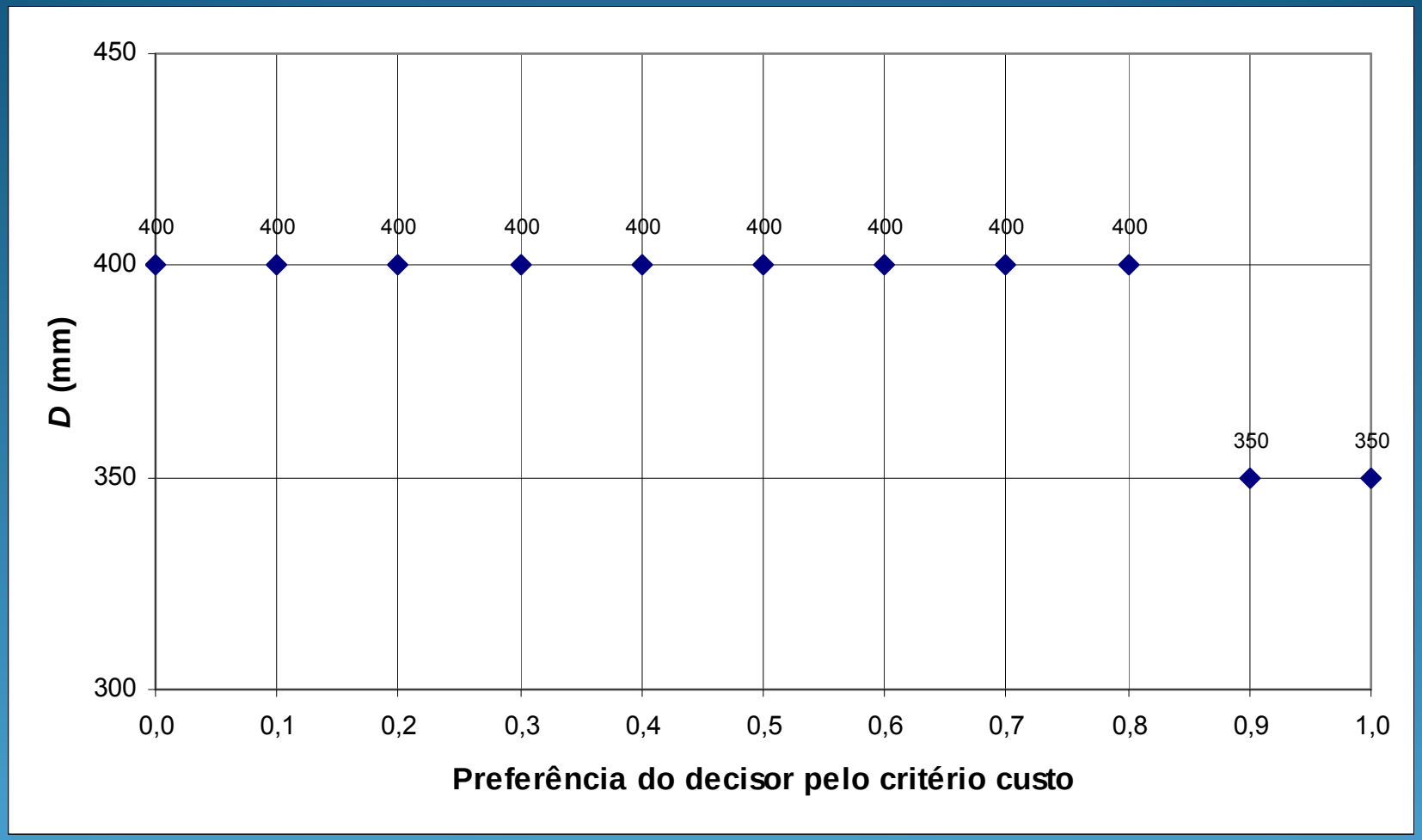

Figura 6 - Diâmetro comercial óptimo versus peso do critério custo para Q_p = 0,1 m³/s quando o benefício é determinado pelo modelo 2.

$$B = \left(0{,}6 + 40 \times 0{,}01^{Q_{máx}/Q_p}\right)^{-1}$$

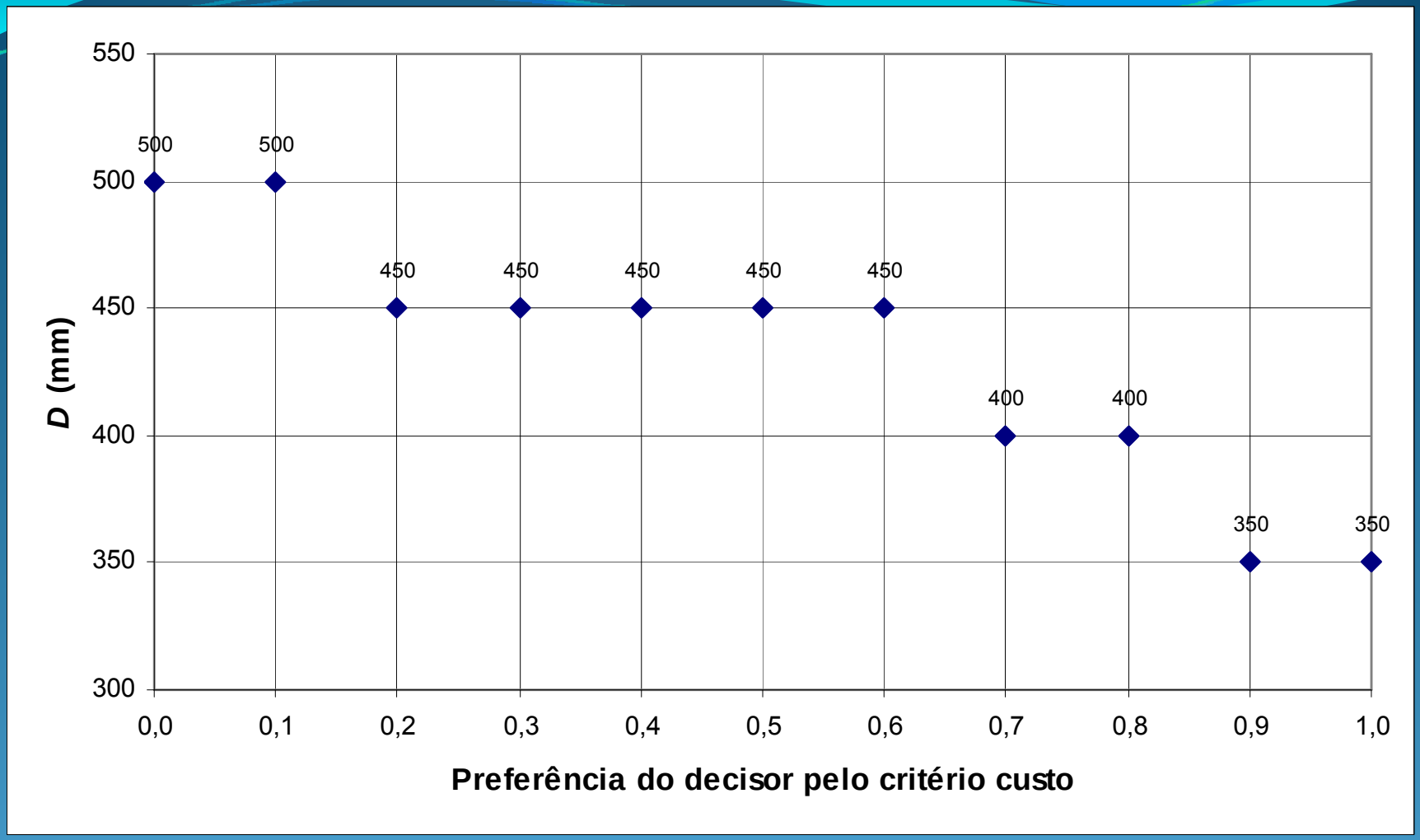

Figura 7 - Diâmetro comercial óptimo *vs* p_{cc} para Q_p = 0,1 m³/s e benefício determinado pelo modelo 3.

$$B = \left(0{,}5 + 2{,}5 \text{x} 0{,}2^{Q_{máx}/Q_p}\right)^{-1}$$

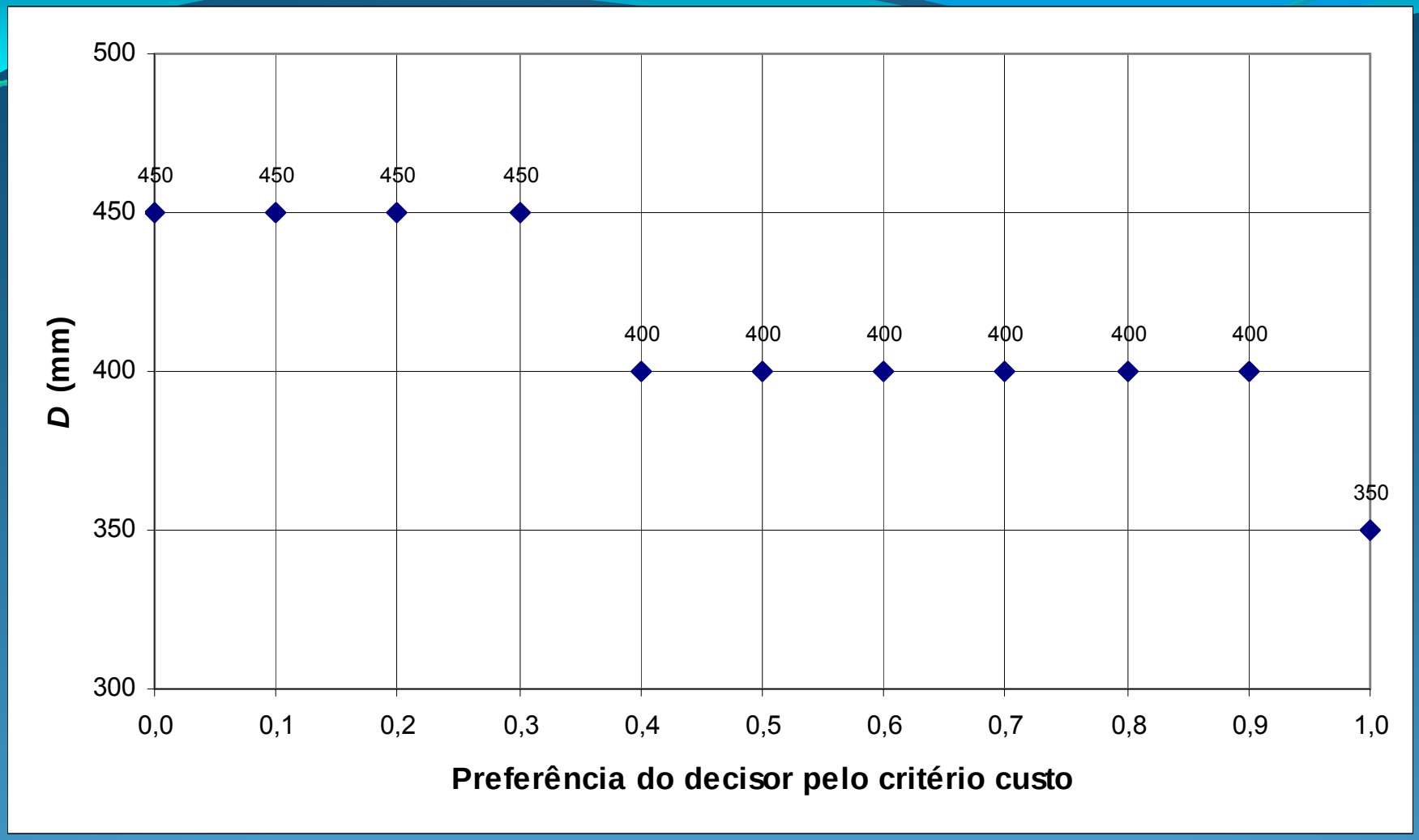

Figura 8 - Diâmetro comercial óptimo *vs* p_{cc} para Q_p = 0,1 m³/s e benefício determinado pelo modelo 4

$$B = \left(0{,}4 + 15 \text{x} 0{,}04^{Q_{máx}/Q_p}\right)^{-1}$$

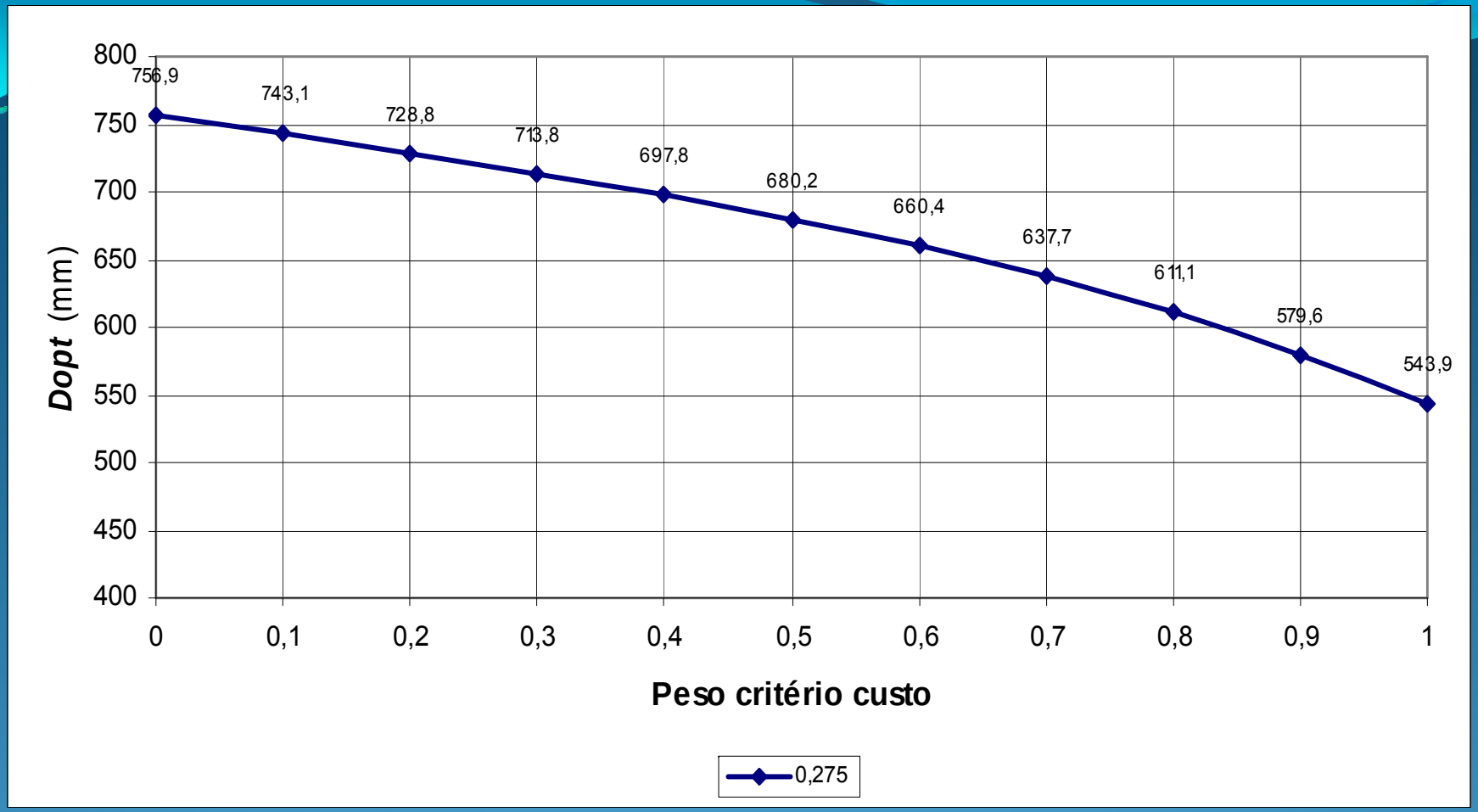

Figura 9 - Diâmetro óptimo versus peso do critério custo para Q_p = 0,275 m³/s e Benefício quantificado pelo modelo 3

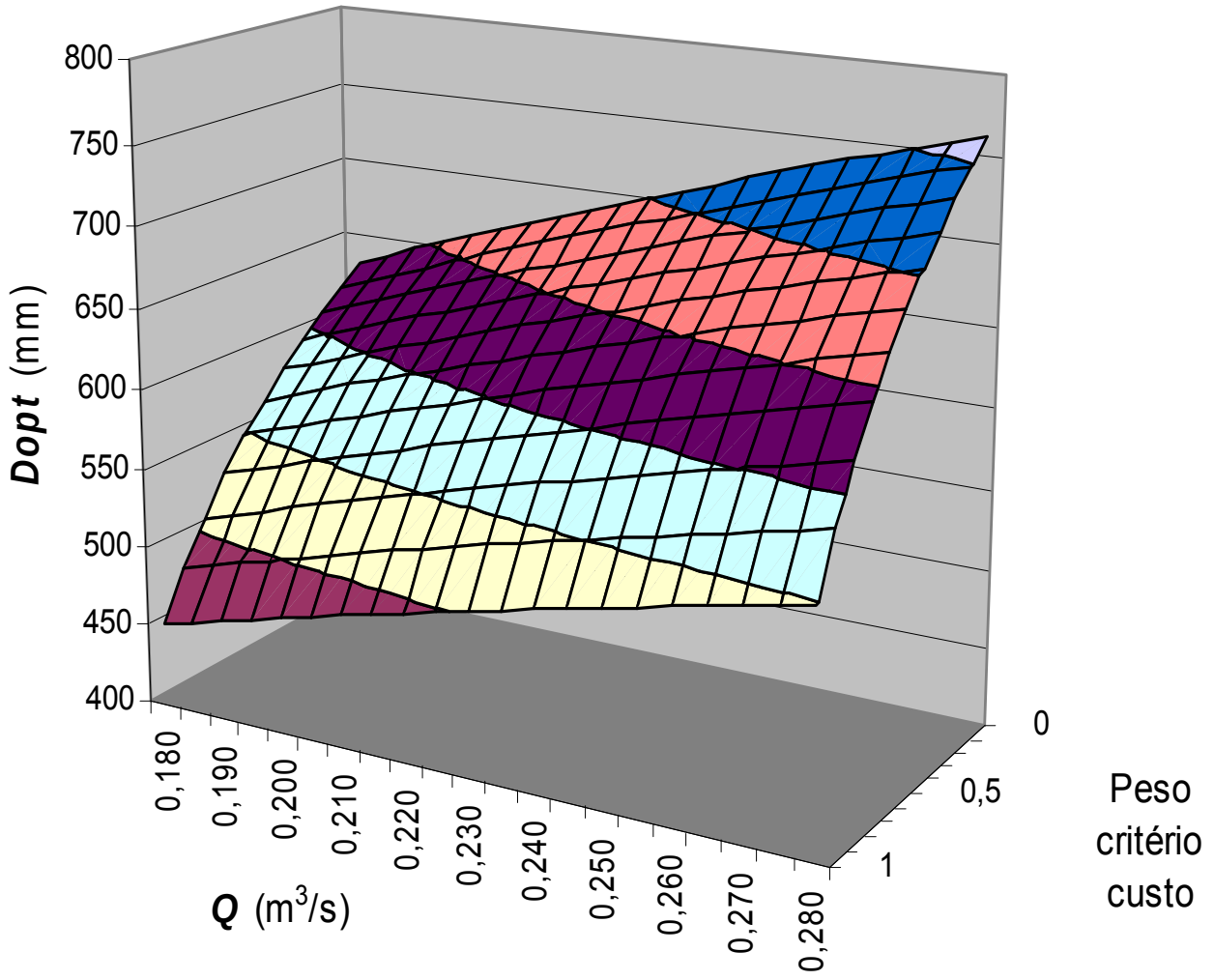

Figura 10 – Exemplo de superfície diâmetro óptimo versus caudal e peso do critério custo

6 - Conclusões

Neste trabalho apresentou-se uma proposta para que seja incluída nos procedimentos do dimensionamento optimizado de sistemas de condução da água a preferência do decisor face a alternativas;

Associou-se o conceito de eventual benefício adicional relativo a uma conduta à sua capacidade máxima de transporte;

Apresentaram-se modelos para quantificar o benefício associado a cada conduta em função da relação entre o caudal máximo recomendável e o caudal de projecto.

Propôs-se um procedimento para o dimensionamento optimizado onde o mérito de cada solução é avaliado através de dois critérios: o custo e o benefício expectável.

Um dia,
mais cedo do que se estima,
Saberemos incluir nos processos de concepção
e de dimensionamento dos sistemas de
condução da água
os critérios de decisão utilizados na prática,
então geriremos racional e optimizadamente a
água que nos foi disponibilizada.