

Um novo método para o cálculo de redes malhadas de distribuição de água

ARMANDO DA SILVA AFONSO (*)

RESUMO

Descreve-se um novo método de tentativas para o cálculo hidráulico de redes malhadas.

Apresenta-se a análise teórica do método e resolvem-se alguns exemplos de aplicação prática.

Na parte final da comunicação compara-se o presente método com o de Hardy Cross, tradicionalmente utilizado.

1. GENERALIDADES SOBRE O CÁLCULO HIDRÁULICO DE REDES MALHADAS

O cálculo hidráulico de uma rede malhada consiste na determinação dos caudais e dos níveis de energia nas diversas condutas que constituem o sistema.

Este cálculo hidráulico deve satisfazer aos seguintes princípios:

a) a soma dos caudais afluentes a um nó deve ser igual à soma dos caudais que saem desse nó;

b) o escoamento em cada conduta deverá obedecer à lei da perda de energia nessa conduta;

c) A soma algébrica das perdas de energia em cada malha deverá ser nula.

Para a realização do cálculo existem diversos métodos, salientando-se dentre eles os seguintes:

1. Métodos de tentativas.
 - 1.1. Método de tentativas não controladas.
 - 1.2. Método de Hardy Cross.
 - 1.3. Método de Newton.
 - 1.4. Método gráfico de Freeman.
2. Método dos modelos hidráulicos.
3. Método da analogia eléctrica.
4. Método das condutas equivalentes.
5. Métodos de seccionamento.
 - 5.1. Método de Allen Hazen.
 - 5.2. Método de W. S. Pardoe.
 - 5.3. Método do círculo.

Para além destes métodos há ainda a considerar a utilização do cálculo automático.

Devido à sua simplicidade e ao rigor suficiente que permite, o método em geral mais utilizado é o de Hardy Cross. O método exposto na presente comunicação é também por tentativas, apresentando diversas semelhanças com o de H. Cross, com o qual será comparado na parte final do trabalho.

2. ANÁLISE TEÓRICA DO NOVO MÉTODO

Considere-se uma malha constituída por z condutas. Sejam Q_e', Q_e'', \dots , os caudais de entrada na malha e Q_s', Q_s'', \dots , os caudais de saída, considerando-se a inexistência de caudais de entrada ou de saída distribuídos ao longo das condutas (fig. 1). Sejam ainda $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_z$, os caudais arbitrados para as diversas condutas, satisfazendo à equação da continuidade em cada nó, que serão afectados de sinal de acordo com o sentido positivo arbitrado.

Admitindo uma lei para a perda de energia do tipo $\Delta H = K \cdot Q^n$, será:

$$\Delta H_i = K_i \cdot Q_i^{n_i}$$

Dado que os caudais arbitrados (Q_i) não serão, provavelmente, os caudais correctos, a soma algébrica das perdas de energia ao longo da malha não será igual a zero, isto é:

$$\Sigma \Delta H_i = A \neq 0$$

Considerem-se agora para todas as condutas novos caudais dados por $(Q_i + \alpha C_i)$, isto é, novos caudais obtidos através da soma dos caudais inicialmente arbitrados com um valor

(*) Engenheiro Civil — Espec. Hidráulica. Director do Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra Portugal.

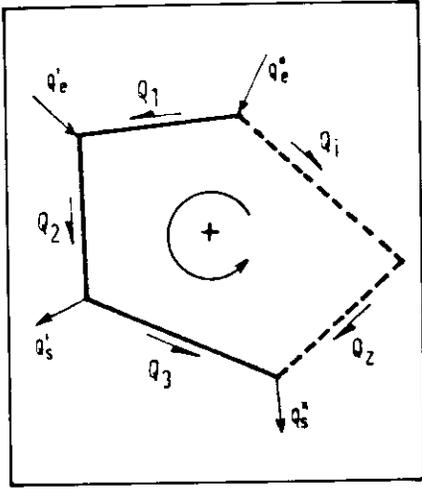


Fig.1 — Malha composta por z condutas. Caudais arbitrados.

constante ∞ , que se supõe sensivelmente inferior aos valores de Q.

Virá então:

$$\Delta H_{i\infty} = K_i \cdot (Q_i + \infty)^{n_i}$$

Dado que, por hipótese, o acréscimo ∞ é de valor sensivelmente inferior aos valores Q_i , pode-se escrever:

$$\begin{aligned} (Q_i + \infty)^n &= \binom{n}{0} Q_i^n + \binom{n}{1} \infty Q_i^{n-1} + \dots + \\ &+ \binom{n}{j} \infty^j Q_i^{n-j} + \dots + \binom{n}{n} \infty^n \approx \\ &\approx \binom{n}{0} Q_i^n + \binom{n}{1} \infty Q_i^{n-1} \end{aligned}$$

pele que virá:

$$\begin{aligned} \Delta H_{i\infty} &= K_i \cdot (Q_i + \infty)^{n_i} \approx K_i \cdot Q_i^{n_i} + \\ &+ \infty \cdot n_i \cdot Q_i^{n_i-1} = \Delta H_i + \\ &+ \infty \cdot n_i \cdot \frac{\Delta H_i}{Q_i} \end{aligned}$$

Dado que estes caudais $(Q_i + \infty)$ não serão também, provavelmente, os caudais correctos, a soma algébrica das sucessivas perdas de energia ao longo da malha terá um valor diferente de zero, isto é:

$$\sum \Delta H_{i\infty} = \sum \left(\Delta H_i + \infty n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} \right) = B \neq 0$$

Note-se que o sinal do somatório $\sum \Delta H_i = A$ indica em que sentido é que se encontram desviados dos valores correctos os caudais arbitrados. Considerando ∞ de sinal igual ao do somatório A, os caudais $(Q_i + \infty)$ estarão ainda mais afastados dos valores correctos, vindo portanto $|B| > |A|$, sendo A e B do mesmo sinal. Arbitran-

do ∞ de sinal contrário ao de A, os caudais $(Q_i + \infty)$ estarão mais próximos dos caudais exactos do que Q_i , podendo até inverter-se o sentido do erro se os caudais exactos tiverem valores compreendidos entre Q_i e $Q_i + \infty$. Arbitrando portanto ∞ de sinal contrário ao de A poderá suceder que $|B| < |A|$, com A e B do mesmo sinal, ou que B seja de sinal contrário ao de A.

Considerou-se portanto $B \neq 0$ pois admitiu-se que os novos caudais considerados $(Q_i + \infty)$ não eram os correctos. Sejam estes caudais dados por $(Q_i + q)$, isto é, seja q a correcção que é necessário aplicar aos valores inicialmente arbitrados para obter os caudais correctos.

Supondo q sensivelmente inferior aos valores de Q_i , e fazendo um desenvolvimento análogo ao do caso anterior, virá:

$$\begin{aligned} \Delta H_{i\infty} &= K_i \cdot (Q_i + q)^{n_i} \approx K_i \cdot Q_i^{n_i} + \\ &+ n_i \cdot q \cdot K_i \cdot Q_i^{n_i-1} = \\ &= \Delta H_i + n_i \cdot q \cdot \frac{\Delta H_i}{Q_i} \end{aligned}$$

Dado que estes caudais $(Q_i + q)$ são os caudais exactos, a soma algébrica das sucessivas perdas de energia ao longo da malha será neste caso igual a zero, isto é:

$$\sum \Delta H_{i\infty} = \sum \left(\Delta H_i + n_i \cdot q \cdot \frac{\Delta H_i}{Q_i} \right) = 0$$

Considere-se de novo o somatório $\sum \Delta H_{i\infty}$. Considere-se a expressão atrás deduzida

$$\sum \Delta H_{i\infty} = \sum \left(\Delta H_i + \infty n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} \right) = B$$

Esta expressão poderá ser escrita sob a forma:

$$\sum \Delta H_{i\infty} = \sum \Delta H_i + \infty \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = B$$

ou

$$\sum \Delta H_{i\infty} = A + \infty \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = B$$

donde

$$\infty \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = B - A \quad (1)$$

Do mesmo modo se poderá considerar:

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_{i\infty} &= \sum \left(\Delta H_i + n_i \cdot q \cdot \frac{\Delta H_i}{Q_i} \right) = \\ &= \sum \Delta H_i + q \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = \\ &= A + q \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = 0 \end{aligned}$$

donde

$$q \sum n_i \frac{\Delta H_i}{Q_i} = -A \quad (2)$$

Dividindo membro a membro (2) por (1) virá:

$$\frac{q}{\infty} = \frac{-A}{B-A}$$

ou finalmente

$$q = \frac{\infty A}{A-B}$$

Em sistemas compostos por mais de uma malha o método será aplicado para a correcção de cada malha, independentemente, sendo as condutas comuns sujeitas às correcções obtidas para cada uma das malhas a que pertencem, tendo em atenção os sentidos arbitrados.

O presente método admite, tal como sucede com o método de Hardy Cross, uma variante consistindo em fórmulas de correcção aplicáveis, não aos caudais, mas aos níveis de energia.

Dadas as analogias teóricas entre as duas variantes, e o facto de, em geral, não se tornar prático o cálculo por correcções dos níveis de energia, considerou-se dispensável na presente comunicação o desenvolvimento do estudo desta variante.

3. APLICAÇÃO PRÁTICA DO NOVO MÉTODO

A aplicação prática do método é facilitada por uma preparação da malha, preparação esta análoga à que em geral se efectua, por exemplo, para a aplicação do método de H. Cross.

Na realidade, e para efeitos de simplicidade no cálculo hidráulico, todas as saídas ou entradas de caudais deverão corresponder a nós, devendo portanto os caudais de percurso ou os caudais de pequeno valor localizados ao longo das condutas ser

distribuídos pelos nós, em proporções tais que se constitua um sistema equivalente.

No que se refere aos caudais de percurso, uniformemente distribuídos, deverão ser divididos pelos nós adjacentes na relação de 0,45 para o nó de montante e 0,55 para o nó de jusante, (considerando para expressão do caudal equivalente $Q_{eq} = Q_j + 0,55 P$), ou, quando for aceitável um menor grau de precisão, igualmente divididos pelos 2 nós.

No que se refere aos caudais de pequeno valor localizados ao longo das condutas, a sua distribuição pelos nós deverá ser feita em cada caso de acordo com o critério de quem calcula, que terá em atenção o grau de precisão do cálculo e o valor e posição do caudal localizado. É aceitável em geral considerar uma divisão destes caudais pelos nós extremos das condutas em quantidades inversamente proporcionais às distâncias a esses nós.

No caso de se tratar de um sistema complexo, composto de várias malhas, pode surgir o problema de determinar quais as malhas a corrigir. O critério habitualmente utilizado (em sistemas planos) é o de considerar as malhas correspondentes às zonas elementares, isto é, às zonas limitadas por tubos e não atravessadas por nenhum.

O sentido positivo arbitrado poderá variar de malha para malha, sendo no entanto aconselhável adotar o mesmo sentido em todas as malhas.

A realização do cálculo implica o conhecimento das características das condutas que influenciam a perda de energia. O conhecimento dos diâmetros das diversas condutas é fundamental, pois caso contrário o problema seria indeterminado, e, não sendo conhecidos "a priori", torna-se necessário arbitrar os seus valores.

Existem diversos critérios para esta escolha de diâmetros, sendo habitual o critério de dimensionar os diâmetros em função dos caudais, de modo a não ser excedido um máximo de velocidade, máximo este calculado com vista a evitar fenómenos de cavitação, choque hidráulico, etc. Este valor limite é em geral, para grandes diâmetros, de 1 m/s (valor indicado pela Norma Portuguesa NP-838), sendo mais reduzido para pequenos diâmetros.

No QUADRO I apresentam-se as velocidades máximas admissíveis para diversos diâmetros, e os correspondentes caudais máximos. Este quadro constitui uma síntese de valores propostos por diversos autores.

A determinação das perdas de energia poderá ser feita, para cada condução, através da aplicação de fórmulas do

tipo: $\Delta H = K \cdot Q^n$, determinando para condução o valor de K e n . Também se poderá determinar a perda unitária de energia (i) através de ábacos que constam em geral das publicações da especialidade (correspondendo a fórmulas do tipo atrás indicado), determinando a perda de carga total pela expressão $\Delta H = i \cdot L$. Este último procedimento, pela sua facilidade de aplicação, é adaptado freqüentemente.

A realização do cálculo pelo presente método implica a consideração de uma correcção arbitrária de valor ∞ .

Este valor será fixado ao critério de quem calcula, fornecendo-se seguidamente algumas indicações para auxiliar a sua escolha.

Pelos princípios teóricos de método torna-se necessário considerar valores de ∞ relativamente pequenos comparados com os valores Q_j . Por outro lado, valores muito pequenos de ∞ em relação aos Q_j , dificultam o cálculo para as aproximações correntes, e conduzem a importantes erros de leitura quando se utilizam ábacos. Deste modo, e dado que, como se demonstra na secção 4, o valor de ∞ não tem (dentro de certos limites) uma influência sensível na aproximação fornecida pelo cálculo, aconselha-se a adaptação de valores de ∞ que, embora pequenos comparados com os valores Q_j , permitam diferenciar, dentro das aproximações de cálculo, os valores Q_j dos valores $Q_j + \infty$. Quando se utilizam ábacos o valor ∞ deve permitir leituras

claramente diferenciadas para os caudais Q_j e $Q_j + \infty$. Dum modo geral, um valor de ∞ aproximadamente igual a 10% da média dos caudais Q_j torna-se aconselhável.

Quando for possível ter uma noção sobre o valor do erro nos caudais arbitrados (q), o que geralmente sucede na realização de uma segunda tentativa, torna-se aconselhável adotar valores de ∞ próximos de q , conforme se refere também na Secção 4.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

De acordo com o que atrás ficou exposto, pode resumir-se a marcha do cálculo do seguinte modo:

- após a preparação da malha arbitrar um sentido positivo para a circulação dos caudais;
- arbitrar uma distribuição de caudais pelas condutas, satisfazendo à equação da continuidade em cada nó. Estes caudais deverão ser afectados de sinal, de acordo com o sentido positivo arbitrado;
- dimensionar os diâmetros das condutas (caso não sejam conhecidos "a priori"), em função dos caudais arbitrados;
- determinar para cada condução o valor da perda de carga total ΔH , que deverá também ser afectada de sinal de acordo com o sentido positivo arbitrado;
- calcular o somatório das perdas

QUADRO I

D (mm)	$U_{m\acute{a}x}$ (m/s)	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)
50	0,5 - 0,6	1,0 - 1,2
60	0,5 - 0,7	1,4 - 2,0
70	0,6 - 0,7	2,4 - 2,7
80	0,7 - 0,75	3,5 - 3,7
100	0,75	5,8
125	0,8	9,5
150	0,8	14,0
175	0,9	22,0
200	0,9	28,0
225	1,0	40,0
250	1,0	49,0
300	1,0	71,0
diâmetros superiores	1,0	

de carga totais, $\Sigma \Delta H = A$;

f) arbitrar uma correcção para os caudais (∞), de sinal contrário ao de A , e calcular os novos caudais $Q_i + \infty$;

g) determinar as perdas de carga totais correspondentes aos novos caudais;

h) calcular o novo somatório de perdas de carga totais, (B);

i) determinar a correcção a aplicar aos caudais inicialmente arbitrados, através da expressão

$$q = \frac{\infty \cdot A}{A - B}$$

Sendo o sistema composto por mais de uma malha, e como atrás se referiu, as condutas comuns serão sujeitas às correcções obtidas para cada uma das malhas a que pertencem, tendo em atenção os sentidos arbitrados.

Sendo os diâmetros arbitrados para os caudais iniciais, e após a realização da 1ª tentativa, poderá suceder que os novos caudais obtidos aconselhem a adoção de diferentes valores para o diâmetro, de acordo com o QUADRO I.

O critério de quem calcula deverá decidir então da alteração ou não dos diâmetros, tendo em atenção que esta alteração implica novas tentativas para equilibrar a malha, e ainda que os valores do quadro apresentado são valores aconselhados por diversos autores, e não limites rigorosamente fixos, pelo que são de aceitar pequenas variações dentro dos valores apresentados.

Considere-se, para primeiros exemplos, uma única malha, constituindo um sistema simétrico. O facto de se tratar de um sistema simétrico permite conhecer "a priori" os caudais correctos, e assim avaliar o grau de convergência do método.

Seja a malha representada na figura 2. Os caudais correctos serão, naturalmente, $Q_{AB} = 30$ l/s, $Q_{BC} = 10$ l/s, $Q_{CD} = -10$ l/s, e $Q_{DA} = -30$ l/s.

As condutas são de fibrocimento, e consideram-se conhecidos os valores de K e n (da expressão $\Delta H = K \cdot Q^n$) para cada conduta.

Serão considerados 4 cálculos diferentes para esta malha, correspondendo a diferentes valores do termo ∞ e dos caudais inicialmente arbitrados, realizando-se para todos os exemplos uma única tentativa. Estes diferentes cálculos permitem avaliar a sensibilidade do método face ao erro inicial e à variação de ∞ .

As aproximações consideradas são exageradas para os cálculos práticos correntes, mas na presente comunica-

ção, dado o seu carácter, considerou-se conveniente uma maior precisão.

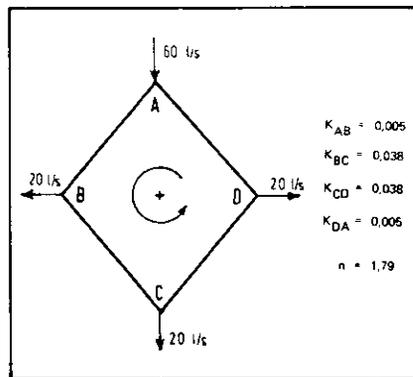
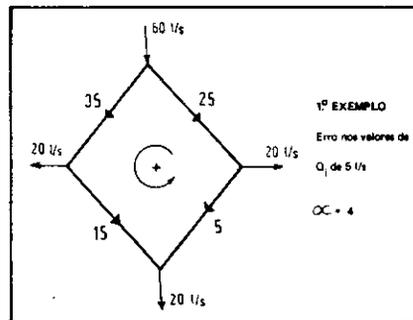
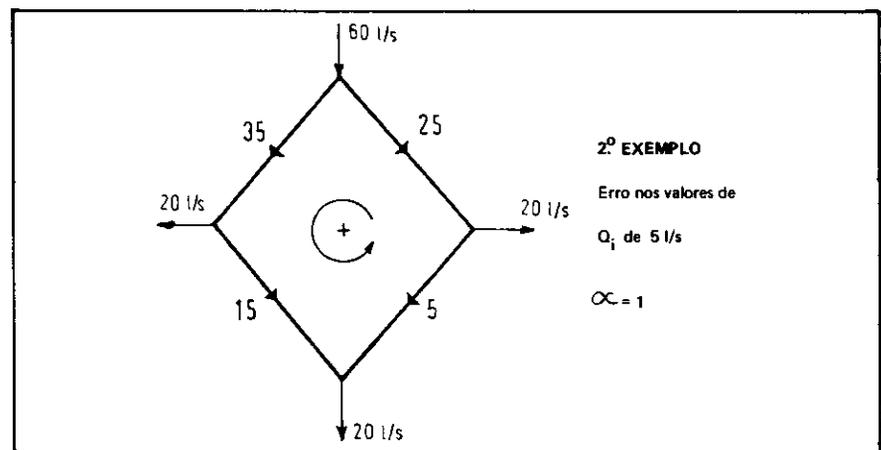


Fig. 2 - Malha simétrica.



MALHA	ÚNICA			
	AB	BC	CD	DA
K	0,005	0,038	0,038	0,005
Q_o	35	15	-5	-25
Q_o^n	580,606	127,410	-17,830	-317,916
ΔH_o	2,903	4,842	-0,678	-1,580
$\Sigma \Delta H_o$	+ 5,477			
∞	- 4			
$Q_o + \infty$	31	11	-9	-29
$(Q_o + \infty)^n$	467,237	73,130	-51,062	-414,660
ΔH_{oK}	2,336	2,779	-1,940	-2,073
$\Sigma \Delta H_{oK}$	+ 1,102			
$q = \infty A / (A - B)$	- 5,01			
$Q_{correct}$	29,99	9,99	-10,01	-30,01



Os resultados obtidos para os exemplos apresentados permitem concluir o seguinte:

a) Para a resolução de uma única malha o método fornece resultados suficientemente precisos após uma única tentativa.

Quando se utilizam ábacos os erros obtidos são em geral superiores, devido a deficiências na leitura de valores, inevitáveis neste processo de cálculo.

b) Para as aproximações em geral exigidas na prática, os desvios iniciais não influenciam de modo sensível os resultados do cálculo.

c) O valor arbitrado para ∞ também não tem praticamente influência nos resultados do cálculo (nos casos práticos correntes), devendo no entanto observar-se o que atrás se referiu sobre a escolha do valor deste termo, com vista a uma maior precisão de cálculo. (Os exemplos anteriores, 1º e 2º, mostram contudo que os erros são tanto menores quanto mais próximo estiver ∞ do valor do desvio nos caudais arbitrados - q).

MALHA	ÚNICA			
CONDUTA	AB	BC	CD	DA
K	0,005	0,038	0,038	0,005
Q_o	35	15	-5	-25
Q_o^n	580,606	127,410	-17,830	-317,916
ΔH_o	2,903	4,842	-0,678	-1,590
$\Sigma \Delta H_o$		+ 5,477		
α		- 1		
$Q_o + \alpha$	34	14	-6	-26
$(Q_o + \alpha)^n$	551,248	112,608	-24,711	-341,038
$\Delta H_{o\alpha}$	2,756	4,279	-0,939	-1,705
$\Sigma \Delta H_{o\alpha}$		+ 4,391		
$q = \alpha A / A - B$		- 5,04		
Q_{CORRIG}	29,96	9,96	- 10,04	- 30,04

Na página seguinte repete-se a resolução do 4.º exemplo, mas por meio da utilização de um ábaco de rectas paralelas.

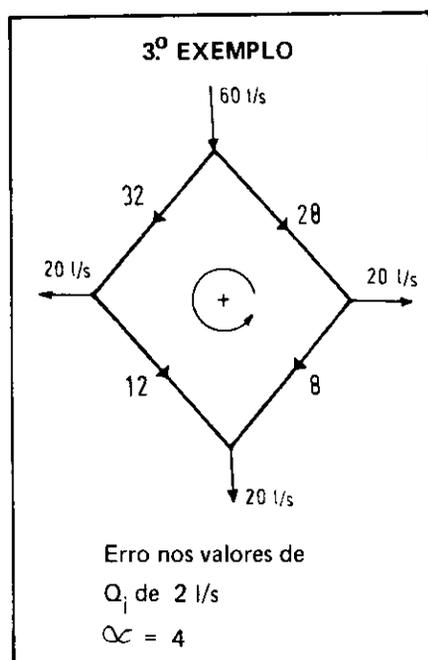
Neste caso consideraram-se conhecidos os diâmetros e os comprimentos das diversas condutas da malha.

Apresenta-se seguidamente mais um exemplo, neste caso sobre um sistema complexo, composto por duas malhas (fig. 3).

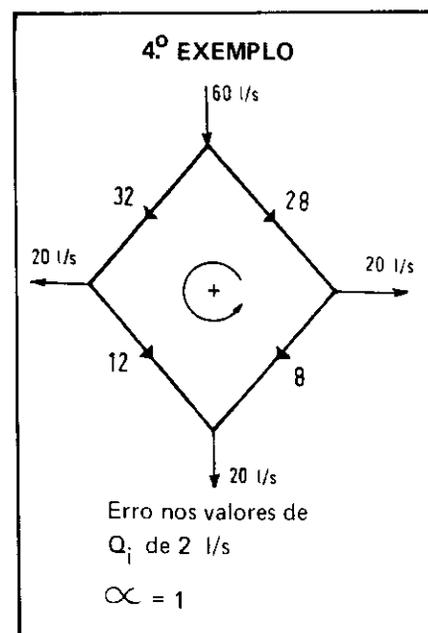
Embora para cada malha seja suficiente uma tentativa, é aconselhável nestes casos a realização de mais tentativas, dado o desequilíbrio introduzido ao efectuar-se a correcção, pelas 2 malhas, das condutas comuns.

O cálculo será executado por aplicação de um ábaco de rectas paralelas para condutas de fibrocimento, supondo conhecidos os diâmetros.

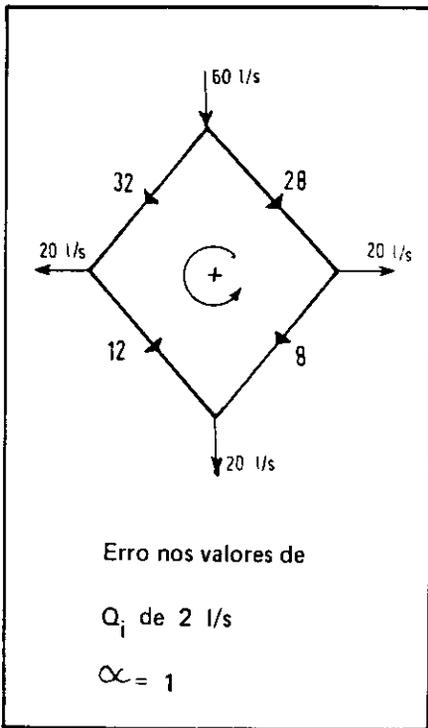
Serão realizadas duas tentativas,



MALHA	ÚNICA			
CONDUTA	AB	BC	CD	DA
K	0,005	0,038	0,038	0,005
Q_o	32	12	-8	-28
Q_o^n	494,559	85,454	-41,355	-389,415
ΔH_o	2,473	3,247	-1,571	-1,947
$\Sigma \Delta H_o$		+ 2,202		
α		- 4		
$Q_o + \alpha$	28	8	-12	-32
$(Q_o + \alpha)^n$	389,415	41,355	-85,454	-494,559
$\Delta H_{o\alpha}$	1,947	1,571	-3,247	-2,473
$\Sigma \Delta H_{o\alpha}$		- 2,202		
$q = \alpha A / A - B$		- 2,00		
Q_{CORRIG}	30	10	-10	-30



MALHA	ÚNICA			
CONDUTA	AB	BC	CD	DA
K	0,005	0,038	0,038	0,005
Q_o	32	12	-8	-28
Q_o^n	494,559	85,454	-41,355	-389,415
ΔH_o	2,473	3,247	-1,571	-1,947
$\Sigma \Delta H_o$		+ 2,202		
α		- 1		
$Q_o + \alpha$	31	11	-9	-29
$(Q_o + \alpha)^n$	467,237	73,130	-51,062	-414,660
$\Delta H_{o\alpha}$	2,336	2,779	-1,940	-2,073
$\Sigma \Delta H_{o\alpha}$		+ 1,102		
$q = \alpha A / A - B$		- 2,00		
Q_{CORRIG}	30	10	-10	-30



MALHA	ÚNICA			
	AB	BC	CD	DA
D	225	150	150	225
L	1000	1000	1000	1000
Q_o	32	12	-8	-28
i_o	2,9	3,4	-1,7	-2,1
ΔH_o	2,9	3,4	-1,7	-2,1
$\sum \Delta H_o$ (A)	+ 2,5			
α	- 1			
$Q_o + \alpha$	31	11	-9	-29
$i_{o\alpha}$	2,7	2,8	-2,0	-2,3
$\Delta H_{o\alpha}$	2,7	2,8	-2,0	-2,3
$\sum \Delta H_{o\alpha}$ (H)	+ 1,2			
$q = \sum A / A - B$	+ 1,9			
Q_{corrig}	30,1	10,1	-9,9	-29,9

que, neste processo de cálculo, são em geral suficientes para a obtenção de um grau de precisão satisfatório, em comparação com as aproximações fornecidas pelas leituras do ábaco.

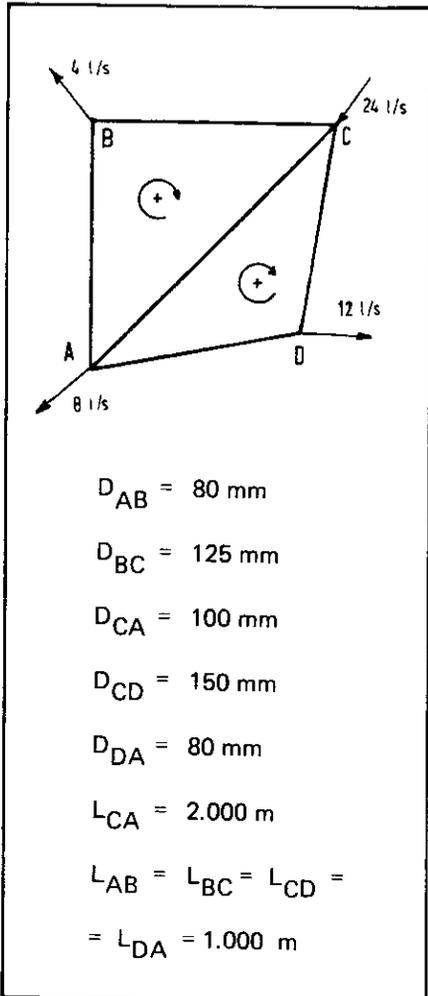


Fig. 3 – Sistema composto por 2 malhas.

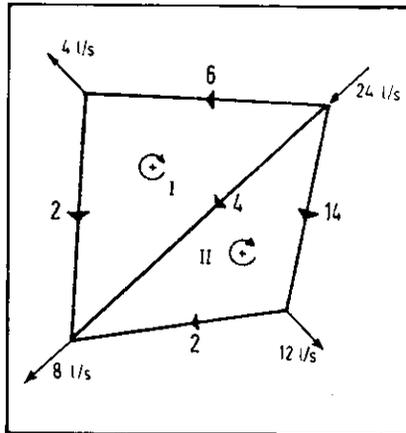


Fig. 4 – Caudais arbitrados (1ª tentativa).

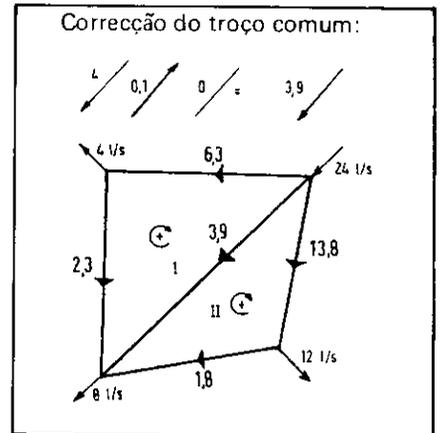


Fig. 6 – Caudais finais corrigidos.

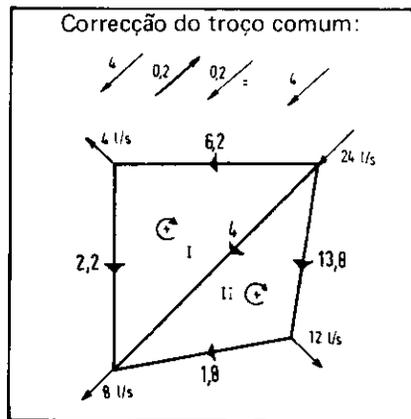


Fig. 5 – Caudais de cálculo após a 1ª tentativa.

Note-se que na realização da segunda tentativa se obtiveram valores de A praticamente nulos (0,6 e 0,1). Este facto significa que as malhas ficaram praticamente equilibradas após a 1ª tentativa, sendo portanto muito pequeno o desvio (q) dos caudais obtidos após a 1ª tentativa em relação aos caudais correctos. Deste modo, e como interessa que o valor arbitrado para α seja próximo de q , por razões atrás expostas, consideraram-se nesta segunda tentativa valores menores para este termo α (0,5 em vez de 1,0 para as duas malhas).

5.º EXEMPLO

MALHA	I			II		
	AB	BC	CA	AC	CD	DA
D	80	125	100	100	150	80
L	1000	1000	2000	2000	1000	1000

5. COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DE H. CROSS. CONCLUSÕES

Repete-se nas páginas seguintes a resolução do 1º exemplo (ou 2º) e do 3º exemplo (ou 4º) por aplicação do método de Hardy Cross.

O 3º exemplo será resolvido por utilização de um ábaco de rectas paralelas.

Dos exemplos apresentados e das análises teóricas dos 2 métodos, podem constatar-se as seguintes vantagens do novo método em relação ao método de H. Cross:

a) O método apresenta, nos exemplos apresentados, uma convergência mais rápida que o método de H. Cross, isto é, com o mesmo número de tentativas o novo método fornece resultados mais precisos do que o de Cross.

b) O novo método pode ser directamente aplicado a malhas constituídas por condutas de diferentes materiais (valor de n da expressão $\Delta H = K \cdot Q^n$ diferente), enquanto que a aplicação do método de H. Cross a malhas deste tipo obriga, para uma boa aproximação, a alterar e a complicar a marcha de cálculo tradicional.

c) O facto de o novo método exigir, para cada tentativa, a determinação de perdas de carga ao longo da malha em duas situações diferentes, permite facilmente obter uma noção sobre a sensibilidade da malha às varia-

Q_0	-2	-6	+4	-4	+14	+2
i_0	-2,7	-2,3	+3,1	-3,1	+4,4	+2,7
ΔH_0	-2,7	-2,3	+6,2	-6,2	+4,4	+2,7
$\Sigma \Delta H_0 (A)$		+1,2			+0,9	
α		-1			-1	
$Q_0 + \alpha$	-3	-7	+3	-5	+13	+1
$i_{0\alpha}$	-5,2	-3,0	+1,9	-4,6	+4,0	+0,8
$\Delta H_{0\alpha}$	-5,2	-3,0	+3,8	-9,2	+4,0	+0,8
$\Sigma \Delta H_{0\alpha} (B)$		-4,4			+4,4	
$q = \alpha A / (A - B)$		-0,2			-0,2	

Q_1	-2,2	-6,2	+4,0	-4,0	+13,8	+1,8
i_1	-3,2	-2,4	+3,1	-3,1	+4,2	+2,1
ΔH_1	-3,2	-2,4	+6,2	-6,2	+4,2	+2,1
$\Sigma \Delta H_1 (A)$		+0,6			+0,1	
α		-0,5			-0,5	
$Q_1 + \alpha$	-2,7	-6,7	+3,5	-4,5	+13,3	+1,3
$i_{1\alpha}$	-4,4	-2,8	+2,5	-3,8	+4,1	+1,3
$\Delta H_{1\alpha}$	-4,4	-2,8	+5,0	-7,6	+4,1	+1,3
$\Sigma \Delta H_{1\alpha} (B)$		-2,2			-2,2	
$q = \alpha A / (A - B)$		-0,1			≈ 0	
Q_{corrig}	-2,3	-6,3	+3,9	-3,9	+13,8	+1,8

ções dos caudais nas condutas. Se os somatórios A e B são de sinal contrário, o método permite determinar,

com uma única tentativa, limites dentro dos quais se situam os caudais correctos.

1º EXEMPLO (Cross)

MALHA	ÚNICA			
	AB	BC	CD	DA
K	0,005	0,038	0,038	0,005
Q	35	15	-5	-15
Q^n	580,606	127,410	-17,830	-317,916
ΔH	2,903	4,842	-0,678	-1,580
$\Sigma \Delta H (C)$		+5,477		
$\Delta H/Q$	0,083	0,323	0,136	0,064
$\Sigma \Delta H/Q (D)$		0,606		
$1,79 \times D/E$		1,085		
$q = -C/E$		-5,05		
Q_{corrig}	29,95	9,95	-10,05	-30,05

3º EXEMPLO (Cross)

MALHA	ÚNICA			
	AB	BC	CD	DA
K	225	150	150	225
Q	30	12	-8	-28
Q^n	2,9	3,4	-1,7	-2,1
ΔH	2,9	3,4	-1,7	-2,1
$\Sigma \Delta H (C)$		+2,5		
$\Delta H/Q$	0,09	0,28	0,21	0,08
$\Sigma \Delta H/Q (D)$		0,64		
$1,79 \times D/E$		1,15		
$q = -C/E$		-2,2		
Q_{corrig}	30,2	10,2	-9,8	-29,8

BIBLIOGRAFIA

AFONSO, A. Silva — Análise Hidráulica de Redes Malhadas. Coimbra, 1976. Ed. do Autor.

AFONSO, A. Silva — Lições de Hidráulica Geral. Faculdade de Ciências e Technolo-

gia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 1975.

DUPONT, A. — Hydraulique Urbaine. Paris, Eyrolles, 1977.

FAIR, GEYER Y OKUN — Water Supply and Wastewater Removal. New York,

John Wiley and Sons, Inc., 1966.

NETTO, J. Azevedo — Manual de Hidráulica. São Paulo, Edgard Blücher, 1973.

STEEL, E.W. — Water Supply and Sewerage. Tóquio, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.

GÁLCULO HIDRÁULICO DE REDES EM MALHAS		ESQUEMA DA REDE	
MÉTODO DE A. AFONSO			
VARIANTE DO AJUSTAMENTO DOS CAUDAIS			
MALHA			
CONDUTAS	Materi.		
	Desig.		
	D		
	L+Leq.		
1ª TENTATIVA	Q ₀		
	i ₀		
	ΔH ₀		
	±ΔH ₀ A		
	Sinal de α		
	α		
	Q ₀ +α		
	i _{0α}		
	ΔH _{0α}		
	±ΔH _{0α} B		
	$Q_0 = \frac{\alpha \cdot A}{A-B}$		
2ª TENTATIVA	Q ₁		
	i ₁		
	ΔH ₁		
	±ΔH ₁ A		
	Sinal de α		
	α		
	Q ₁ +α		
	i _{1α}		
	ΔH _{1α}		
	±ΔH _{1α} B		
	$Q_1 = \frac{\alpha \cdot A}{A-B}$		
Q _{CORRIG.}			
OBS:	Se A>0 considerar α<0 - Se A<0 considerar α>0		