

5. ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

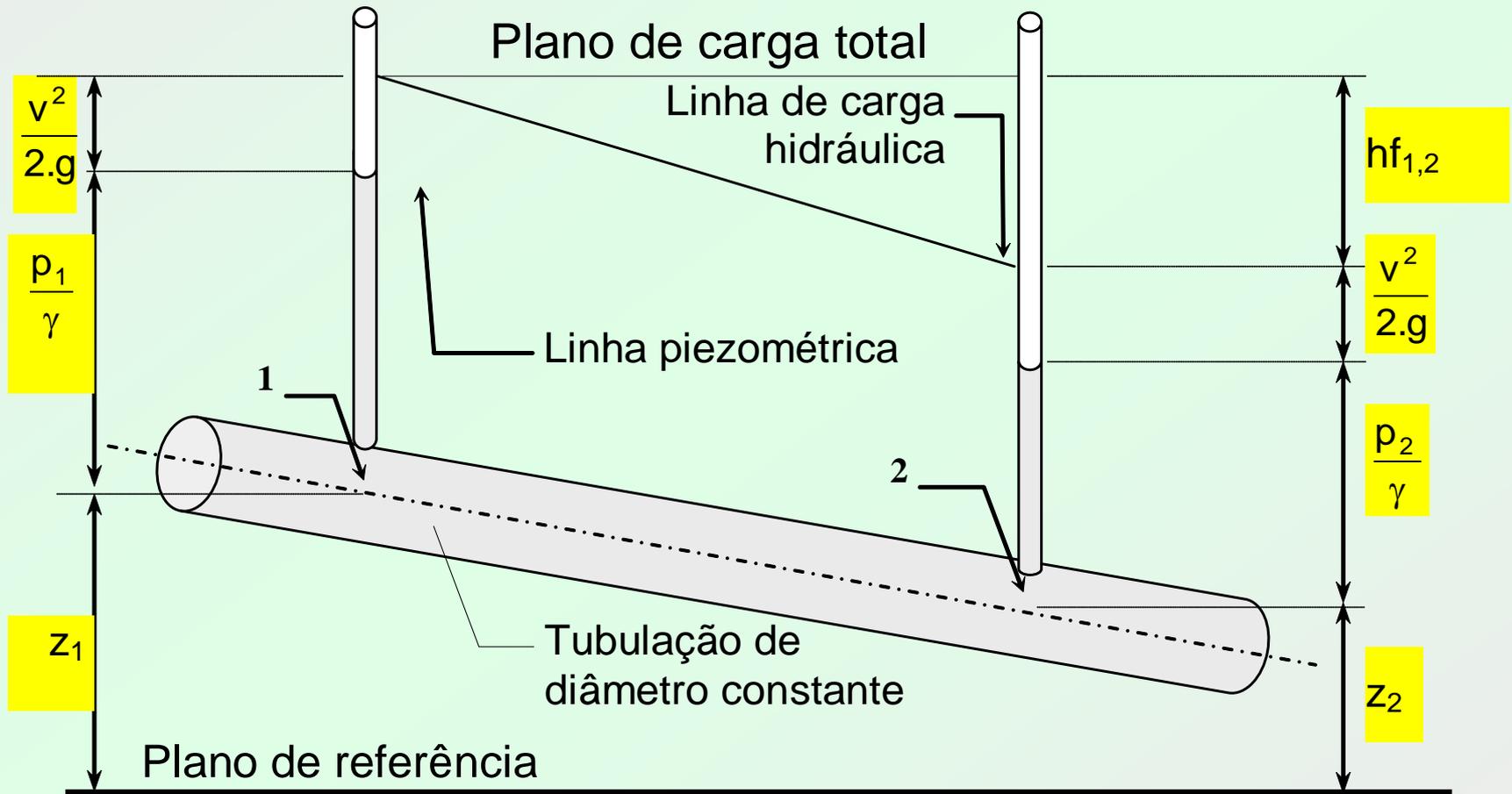


5.1. TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS

5.2. PERDA DE CARGA: NATUREZA E CLASSIFICAÇÃO

- Escoamento → transformação parcial da energia hidráulica em energia térmica
- Laminar → resistência devido à viscosidade
- Turbulento → resistência devido à viscosidade e turbulência (atrito com as paredes da tubulação e choques de filetes)

Linhas de cargas e perda de carga num escoamento permanente uniforme.



Classificação da perda de carga (hf):

Perda ao longo da tubulação:

- perda uniforme em qualquer trecho de uma tubulação de dimensões constantes, independentemente da posição da mesma

Perdas em peças especiais ou localizadas:

- acessórios e demais singularidades da tubulação;
- somente assumem valores consideráveis quando a tubulação for muito curta e/ou existirem muitas peças na tubulação;

Ordem cronológica das 40 primeiras fórmulas de perda de carga (hf):

Ano	Autor	País	Ano	Autor	País		
1	1775	Chézy	França	21	1877	Fanning	Estados Unidos
2	1779	Dubuat	França	22	1877	Hamilton Smith	Estados Unidos
3	1791	Woltmann	Alemanha	23	1878	Colombo	França
4	1796	Eytelwein	Alemanha	24	1878	Darrach	Estados Unidos
5	1800	Coulomb	França	25	1880	Ehrmann	Alemanha
6	1802	Eisenmann	Alemanha	26	1880	Iben	Alemanha
7	1804	Prony	França	27	1881	Franck	Alemanha
8	1825	D'Aubuisson	França	28	1883	Reynolds	Inglaterra
9	1828	Tadini	Itália	29	1884	Thrupp	Inglaterra
10	1845	Weisbach	Alemanha	30	1886	Unwin	Estados Unidos
11	1851	Saint Venant	França	31	1887	Stearns-Brush	Estados Unidos
12	1854	Hagen	Alemanha	32	1889	Geslain	França
13	1855	Dupuit	França	33	1889	Tutton	Inglaterra
14	1855	Leslie	Inglaterra	34	1890	Manning	Irlanda
15	1855	Darcy	França	35	1892	Flamant	França
16	1867	Ganguillet-Kutter	Suíça	36	1896	Lang	Alemanha
17	1867	Levy	França	37	1898	Fornié	França
18	1868	Bresse	França	38	1902	Hiram-Mills	Estados Unidos
19	1868	Gauckler	França	39	1903	Christen	Estados Unidos
20	1873	Lampe	Alemanha	40	1903*	Hazen-Williams	Estados Unidos

5.3. PERDA DE CARGA AO LONGO DA TUBULAÇÃO: FÓRMULAS PARA SEU CÁLCULO

- Um dos problemas mais estudados na engenharia
- Investigações experimentais em tubos de seção circular → resistência ao escoamento é:
 - diretamente proporcional ao comprimento (L) da tubulação
 - inversamente proporcional ao diâmetro (D) elevado a certa potência (m)
 - proporcional à velocidade de escoamento (v) elevada a certa potência (n)
 - independente da posição da tubulação e pressão de operação
 - dependente da rugosidade interna da tubulação (associado à λ)
 - dependente da densidade e viscosidade do fluido (associado à λ)

EQUAÇÃO “SIMBÓLICA”:
$$hf = \lambda \cdot L \cdot \frac{v^n}{D^m}$$

FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

- Allen Hazen (eng. civil e sanitarista) e Gardner S. Williams (prof. de Hidráulica) → EUA (1903)
- Estudo estatístico de mais de 30 pesquisadores
- Conduitos livres ou forçados para diâmetros de 50 a 3500 mm
- Somente água a aproximadamente 20 °C

$$Q = 0,2788 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot J^{0,54}$$

$$v = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54}$$

$$D = 1,625 \cdot \frac{Q^{0,38}}{C^{0,38} \cdot J^{0,205}}$$

$$J = 6,81 \cdot \frac{v^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{1,167}}$$

$$J = 10,65 \cdot \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}}$$

sendo:

C – coeficiente relacionado à rugosidade interna do material da tubulação, adimensional (Tabela 16);

J – perda de carga unitária ocorrida na tubulação (m/m).

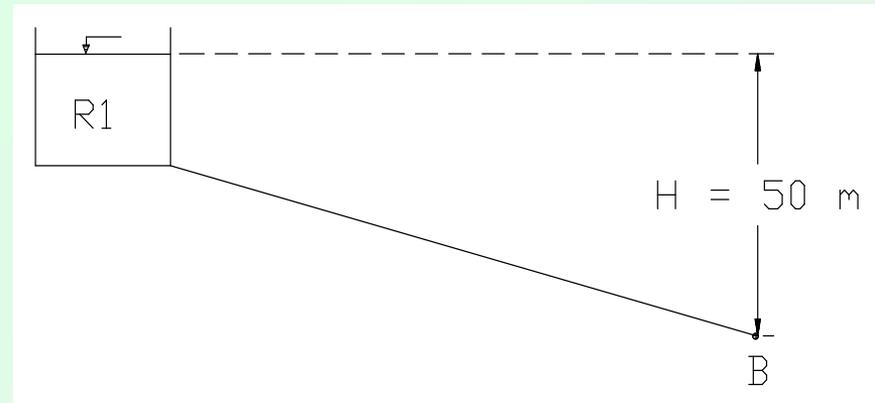
Tabela 16. Valores do coeficiente “C” de Hazen-Williams.

Material – Especificação		C		
		novos	± 10anos	± 20anos
Aço	corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
	galvanizado	125	100	-
	rebitado	110	90	80
	revestido	130	110	90
	soldado	125	-	-
Ferro	fundido	125	110	95
	fundido revestido com cimento centrifugado	130	120	105
	fundido revestido com epóxi	140	130	120
Concreto	acabamento liso	130	-	-
	acabamento normal	120	-	-
	acabamento rugoso	100	-	-
Plástico (PVC e polietileno)		150	135	130
Alumínio		135	-	-
Vidro		150	-	-
Fibrocimento		130	-	-
Cobre, latão e chumbo		140	135	130
Manilhas cerâmicas		110	-	-

Exercício de Aplicação

Sabendo-se que a tubulação de PVC do esquema abaixo possui 1200 m de comprimento e 150 mm de diâmetro, calcular:

- A vazão quando a válvula de gaveta posicionada em B estiver totalmente aberta.
- Se a válvula em B for fechada parcialmente, permitindo metade da vazão calculada no item “a”, quanto será a perda de carga na tubulação? Quanto restará de pressão no final da tubulação antes da válvula.
- Se a tubulação for substituída por uma de PCV de diâmetro 75 mm, quanto será a vazão com a válvula totalmente aberta?
- Se a tubulação for substituída por uma de aço galvanizado de mesmo diâmetro (150 mm), quanto será a vazão com a válvula totalmente aberta?
- Quanto de energia hidráulica em 10h, em kWh, é transformada em calor devido à perda de carga ocorrida, considerando a vazão do item “a”?



Exercício de Aplicação

Em uma fazenda existe uma instalação para confinamento de gado capaz de comportar 35000 animais. A água para atendê-los é proveniente de um reservatório posicionado em um ponto alto da propriedade, cujo nível se encontra na cota 148 m e a uma distância de 1236 m do início do sistema ramificado de distribuição para os currais, cuja cota é 92 m. O proprietário lhe solicitou o dimensionamento de uma tubulação de PCV para transportar a água. Sabendo-se que cada animal consome diariamente 45 litros de água e que a pressão mínima no início do sistema de distribuição deve ser 147 kPa, calcular o diâmetro teórico mínimo para proporcionar a vazão necessária.

Exercício de Aplicação

Se uma bomba centrífuga fornece uma vazão de 100 m³/h na pressão de 784 kPa (medida na saída da bomba), então calcular o diâmetro da tubulação de aço galvanizado de 1000 m de comprimento que permitirá transportar essa vazão até um reservatório elevado 60 m em relação à bomba.

Exercício de Aplicação

Um produtor lhe solicitou uma consultoria para verificar se a bomba hidráulica que ele possui em sua propriedade é suficiente para atender um sistema de irrigação de uma área de 5 ha que pretende plantar feijão. Considerando as condições apresentadas a seguir, responder se a bomba é ou não suficiente para isso.

- Lâmina total de irrigação exigida pela cultura (ETc + perdas): 4,5 mm/dia;
- Tempo de operação do sistema de irrigação previsto por dia: 12 h (porém pode ser expandido até 15 h);
- Pressão exigida no início da linha lateral mais elevada do sistema de irrigação: 294 kPa;
- Comprimento da tubulação principal até a linha lateral mais elevada: 500 m;
- Diâmetro da tubulação: 75 mm;
- Material da tubulação: aço soldado moderadamente oxidado;
- Desnível topográfico entre a captação e o início da linha lateral mais elevada: 30 m;
- Tabela de vazão versus pressão da bomba hidráulica disponível:

Pressão (kPa)	784	779	760	745	725	676	657	539
Vazão (m ³ /h)	0,0	5,0	10,0	12,5	15,0	18,75	20,0	25,0

FÓRMULA DE FLAMANT

- Flamant (1892) → França
- Dimensionamento de condutos de pequeno diâmetro (instalações prediais - até 4")

$$J = 6,107 \cdot \frac{b \cdot Q^{1,75}}{D^{4,76}}$$

sendo: b – coeficiente de Flamant, adimensional (Tabela 17).

Tabela 17. Valores do coeficiente “b” de Flamant.

MATERIAL	b
Ferro fundido ou aço – novo	0,000185
Ferro fundido ou aço – usado	0,000230
Concreto	0,000185
PVC	0,000135
Chumbo	0,000140

Exercício de Aplicação

Um aspersor cujo único bocal apresenta 14 mm de diâmetro e coeficiente de descarga de 0,92 deverá operar na pressão de 588 kPa. Sabendo-se que ele será abastecido por um reservatório elevado distante 500 m através de uma tubulação de PVC, calcular o desnível suficiente entre o bocal e o nível da água do reservatório para que ele opere na pressão recomendada. Fazer os cálculos para duas condições de diâmetro: 50 e 75 mm. *Utilizar as fórmulas de Flamant e Hazen-Williams.*

FÓRMULA UNIVERSAL (DARCY-WEISBACH)

- Qualquer líquido e em qualquer temperatura
- Aplicação prática da eq. “simbólica” → conhecimento de “λ”, “m” e “n”
- Chézy (1775) → valor de “n” era aproximadamente igual a 2
- Darcy (França, 1803-1858) e Weisbach (Alemanha, 1805-1871) propuseram um aprimoramento: $m = 1$ e multiplicação do numerador e denominador por “2.g”

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$hf = f \cdot \frac{L}{4 \cdot R_h} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

sendo:

L – comprimento da tubulação (m)

v – velocidade de escoamento (m/s)

D – diâmetro da tubulação(m)

f (que corresponde a “λ.2.g”) – fator de atrito (adimensional)

O fator de atrito depende:

- Número de Reynolds:

$$NR = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad NR = \frac{v \cdot 4 \cdot R_h}{\nu}$$

- Rugosidade relativa:

$$Rr = \frac{e}{D}$$

sendo:

e – rugosidade absoluta da parede interna da tubulação
(Tabela 15)

Determinação do f - fator de atrito:

- Investigações experimentais e analíticas de diversos pesquisadores: Hagen, Poiseuille, Wiedermann, Prandtl, von Kármán, Nikuradse, Blasius, Colebrook, Moody, Jain e Swamee

➤ Fórmulas:

Swamee 1993 – tanto para escoamento laminar como turbulento

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{NR} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{NR^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{NR} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$4 \cdot R_h$ (não cilíndricos)

➤ Diagramas:

Moody

Diagrama de Moody

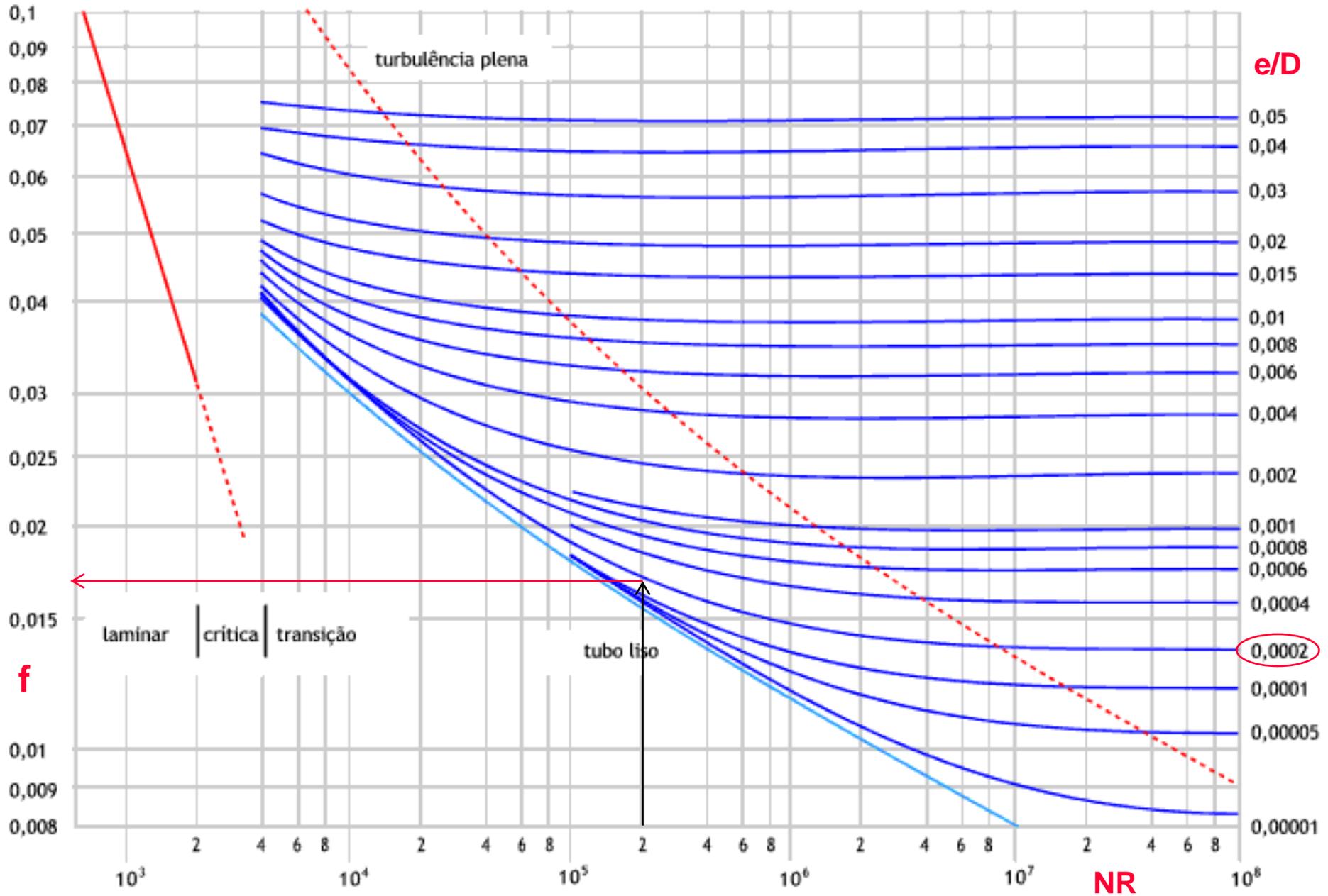
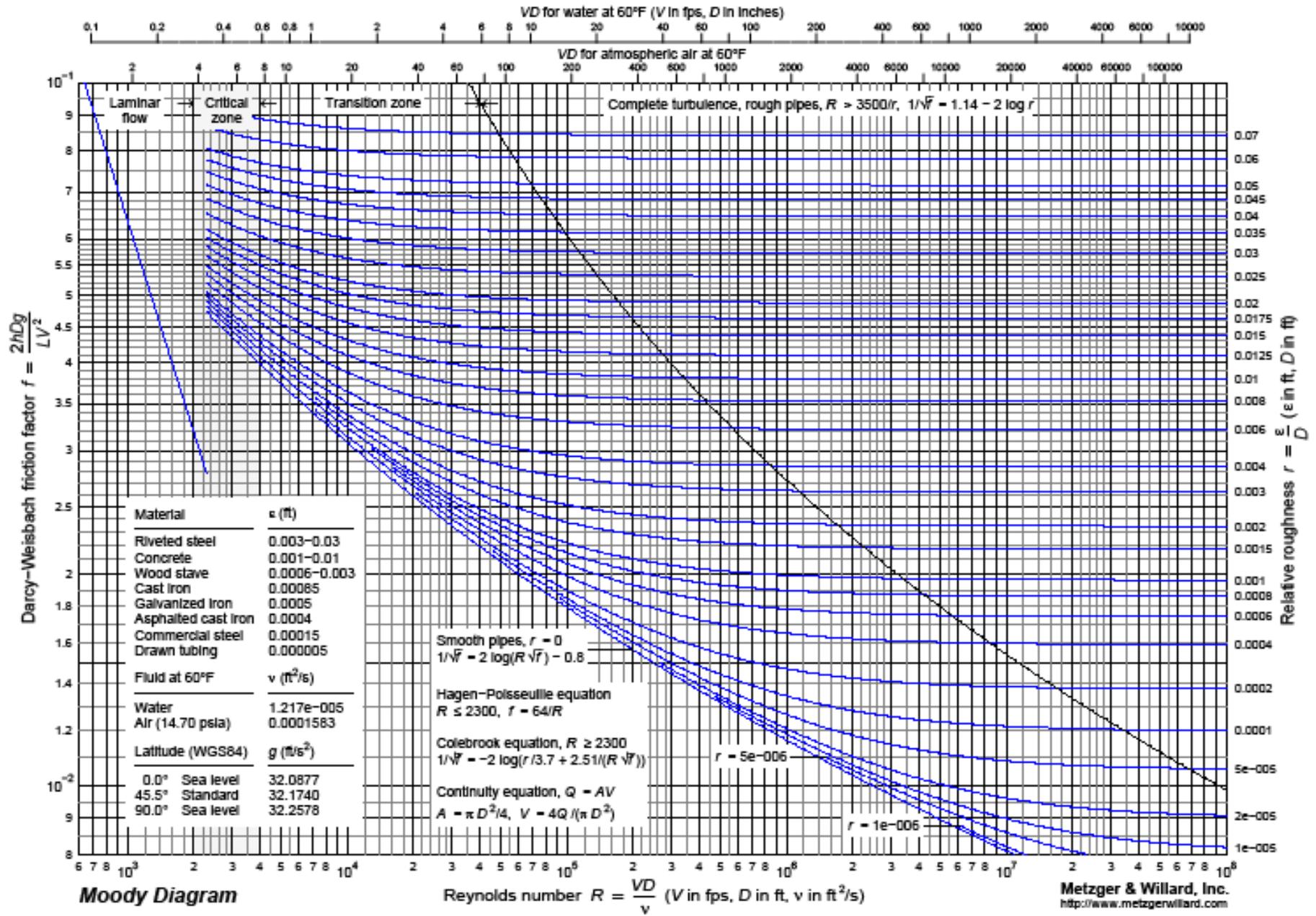


Diagrama de Moody



Moody Diagram

Moody Diagram

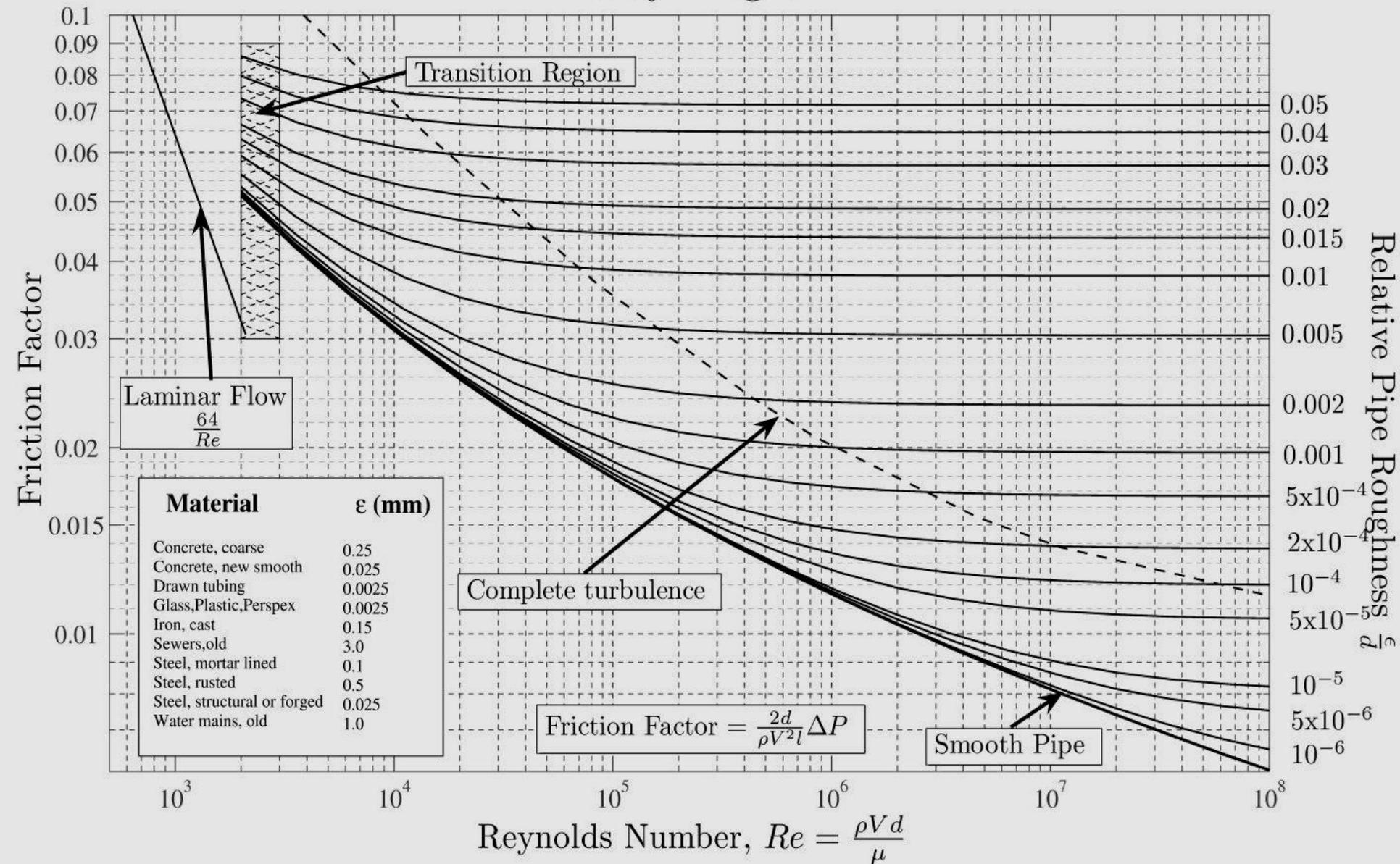


Diagrama de Moody

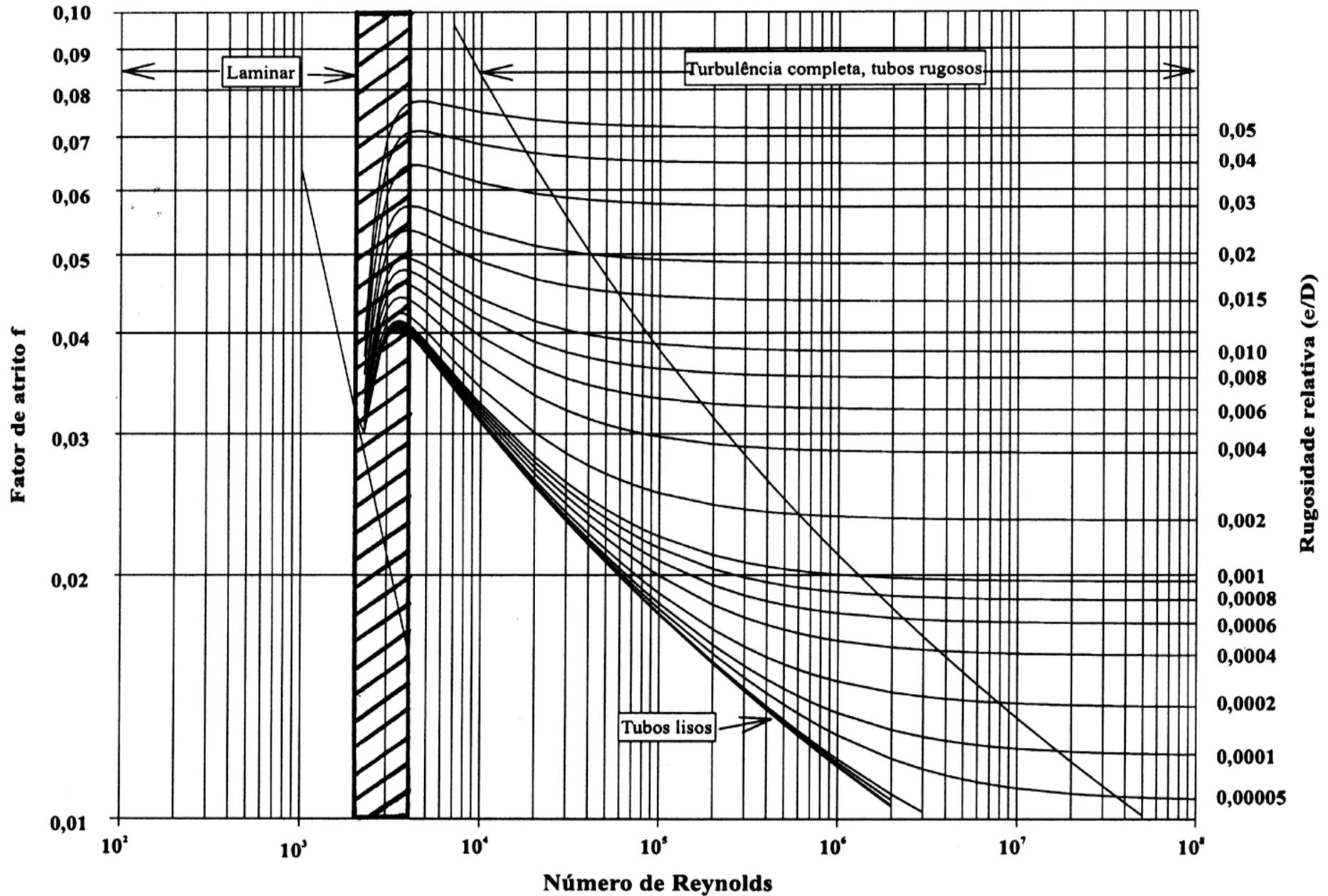


Diagrama de Moody

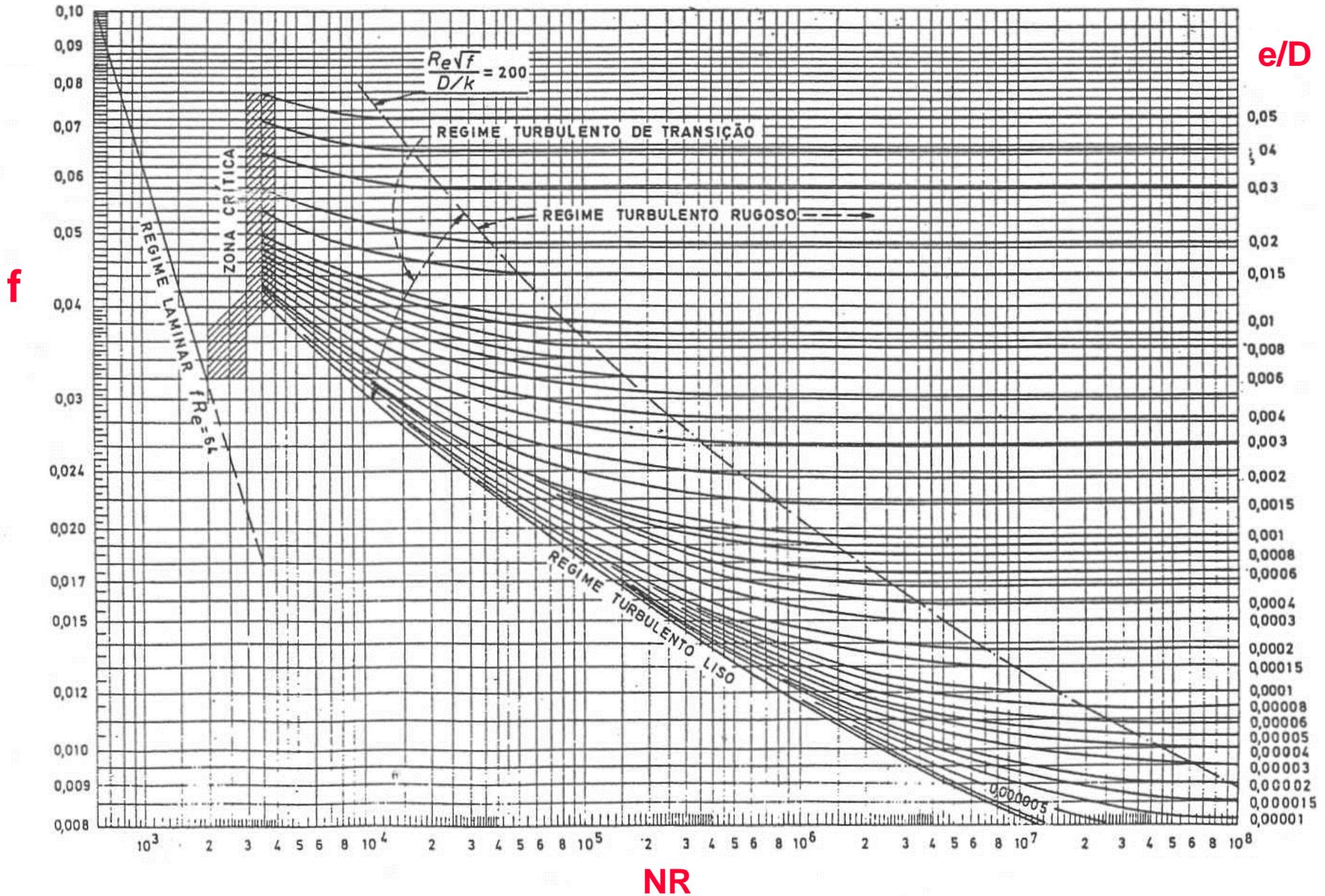
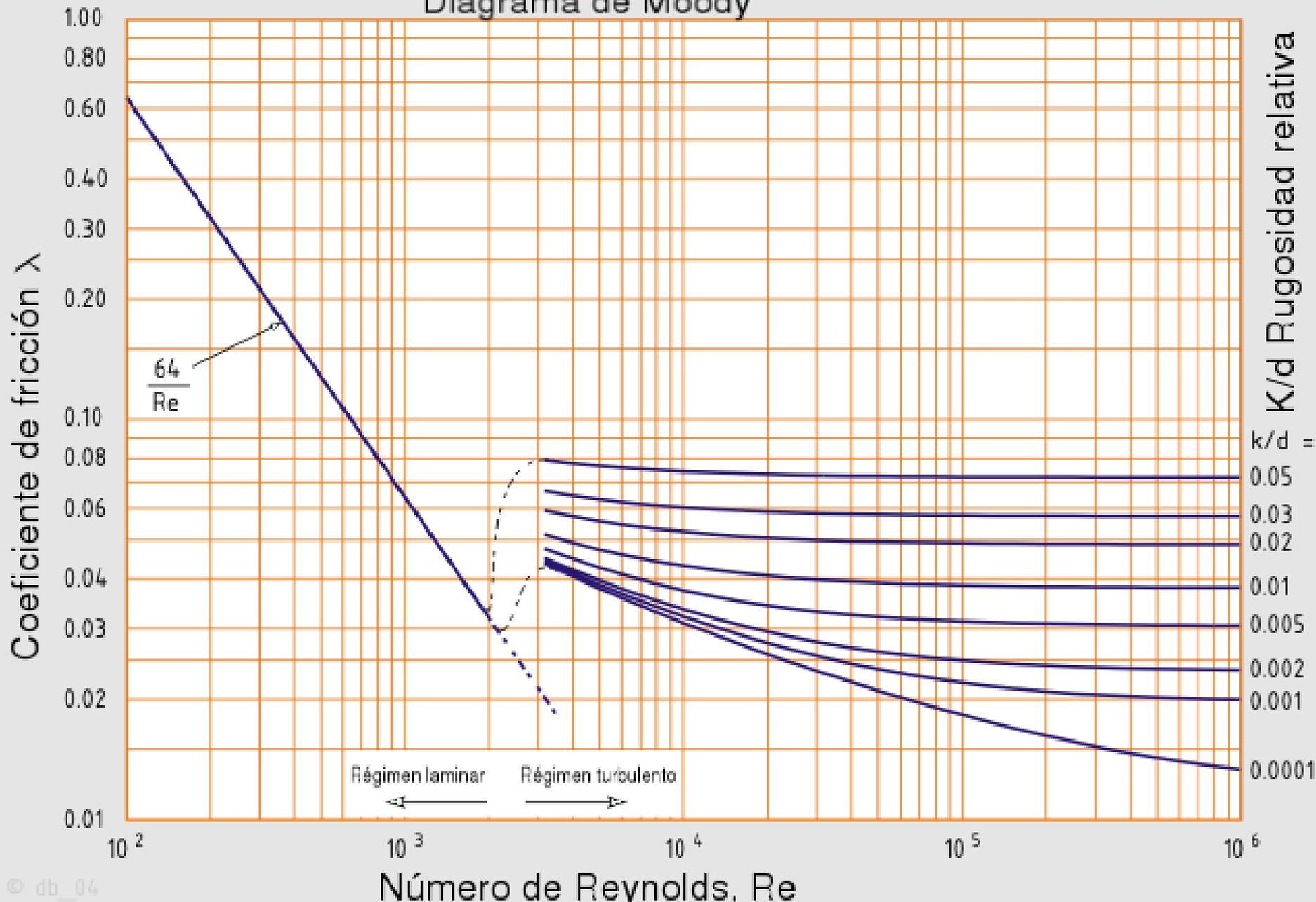


Diagrama de Moody



Problemas práticos → 3 tipos de problemas:

- 1º Tipo:** Dados:
- vazão (Q)
 - diâmetro da tubulação (D)
 - rugosidade absoluta (e)
 - viscosidade cinemática (ν)

Incógnita: - perda de carga (hf)

- 2º Tipo:** Dados:
- diâmetro da tubulação (D)
 - rugosidade absoluta (e)
 - viscosidade cinemática (ν)
 - perda de carga unitária ($J = hf/L$)

Incógnita: - vazão (Q) e/ou velocidade de escoamento (v)

- 3º Tipo:** Dados:
- vazão (Q)
 - rugosidade absoluta (e)
 - viscosidade cinemática (ν)
 - perda de carga unitária ($J = hf/L$)

Incógnita: - diâmetro da tubulação (D)

CALCULADORA PROGRAMÁVEL ou COMPUTADOR:

- Resolução dos três tipos de problemas é facilitada
- Combinação das equações:

Número de Reynolds

Continuidade

Universal

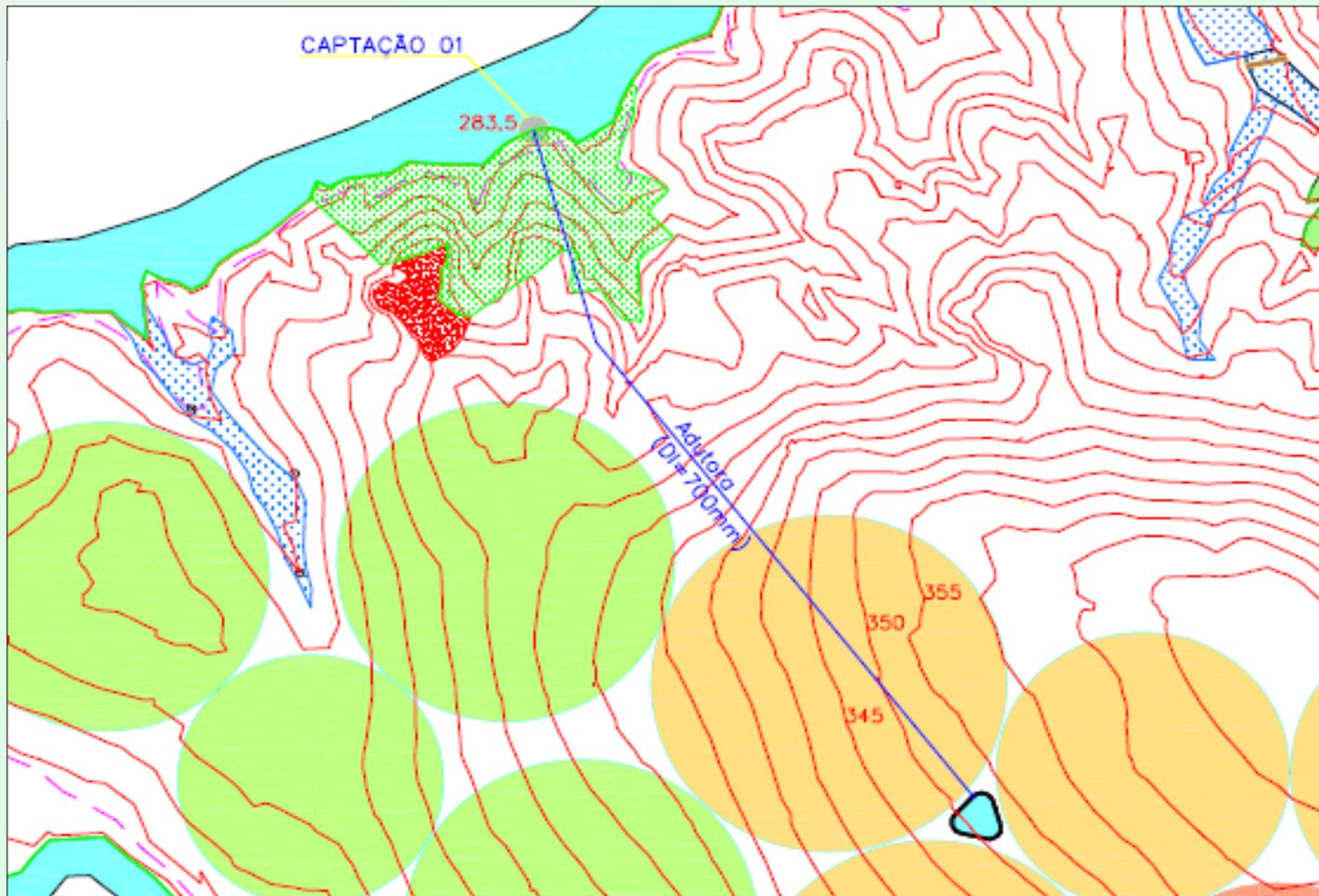
Swamme

$$\frac{g \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot hf}{8 \cdot Q^2 \cdot L} = \left\{ \left(\frac{16 \cdot \pi \cdot D \cdot v}{Q} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74 \cdot (\pi \cdot D \cdot v)^{0,9}}{(4 \cdot Q)^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500 \cdot \pi \cdot D \cdot v}{4 \cdot Q} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

Inserir o valor de cada variável conhecida em qualquer dos 3 tipos de problemas de escoamento que o mesmo será resolvido, pois restará somente uma incógnita

Exercício de Aplicação

Se a adutora do exercício anterior proporcionasse uma perda de carga de 15 m, quanto seria sua vazão?



Problemas práticos → Diagrama de Moody:

2º Tipo:

Dados:

- diâmetro da tubulação (D)
- rugosidade absoluta (e)
- viscosidade cinemática (ν)
- perda de carga unitária ($J = hf/L$)

Incógnita:

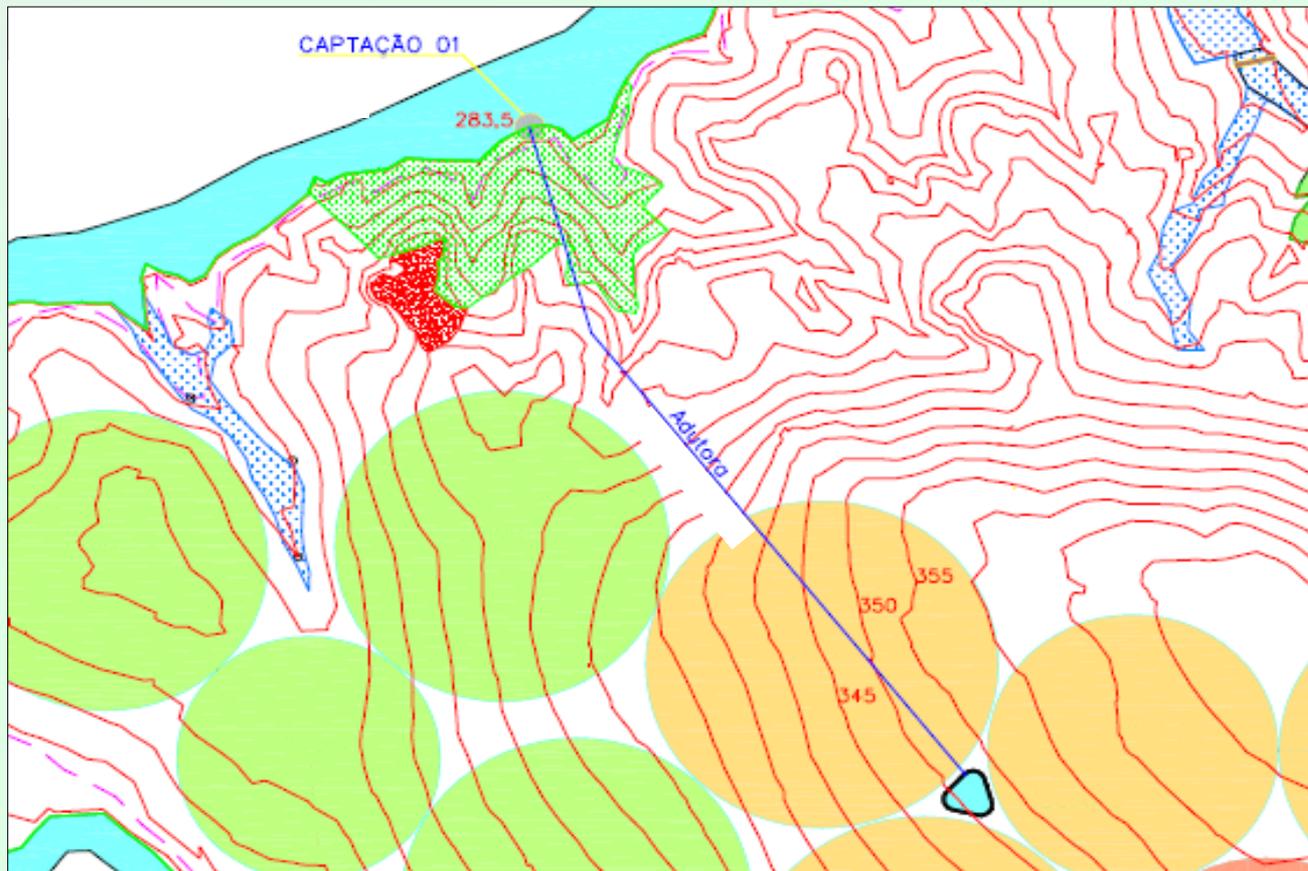
- vazão (Q) e/ou velocidade de escoamento (v)

Passos:

- Calcula-se a rugosidade relativa e coloca-se a velocidade de escoamento em função do fator de atrito, denominando-a $Eq.(a)$; e em função do número de Reynolds, denominando-a $Eq.(b)$;
- Igualando-se (a) e (b) obtém-se um número “ x ” (sempre positivo) que representa o produto do número de Reynolds (indeterminado) com o fator de atrito (indeterminado);
- Em seguida, e por tentativas, atribui-se um valor para o fator de atrito que com a rugosidade relativa calculada obtém-se, através do diagrama de Moody, um valor para o número de Reynolds. Quando o valor do produto do número de Reynolds, encontrado no diagrama, com o fator de atrito atribuído for igual ao do número “ x ”, então o valor do fator de atrito encontrado estará correto;
- Com isso, se calcula a velocidade de escoamento ($Eq.a$) e, finalmente, a vazão. Portanto, neste caso o problema somente é resolvido por tentativas (normalmente convergentes) para a obtenção do fator de atrito.

Exercício de Aplicação

Se a adutora do exercício anterior proporcionasse uma perda de carga de 15 m e uma vazão de $1044 \text{ m}^3/\text{h}$, quanto seria seu diâmetro?



Problemas práticos → Diagrama de Moody:

3º Tipo:

Dados:

- vazão (Q)
- rugosidade absoluta (e)
- viscosidade cinemática (ν)
- perda de carga unitária ($J = hf/L$)

Incógnita:

- diâmetro da tubulação (D)

Passos:

- Na equação da continuidade, coloca-se a velocidade de escoamento em função do diâmetro (indeterminado), denominando-a *Eq.(a)*;
- Substitui-se a *Eq.(a)* na equação de perda de carga (Eq.34), obtém-se a *Eq.(b)*, na qual o diâmetro fica em função do fator de atrito (indeterminado);
- Também se substitui a *Eq.(a)* na equação do número de Reynolds, ficando este em função do diâmetro, cuja equação denomina-se *Eq.(c)*. Lembrando também que a rugosidade relativa (Eq.35) está em função do diâmetro;
- Em seguida, e por tentativas, atribui-se um valor para o fator de atrito que, substituído na *Eq.(b)*, permite calcular o diâmetro, que por sua vez permite calcular o número de Reynolds na *Eq.(c)* e a rugosidade relativa (Eq.35);
- Com o número de Reynolds e a rugosidade relativa encontra-se um valor do fator de atrito no diagrama de [Moody](#), que será o valor verdadeiro se coincidir com o atribuído. Caso contrário, atribui-se outro fator de atrito e repete-se a tentativa até encontrá-lo. Quando isso ocorrer, então o diâmetro também o foi pela *Eq.(b)*.

Exercício de Aplicação

Uma tubulação nova de ferro fundido com cimento centrifugado, de diâmetro 215,6 mm e comprimento 2000 m, transporta 20 L/s de uma solução aquosa, cuja viscosidade cinemática é 0,000074 m²/s. Diante disso, determinar:

- a)** O regime de escoamento a que está submetido o fluido em questão.
- b)** O fator de atrito “f” da fórmula Universal utilizando o diagrama de Moody e a fórmula de Swame.
- c)** A perda de carga ocorrida na tubulação.
- d)** Se a tubulação de ferro fundido tiver sua rugosidade alterada para 0,002 m haverá alteração na vazão? Explicar a resposta.
- e)** Comparar o resultado obtido no item (c) e (d) com o que é obtido utilizando a fórmula de Hazen-Williams (que é inadequada para este caso).

Diagrama de Moody

