

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TUBOS DE FERRO FUNDIDO NACIONAIS

JOSÉ CERQUEIRA DIAS DE MORAES

D.A.E. — São Paulo

ANGELO A. R. NUNES

Engenheiro Consultor

JOSÉ FRANCISCO DIAS DE MORAES

Calculista

1 — INTRODUÇÃO

1.1 — Preliminares: Os tubos de ferro fundido cinzento, ou convencionais, como poderíamos denominá-los em face do novo material já em linha de fabricação, que é o tubo de ferro dúctil, têm sido por demais estudados e analisados, não havendo, pois, muita novidade a ser dita a seu respeito. Entretanto, ao iniciarmos outro trabalho, tivemos a necessidade de determinar a equação do peso destes tubos. Como conseqüência, nos aprofundamos um tanto sobre o assunto, tendo chegado a um desenvolvimento tal, que nos pareceu interessante apresentar este trabalho como sendo independente do seu objetivo inicial. Assim, êle se constituiu como um capítulo, ou como o primeiro capítulo de uma série de trabalhos que nos conduzirá, posteriormente, ao nosso objetivo final.

Ao conversarmos sobre este trabalho com alguns colegas, verificamos que a maioria deles desconhecia bastante o assunto aqui explorado, sugerindo-nos que o apresentasse ao público na presente oportunidade. E, assim o fizemos, sem mais nenhuma pretensão.

1.2 — Objetivos: o objetivo principal do presente trabalho consiste na obtenção da equação do peso dos tubos de ferro fundido cinzento centrifugado, de fabricação nacional, de um modo analiticamente correto, em função dos seus diâmetros nominais internos. Contudo, ao longo do trabalho desenvolvemos outros assuntos, e estabelecemos o conceito de "espessura equivalente", para chegarmos àquela equação.

Na verdade o trabalho todo se desdobrará em mais dois capítulos, a saber: a) determinação dos custos totais de uma linha de ferro fundido cinzento centrifugado; b) estudo de sistemas adutores ou sub-adutores complexos de gravidade hidráulicamente indeterminados. Tais trabalhos deverão vir a público posteriormente.

Além disso, a segunda parte do trabalho poderá ter, obviamente, outras aplicações.

1.3 — Aplicações: este trabalho, como foi elaborado, ainda não permite aplicações práticas imediatas, motivo pelo qual deixamos de apresentar um modelo de exercício de aplicação prática, como sempre costumamos fazer em nossos trabalhos.

1.4 — Limitações: o presente trabalho aplica-se exclusivamente aos tubos de ferro fundido cinzento centrifugado nacionais, sendo baseado nas normas brasileiras da ABNT que regem o assunto, e nos catálogos das duas grandes empresas que fabricam este material no país. Ele vale tanto para os tubos de junta de chumbo como para os de junta elástica, e, tão somente, para os tubos de classe Q, R, LA, A e B, ficando excluídos os das séries "gás", "esgotos" "ferro dúctil" e "flangeados", por não interessarem aos nossos estudos posteriores. Sobre o "ferro dúctil" poderá vir a público um trabalho especial.

Entretanto, a limitação mais importante consiste no fato de que os estudos se desenvolveram até aqui sem se fazer quaisquer considerações sobre o tubo "assentado", isto é, sem considerações sobre as

Nota: Trabalho apresentado ao V Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Julho, 1969, Recife.

cargas de cobertura de terra e as cargas variáveis. Assim, os trabalhos se desenvolveram considerando os tubos como sendo uma peça física, independentemente das conseqüências do seu assentamento no terreno, ou seja, das condições normais de trabalho no terreno.

Houve mais uma limitação: os estudos foram feitos para as dimensões normais dos tubos, não incluindo as tolerâncias admissíveis nas normas da ABNT.

1.5 — Agradecimentos: os autores do presente trabalho agradecem as informações prestadas por elementos da Cia. Ferro Brasileiro e Cia. Metalúrgica Barbará, que foram de inestimável valor no decorrer da elaboração dos trabalhos.

2 — DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 — Diâmetro e Espessura da Parede dos Tubos: a equação de resistência de um cilindro circular ôco (que é o caso dos tubos em geral), submetido à pressões internas, é dada por:

$$e = \frac{pd}{2\sigma} \quad (1.2)$$

e = espessura da parede do cilindro ou tubo
 d — diâmetro interno ou nominal do tubo
 p = pressão interna a que está sujeito o tubo
 σ = taxa de trabalho à tração do material do tubo

Esta equação encontra-se facilmente em qualquer tratado de resistência de materiais, assim como a sua dedução.

Chamando de:

e_r = espessura da parede do tubo para a pressão de ruptura.
 p_r = pressão de ruptura do tubo
 σ_a = taxa de trabalho de tração admissível para o material do tubo
 n = coeficiente de segurança
 p_t — pressão de trabalho máxima admissível para o tubo
 e_t = espessura da parede do tubo não assentado em condições normais de trabalho

Para haver estabilidade deve-se ter que:

$$p_r > p_t \quad (2.2)$$

ou

$$e_t > e_r \quad (2a.2)$$

As condições:

$$\begin{aligned} p_r &= p_t \\ e_t &= e_r \end{aligned} \quad (2b.2)$$

são perigosas, podendo levar facilmente o tubo ao estado de ruptura.

Note-se que a ruptura dos tubos (supostamente sem defeitos de fabricação), por excesso de pressão, dá-se sempre segundo uma ou duas geratrizes diametralmente opostas, e sempre na geratriz ou geratrizes onde as espessuras da parede são menores.

Da eq. (2.2) vem imediatamente:

$$n = \frac{p_r}{p_t} \quad (3.2)$$

$$p_t = \frac{p_r}{n} \quad (3a.2)$$

O coeficiente de segurança mínimo que se adota para os tubos de ferro fundido nacionais é de:

$$n_{\min} = 2,5 \quad (3b.2)$$

podendo, contudo, ser superior à este valor, como realmente ocorre na maioria dos casos.

Então, abstraindo-se das considerações que faremos adiante, a espessura de um tubo, para a pressão de trabalho p_t é dada por:

$$e_t = \frac{np_t d}{2\sigma_a} \quad (4.2)$$

Para um mesmo material homogêneo temos que:

$$\sigma_a = \text{constante} \quad (5.2)$$

e , também, para cada classe de tubos de ferro fundido temos que:

$$p_t = \text{constante} \quad (5a.2)$$

supondo, também que:

$$n = \text{constante} \quad (5b.2)$$

virá então:

$$k = \frac{np_t}{2\sigma_a} = \text{constante} \quad (5c.2)$$

para cada classe de tubo de ferro fundido. Dai, decorre imediatamente na eq. (4.2) que:

$$e_t = kd \quad (6.2)$$

ou seja, as espessuras das paredes dos tubos de mesmo material e sujeitos à mesma pressão de trabalho, e com mesmos coeficientes de segurança, são uma função linear dos diâmetros.

Para o ferro fundido cinzento esta equação é perfeitamente válida, porque êle no trabalho de tração, obedece estritamente a lei de Hooke, sendo que o seu diagrama de deformações é praticamente uma reta, terminando no ponto de ruptura do material.

2.2 — Pressões de Prova, de Trabalho e de Ruptura: os tubos de ferro fundido cinzento centrifugado, normalmente empregados em obras de saneamento no Brasil, são fabricados por duas empresas de grande porte, e que são a Cia. Ferro Brasileiro e Cia. Metalúrgica Barbará.

Consultando-se os seus mais recentes catálogos para tubos de ferro fundido cinzento centrifugado (não incluindo os de ferro dúctil), verifica-se que todos os tipos e classes de tubos, exclusive os já citados, obedecem às normas da ABNT com relação às espessuras das paredes, pesos, etc.

Segundo informam os catálogos daquelas empresas, ou antigos ou recentes, as pressões de prova não têm sido mantidas constantes ao longo do tempo, e há mesmo catálogos que nem fornecem pressão de prova para nenhuma classe de tubos.

Entretanto, considerando catálogos antigos e modernos, apresentamos alguns valores da pressão de prova, por ordem cronológica, sem indicação da origem de fabricação, e para juntas de chumbo:

Classe	P. Prova — kg/cm ²
LA	25 — 25 — 25
A	30 — 30 — 25
B	30 — 30 — 25

independentemente dos diâmetros

Para os tubos de junta elástica não são fornecidos dados de pressão de prova. Entretanto, como as espessuras e pesos por metro linear são os mesmos para as classes LA, A, e B de junta de chumbo, e como o material é o mesmo, é de se supor que as suas pressões de prova sejam as mesmas adotadas para os tubos de juntas de chumbo.

Os catálogos também não relacionam as pressões de prova com as pressões de serviço, o que nos parece um inconveniente, por trazer dificuldades à escolha da classe do tubo nos projetos de saneamento.

Com relação às pressões de ruptura os dados são escassos, mas neste trabalho chegar-se-á até lá.

2.3 — Verificação da Equação (6.2): as normas brasileiras para a fabricação de tubos de ferro fundido cinzento centrifugado fornecem as espessuras de fabricação dos tubos, em função dos diâ-

metros nominais e das classes dos tubos fabricados no país.

Estas normas são obedecidas rigorosamente pelas citadas empresas, sendo que as espessuras e pesos por metro linear não diferem entre os tubos de junta de chumbo e os de junta elástica. Isto nos conduz a conclusão de que, a resistência do tubo em si é a mesma para os tubos com estes dois tipos diferentes de juntas.

No Gráfico 2.1 constam as curvas de E_t (espessura de fabricação) em função dos diâmetros nominais e das classes de tubos.

Observando-se êste gráfico verifica-se que elas constituem uma família de retas, com coeficientes angulares muito próximos entre si. Isto quer dizer que na elaboração daquelas normas, manteve-se o valor de k como praticamente constante para cada classe de tubo, e ligeiramente variável entre as classes de cada tubo.

2.4 — Generalização da Equação (6.2): os tubos de ferro fundido cinzento centrifugados, como já vimos, são fabricados no Brasil pela Barbará e pela Ferro Brasileiro.

Consultando-se os seus mais recentes catálogos (exclusive os de ferro dúctil), verifica-se que todos os tipos e classes de tubos obedecem às normas brasileiras, não se considerando os das séries “gás”, “esgotos” e “flangeados”.

Ora, para a elaboração de projetos de sistemas de águas, os tubos das séries “gás”, “esgotos” e “flangeados” nunca são utilizados. Os tubos “flangeados” são usados tão somente em instalações localizadas ou isoladas, tais como estações de tratamento de água, de esgotos e de recalque e outras similares.

Assim, só são utilizados para os sistemas de água, tais como linhas de recalque, linhas e sistemas simples ou complexos de gravidade, rédes de distribuição, etc., os tubos das classes Q, R, LA, A e B, sendo a de classe LA a de uso mais generalizado.

Nestas condições, a eq. (6.2) torna-se perfeitamente válida, dentro do que será visto mais adiante, tornando-se para tais fins, perfeitamente geral.

2.5 — Considerações Sobre o Gráfico 2.1: na eq. (6.2) temos que para:

$$d = 0 \quad (7.2)$$

a espessura deveria ser nula, ou seja:

$$e_t = 0 \quad (7a.2)$$

Observando-se, contudo, o Gráfico 2.1 verifica-se que não ocorre a condição (7a.2) para o condição (7.2), sendo que para:

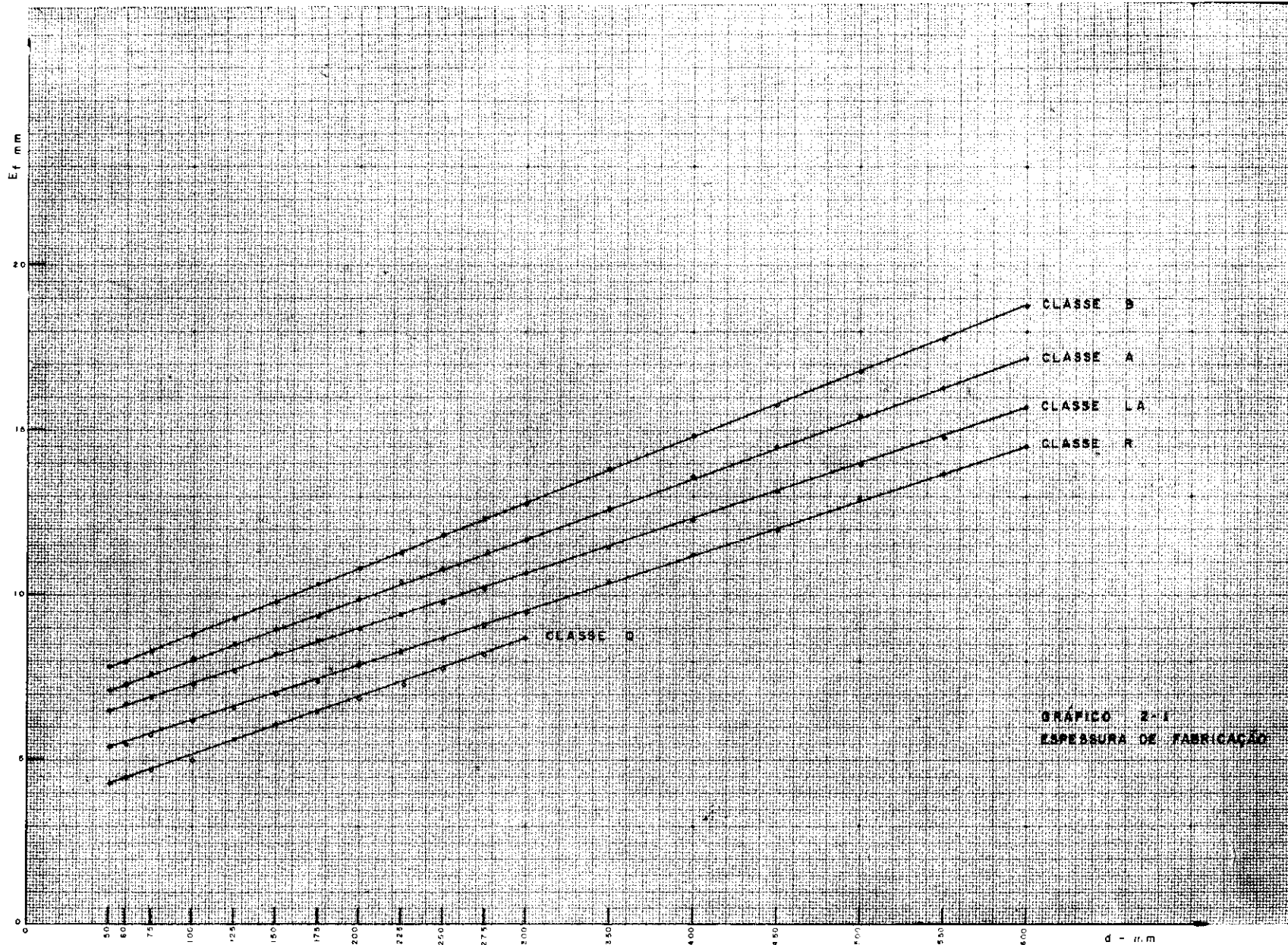


GRÁFICO 2-1
ESPESSURA DE FABRICAÇÃO

$$e_i = 0$$

o valor do diâmetro passa a ser negativo, ou seja

$$d < 0 \quad (7b.2)$$

o que seria um absurdo em face da eq. (6.2). Na realidade, as espessuras de fabricação "E_f" são maiores do que as fornecidas pela equação de resistência.

Este acréscimo na espessura de fabricação das paredes dos tubos, provavelmente é feito para:

- a) compensação aleatória para possíveis defeitos de fabricação;
- b) dar maior durabilidade aos tubos em face dos efeitos da corrosão;
- c) dar uma segurança extra na resistência dos tubos.

Com relação a este fato, já o Prof. Saliger (ref. 1), em sua obra, tratando sobre o dimensionamento de tubos de ferro fundido diz que se deve acrescentar um "suplemento de 0,7 cm inerente a la fundicion vertical" à espessura de cálculo dado pela eq. (6.2).

Evidentemente a técnica de fabricação dos tubos de ferro fundido evoluiu muito de lá para cá, mas, manteve-se o referido acréscimo, embora com valores diferentes, na atual fabricação de tubos de ferro fundido.

Não obstante o Prof. Saliger não justificar a razão do referido acréscimo, a sua autoridade em resistência dos materiais é suficiente para se aceitar, sem mais nada, este acréscimo na espessura da parede do tubo de ferro fundido, como uma condição "inerente" à sua técnica de fabricação.

Então, chamando de:

E_f = espessura de fabricação dos tubos de ferro fundido cinzento

e_a = acréscimo na espessura da parede dos tubos sobre a espessura de cálculo

virá imediatamente

$$E_f = e_a + e_i \quad (8.2)$$

Substituindo "e_i" da eq. (6.2), teremos então a equação da espessura de fabricação das paredes dos tubos de ferro cinzento centrifugado:

$$E_f = e_a + k d \quad (9.2)$$

que é uma equação linear.

Os valores "e_a" e "k" dependem exclusivamente da classe do tubo, e constam na Tabela 2.1. Estes

valores foram determinados por regressão linear, a partir dos valores dados na tabela das normas da ABNT.

TABELA 2.1

Valores de e_a e k — Eq (9.2)

CLASSE DO TUBO	e _a mm	k
Q	3,38	0,0176
R	4,52	0,0167
LA	5,65	0,0167
A	6,22	0,0183
B	6,80	0,0200

Na Tabela 2.2 constam os diâmetros por classes de tubos, e as espessuras dadas pela eq. (9.2) calculadas pelos valores da Tabela 2.1, e as espessuras das normas; os valores calculados foram aproximados para a 1ª casa decimal, para haver comparabilidade com as fornecidas pelas normas.

Como vemos, existem somente quatro valores discordantes de 0,1 mm. Isto não afeta a linearidade da eq. (9.2), em face de todos os outros valores serem plenamente concordantes.

Assim, a eq. (9.2) torna-se perfeitamente aplicável como equação linear da espessura de fabricação "E_f" em função dos diâmetros nominais "d". É o que vamos fazer mais adiante neste trabalho.

No gráfico 2.1 as retas são a representação gráfica da eq. (9.2) para os valores dados na Tabela 2.1, de "e_a" e "k". Os pequenos círculos representam os valores da espessura da parede dos tubos fornecidos pelas normas da ABNT. Verifica-se que a aderência é perfeita entre os valores calculados e os valores observados.

A linearidade da eq. (9.2) para os dados observados (espessura das normas) pode, aliás, ser verificada facilmente pelo coeficiente de correlação linear. Quando o seu valor é igual a unidade ou muito próximo dela, a função correspondente é perfeitamente linear ou muito próxima de tal função.

O coeficiente de correlação linear é dado por:

$$C_c = \frac{S_{ed}}{S_e \times S_d} \quad (9a.2)$$

Tabela 2.3

ESPESSURAS CALCULADAS E ESPESSURAS DAS NORMAS

d mm	CLASSE Q		CLASSE R		CLASSE LA		CLASSE A		CLASSE B	
	E_f mm	e mm	E_f mm	e mm	E_f mm	e mm	E_f mm	e mm	E_f mm	e mm
50	4,3	4,3	5,4	5,4	6,5	6,5	7,1	7,1	7,8	7,8
60	4,4 +	4,5	5,5	5,5	6,7	6,7	7,3	7,3	8,0	8,0
75	4,7	4,7	5,8	5,8	6,9	6,9	7,6	7,6	8,3	8,3
100	5,1 +	5,0	6,2	6,2	7,3	7,3	8,1	8,1	8,8	8,8
125	5,6	5,6	6,6	6,6	7,7	7,7	8,5	8,5	9,3	9,3
150	6,0	6,0	7,0	7,0	8,2	8,2	9,0	9,0	9,8	9,8
175	6,5	6,5	7,4	7,4	8,6	8,6	9,4	9,4	10,3	10,3
200	6,9	6,9	7,9	7,9	9,0	9,0	9,9	9,9	10,8	10,8
225	7,3	7,3	8,3	8,3	9,4	9,4	10,3 +	10,4	11,3	11,3
250	7,8	7,8	8,7	8,7	9,8	9,8	10,8 -	10,8	11,8	11,8
275	8,2	8,2	9,1	9,1	10,2	10,2	11,3	11,3	12,3	12,3
300	8,7	8,7	9,5	9,5	10,7	10,7	11,7	11,7	12,8	12,8
350			10,4	10,4	11,5	11,5	12,6	12,6	13,8	13,8
400			11,2	11,2	12,3	12,3	13,5 +	13,6	14,8	14,8
450			12,0	12,0	13,2	13,2	14,5 -	14,5	15,8	15,8
500			12,9	12,9	14,0	14,0	15,4	15,4	16,8	16,8
550			13,7	13,7	14,8	14,8	16,3	16,3	17,8	17,8
600			14,5	14,5	15,7	15,7	17,2	17,2	18,8	18,8

OBS.: E_f = espessura calculada pela eq. (9.2) e com dados da Tabela 2.1
e = espessura dada nas normas
+ = valores ligeiramente discordantes

C_c = coeficiente de correlação linear
 S_{ed} = covariância das espessuras e diâmetros
 S_e = raiz quadrada da variância das espessuras
 S_d = raiz quadrada da variância dos diâmetros

O coeficiente de correlação linear é sempre positivo, desprezando-se os valores negativos da covariância e das raízes quadradas das variâncias, e seu valor máximo é igual a unidade, que representa a linearidade perfeita da função em estudo.

Na Tabela 2.1a constam os coeficientes de correlação linear para tôdas as classes de tubos.

TABELA 2.1a
Coeficiente de Correlação Linear

CLASSE	C_c
Q	1,000
R	1,000
LA	1,000
A	1,000
B	0,999

Os valores de " C_c " da Tabela 2.1a mostram que a equação (9.2) é linear para os dados fornecidos pelas normas brasileiras da ABNT.

Por outro lado, a tolerância admitida pelas normas da ABNT, "para menos" é dada por:

$$t = 0,6 + 0,07 E_f \quad (9b.2)$$

o que nos fornece na eq. (9.2) o valor da espessura mínima de fabricação:

$$E_f \text{ min} = E_f - t = E_f - (0,6 + 0,07 E_f)$$

$$E_f \text{ min} = 0,93 E_f - 0,6 \quad (9c.2)$$

A observação da eq. (9c.2) com os valores da Tabela 2.1 mostra, à evidência, que os desvios entre os valores calculados de E_f e os das normas (observados) são menores do que os permitidos pelas tolerâncias estabelecidas nas normas da ABNT.

Dêste modo, poderemos aplicar a eq. (9.2) nos desenvolvimentos posteriores dêste trabalho, sem o menor receio de fugir à realidade.

2.6 — Pressões de Ruptura dos Tubos: aplicando a eq. (1.2) às pressões de ruptura teremos:

$$E_f = \frac{dp_r}{2 \sigma_a}$$

Ora, os valores de " E_f " são dados nas normas, os diâmetros " d " são conhecidos, e a taxa de trabalho a tração " σ_a " é estabelecida nas normas com o seguinte valor:

$$\sigma_a = 16 \text{ kg/mm}^2 = 1\,600 \text{ kg/cm}^2$$

Então a eq. (10.2) passa a ser:

$$p_r = \frac{2 \sigma_a E_f}{d} = \frac{2 \times 1\,600 E_f}{d} \quad (11.2)$$

$$p_r = \frac{3\,200 E_f}{d} \quad (11a.2)$$

em que

$$E_f, d = \text{em mm}$$

$$p_r = \text{em kg/cm}^2$$

Aplicando a eq. (11a.2) para todos os valores de " E_f " e " d " para tôdas as classes, teremos a Tabela 2.3, que fornece as pressões de ruptura dos tubos de ferro fundido cinzento centrifugados, fabricados no Brasil.

Observe-se que o valor de " σ_a " de 16 kg/mm² é um valor conservativo, adotado pelas normas brasileiras. Na verdade o seu valor é da ordem de 20 kg/mm², o que aumentará ainda mais o valor das pressões de ruptura dos tubos segundo a eq. (11.2).

Substituindo a eq. (9.2) na eq. (11.2) teremos:

$$p_r = \frac{2 \sigma_a}{d} \times (e_s + kd) \quad (12.2)$$

simplificando vem:

$$p_r = 2 \sigma_a k + \frac{2 e_s \sigma_a}{d} \quad (12a.2)$$

Esta equação mostra que a pressão de ruptura é função de um termo constante $2 \sigma_a k$, que é função da classe do tubo, e de um termo variável, que é função da classe do tubo e dos diâmetros.

Com os valores da Tabela 2.3 construímos o Gráfico 2.2, que mostra que os valores da pressão de ruptura em função dos diâmetros formam uma hipérbole não equilátera, e que as classes de tubos constituem uma família de hipérbolas não equiláteras.

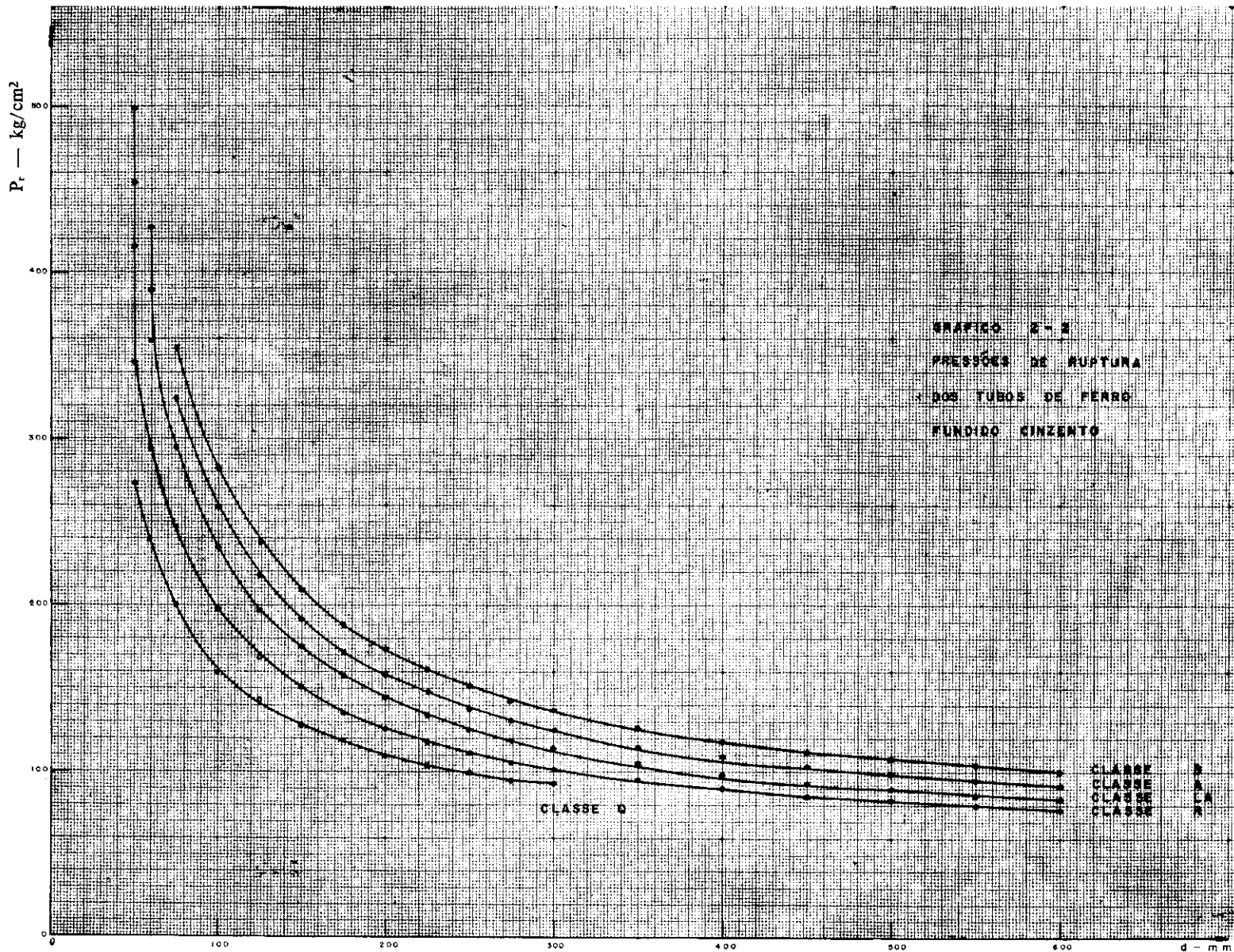
Observando-se a Tabela 2.3, conclui-se que as pressões de ruptura dos tubos de ferro fundido cinzento centrifugados nacionais, são extremamente altas com relação às pressões de serviço inicialmente empregadas para cada classe.

Como exemplo, pode-se ver que o tubo de 50 mm de diâmetro da classe B se rompe com a pres-

Tabela 2.3

PRESSÕES DE RUPTURA DOS TUBOS DE FERRO FUNDIDO
KG/CM²

d mm	CLASSES				
	Q	R	LA	A	B
50	275	346	416	454	499
60	240	293	359	389	427
75	201	247	294	324	354
100	160	198	234	259	282
125	143	169	197	218	238
150	128	149	175	192	209
175	119	135	157	172	188
200	110	126	144	158	173
225	104	118	134	148	161
250	100	111	125	138	151
275	95	106	119	131	143
300	93	101	114	125	137
350		95	105	115	126
400		90	98	109	118
450		85	94	103	112
500		83	90	99	108
550		80	86	95	104
600		77	84	92	100



são le 499 kg/cm², ou com uma altura de coluna de água de 4 990 m.

Por outro lado, o tubo mais fraco é o da classe R de 600 mm de diâmetro, que se rompe com uma carga de água de 770 m.

A relação entre as pressões mínimas de ruptura e a pressão normal de ruptura p_r será dada por:

$$\rho = \frac{p_{r \min}}{p_r} \quad (12b.2)$$

ρ = relação entre as pressões mínima e normal de ruptura

$p_{r \min}$ = pressão mínima de ruptura

p_r = pressão normal de ruptura

Considerando a eq. (11.2) na eq. (12b.2) teremos sucessivamente:

$$\rho = \frac{\frac{2 \sigma_a E_{f \min}}{d}}{2 \sigma_a E_f} = \frac{E_{f \min}}{E_f} \quad (12c.2)$$

Substituindo $E_{f \min}$ da eq. (9c.2) teremos na eq. (12c.2):

$$\rho = \frac{0,93 E_f - 0,6}{E_f} = 0,93 - \frac{0,6}{E_f} \quad (13c.2)$$

Considerando a eq. (9.2) virá finalmente na eq. (13c.2):

$$\rho = 0,93 - \frac{0,6}{e_a + kd} \quad (13d.2)$$

O segundo termo da eq. (13d.2) diminui sucessivamente quando se passa da classe Q para R, R para LA etc, assim como com o aumento do diâmetro nominal. Diminuindo o segundo termo daquela equação, evidentemente aumenta o valor de ρ .

Assim, se pode concluir que as pressões mínimas de ruptura aumentam de acordo com as classes de tubos mais reforçados, o que é evidente, como também com o aumento dos diâmetros nominais.

De um modo geral, pode-se, pois, afirmar que as pressões mínimas de ruptura assumem sempre um valor maior do que 93% das pressões normais de ruptura, ou sejam:

$$p_{r \min} > 0,93 p_r \quad (13e.2)$$

pois o segundo termo da eq. (13d.2) nunca é nulo.

Pode-se obter qualquer valor de ρ , pois os valores de E_f são dados na Tabela 2.1. Obtendo-se o valor de ρ , determina-se o valor da pressão mínima de ruptura pela eq. (12b.2), pois os valores da pressão normal de ruptura p_r são dados na Tabela 2.3.

2.7 — Equação do Pêso dos Tubos: a área da parede de um tubo numa seção perpendicular ao seu eixo é:

$$S = \pi (R^2 - r^2) \quad (13.2)$$

S = área do anel circular (parede) na seção perpendicular ao eixo do tubo

R = raio externo do tubo

r = raio interno do tubo

O raio externo do tubo é dado por:

$$R = E_f + r \quad (14.2)$$

Elevando ao quadrado e compondo vem:

$$R^2 - r^2 = E_f^2 + d E_f \quad (14a.2)$$

d = diâmetro interno do tubo

Substituindo na eq. (13.2) teremos:

$$S = \pi (E_f^2 + d E_f) \quad (15.2)$$

O pêso do tubo por unidade de comprimento é:

$$P = \delta S \quad (16.2)$$

P = pêso do tubo por unidade de comprimento

δ = pêso específico do material do tubo

Substituindo "S" da eq. (15.2) na eq. (16.2) vem:

$$P = \pi \delta (E_f^2 + d E_f) \quad (17.2)$$

Considerando a eq. (9.2) virá:

$$P = \pi \delta [(e_a + kd)^2 + (e_a + kd) d] \quad (18.2)$$

desenvolvendo e ordenando o segundo membro em relação a "d" teremos:

$$P = \pi \delta e_a^2 + \pi \delta e_a (2k + 1) d + \pi \delta (k + k^2) d^2 \quad (18a.2)$$

Fazendo:

$$A_0 = \pi \delta e_a^2$$

$$A_1 = \pi \delta e_a (2k + 1) \quad (19.2)$$

$$A_2 = \pi \delta (k + k^2)$$

virá finalmente, na eq. (18a.2):

$$P = A_0 + A_1 d + A_2 d^2 \quad (20.2)$$

que nos fornece a equação do peso dos tubos de ferro fundido centrifugado por unidade de comprimento, em função dos seus diâmetros nominais.

Os valores de "A₀", "A₁" e "A₂" são função exclusiva da classe do tubo considerado, pois "e_a" e "k" também o são.

Verifica-se que o peso dos tubos em estudo, por unidade de comprimento, é uma função de um polinômio do 2.º grau.

A equação obtida acima difere da apresentada por outro autor em seu excelente trabalho (ref. 2), pois aquele autor obteve no segundo membro um polinômio do 3.º grau.

Ocorre, entretanto que, calculando-se os coeficientes A₀, A₁, e A₂ pelos valores de "e_a" e "k", e depois aplicando-se à eq. (20.2) não se obtém os valores dos pesos dos tubos por metro linear dados nos catálogos, mas sim valores menores do que os reais.

Esta anomalia se deve ao fato de que a eq. (20.2) foi deduzida para uma canalização de espessura contínua. Esta continuidade não existe nos tubos de ponta e bolsa, pois a bolsa não só não conta no comprimento útil do tubo, como também é de maior diâmetro interno e de maior espessura do que a espessura nominal do próprio tubo. Assim há uma acumulação de peso na bolsa, o que altera os resultados dos coeficientes dados nas eq. (19.2), para os valores já determinados de "e_a" e "k".

Para corrigir esta anomalia estabelecemos o conceito de "espessura equivalente", que será estudado em seguida.

2.8 — Espessura Equivalente: definimos como espessura equivalente "à espessura fictícia que teria um tubo por metro linear de comprimento, calculada a partir dos pesos dos tubos apresentados nos catálogos dos fabricantes".

Com isto, a acumulação do peso na bolsa fica uniformemente distribuída ao longo do tubo, por metro linear de comprimento.

Mantendo-se o mesmo diâmetro interno nominal do tubo teremos que o diâmetro equivalente externo seria dado por:

$$D_e = d + 2 E_e \quad (21.2)$$

D_e = diâmetro equivalente externo do tubo

d = diâmetro interno nominal do tubo

E_e = espessura equivalente da parede do tubo

A seção equivalente será dada por:

$$A_e = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d^2) \quad (22.2)$$

Da equação acima se obtém D_e:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 A_e}{\pi} + d^2} \quad (23.2)$$

O volume equivalente da massa de ferro fundido por metro linear de comprimento será dado por:

$$V_e = 1 \times A_e = A_e \quad (24.2)$$

Entretanto o peso daquela massa de ferro fundido é:

$$P = \delta V_e \quad (25.2)$$

δ = peso específico do ferro fundido

Considerando a eq. (24.2) teremos na eq. (25.2)

$$P = \delta A_e \quad (26.2)$$

de onde vem

$$A_e = \frac{P}{\delta} \quad (26a.2)$$

que substituindo na eq. (23.2) dará:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 P}{\pi \delta} + d^2} \quad (27.2)$$

e a espessura equivalente na eq. (21.2) passa a ser finalmente:

$$E_e = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4 P}{\pi \delta} + d^2} - \frac{d}{2} \quad (28.2)$$

O peso "P" é dado nos catálogos da Cia. Ferro Brasileira e da Cia. Metalúrgica Barbará, sendo iguais por classes e diâmetros dos tubos nos dois catálogos, salvo erro de impressão.

Pela eq. (28.2) calculamos os valores das espessuras equivalentes para tôdas as classes e diâmetros de tubos, a partir dos valores de "P" dados nos catálogos e para

$$\delta = 7\,250 \text{ kg/m}^3$$

que é um valor aceitável para o peso específico do ferro fundido cinzento centrifugado.

Substituindo as constantes na eq. (28.2) teremos:

$$E_e = \frac{1}{2} \sqrt{175,62 \times 10^{-6} \times P + d^2} - \frac{d}{2} \quad (28a.2)$$

Os resultados constam da Tabela 2.4.

Observando-se a Tabela 2.4 verifica-se que a distribuição da massa acumulada na bolsa, ao longo de todo o tubo, não aumentou muito a espessura equivalente sobre a espessura nominal. Mas é o suficiente para corrigir os coeficientes A₀, A₁ e A₂ da eq. (20.2), de modo a tornar exata a aplicação desta equação nos nossos trabalhos posteriores.

Com os resultados obtidos na Tabela 2.4 construímos o Gráfico 2.3. Neste gráfico os valores de

Tabela 3.4
DIÂMETROS NOMINAIS, ESPESSURAS NORMALIZADAS E ESPESSURAS EQUIVALENTES

d mm	CLASSE Q		CLASSE R		CLASSE LA		CLASSE A		CLASSE B	
	e mm	E _e mm	e mm	E _e mm	e mm	E _e mm	e mm	E _e mm	e mm	E _e mm
50	4,3	5,55	5,4	6,60	6,5	7,60	7,1	8,30	7,8	8,95
60	4,5	5,55	5,5	6,60	6,7	7,75	7,3	8,35	8,0	8,90
75	4,7	5,95	5,8	6,95	6,9	7,95	7,6	8,90	8,3	9,35
100	5,0	5,75	6,2	7,00	7,3	8,10	8,1	8,90	8,8	9,25
125	5,6	6,30	6,6	7,30	7,7	8,55	8,5	9,20	9,3	9,80
150	6,0	6,70	7,0	7,85	8,2	8,85	9,0	9,65	9,8	10,40
200	6,9	7,60	7,9	8,65	9,0	9,85	9,9	10,65	10,8	11,40
250	7,8	8,65	8,7	9,50	9,8	10,60	10,8	11,60	11,8	12,55
300	8,7	9,50	9,5	10,35	10,7	11,55	11,7	12,50	12,8	13,45
350			10,4	11,20	11,5	12,45	12,6	13,45	13,8	14,55
400			11,2	12,05	12,3	13,30	13,6	14,50	14,8	15,55
450			12,0	12,90	13,2	14,10	14,5	15,40	15,8	16,65
500			12,9	13,85	14,0	15,00	15,4	16,40	16,8	17,65
550			13,7	14,70	14,8	15,85	16,3	17,45	17,8	18,70
600			14,5	15,55	15,7	16,75	17,2	18,25	18,8	19,70

OBS.: e = espessura dada nas normas

E_e = espessura equivalente calculada pela eq. (28a.2)

E_e tirados da Tabela 2.4 aparecem como pequenos círculos. Verifica-se no mesmo que existem anormalidades nas espessuras equivalentes para tôdas as classes de tubos nos diâmetros de 50 mm, 60 mm e 75 mm. A partir do diâmetro de 100 mm em diante as curvas das E_e em função dos diâmetros nominais constituem praticamente uma família de retas, tal como no Gráfico 2.1 para as espessuras nominais.

Aquela anormalidade se explica fàcilmente, se se considerar que as bolsas dos tubos daqueles diâmetros, constituem um contra-pêso muito grande em relação às espessuras nominais, de modo que aumentam por demais as espessuras equivalentes.

Entretanto, para os nossos trabalhos posteriores nunca serão utilizados tubos de diâmetros inferiores a 100 mm. Dêste modo, no presente trabalho faremos o tratamento matemático sômente para os tubos de 100 mm de diâmetro para cima, desprezando os inferiores.

2.9 — Equações de Regressão das Espessuras Equivalentes: foram determinadas as equações lineares de regressão para as espessuras equivalentes, em função dos diâmetros nominais, desprezando-se para tanto os diâmetros inferiores a 100 mm.

Estas equações têm a mesma forma da eq. (9.2):

$$E_{er} = E_n + Kd \quad (29.2)$$

Os valores das constantes " E_n " e " K " foram determinadas por regressão linear, e constam na Tabela 2.5. Estes valores dependem exclusivamente da classe do tubo.

TABELA 2.5

Valores de E_n e K — E_n (29.2)

CLASSE DO TUBO	E_n mm	K
Q	3,903	0,01874
R	5,214	0,01719
LA	6,338	0,01718
A	6,842	0,01908
B	7,230	0,02086

Comparando esta tabela com a Tabela 2.1 (para espessuras nominais) verifica-se, como era de se supor, que os valores das constantes são maiores para as espessuras equivalentes em relação às espessuras nominais.

Aplicando-se os valores da Tabela 2.5 na eq. (29.2) para tôdas as classes e todos os diâmetros

acima de 100 mm construímos a Tabela 2.6, onde aparecem as espessuras equivalentes como originalmente calculadas (pela eq. 28a.2) e as determinadas pela eq. (29.2) das retas de regressão.

Observando-se a Tabela 2.6 verifica-se que os valores de E_e são praticamente iguais aos calculados pela eq. (29.2) de regressão, com as constantes da Tabela 2.5.

Com os dados da Tabela 2.6 construímos o Gráfico 2.3, onde se verifica a perfeita aderência entre os valores de E_{er} (retas) e E_e (círculos), para os diâmetros de 100 mm para cima.

Aplicando a eq. (9a.2) para os coeficientes de correlação linear entre as espessuras E_e (que funcionam neste caso como dados observados) e os diâmetros, teremos os coeficientes de correlação na Tabela 2.7.

TABELA 2.7

Coeficientes de Correlação Linear

CLASSE	C_{E_e}
Q	0,999
R	1,000
LA	1,000
A	1,000
B	1,000

Os valores de C_{E_e} da Tabela 2.7 mostram claramente que a eq. (29.2) é perfeitamente linear.

2.10 — Determinação dos Coeficientes A_0 , A_1 e A_2 : com a substituição das espessuras nominais (das normas) pelas espessuras equivalentes, os coeficientes das eq. (19.2) passam a ter as seguinte expressões:

$$A_0 = \pi \delta E_n^2$$

$$A_1 = \pi \delta E_n (2K + 1) \quad (30.2)$$

$$A_2 = \pi \delta (K + K^2)$$

valendo do mesmo modo para a eq. (20.2) do pêso dos tubos.

Tomando os valores de E_n e K da Tabela 2.5, e fazendo

$$\delta = 7\,250 \text{ kg/m}$$

calculamos os coeficientes A_0 , A_1 e A_2 , os quais constam da Tabela 2.8.

Tabela 2.6
 VALORES DE E_{et} - Eq. (29.2)
 VALORES DE E_e - Eq. (28a.2)

d mm	CLASSE Q		CLASSE R		CLASSE LA		CLASSE A		CLASSE B	
	E_e mm	E_{et} mm	E_e mm	E_{et} mm	E_e mm	E_{et} mm	E_e mm	E_{et} mm	E_e mm	E_{et} mm
100	5,75	5,78	7,00	6,93	8,10	8,06	8,90	8,75	9,25	9,32
125	6,30	6,25	7,30	7,36	8,55	8,49	9,20	9,23	9,80	9,84
150	6,70	6,71	7,85	7,79	8,85	8,92	9,65	9,70	10,40	10,36
200	7,60	7,65	8,65	8,65	9,85	9,77	10,65	10,66	11,40	11,40
250	8,65	8,59	9,50	9,51	10,60	10,63	11,60	11,61	12,55	12,45
300	9,50	9,53	10,35	10,37	11,55	11,49	12,50	12,57	13,45	13,49
350			11,20	11,23	12,45	12,35	13,45	13,52	14,55	14,53
400			12,05	12,09	13,30	13,21	14,50	14,47	15,55	15,57
450			12,90	12,95	14,10	14,07	15,40	15,43	16,65	16,62
500			13,85	13,81	15,00	14,93	16,40	16,38	17,65	17,66
550			14,70	14,67	15,85	15,79	17,75	17,34	18,70	18,70
600			15,55	15,53	16,75	16,65	18,25	18,29	19,70	19,75

E_e mm

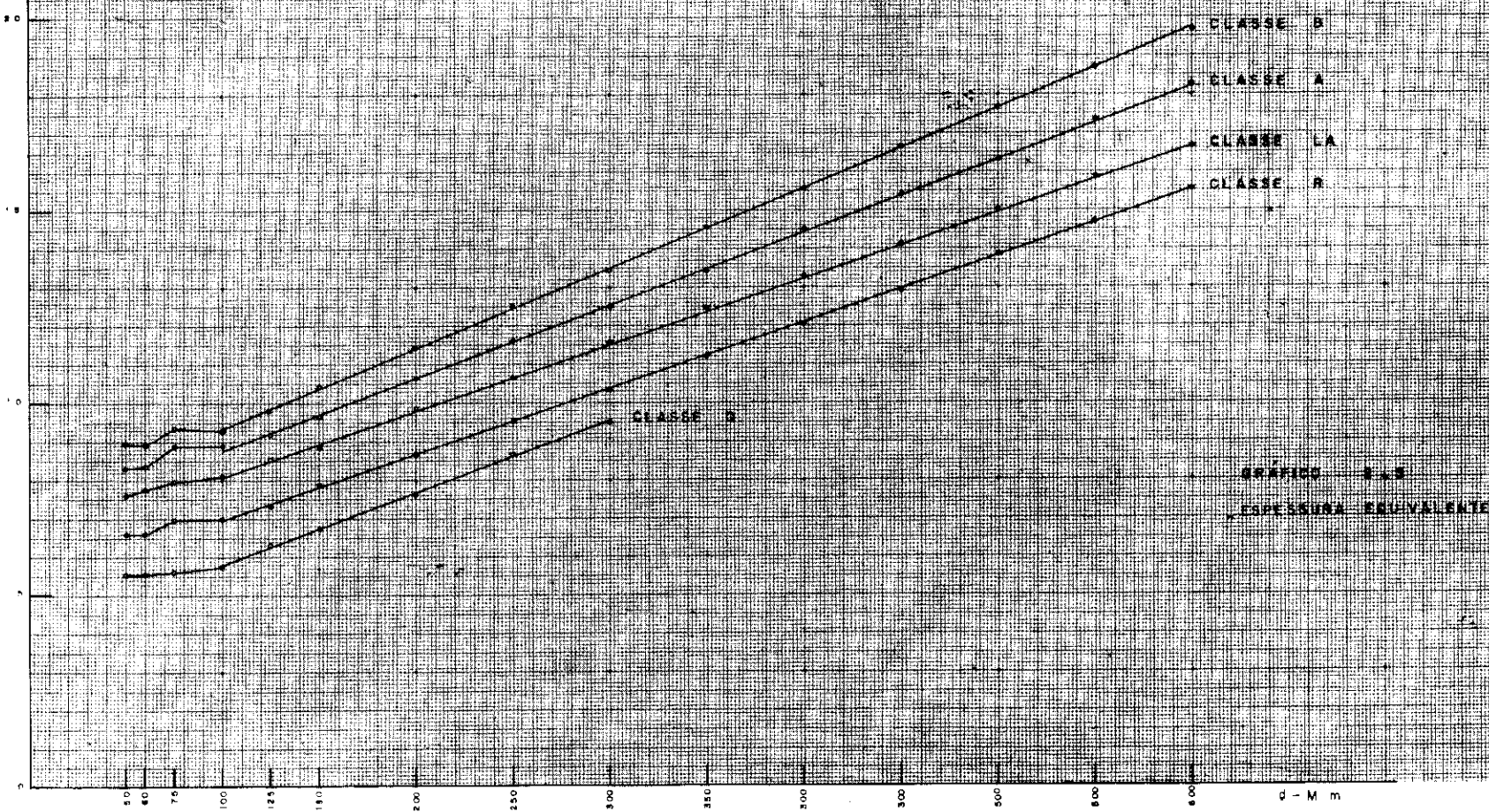


GRAFICO 2-5
SPESORE EQUIVALENTE

Tabela 2.9
VERIFICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO PÊSO DOS TUBOS - Eq. (20.2)

d m	CLASSE Q				CLASSE R				CLASSE LA				CLASSE A				CLASSE B			
	P _Q kg/m	P _C kg/m	P _Q - P _C kg/m	ε %	P _R kg/m	P _C kg/m	P _R - P _C kg/m	ε %	P _{LA} kg/m	P _C kg/m	P _{LA} - P _C kg/m	ε %	P _A kg/m	P _C kg/m	P _A - P _C kg/m	ε %	P _B kg/m	P _C kg/m	P _B - P _C kg/m	ε %
0,100	13,918	14,000	- 0,082	- 0,58	16,887	17,000	- 0,113	- 0,66	19,828	20,000	- 0,172	- 0,86	21,874	22,000	- 0,326	- 1,48	23,197	23,000	+ 0,197	+ 0,86
0,125	18,870	19,000	- 0,330	- 1,74	22,198	22,000	+ 0,198	+ 0,90	25,800	26,000	- 0,200	- 0,77	28,210	28,000	+ 0,210	+ 0,73	30,214	30,000	+ 0,214	+ 0,71
0,150	23,985	24,000	- 0,035	- 0,01	28,008	28,000	+ 0,008	+ 0,03	32,271	32,000	+ 0,271	+ 0,85	35,300	35,000	+ 0,300	+ 0,86	37,838	38,000	- 0,162	- 0,43
0,200	36,186	36,000	+ 0,186	+ 0,52	40,782	41,000	- 0,218	+ 0,53	46,703	47,000	- 0,297	- 0,63	51,140	51,000	+ 0,140	+ 0,27	54,903	55,000	- 0,097	- 0,18
0,250	50,581	51,000	- 0,419	- 0,82	58,224	58,000	+ 0,224	+ 0,40	63,126	63,000	+ 0,126	+ 0,20	69,195	69,000	+ 0,195	+ 0,28	74,395	75,000	- 0,605	- 0,81
0,300	67,150	67,000	+ 0,150	+ 0,22	73,318	73,000	+ 0,318	+ 0,44	81,538	82,000	- 0,462	- 0,56	89,463	89,000	+ 0,463	+ 0,52	96,311	98,000	+ 0,311	+ 0,32
0,350					92,405	92,000	+ 0,405	+ 0,44	101,941	103,000	- 1,059	- 1,03	111,947	111,000	+ 0,947	+ 0,85	120,654	121,000	- 0,346	- 0,29
0,400					113,482	113,000	+ 0,482	+ 0,43	124,333	125,000	- 0,667	- 0,53	136,644	137,000	- 0,356	- 0,26	147,421	147,000	+ 0,421	+ 0,29
0,450					136,552	136,000	+ 0,552	+ 0,41	148,717	149,000	- 0,283	- 0,19	163,557	163,000	+ 0,537	+ 0,34	176,614	177,000	- 0,386	- 0,22
0,500					161,612	162,000	- 0,388	- 0,24	175,090	176,000	- 0,910	- 0,52	192,664	192,000	+ 0,664	+ 0,35	208,231	208,000	+ 0,231	+ 0,11
0,550					188,664	189,000	- 0,336	- 0,18	203,088	204,000	- 0,912	- 0,45	224,025	223,000	+ 1,025	+ 0,46	242,275	242,000	+ 0,275	+ 0,12
0,600					217,706	218,000	- 0,294	- 0,13	233,807	235,000	- 1,193	- 0,51	257,580	256,000	+ 1,580	+ 0,62	278,105	278,000	+ 0,105	+ 0,04

Obs.: P_Q, P_R, P_{LA}, P_A, e P_B = pesos calculados pelas equações do pêso
P_C = pêso dado nos catálogos para a classe e diâmetros correspondentes
P - P_C = desvios entre os pesos calculados e os dos catálogos
 $\epsilon = \frac{P - P_C}{P_C} \times 100$ = erros relativos, em %

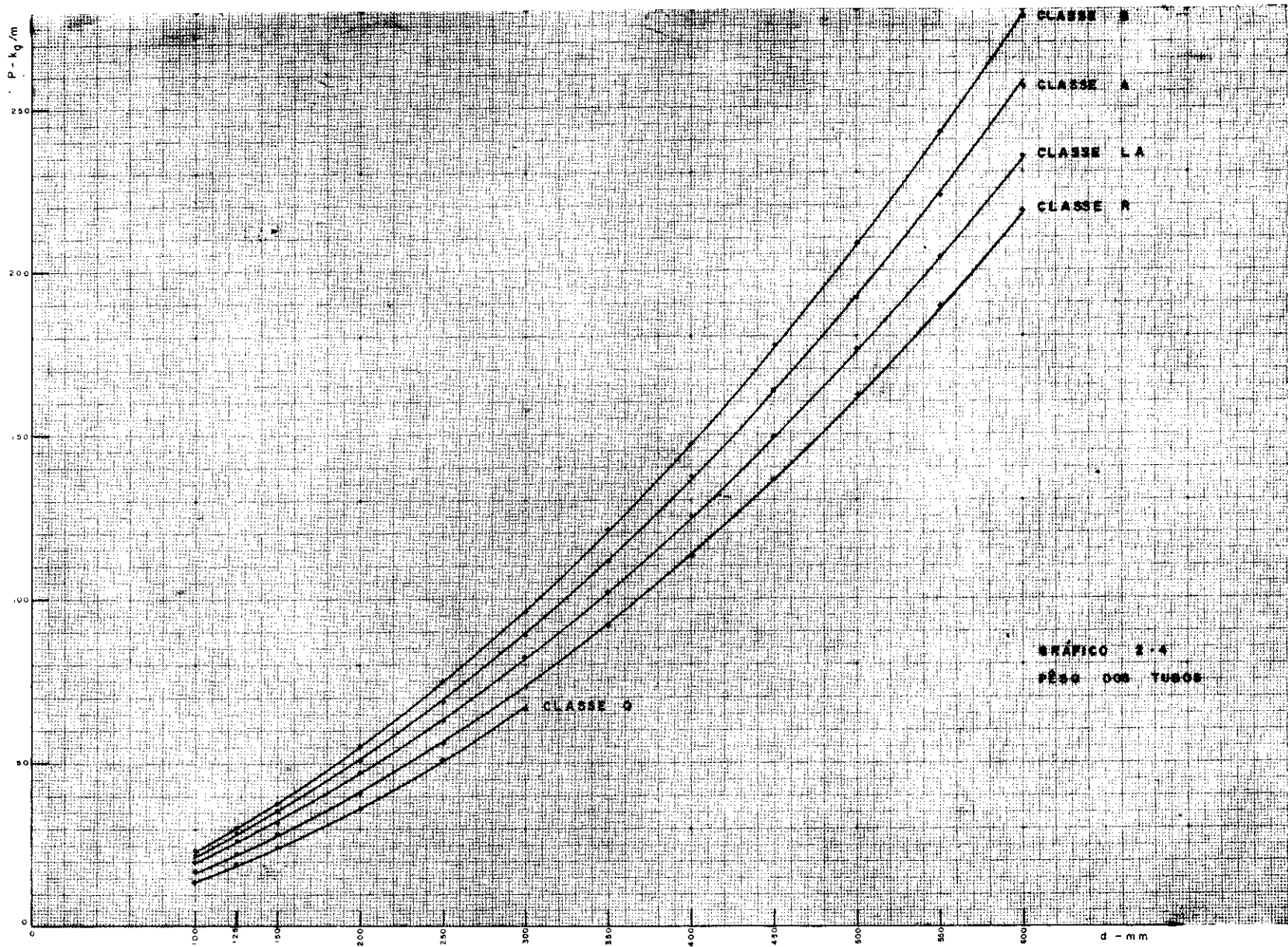


TABELA 2.8

Coefficientes A_0 , A_1 e A_2 — eq. (20.2) e 30.2)

CLASSE	A_0 kg/m	A_1 kg/m ²	A_2 kg/m ³
Q	0,347	92,23	434,82
R	0,619	122,85	398,27
LA	0,915	149,33	398,04
A	1,066	161,79	442,89
B	1,191	171,55	485,06

Os valores de A_0 , A_1 e A_2 dependem exclusivamente da classe do tubo.

2.11 — Verificação da Equação do Pêso dos Tubos: atribuindo à eq. (20.2) do pêso dos tubos por metro linear de comprimento os valores de A_0 , A_1 e A_2 da Tabela 2.8, teremos então as cinco equações seguintes:

CLASSE DO TUBO

EQUAÇÃO DO PÊSO

Q	$P_Q = 0,347 + 92,23 d + 434,82 d^2$
R	$P_R = 0,619 + 122,85 d + 398,27 d^2$
LA	$P_{LA} = 0,915 + 149,33 d + 398,04 d^2$
A	$P_A = 1,066 + 161,79 d + 442,89 d^2$
B	$P_B = 1,191 + 171,55 d + 485,06 d^2$

Nestas equações temos:

- a — pesos P dados em kg/m
- b — diâmetros d dados em metros
- c — aplicabilidade: para tôdas as classes especificadas, para diâmetros de 100 mm (in-

clusive) até 600 mm, e para tubos de ferro fundido cinzento centrifugados, com juntas de chumbo e elásticas.

Como se verifica, a sua aplicabilidade inclui todo o campo normalmente abrangido pelos sistemas hidráulicos de recalque, adução e sub-adiução por sistemas de gravidade simples ou complexos, hidráulicamente determinados ou indeterminados, nas obras de saneamento da maioria das nossas cidades do interior.

Aplicando às equações acima os valores dos diâmetros nominais dos tubos a partir de 100 mm até 600 mm, construímos a Tabela 2.9, na qual constam todos os elementos para a verificação da precisão dos resultados obtidos com aquelas equações.

Observando-se a Tabela 2.9 verifica-se que os valores calculados do pêso conferem bastante com os dos catálogos.

Os erros relativos são desprezíveis, menores do que as tolerâncias permitidas pelas normas.

Com a Tabela 2.9 construímos o Gráfico 2.4. Neste gráfico as curvas representam as equações do pêso por classe de tubo e diâmetros. Elas constituem uma família de parábolas do 2.º grau. A aderência dos pontos observados com as curvas teóricas é perfeita.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — SALIGER, R. — “Estática Aplicada”, 2.ª Edição, 3.ª impressão, Editorial Labor S/A, 1946, pg. 129, Exemplo 3.º.
- 2 — TELES, ENIO GONÇALVES — “Novo Processo para Determinação do Diâmetro mais Econômico para Adução de Recalque”, Revista DAE n.º 65, junho 1967, pg. 18.