

Influência de revestimentos externos em tubulações industriais sobre dados de medição de vazão em sistemas de combate a incêndio, obtidos com o medidor ultrassônico portátil TransPort-PT878 da GE

Leandro P. L., Joase S. F., Ricardo A. B. M.
Petrobras, Brasil

Eduardo R.B.
Atnas Engenharia, Brasil

1. INTRODUÇÃO

A norma NFPA 25 [1] padroniza os testes em tubulações de redes de água de combate a incêndio. Para avaliar a integridade dessas tubulações, esses testes são realizados com o uso do medidor de vazão ultrassônico. O princípio básico dos diversos modelos é emitir ondas acústicas em fase sobre a superfície da tubulação, e medir a diferença de fase entre as ondas recebidas em dois pontos separados por uma distância determinada pelo próprio equipamento. Sendo a diferença de fase crescente com a velocidade do fluido na tubulação, o equipamento utiliza as velocidades de propagação da onda acústica nas diferentes interfaces para ajustar o coeficiente de proporcionalidade entre a diferença de fase e a velocidade do fluido. Com a velocidade do fluido medida e as variáveis dimensionais fornecidas na calibração, como diâmetro externo e espessura da parede do tubo, pode-se calcular a vazão instantânea no trecho onde os sensores estão instalados.

Segundo o manual do medidor de vazão portátil TransPort-PT878 [2], os transdutores convertem energia elétrica em pulsos ultrassônicos em um ciclo de transmissão, e convertem os pulsos ultrassônicos de volta em energia elétrica no ciclo de recebimento. A conversão imediata de deformação mecânica em diferença de potencial e vice-versa pode ser obtida através de cristais com características piezoelétricas. O módulo eletrônico gera uma oscilação na tensão elétrica que o cristal contido em cada transdutor transforma em onda acústica com frequência ultrassônica; quando o fluido dentro da tubulação está parado, as ondas recebidas pelos transdutores estarão em fase; quando o fluido está escoando, a onda proveniente de um transdutor chegará mais rápido em um sentido que a onda vinda do outro transdutor, gerando uma diferença de fase; as ondas são novamente convertidas em sinal elétrico; a diferença de fase gera uma diferença alternada de potencial elétrico com a mesma frequência da fonte acústica.

Deste modo, torna-se importante avaliar a influência do revestimento externo nos resultados das medições de vazão.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Comparar, em tubulações de redes de água de combate a incêndio, medições de vazão de água obtidas em trechos com e sem revestimento, compreendendo a influência de uma interface de cobertura nas medições realizadas pelo medidor ultrassônico portátil GE, modelo PT 878.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

3.1 Modelo teórico

3.1.1 Propagação de ondas

Para entendimento da dinâmica de propagação das ondas em uma tubulação, de acordo com Yilmaz [3], são colocadas as seguintes definições:

- **Ondas transversais:** o campo de pressão se propaga através da oscilação das partículas do meio na direção perpendicular à direção da propagação.
- **Ondas longitudinais (acústicas):** as partículas do meio oscilam na mesma direção da propagação da onda.
- **Meio elástico:** meio sólido, onde podem se propagar ondas transversais e longitudinais. Exemplos: a parede do tubo e o revestimento.

• **Meio acústico:** meio fluído (líquido ou gasoso), onde apenas ondas longitudinais podem se propagar. Exemplo: a água.

Um meio elástico homogêneo e isotrópico possui como propriedades uma velocidade v_p de propagação da onda transversal e outra velocidade v_s da onda transversal, onde geralmente $v_p > v_s$. Em um meio acústico a onda transversal não se propaga. A partir dessa definição, como a água que passa pela tubulação é um meio acústico, as ondas transversais que chegam ao transdutor não trazem informação sobre o fluído, e é considerada como ruído.

A propagação das ondas ocorre através de meios cuja seção longitudinal está disposta em camadas retas com espessuras diferentes. Em cada interface (fronteira entre duas camadas de materiais diferentes), ocorrem os fenômenos de refração e reflexão das ondas. Mesmo na incidência de uma onda longitudinal, a interação com a interface pode resultar em ondas transversais refletidas e refratadas. A figura 1 a seguir mostra como se comporta uma onda acústica se propagando em um meio elástico ao atingir uma interface com outro meio elástico. Nesta figura, o meio 1 tem velocidades de propagação menores que o meio 2. Traçando uma reta perpendicular à interface no ponto de incidência de um raio de onda acústica incidente, o ângulo que o raio da onda acústica refletida faz com esta reta (reta normal) é igual ao ângulo do raio da onda incidente, porém os raios estão espelhados em relação à reta normal. Já a relação entre os ângulos do raio incidente e do raio refratado (o que atravessa a interface). para a onda acústica, é dada pela Lei de Snell, da equação 1 abaixo.

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \quad (1)$$

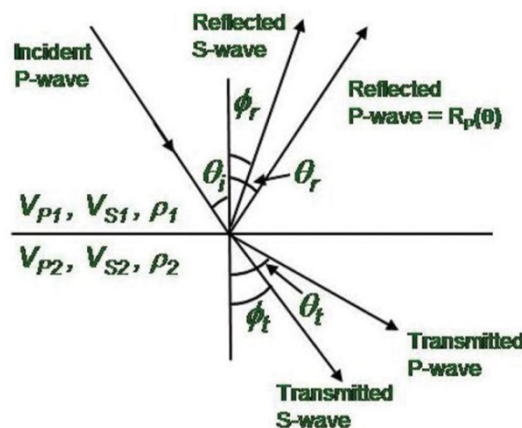


Figura 1 - Dinâmica de espalhamento de uma onda acústica incidente

Sendo ρ_1 e ρ_2 as respectivas densidades dos meios, verifica-se que para adaptar o modelo de espalhamento acima para meios acústicos, apenas são eliminadas as propagações de ondas transversais para esses meios; os ângulos permanecem os mesmos, por dependerem da Lei de Snell; a única consequência é a mudança no balanço de energia.

Quando se incide obliquamente uma onda plana acústica em um meio com velocidade de propagação v_1 , e o raio da onda atravessará 2 interfaces até chegar ao ponto P, conforme a figura 2, verificar-se-á a influência na mudança ordem das camadas subsequentes; no caso a da onda vindo do meio 1, passando para o meio 2 com velocidade v_2 e depois indo para o meio 3 com velocidade v_3 até atingir o ponto P; no caso b, troca-se o meio 2 pelo meio 3.

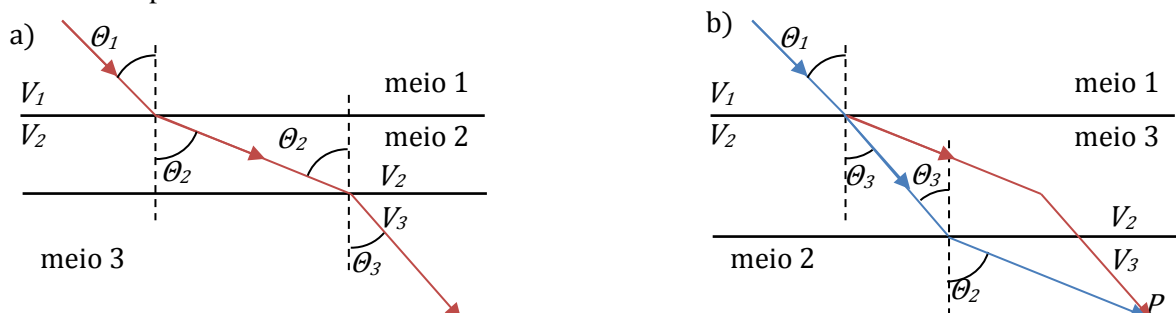


Figura 2 - Influência da ordem das camadas

O primeiro passo é provar que θ_2 é o mesmo no caso *a* e no *b*, em função do ângulo de incidência. Para isso, aplicando a equação 1 no caso *a*, o ângulo pode ser obtido diretamente.

$$\sin \theta_2 = \frac{V_2 \sin \theta_1}{V_1}$$

Para o caso *b*, primeiro se calcula o ângulo θ_3 e depois θ_2 .

$$\underbrace{\sin \theta_3 = \frac{V_3 \sin \theta_1}{V_1} \quad \sin \theta_2 = \frac{V_2 \sin \theta_3}{V_3}}_{\sin \theta_2 = \frac{V_2}{V_3} \cdot \frac{V_3 \sin \theta_1}{V_1} = \frac{V_2 \sin \theta_1}{V_1}}$$

Como se pode obter, da mesma forma, a relação de igualdade para o ângulo θ_3 , pode-se supor que, para meios isotrópicos e homogêneos, o ângulo da onda refratada depende apenas do ângulo da onda incidente e das velocidades nos meios em questão, não dependendo dessas variáveis das camadas intermediárias.

Para espessuras constantes das camadas, sendo o ângulo o mesmo nas duas configurações para o mesmo ângulo de incidência, o vetor de deslocamento será o mesmo em qualquer um dos casos. No caso *b*, o raio da configuração *a* foi deixado propositalmente, para que se possa ver, com base na conclusão acima, que nas duas configurações a onda incidente atinge o mesmo ponto *P*.

3.1.2 Difração e diferença temporal

Quando uma onda plana encontra uma barreira com apenas a abertura de uma fenda de comprimento da ordem do comprimento de onda, as paredes dessa fenda desviam as bordas da onda, formando o efeito de difração de acordo com a figura 3.

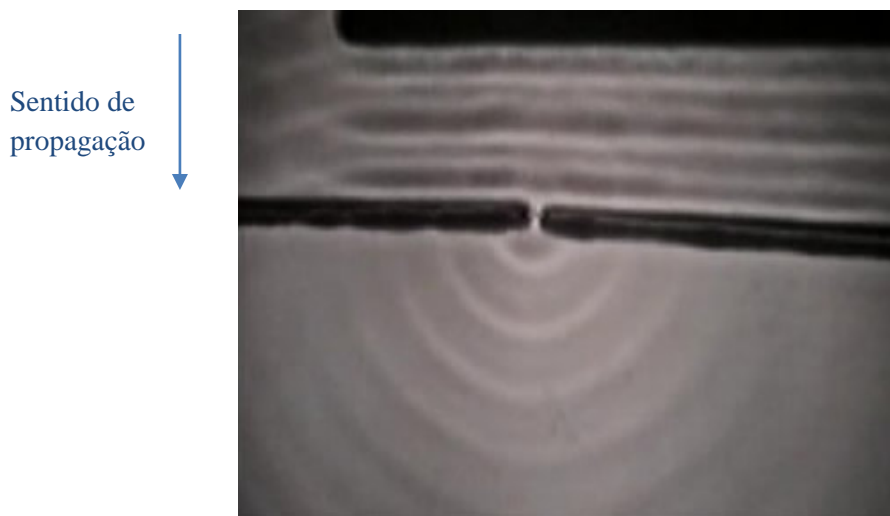


Figura 3 - Difração de uma onda plana bidimensional

A difração aumenta o comprimento de onda e espalha a energia da onda plana inicial. O padrão da figura 3 é feito a partir de uma fenda de comprimento menor que o comprimento de onda. Quando a fenda tem um comprimento equivalente ao comprimento de onda, ocorre um padrão de interferência das frentes

de onda que geram franjas de máximos e mínimos de intensidade. O princípio pode ser visto na figura 4: a parte da onda difratada em um dos lados da fenda percorre um caminho diferente em relação à parte difratada pelo outro lado; conforme o ângulo de desvio, essa diferença completa um múltiplo de um comprimento de onda (interferência construtiva) ou esse múltiplo mais meio comprimento de onda (interferência destrutiva).

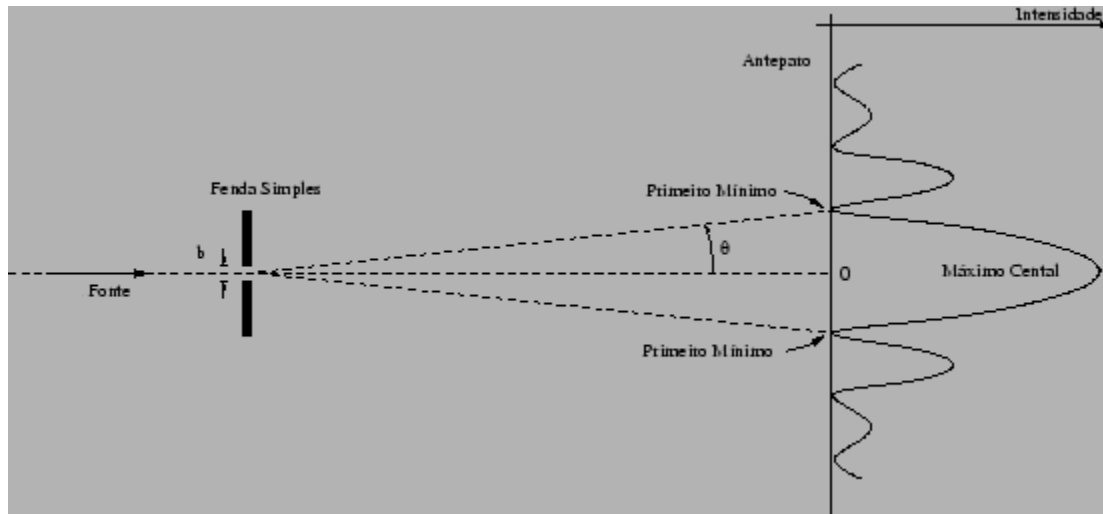


Figura 4 - Princípio das franjas de interferência em uma difração.

O transdutor funciona como uma fonte de difração, onde o comprimento da fenda é a dimensão longitudinal do transdutor, a que tem a direção paralela ao eixo da tubulação. Portanto, mesmo a onda gerada sendo uma onda plana, uma das formas que o módulo eletrônico tem para diferenciar o sinal do ruído é colocar os transdutores em posições que permitam receber apenas a onda proveniente de um dos máximos de difração. Sendo esse máximo deslocado em relação ao máximo central, capta-se uma frente de onda que tem uma componente da trajetória paralela em relação ao eixo da tubulação. Esta componente tem seu tempo de chegada ao receptor diretamente influenciado pela velocidade do fluido, o que permite a medição da vazão.

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= d_{\text{transdutores}} / (v_p \sin \theta + v_{\text{fluido}}) \\ t_2 &= d_{\text{transdutores}} / (v_p \sin \theta - v_{\text{fluido}}) \end{aligned} \right\} \Delta t = t_2 - t_1 = 2 d_{\text{transdutores}} v_{\text{fluido}} / ((v_p \sin \theta)^2 + v_{\text{fluido}}^2) \quad (2)$$

Portanto, a equação atende às condições esperadas de $\Delta t = 0$ quando $v_{\text{fluido}} = 0$, e Δt aumenta quase linearmente conforme v_{fluido} aumenta, já que $v_p \gg v_{\text{fluido}}$. A equação 2 vale para um cruzamento de onda na seção do tubo.

3.2 Modelo experimental

Os dados experimentais foram extraídos a partir da montagem do equipamento, conforme manual do fabricante, no laboratório do EDIF - Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica de Fluidos, localizado no Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O experimento foi realizado no dia 1º de abril de 2015 às 09:44 h.

Em uma tubulação de aço inox 304, de $\varnothing_{\text{externo}} = 50,80 \pm 0,02$ mm, $e_{\text{parede}} = 1,20 \pm 0,02$ mm, instalaram-se os transdutores #24 (Shear) em três trechos preparados previamente para comparação:

1. Sem pintura;
2. Com 1 demão de pintura tar-epóxi de espessura $0,40 \pm 0,02$ mm;
3. Com 2 demãos de pintura tar-epóxi de espessura $0,70 \pm 0,02$ mm.

A foto da figura 5 ilustra a montagem dos transdutores. A montagem foi feita em um trecho reto da tubulação com uma distância mínima de 3,70 m em relação ao primeiro acidente, uma curva de 45°.



Figura 5 - Montagem experimental dos transdutores.

O manual do medidor de vazão [2] solicita que haja um trecho reto mínimo de 10 diâmetros a montante da montagem e 5 diâmetros a jusante, o que foi atendido na montagem. O módulo eletrônico do medidor foi localizado em um local sem interferência eletromagnética considerável, ou seja, longe de locais com alta corrente elétrica ou produção de fortes campos magnéticos.

Para calibração do módulo eletrônico, as velocidades sônicas usadas para cada camada, além de seus respectivos materiais, foram configurados de acordo com a tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Configuração das camadas e suas respectivas velocidades sônicas.

Camada	Material	v_p (m/s)
Fluído	Água doce	1497
Tubulação	Aço inox 304	3141
Revestimento	Tar-epóxi	2000

Para a medição das espessuras das camadas de revestimento foi utilizado um paquímetro com Vernier com precisão de 0,02 mm.

4. RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro objetivo era verificar se o equipamento conseguiria aferir a vazão mesmo com uma camada a mais de material; esta camada gera reflexões e reverberações que ocasionam ruído no sinal, aproximando a amplitude do sinal ao limiar de ruído. Nota-se na figura 6 que o módulo eletrônico conseguiu fazer a medição com boa estabilidade. O quadro inferior direito mostra a medição da

velocidade sônica do fluido, que se afastou em apenas 1,4% em relação à considerada na calibração. Além disso, o quadro superior direito mostra a qualidade do sinal da franja de onda recebida pelo equipamento, o que mostra uma baixa presença de ruído.

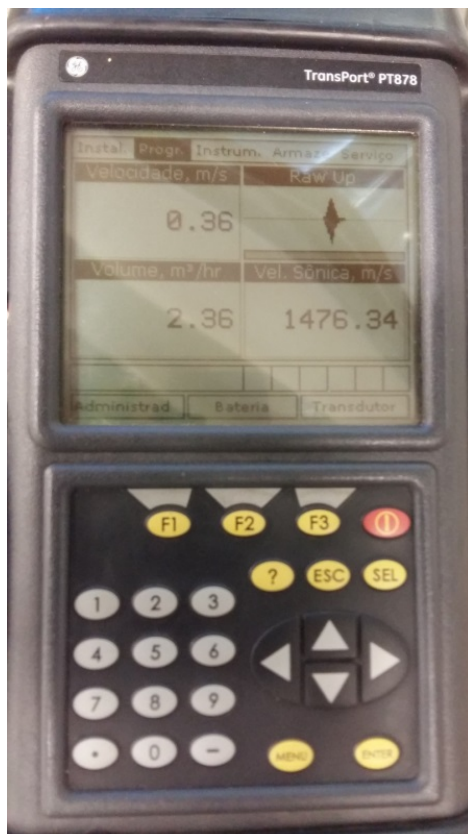


Figura 6: Característica do módulo eletrônico nas medições realizadas em laboratório.

A tabela 2 mostra os dados adquiridos no laboratório. (*) Algumas medições foram feitas considerando ou não o revestimento na programação do módulo eletrônico. (**) Há uma vazão de referência feita pelo medidor do laboratório, controlado por um inversor de frequência.

Tabela 2 - Dados experimentais

Espessura (mm)	Considera revestimento	Q _{volumétrico} (ℓ/h)	Q _{ultrassônico} (m³/h)	V _m (m/s)	V _p (m/s)
0,00	FALSO	2840	2,46	0,37	1487,73
0,00	FALSO	3310	2,94	0,44	1485,78
0,40	FALSO	2840	2,36	0,36	1472,77
0,40	FALSO	3310	2,87	0,43	1486,63
0,40	VERDADEIRO	2840	2,44	0,38	1475,03
0,40	VERDADEIRO	3310	2,89	0,45	1475,02
0,70	FALSO	2840	2,47	0,37	1478,42
0,70	FALSO	3300	2,86	0,43	1477,22
0,70	VERDADEIRO	2840	2,37	0,37	1451,22
0,70	VERDADEIRO	3300	2,82	0,45	1451,42

Analisando a influência da correção do valor absoluto feita pelo módulo eletrônico considerando ou não o revestimento em sua programação, obtivemos os resultados de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre vazões medidas sem e com correção

Espessura (mm)	Considera revestimen	Qvolumétrico (ℓ/h)	Qultrassônico (m³/h)	v _m (m/s)	v _p (m/s)
0,40	FALSO	2840	2,36	0,36	1472,77
0,40	VERDADEIRO	2840	2,44	0,38	1475,03
0,40	FALSO	3310	2,87	0,43	1486,63
0,40	VERDADEIRO	3310	2,89	0,45	1475,02
0,70	FALSO	2840	2,47	0,37	1478,42
0,70	VERDADEIRO	2840	2,37	0,37	1451,22
0,70	FALSO	3300	2,86	0,43	1477,22
0,70	VERDADEIRO	3300	2,82	0,45	1451,42

As dispersões entre a vazão que considera o revestimento e a que não considera, para as quatro vazões medidas, foram as seguintes:

$$\Delta Q_1 = |2,44 - 2,36| / 2,44 = 3,28\%$$

$$\Delta Q_2 = |2,89 - 2,87| / 2,89 = 0,692\%$$

$$\Delta Q_3 = |2,37 - 2,47| / 2,37 = 4,22\%$$

$$\Delta Q_4 = |2,82 - 2,86| / 2,82 = 1,42\%$$

Analisando os resultados quanto à interferência da espessura da camada do revestimento, de acordo com a tabela 4, verifica-se que o módulo eletrônico altera as vazões de acordo com o aumento da camada de revestimento, mesmo se mantidas as velocidades médias dos fluídos.

Tabela 4 - Comparação entre vazões medidas para cada medida de revestimento

Espessura (mm)	Considera revestimen	Qvolumétrico (ℓ/h)	Qultrassônico (m³/h)	v _m (m/s)	v _p (m/s)
0,00	TRUE	2840	2,46	0,37	1487,73
0,00	TRUE	3310	2,94	0,44	1485,78
0,40	TRUE	2840	2,44	0,38	1475,03
0,40	TRUE	3310	2,89	0,45	1475,02
0,70	TRUE	2840	2,37	0,37	1451,22
0,70	TRUE	3300	2,82	0,45	1451,42

Supondo que o medidor esteja considerando o revestimento como uma camada interna à tubulação, foi proposto um fator de correção dos dados de tal modo que eles sejam corrigidos, de modo a considerar que o diâmetro externo seja a soma do diâmetro nominal com a espessura da camada de revestimento. Esse fator foi calculado através da equação (3) a seguir:

$$\frac{\pi D_1^2}{4} \bigg/ \frac{\pi D_2^2}{4} = f \rightarrow f = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (3)$$

onde f = fator de correção.

Aplicando o fator de correção, verificamos na tabela 5 que os dados corrigidos pelo fator calculado para cada camada tiveram a sua dispersão diminuída, o que comprova que o equipamento considera que a camada de revestimento seja interna.

Tabela 5 - Dados corrigidos pelo fator calculado.

Espessura (mm)	Considera revestimen	Correção	Qvolumétrico (ℓ/h)	Qultrassônico (m³/h)	v _m (m/s)	v _p (m/s)
0,00	VERDADEIRO	VERDADEIRO	2840	2,46	0,37	1487,73
0,00	VERDADEIRO	VERDADEIRO	3310	2,94	0,44	1485,78
0,40	VERDADEIRO	VERDADEIRO	2840	2,52	0,38	1475,03
0,40	VERDADEIRO	VERDADEIRO	3310	2,99	0,45	1475,02
0,70	VERDADEIRO	VERDADEIRO	2840	2,51	0,37	1451,22
0,70	VERDADEIRO	VERDADEIRO	3300	2,99	0,45	1451,42

Portanto, o diâmetro externo a ser utilizado na calibração do módulo eletrônico do medidor de vazão deve ser:

$$\phi_{\text{externo}} = \phi_i + 2e_{\text{camada}} \quad (4)$$

onde ϕ_{externo} é o diâmetro externo a ser colocado na calibração, ϕ_i é o diâmetro externo do tubo e e_{camada} é a espessura da camada de revestimento.

5. CONCLUSÕES

A montagem experimental minimizou a influência do tipo de regime de escoamento da água na tubulação, fazendo com que a influência principal no valor medido fosse mesmo da presença ou não de revestimento no trecho de tubulação medido e a espessura dessa camada.

O medidor acrescenta a espessura do revestimento no cálculo da vazão como se esse revestimento estivesse interno à tubulação. Considerando uma correção na área interna da tubulação, retornamos ao valor de vazão medido no trecho sem pintura. Portanto, a medição pode ser feita sobre a camada de pintura sem muita divergência em relação aos valores medidos sem pintura.

Os erros percentuais calculados para considerações na programação com ou sem revestimento indicam que não há grande influência no valor absoluto medido no caso da espessura da camada de pintura ter um valor estimado diferente do programado. Eles são maiores quanto mais baixa for a vazão medida.

O diâmetro externo a ser considerado na calibração do módulo eletrônico do medidor de vazão deve ser o diâmetro externo do tubo somado a duas vezes a espessura da camada de revestimento.

Quando não for possível aferir exatamente a espessura da camada de revestimento, o ideal é estimar uma espessura de camada mínima, por exemplo, 0,70 mm para uma camada de pintura epóxi ou 4,0 mm para manta asfáltica, pois usar os transdutores sobre uma camada de revestimento, quando a calibração do equipamento desconsidera tal revestimento, gera um erro sistemático nas medições, e usar uma espessura aproximada diminui esse erro.

Utilizando as correções (3) ou (4) propostas por este relatório, é possível fazer a aquisição dos dados de vazão de água de redes de combate a incêndio sem a necessidade de raspar a pintura da tubulação, preservando a integridade dos trechos utilizados para os testes de desempenho de bombas e verificação do estado interno das tubulações.

6. REFERÊNCIAS

- [1] NFPA: NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, “Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems”, NFPA (2015).
- [2] GENERAL ELECTRIC, “PT878 Portable Liquid Flowmeter, Operation & Installation Guide”, GE Infrastructure, Sensing (2008).
- [3] YILMAZ, O., 1987, *Seismic Data Processing*, SEG Publication: Investigations in Geophysics, Tulsa, OK, USA (2008).
- [4] DAVID J. GRIFFITHS, 1999, *Introduction to Electrodynamics*, third edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA (2012).
- [5] HALLIDAY & RESNICK. 1960. *Fundamentos de Física*, volume 4: Óptica e Física Moderna. 9ª edição. LTC. Rio de Janeiro, Brasil (2012).