

Programa LEAKMAP

O LEAKMAP é um programa desenvolvido para calcular vazamentos em dutos levando em consideração o perfil longitudinal e as condições operacionais dos mesmos.

Dados de Entrada no Programa LEAKMAP

Os dados de entrada utilizados no programa levam em consideração as características do duto. Os principais dados de entrada são:

- Pressão atmosférica;
- Coeficiente de descarga;
- Profundidade do duto;
- Diâmetro nominal;
- Espessura da parede do duto;
- Altura manométrica na saída para cada produto;
- Altura manométrica na chegada para cada produto;
- Vazão da bomba;
- Produtos transportados;
- Densidades dos produtos transportados;
- Pressões de vapor dos produtos transportados;
- Perfil hidráulico do duto em coordenadas, sendo o eixo x correspondente à quilometragem do duto e o eixo y as cotas de altura;
- Diâmetro do furo.

Além dos dados anteriormente mencionados, também são inseridos no programa:

- Tempo para cálculo das conseqüências, que é o tempo máximo estimado pelos técnicos da faixa para contenção do vazamento;
- Tempo de detecção de vazamentos, que corresponde ao tempo de reação do operador para comandar a parada da transferência, uma vez identificada uma grande anormalidade;
- Tempo de paralisação do bombeamento após detecção, que é o tempo necessário para a paralisação do bombeamento;



- Tempo de bloqueio das válvulas no duto após a parada do bombeamento corresponde ao tempo médio estimado pelos inspetores de faixa e operação para acesso a cada válvula de bloqueio.

Dados de saída do Programa LEAKMAP

Como resultado, o Programa LEAKMAP apresenta uma tabela, conforme a Figura 1 a seguir, com os valores de saída para cada acidente em todos os pontos notáveis, sendo composta pelas seguintes colunas:

- (1) **Taxa inicial de vazamento (kg/s)** – vazão inicial no ponto de vazamento;
- (2) **Velocidade inicial de vazamento (m/s)** – velocidade inicial no ponto de vazamento;
- (3) **Tempo de fechamento das válvulas de isolamento à montante/jusante (min)** – Tempo de fechamento das válvulas à montante e à jusante do ponto de vazamento;
- (4) **Volume total vazado (m³)** – Volume total vazado, ou seja, a soma do volume vazado até a parada do bombeamento e do volume da coluna gravitacional;
- (5) **Área da poça do vazamento (m²)** – Área da poça formada pelo volume total vazado.



			Acidente 1 Tempo detecção do vazamento Tempo parada da bomba				
Denominação	km	Altura (m)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
			Taxa inicial de vazamento (kg/s)	Velocidade inicial de vazamento (m/s)	Tempo de fechamento das válvulas de isolamento (min/min)	Volume total vazado (m ³)	Área da poça do vazamento (m ²)

Figura 1 - Modelo da Planilha de Saída do Programa LEAKMAP

Assim, de forma a explicar detalhadamente a rotina de cálculo do programa, os itens a seguir apresentam a metodologia de cálculo para obtenção dos resultados apresentados nas colunas da tabela da Figura 1.

Metodologia de Cálculo do Programa LEAKMAP

Cálculo dos Volumes Vazados Coluna Gravitacional

Para cada um dos pontos notáveis inseridos, o programa verifica quais trechos do duto podem contribuir no vazamento, detectando se os mesmos estão à montante ou à jusante do ponto de vazamento e em quais trechos o vazamento ocorre simultaneamente.

Ressalta-se que os trechos longos são divididos, de forma a se obter os tempos para pequenos trechos, pois como será apresentado posteriormente, o programa considera o tempo de detecção e de fechamento das válvulas intermediárias, bem como a localização das mesmas.

A Figura 2 a seguir exemplifica esta etapa do programa.

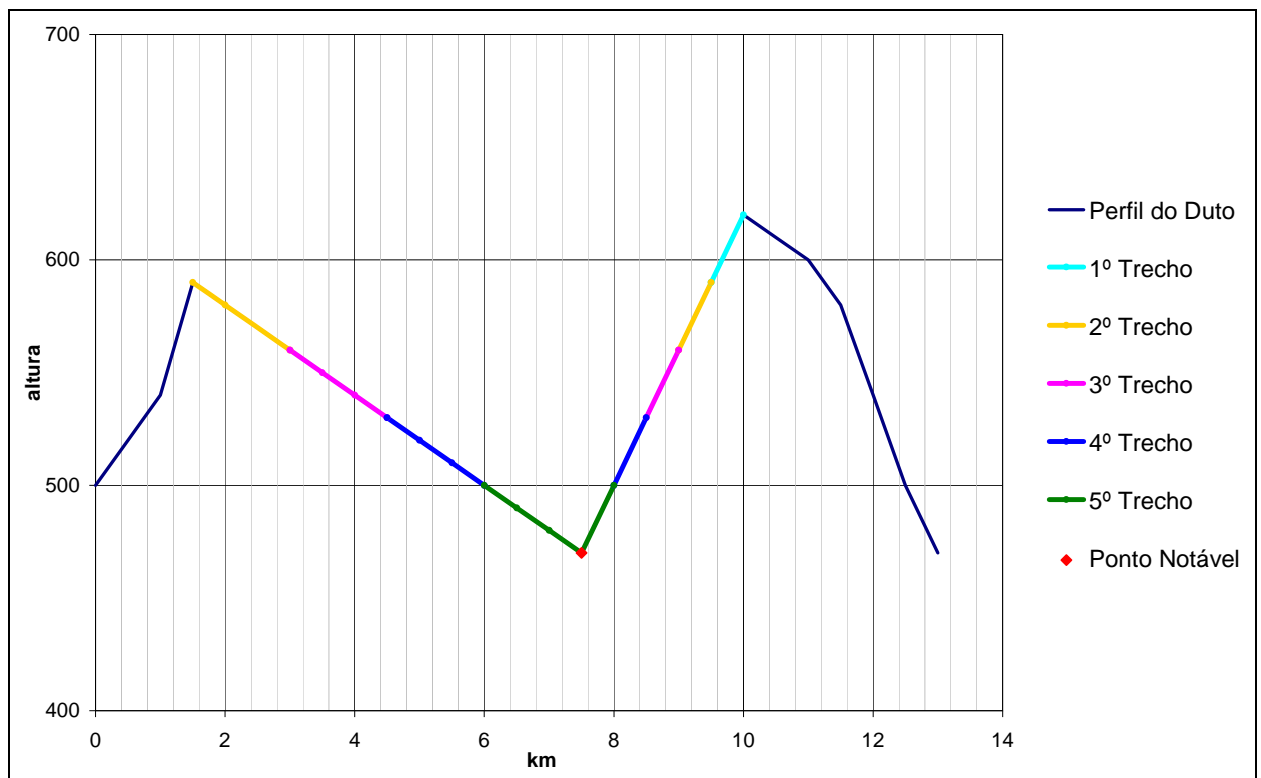


Figura 2 – Trechos com Possibilidade de Vazamento

Após verificados os trechos com possibilidade de vazamento, para cada um deles são realizados os seguintes cálculos:

$$CotaMédia = \left(\frac{\sqrt{a} + \sqrt{b}}{2} \right)^2 + h_v \quad (1)$$

Sendo:

- a - diferença de cotas entre o ponto inicial do trecho em estudo e o ponto de vazamento;
- b - diferença de cotas entre o ponto final do trecho em estudo e o ponto de vazamento;
- h_v - cota do ponto de vazamento.



$$DistânciaMédia = \left| \left(\frac{km_1 + km_2}{2} \right) - km_v \right| \quad (2)$$

Sendo,

- km_1 e km_2 - quilometragem dos pontos inicial e final do trecho em estudo respectivamente;
- km_v - quilometragem do ponto de vazamento.

A Figura 3 a seguir representa graficamente as fórmulas apresentadas anteriormente.

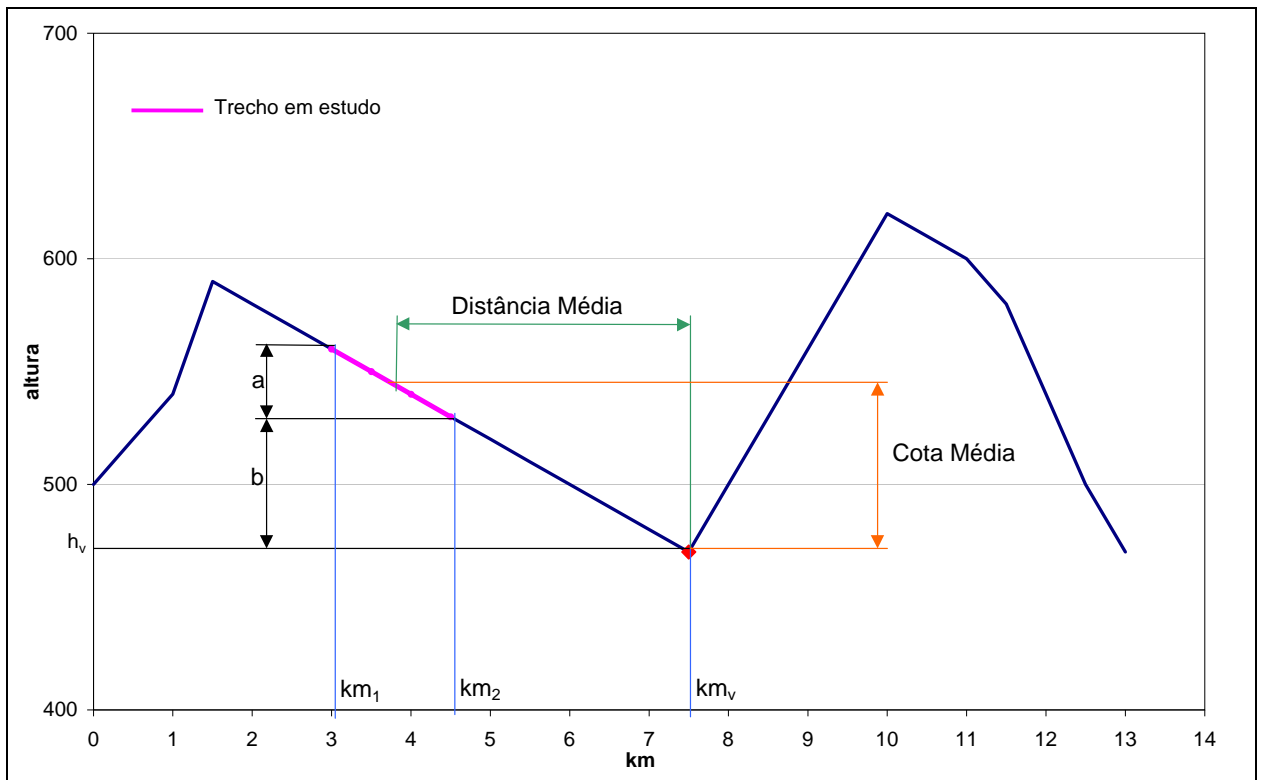


Figura 3 – Representação Gráfica da Distância Média e Cota Média para um

$$AlturaMédia = CotaMédia - h_v \quad (3)$$

Trecho

Assim, com base nestes resultados são realizados ainda os seguintes cálculos:

$$AlturaAtmosférica = \frac{P_{atm}}{g \cdot \rho} \quad (4)$$

- P_{atm} – Pressão atmosférica, em Pa;
- g - aceleração da gravidade, em m/s^2 ;
- ρ - densidade do produto, em kg/m^3 .

$$AlturaVapor = \frac{P_{vap}}{g \cdot \rho} \quad (5)$$

Sendo,

- P_{vap} – Pressão de vapor do produto, em Pa.

Para líquidos: $AlturaBloqueio = AlturaAtmosférica$ (6)

Para gases liquefeitos: $AlturaBloqueio = 0,55 \cdot AlturaVapor$

$$AlturaEstática(h_s) = AlturaMédia(h_g) + AlturaVapor(h_{vap}) - AlturaBloqueio \quad (7)$$

Para o cálculo da velocidade média de vazamento em cada trecho o programa realiza o procedimento descrito a seguir, sendo que os cálculos se diferenciam no caso de apenas um lado do duto vazando (como o “1º Trecho” da Figura 2) ou dois lados vazando simultaneamente (como nos outros trechos de Figura 2).

Cálculo da Velocidade Média de Vazamento para um Único Lado do duto

Vazando

O programa utiliza a seguinte equação:

$$Q = S_o \cdot Cd \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_t} \quad (8)$$

Sabendo que $Q = v \cdot S_t$, obtém-se:

$$v = \frac{S_o \cdot Cd}{S_t} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_t} \quad (9)$$

Onde:

$$K = \frac{S_o \cdot Cd}{S_t} \quad (10)$$

Sendo,

- S_o – Seção do Orifício;
- S_t – Seção do duto;
- Cd – Coeficiente de descarga.

Conhecendo-se a expressão $h_t = h_g + h_{vap} - h_{atm} - h_p$, e utilizando-se a equação (7), obtém-se:

$$v = K \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_s - h_p)} \quad (11)$$

O programa calcula então a altura da perda de carga (h_p) no duto, através da equação de Bernoulli:

$$h_{\text{manométrica de saída}} + h_{\text{geométrica de saída}} = h_{\text{manométrica de chegada}} + h_{\text{geométrica de chegada}} + h_p \quad (12)$$

E em seguida o fator de fricção (f) utilizando a fórmula geral de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \frac{v^2}{2gD} L \quad (13)$$

Sendo,

- v – velocidade de movimentação do líquido, em m/s, calculado com base na vazão e na seção do duto;
- L – comprimento do duto, em m;
- D – diâmetro interno do duto, em m.

Substituindo na equação (11) a altura da perda de carga, equação (13), obtêm-se a equação para o cálculo da velocidade de fuga para o escoamento de um trecho da tubulação, para um único lado de vazamento:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot K^2 \cdot h_s}{1 + K^2 \cdot f \cdot \frac{L}{Dt}}} \quad (14)$$

Cálculo da Velocidade Média de Vazamento para Dois Lados do duto

Vazando Simultaneamente

Para se obter a relação entre as velocidades do líquido nos trechos vazados simultaneamente (com as mesmas alturas iniciais e finais), utiliza-se primeiramente a seguinte expressão:

$$h_t = h_g + h_{vap} - h_{atm} - h_{per1} = h_g + h_{vap} - h_{atm} - h_{per2} \quad (15)$$

Utilizando-se a equação (7), obtém-se:

$$h_s - h_t = \frac{f \cdot L_1}{2g \cdot D_1} v_1^2 = \frac{f \cdot L_2}{2g \cdot D_2} v_2^2 \quad (16)$$

E posteriormente a relação:

$$v_1 = v_2 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (17)$$

Sendo,

- L_1 e L_2 – distância média do trecho em estudo e do trecho do lado oposto, respectivamente;
- v_1 e v_2 – velocidade média do trecho em estudo e do trecho do lado oposto, respectivamente.

Aplicando-se a equação de continuidade de fluxo para ambos os trechos têm-se:

$$v_v \cdot So \cdot Cd = (v_1 + v_2) \cdot St \quad (18)$$

Utilizando-se a equação da velocidade para v_v (velocidade do vazamento) com os dois lados do duto vazando, e a relação entre as velocidades dos trechos, obtêm-se:

$$\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_s - h_p)} = v_1 \left(1 + \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \frac{St}{So \cdot Cd} \quad (19)$$

Substituindo-se a expressão da perda de carga e isolando a velocidade, obtém-se a expressão para o cálculo da velocidade em um dos trechos dos quais ocorre vazamento simultâneo:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_s}{\left(f \cdot \frac{L_1}{Dt} + \left(1 + \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right)^2 \cdot \left(\frac{St}{So \cdot Cd} \right)^2 \right)}} \quad (20)$$

Cálculo do Tempo de Vazamento de um Trecho para um Único Lado do duto Vazando

À partir da velocidade média e do comprimento (L) do trecho em estudo obtém-se o tempo de escoamento neste trecho com a seguinte equação:

$$t = \frac{L}{v} \quad (21)$$

Cálculo do Tempo de Vazamento de Dois Trechos Vazando Simultaneamente

No caso de dois trechos em lados opostos vazando simultaneamente, considera-se o comprimento de cada trecho (L_1 e L_2), bem como as velocidades médias

$$t = \frac{\left(\frac{L_1}{v_1}\right) + \left(\frac{L_2}{v_2}\right)}{2} \quad (22)$$

correspondentes:

Cálculo da Vazão Média dos Trechos

A vazão média de cada trecho é obtida à partir dos valores obtidos de velocidade média e da seção do duto (St).

Assim, para o caso de um único lado vazando, utiliza-se a fórmula:

$$Q = v \cdot St \quad (23)$$

Já no caso de dois trechos vazando simultaneamente faz-se a soma das velocidades médias:

$$Q = (v_1 + v_2) \cdot St \quad (24)$$

Cálculos da Taxa Inicial e da Velocidade Inicial de Vazamento

O cálculo da taxa inicial de vazamento é realizado com base na vazão média calculada para o primeiro trecho de vazamento, em m^3/s , e na densidade do produto (ρ) em kg/m^3 , utilizando a equação:

$$\text{Taxa Inicial de Vazamento} = Q \cdot \rho \quad (25)$$

Para o cálculo da velocidade inicial de vazamento também é utilizada a vazão média calculada para o primeiro trecho de vazamento, além da seção do orifício (S_o) e do coeficiente de descarga (Cd), através da equação:

$$v_i = \frac{Q}{S_o \cdot Cd} \quad (26)$$

Cálculo do Volume Total Vazado

O cálculo do volume total vazado, que no caso de vazamento sem bombeamento é o volume vazado da coluna gravitacional, para um trecho em apenas um lado é obtido com a fórmula:

$$V = St.L \quad (27)$$

No caso de dois trechos em lados opostos vazando simultaneamente, soma-se os comprimentos dos dois trechos para se obter o valor de L .

Tendo o volume vazado e o tempo de vazamento de cada trecho, o programa calcula o volume vazado no ponto notável, que é a soma de todos os volumes dos trechos, até o momento de equilíbrio das pressões interna e externa do duto, ou seja, por exemplo se no último trecho o valor calculado para Altura Total (equação (7) apresentada anteriormente) for menor ou igual a zero significa que as pressões interna e externa do duto se igualaram e conseqüentemente o volume contido neste trecho não vazará.

Em casos que existam válvulas de bloqueio, o programa considera o tempo de detecção do acidente mais o tempo de fechamento das válvulas e calcula o volume vazado na coluna gravitacional onde está localizada cada válvula somente para este tempo. Por este motivo, o programa faz a divisão do vazamento em pequenos trechos, como apresentado anteriormente na Figura 2, pois desta forma obtém os tempos intermediários com menor espaçamento, sendo possível realizar um cálculo de interpolação para o tempo desejado com maior precisão.

7.2.3.2 Cálculo dos Volumes Vazados com Bombeamento

Nos acidentes em que o duto está movimentando produto, ou seja, está com bombeamento, na tabela de resultados alteram-se alguns valores, pois conforme mencionado anteriormente, considera-se 1 minuto para detecção do vazamento no caso de rupturas e furos com 20% e 5 % do diâmetro, mais 1 minuto para parada da bomba.

Assim, a taxa inicial de vazamento e a velocidade inicial de vazamento são calculadas através das seguintes equações:

$$Q_1 = Q_v + Q_2 \quad (28)$$

Sendo,

- Q_1 e Q_2 – Vazão volumétrica a montante e a jusante do ponto de vazamento, respectivamente;
- Q_v – Vazão volumétrica do ponto de vazamento.

$$Q_1 = v_1 \cdot St \quad (29)$$

$$Q_2 = v_2 \cdot St \quad (30)$$

$$Q_v = S_o \cdot Cd \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_t} \quad (31)$$

$$h_p = f \frac{v^2}{2gD} L \quad (32)$$

$$h_{m1} + h_{g1} = h_{mv} + h_{gv} + h_{p1} \quad (33)$$

$$h_{mv} + h_{gv1} = h_{m2} + h_{g2} + h_{p2} \quad (34)$$

Dessa forma o programa calcula a taxa de vazamento e a velocidade inicial para cada ponto notável inserido, aplicando as equações apresentadas anteriormente, considerando o comportamento do produto após a ocorrência do furo nos trechos a montante e a jusante do mesmo, ou seja, o programa afere os valores até obter um equilíbrio no comportamento, obtendo assim resultados mais refinados.

A partir da taxa inicial de vazamento, é calculado o volume vazado durante o bombeamento, ou seja, para a soma do tempo de detecção mais o tempo de paralisação da bomba.

Cálculo do Tempo de Vazamento

O tempo de vazamento apresentado na tabela de resultados do Programa LEAKMAP está relacionado ao volume vazado, ou seja, é o tempo de vazamento até o equilíbrio das pressões interna e externa do duto.

Cálculo da Área de Poça

Na tabela de resultados o Programa LEAKMAP apresenta a área da poça para o tempo máximo das consequências inserido no programa, conforme apresentado anteriormente, correspondente ao tempo máximo para contenção do vazamento.

Assim, o programa calcula o volume vazado para o tempo máximo da mesma forma que calcula o volume para um tempo de fechamento de válvulas, conforme apresentado anteriormente. Ressalta-se que se não houver inventário suficiente para ocorrer vazamento no tempo desejado, o programa considera o tempo máximo calculado para vaziar toda a coluna.

Para o cálculo da área da poça formada pelo volume encontrado, o programa considera o comportamento do líquido no vazamento como apresentado na Figura 4.

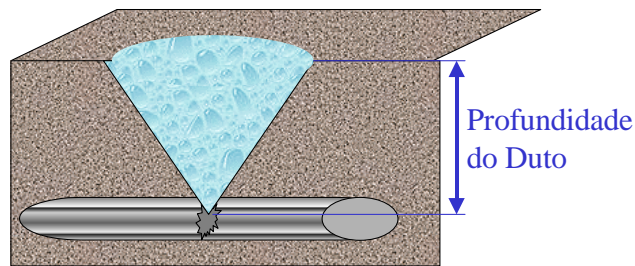


Figura 4 – Comportamento do Vazamento Considerado

Desta forma, utiliza-se a fórmula do volume de um cone, descrita a seguir:

$$V = \frac{A_{base} \cdot h}{3} \quad (35)$$

Considerando o cone invertido, o volume vazado e h como a profundidade do duto, obtém-se a fórmula para o cálculo da área da poça:

$$A_{poça} = \frac{V \cdot 3}{Prof. Duto} \quad (36)$$

No caso das hipóteses do duto com bombeamento, para o cálculo da área da poça do vazamento para o tempo máximo das consequências considera-se o volume vazado durante o bombeamento mais o volume vazado da coluna gravitacional até o tempo máximo desejado, desconsiderando o tempo de parada da bomba. Por exemplo,

se o tempo máximo das conseqüências for de 5 horas e o tempo de detecção mais parada do bombeamento for de 15 minutos, o programa utilizará o volume vazado com bombeamento para os quinze minutos mais o volume vazado na coluna gravitacional durante 4 horas e 45 minutos.

Estes mesmos cálculos são realizados para a coluna “Área da Poça do Vazamento”, porém para o volume total vazado apresentado anteriormente.

