

# **ANÁLISE DE DEPÓSITOS EM TUBULAÇÕES COM LINHAS DE GRADIENTE HIDRÁULICO MEDIDAS COM FERRAMENTAS DE INSPEÇÃO EM LINHA DE LIVRE FLUTUAÇÃO**

Matthew Kindree, M.Sc.<sup>1</sup>; Anouk van Pol, B.Sc.<sup>2</sup>; e John van Pol, Ph.D.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INGU Solutions Inc., e-mail (autor correspondente): [matthew@ingu.com](mailto:matthew@ingu.com)

<sup>2</sup>INGU Solutions Inc., e-mail: [anouk@ingu.com](mailto:anouk@ingu.com)

<sup>3</sup>INGU Solutions Inc., e-mail: [john@ingu.com](mailto:john@ingu.com)

## **RESUMO**

Este documento demonstra a metodologia para cálculo da linha de gradiente hidráulico ferramentas de inspeção em linha de livre flutuação e a subsequente análise de depósitos na linha de gradiente hidráulico. As ferramentas de inspeção em linha e flutuação neutra medem a pressão ao longo do comprimento total da tubulação sob condições normais de operação. A implementação de várias ferramentas com breve retardo permite que as características localizadas se diferenciem das alterações na operação da tubulação durante a implementação. As alterações identificadas na operação durante a implementação são corrigidas antes do cálculo da linha de gradiente hidráulico, utilizando o perfil de elevação da tubulação. A linha de gradiente hidráulico resultante representa a perda de pressão do fluxo devido ao atrito ao longo da tubulação; locais com perda de pressão do fluxo mais acentuada indicam restrições na tubulação por acúmulo de depósitos. O ângulo de inclinação da linha de gradiente hidráulico, as especificações da tubulação e a taxa de vazão medida na inspeção são utilizados em conjunto com a equação de Hazen-Williams para calcular os níveis dos depósitos em diversos segmentos ao longo da tubulação.

## **INTRODUÇÃO**

O abastecimento de água potável tratada e a remoção de esgotos em residências e empresas é uma necessidade para a saúde e a segurança das comunidades. Estima-se que os Estados Unidos utilizam cerca de 148 bilhões de litros de água por dia, que precisam ser transportados de e para pontos residenciais, comerciais e industriais por meio de uma imensa rede de tubulações (Pesquisa geológica, EUA, 2015). Estima-se que os Estados Unidos mantenham cerca de 3,54 milhões de quilômetros de dutos para transporte de água potável (American Water Works Association, 2019) e mais de 2,1 milhões de quilômetros de dutos que transportam esgotos (Agência de proteção ambiental dos EUA, 2010), em 16.000 estações públicas de tratamento de esgotos (Agência de segurança cibernética e infraestrutural, 2023). O Canadá tem mais de 470.000 quilômetros de dutos transportando água e esgotos (Statistics Canada, 2022). Essa infraestrutura hidráulica está envelhecendo com a idade média dessas tubulações de água potável e esgotos nos Estados Unidos por volta de 45 anos (Tabuchi, 2017) e um a cada cinco quilômetros de tubulação hidráulica no Canadá com mais de 50 anos de operação (Statistics Canada, 2022). É crítico, portanto, que as tubulações de água e esgoto sejam monitoradas para assegurar que estejam em condições adequadas e para manter o desempenho dos sistemas de águas e esgotos.

O acúmulo de depósitos em uma tubulação é uma preocupação mais pungente nas tubulações de esgotos. Os depósitos reduzem a capacidade da tubulação, podem causar corrosão e desgaste das paredes dos tubos, bem como transbordamento nos sistemas. Em 2004, a EPA constatou que 48% dos eventos de transbordamento em sistemas de esgoto sanitário com causa conhecida nos Estados Unidos foram resultantes de algum tipo de entupimento integral ou parcial (Agência de proteção ambiental dos EUA, 2004). Esses eventos de transbordamento representam um risco para a saúde pública e poluem o meio ambiente.

O acúmulo de depósitos em uma tubulação restringe seu diâmetro efetivo e causa perdas expressivas de pressão de atrito. Desta forma, as operadoras de tubulações monitoram o rendimento das estruturas e todas as medições de pressão disponíveis, em busca de indícios de restrições. Entretanto, esses métodos de monitoramento não indicam a localização ou o tamanho da restrição detectada. Ferramentas de inspeção em linha que medem o perfil de pressão ao longo de toda a tubulação proporcionam uma perspectiva mais detalhada do desempenho de uma tubulação e permitem a localização e uma estimativa do tamanho da restrição. Locais com perda de pressão de atrito mais acentuadas indicam restrições na tubulação pelo acúmulo de depósitos ou bolsões de gás confinados, com restrições maiores causando perdas mais acentuadas. O cálculo da linha de gradiente hidráulico (LGH) permite essa análise, contabilizando as alterações na pressão hidrostática ao longo da tubulação.

Este documento demonstra a metodologia utilizada para calcular a LGH por livre flutuação, ferramentas de inspeção em linha e a análise subsequente da LGH para fornecer informações sobre o nível dos depósitos encontrados em uma tubulação. Na primeira etapa, o histórico técnico detalha as relações físicas que determinam o fluxo em uma tubulação e a definição da LGH. A metodologia de cálculo da LGH é demonstrada incluindo importantes características da ferramenta de inspeção em linha; os métodos utilizados para identificar e retificar alterações operacionais durante a inspeção; e o cálculo de uma LGH com base na pressão medida ao longo da tubulação. Finalmente, a análise da LGH determina os níveis de depósitos na tubulação em detalhes.

## HISTÓRICO TÉCNICO

Fluxos estáveis e incompressíveis em tubos são determinados pela equação de Bernoulli,

$$\left(\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g}\right)_{a \text{ montante}} = \left(\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g}\right)_{a \text{ jusante}} + h_{\text{atrito}},$$

onde  $p$  é a pressão,  $\rho$  é a densidade fluida,  $g$  é a aceleração devido à gravidade,  $z$  é a elevação da tubulação,  $v$  é a velocidade do fluido e  $h_{\text{atrito}}$  é a perda de carga devido ao atrito. Esta equação pode ser mais simplificada, uma vez que a velocidade do fluido é constante em todos os segmentos da tubulação, sem fluxos significativos de admissão ou descarga e sem alterações no diâmetro. Para definir a linha de gradiente hidráulico,  $HGL$ , como a pressão do fluxo adicionada à elevação da tubulação ( $HGL = p/(\rho g) + z$ ), a equação de Bernoulli pode ser simplificada como:

$$HGL_{a \text{ montante}} = HGL_{a \text{ jusante}} + h_{\text{atrito}}.$$

Desta forma, as alterações na LGH são diretamente relacionadas à perda de pressão do fluxo devido ao atrito,  $\Delta HGL = h_{\text{friction}}$ .

O perda de pressão do fluxo devido ao atrito depende da geometria da tubulação, do material dos tubos e da taxa de vazão, utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach,

$$h_{\text{atrito}} = f \frac{8}{\pi^2 g} \frac{\Delta x}{D^5} Q^2,$$

onde  $\Delta x$  é o comprimento ao longo do tubo,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação,  $Q$  é o taxa de vazão e  $f$  é o coeficiente de resistência de Darcy. O coeficiente de resistência de Darcy depende do estado do fluxo (turbulento ou laminado) e é uma função da densidade e viscosidade do fluido; o diâmetro interno e a rugosidade hidráulica da superfície interna do tubo; e a taxa de vazão. Essas grandezas são tradicionalmente relacionadas conforme o diagrama de Moody (Moody, 1944) ou uma das diversas equações complexas que incluem a equação de Colebrook (Colebrook, 1939):

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} = -2.0 \text{ registro} \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re f^{\frac{1}{2}}} \right),$$

onde  $\epsilon$  é a rugosidade hidráulica da superfície interna do tubo, conforme os diferentes materiais de fabricação dos tubos, e  $Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$  é o coeficiente de Reynolds não dimensional do fluxo, onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

No caso da água à temperatura ambiente, a razão de Hazen-Williams existe como uma alternativa tradicional à equação de Darcy-Weisbach. É uma relação empírica mais simples entre a taxa de vazão, o diâmetro interno da tubulação e um coeficiente de rugosidade  $C$ , conforme a rugosidade hidráulica de diferentes materiais de fabricação dos tubos. A razão de Hazen-Williams é (William e Hazen, 1905):

$$\Delta HGL = h_{\text{atrito}} = \frac{10.67Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.8704}} \Delta x.$$

O acúmulo de depósitos restringe o diâmetro efetivo da tubulação e tem uma rugosidade acentuada, se comparada à de um tubo limpo; ambos os fatores causam atrito acentuado e um gradiente mais íngreme na LGH. Portanto, a análise do ângulo de inclinação da LGH com uma taxa de vazão específica é uma indicação do nível de depósitos na tubulação. A LGH de uma tubulação pode ser calculada a partir das medições de pressão de uma ferramenta de inspeção em linha de flutuação neutra.

## **METODOLOGIA: FERRAMENTAS DE INSPEÇÃO EM LINHA DE FLUTUAÇÃO NEUTRA**

Os métodos tradicionais de inspeção se restringem a medições de pressão de um pequeno número de pontos ao longo da tubulação, que não fornecem detalhamento suficiente do perfil de pressão ao longo da tubulação inteira. As ferramentas de inspeção em linha têm a vantagem de registrar

medições de pressão ao longo da tubulação inteira. Entretanto, ferramentas de inspeção em linha com smart-pig dependem da pressão na tubulação para impulsionar o pig através da tubulação, portanto, não fornecem uma medida representativa da pressão sob condições normais de operação.

Ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra são ideais e adequadas para esta aplicação, devido à sua natureza de livre flutuação. A característica de flutuação neutra da ferramenta significa que a ferramenta tem a mesma massa específica que o fluido, e portanto, se movimenta com o fluxo como se fizesse parte dele. Isto permite que as ferramentas de flutuação neutra superem mudanças na elevação, alterações causadas por válvulas e alterações no diâmetro, bem como derivações fechadas e restrições, ao seguir o fluxo. A facilidade de instalação e recuperação da ferramenta permite a inspeção ocorra sob condições normais de operação para se obter uma medição representativa da pressão na tubulação.

As ferramentas de flutuação neutra utilizadas na análise descrita neste documento são conhecidas como Pipers®. São pequenas esferas equipadas com múltiplos sensores, com menos de 7,5 centímetros de diâmetro. Seu peso pode ser ajustado para corresponder à densidade do fluido na tubulação, de forma que são consideradas de flutuação neutra. A ferramenta transporta uma matriz com múltiplos sensores, incluindo uma unidade de medição de inércia (acelerômetro triaxial e giroscópio), vários magnetômetros triaxiais, um sensor de pressão e um de temperatura, além de um sensor acústico passivo. A matriz com múltiplos sensores permite que vários aspectos das condições da tubulação sejam monitorados em uma única inspeção. As técnicas avançadas de processamento de dados (Byington, 2023) pareadas à medição com múltiplos sensores permitem uma localização precisa das medições ao longo da tubulação, sem o uso de marcadores de superfície (Kindree, 2022). As ferramentas podem ser instaladas pelo operador da tubulação sob condições normais de operação, sem alterações na tubulação.

Desta forma, essas ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra permitem que a pressão na tubulação seja medida com alta resolução espacial ao longo de toda a tubulação, sob condições normais de operação. As medições de pressão em uma inspeção são utilizadas para calcular a LGH da tubulação e analisadas em seguida.

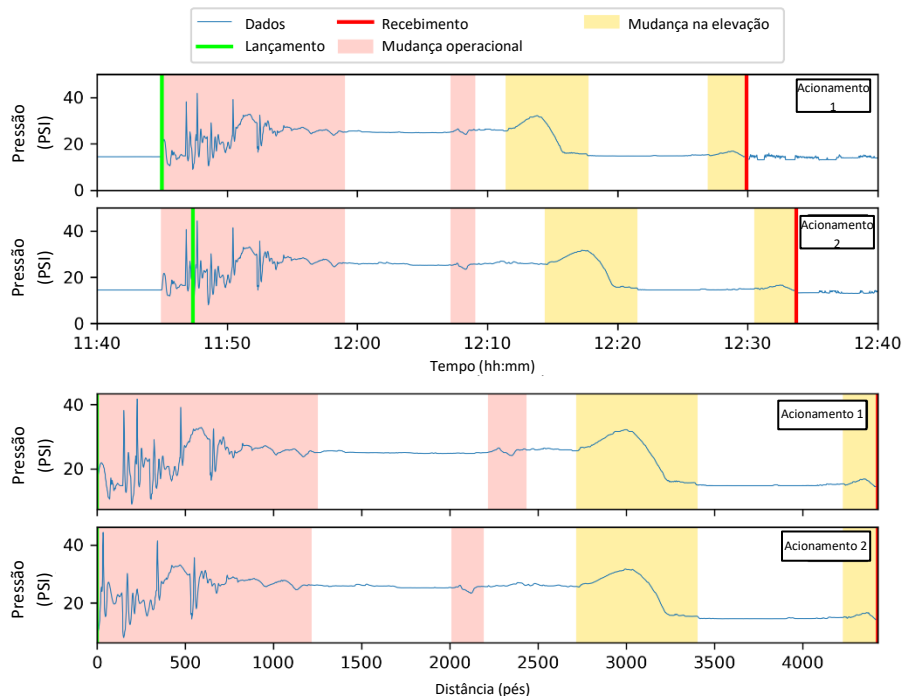
## **METODOLOGIA: MUDANÇAS OPERACIONAIS DURANTE A INSTALAÇÃO**

As ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra medem uma combinação da pressão do fluxo ao longo da tubulação e qualquer mudança operacional na tubulação durante a inspeção. Várias ferramentas podem ser instaladas na mesma tubulação, com um pequeno retardo entre os lançamentos, que permitem que as características da tubulação sejam diferenciadas das mudanças operacionais. As variações de pressão medidas por ambas as ferramentas no mesmo local indicam características da tubulação, enquanto as variações de pressão que não se repetem entre as aplicações indicam mudanças operacionais durante a inspeção. As duas linhas superiores na Figura 1 ilustram a pressão no decorrer do tempo, medida durante uma inspeção e as duas linhas inferiores ilustram a pressão conforme a distância. As duas inspeções foram lançadas e recuperadas com um intervalo de cerca de 3 minutos entre elas (os horários dos lançamentos estão indicados com linhas verticais verdes e os horários de recuperação, com linhas verticais vermelhas). As mudanças operacionais de pressão na tubulação estão destacadas na cor rosa e são medidas ao mesmo tempo

por ambas as ferramentas em locais diferentes da tubulação, a qualquer momento. Em contraste, as mudanças na elevação da tubulação estão destacadas na cor amarela, e são medidas quando as ferramentas passam por um local específico, o que ocorre em um momento diferente para cada ferramenta.

Uma vez identificadas, as mudanças operacionais durante a inspeção podem ser corrigidas antes que se calcule a LGH, utilizando uma entre duas técnicas possíveis. No primeira técnica, as medições da pressão auxiliar na tubulação com suficiente resolução temporal são subtraídas da pressão medida pelas ferramentas de inspeção em linha. As duas linhas superiores na Figura 2 ilustram a pressão medida com o tempo de uma inspeção em linha e a pressão auxiliar SCADA medida na tubulação durante a inspeção. Mudanças na operação da tubulação são medidas tanto pelos recursos de medição de pressão SCADA quanto pela ferramenta de inspeção em linha, simultaneamente. Portanto, a pressão medida pela ferramenta de inspeção em linha é corrigida conforme as mudanças operacionais durante a inspeção, subtraindo-se a pressão SCADA. A pressão operacional corrigida resultante está ilustrada na linha inferior na Figura 2 e contempla apenas a pressão do fluxo utilizada para calcular a LGH.

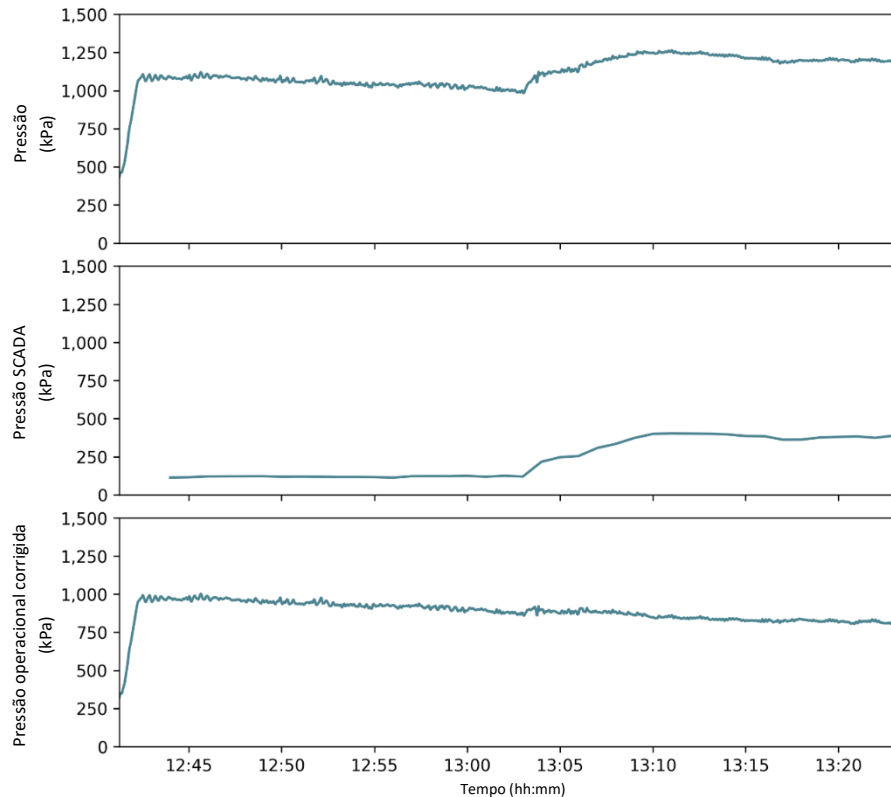
Quando possível, ambas as ferramentas são instaladas com um breve retardo entre os lançamentos, de forma que ambos estejam na tubulação ao mesmo tempo. Desta forma, ambas as ferramentas de inspeção em linha medirão as mesmas mudanças operacionais ao mesmo tempo e um conjunto de medições de pressão poderá ser utilizado para corrigir as mudanças operacionais no segundo conjunto de medições de pressão. As duas linhas superiores na Figura 3 ilustram a pressão medida com o tempo, em duas inspeções em uma tubulação. A linha central na Figura 3 também ilustra a pressão retificada da primeira inspeção, em que a tendência decrescente foi subtraída da pressão medida. As alterações na operação da tubulação são medida por ambas as ferramentas de inspeção em linha simultaneamente. Portanto, a pressão retificada da primeira inspeção é subtraída da pressão medida na segunda inspeção, para corrigir as mudanças operacionais durante a inspeção. A pressão operacional corrigida resultante está ilustrada na linha inferior na Figura 3 e contempla somente a pressão do fluxo utilizada para calcular a LGH.



**Figura 1:** As medições de pressão em duas inspeções em uma tubulação com um breve retardo entre os lançamentos das ferramentas. As duas linhas superiores ilustram a pressão medida com o tempo e as duas linhas inferiores ilustram a pressão medida conforme a distância. As mudanças operacionais durante a inspeção estão destacadas na cor rosa e as mudanças na elevação ao longo da tubulação estão destacadas na cor amarela.

## METODOLOGIA: A LINHA DE GRADIENTE HIDRÁULICO

Uma vez corrigidas as mudanças operacionais durante o levantamento, a LGH pode ser calculada somando-se a pressão do fluxo a um perfil de elevação da tubulação. Os perfis de elevação muitas vezes estão disponíveis no projeto ou nos desenhos as-built da tubulação. Entretanto, se os desenhos não estiverem disponíveis, o perfil de elevação de superfície pode ser obtido a partir de serviços como o Google Earth, com o auxílio de um mapa da tubulação GIS, e utilizado para o cálculo da LGH (presumindo-se que a tubulação seja subterrânea com profundidade constante em toda sua extensão). A Figura 4 ilustra a pressão medida ao longo da tubulação em uma inspeção em linha, o perfil de elevação da tubulação e a LGH resultante. Observe que a pressão medida (linha superior na Figura 4) e o perfil de elevação (linha central na Figura 4) têm uma relação inversa (ou seja, os aumentos de pressão causados pela pressão de tubulação na descendente e as quedas de pressão causadas pela tubulação na ascendente).

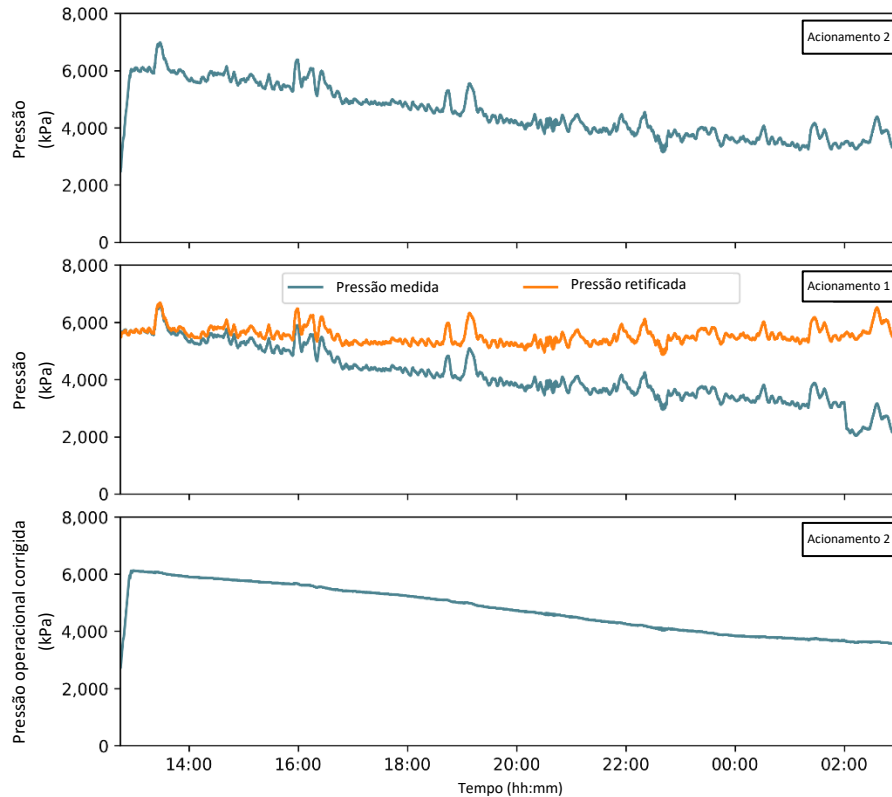


**Figura 2:** De cima para baixo: a pressão medida com o tempo em uma inspeção em linha, a pressão SCADA auxiliar medida na tubulação e a pressão medida e corrigida na inspeção em linha conforme as mudanças operacionais durante a inspeção (ou seja, pressão medida menos pressão SCADA).

A LGH resultante fornece uma perspectiva do desempenho da tubulação sob condições operacionais normais. A LGH pode ser analisada de diversas formas:

- Como o atrito só pode causar reduções na LGH, os locais em que ambas as ferramentas de inspeção em linha medem um *aumento* na LGH devem ter como causa uma redução adicional na elevação da tubulação não capturada com precisão pelo perfil de elevação. Por outro lado, locais em que ambas as ferramentas de inspeção em linha medem uma *redução* na LGH podem ter como causa um atrito acentuado (devido a uma restrição no fluxo) ou um aumento adicional na elevação da tubulação não capturado com precisão pelo perfil de elevação. Com essas informações, chega-se a uma compreensão mais precisa da elevação da tubulação.
- A LGH pode ser utilizada como insumo, refinamento ou validação de simulações de engenharia mais complexas do sistema hidráulico, dessa forma fornecendo um conhecimento mais preciso e detalhado da dinâmica do sistema hidráulico. A LGH também pode ser validada em comparação a qualquer medição de pressão auxiliar na tubulação e fornece perspectivas sobre o que as medições auxiliares podem indicar no restante da tubulação.
- A LGH é reduzida ao longo da tubulação devido ao atrito no fluxo em segmentos mais íngremes, o que indica que perda acentuada de pressão do fluxo por atrito. Desta forma, segmentos da LGH com gradientes mais íngremes podem indicar um maior acúmulo de

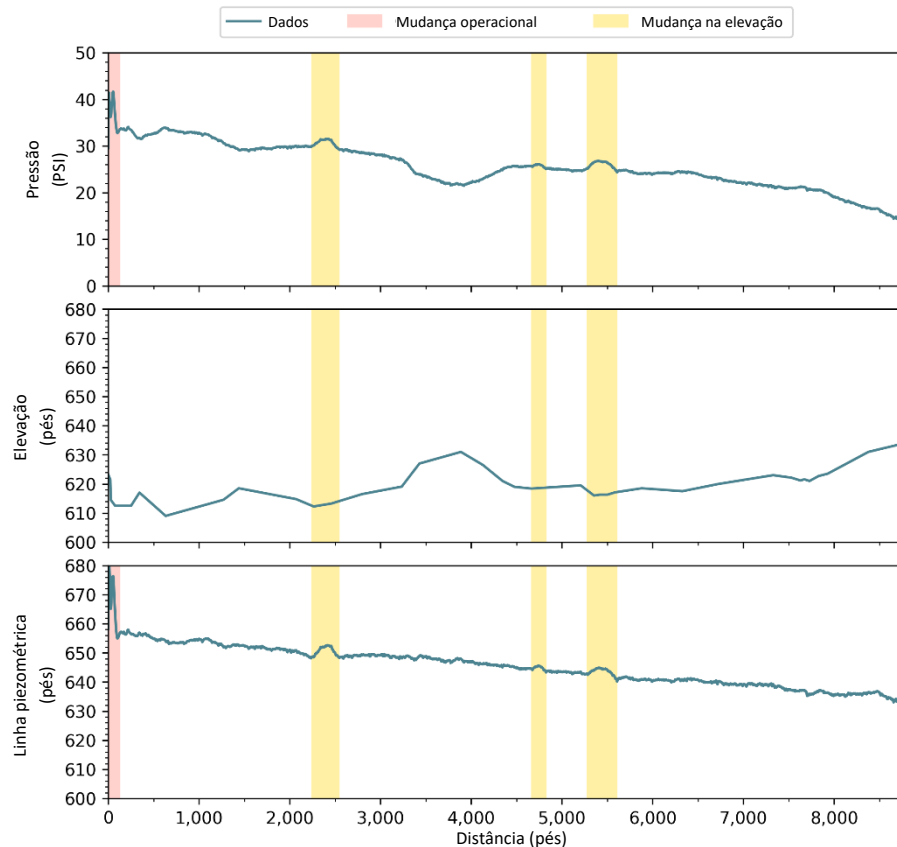
depósitos em relação ao restante da tubulação. A perda de pressão do fluxo por atrito está relacionada ao diâmetro interno efetivo e à rugosidade hidráulica da tubulação, utilizando a equação de Hazen-Williams (ou a equação de Darcy-Weisbach). Portanto, os gradientes da LGH são medido e utilizados na equação de Hazen-Williams para fornecer medidas quantitativas do nível de depósitos presente em segmentos ao longo da tubulação.



**Figura 3:** De cima para baixo: a pressão medida na segunda inspeção de uma tubulação, a pressão medida e a pressão retificada do primeira inspeção da tubulação e a pressão medida na segunda inspeção corrigida conforme as mudanças operacionais durante a inspeção (ou seja, a pressão medida na segunda inspeção menos a pressão retificada da primeira inspeção).

## METODOLOGIA: ANÁLISE DOS DEPÓSITOS

A LGH é dividida em segmentos com gradientes semelhantes e uma linha é traçada para cada segmento pelo método dos quadrados mínimos. O método dos quadrados mínimos reduz o impacto de qualquer variação residual mínima na LGH, causado por pequenas mudanças operacionais durante a instalação ou pequenas discrepâncias entre o perfil de elevação calculado e a elevação real da tubulação. A Figura 5 ilustra a LGH da inspeção em linha de uma adutora de pressão DIP de 18 polegadas, ilustrada na parte inferior da Figura 4, com as linhas de melhor adaptação sobrepostas. O perfil de elevação de superfície obtido do Google Earth e o perfil de elevação da tubulação também podem ser vistos como referências.

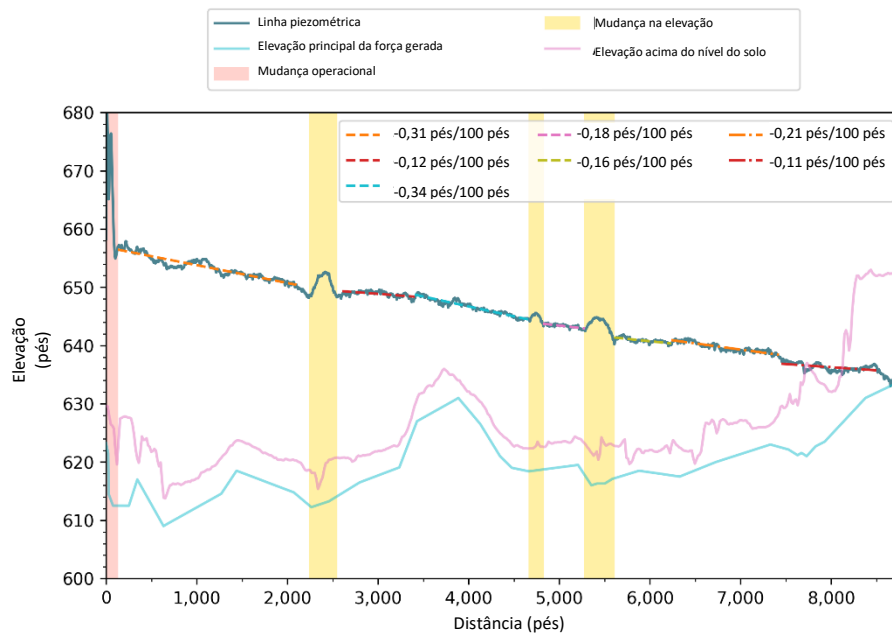


**Figura 4:** De cima para baixo: a pressão medida ao longo da tubulação, o perfil de elevação e a linha de gradiente hidráulico (ou seja, pressão do fluxo mais elevação da tubulação). As mudanças na elevação ao longo da tubulação que não foram capturadas com precisão pelo perfil de elevação estão em destaque na cor amarela.

Os gradientes da LGH, a geometria e o material da tubulação e a taxa de vazão da inspeção são utilizados na equação de Hazen-Williams (ou na equação de Darcy-Weisbach) para calcular valores quantitativos para três cenários:

- As diferenças entre o gradiente da LGH e o gradiente esperado em uma tubulação limpa podem ter como causa discrepâncias entre o perfil de elevação e a elevação real da tubulação (ou seja, a elevação da tubulação pode ter uma inclinação diferente em um segmento da tubulação do que o indicado no perfil de elevação). A alteração máxima adicional na elevação em cada segmento da tubulação é calculada para se determinar a causa da diferença observada no gradiente da LGH.
- A superfície interna do tubo pode ser mais áspera devido a um acúmulo de depósitos ou ao processo de envelhecimento do tubo, gerando um gradiente mais íngreme na LGH. O coeficiente de rugosidade mínimo que resultaria em um gradiente mais íngreme na LGH é calculado utilizando a equação de Hazen-Williams. O coeficiente de rugosidade resultante pode ser comparado aos valores de tubos envelhecidos ou de tubos em condições boas a precárias, para se ter uma indicação das condições dos tubos.
- O diâmetro efetivo da tubulação pode se restringir devido a um acúmulo de depósitos, gerando um gradiente mais íngreme na LGH. O diâmetro efetivo que resultaria em um gradiente mais íngreme na LGH é calculado utilizando a equação de Hazen-Williams. O

diâmetro efetivo resultante é subtraído do diâmetro de um tubo limpo para determinar o nível dos depósitos presentes em cada segmento da tubulação.



**Figura 5:** A LGH com linhas de melhor adaptação sobrepostas, a resistência calculada na elevação principal e a elevação de superfície obtida do Google Earth. As mudanças na elevação ao longo da tubulação que não foram capturadas com precisão pelo perfil de elevação estão em destaque na cor amarela.

Finalmente, os segmentos da tubulação com um gradiente mais íngreme na LGH são provavelmente causados por uma combinação de fatores, uma vez que o perfil de elevação pode não ser inteiramente preciso e um acúmulo de depósitos pode restringir o diâmetro e aumentar a rugosidade hidráulica da tubulação. Os valores máximos dos três cenários são calculados para cada segmento da tubulação. A Tabela 1 relaciona os resultados desses cálculos para a LGH ilustrada na Figura 5, em uma adutora principal DIP de 18 polegadas.

**Tabela 1:** Os gradientes medidos e esperados na LGH e a restrição máxima de diâmetro correspondente, discrepância máxima na elevação e coeficiente de rugosidade mínimo para cada segmento da tubulação.

Tubo segmento (pés)	Fornecido taxa de vazão (GPM)	Medido HGL gradiente (pés/100 pés)	Esperado HGL gradiente (pés/100 pés)	Diâmetro máximo restrição (polegadas)	Elevação máxima discrepância (pés)	Rugosidade mínima coeficiente
130 - 2.100	2.450	-0,31	-0,13	3,0	3,4	89
2.605 - 3.405		-0,12		N/A	-0,1	N/A
3.405 - 4.670		-0,34		3,3	2,6	84

4.820 - 5.285		-0,18		1,1	0,2	119
5.605 - 6.235		-0,16		0,8	0,2	125
6.235 - 7.425		-0,21		1,8	1,0	108
7.450 - 8.530		-0,11		N/A	-0,3	N/A

## CONCLUSÃO

A metodologia para se calcular a LGH utilizando ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra foi apresentada neste documento, juntamente com a análise subsequente da LGH, para fornecer perspectivas quanto à localização e o nível dos depósitos em uma tubulação. A facilidade de instalação e recuperação das ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra permite que a inspeção ocorra sob condições normais de operação, para se obter uma medição representativa da pressão na tubulação. O método de cálculo da LGH é robusto, de forma que as mudanças operacionais durante uma inspeção são identificadas e corrigidas utilizando diferentes técnicas, conforme as informações disponíveis. A LGH resultante ilustra o desempenho global da tubulação e pode compor a base para análises de engenharia adicionais. A análise dos depósitos na LGH indica segmentos da tubulação com um maior acúmulo de depósitos, além de indicar o nível máximo de restrição do diâmetro causado pelo acúmulo de depósitos. Essas informações ajudam as operadoras da tubulação a definir metas e programar as limpezas. Na demonstração do método, diversos exemplos de perfis de pressão e LGH com alta resolução foram apresentados.

A facilidade da instalação permite que esta abordagem seja utilizada com frequência, para dar continuidade ao monitoramento das condições da tubulação. A comparação entre LGHs de inspeções antes e depois de uma limpeza programada serve para avaliar a eficiência da limpeza. Além disso, a comparação entre LGHs de inspeções depois de períodos prolongado de operação normal pode indicar como os depósitos na tubulação se expandem ou se reduzem. Desta forma, a comparação entre LGHs de inspeções separadas está sendo validada no momento.

## REFERÊNCIAS

- American Water Works Association, “2019 State of the Water Industry Report.”, **2019**
- Byington M., van Pol A., and van Pol J., "Pipeline Joint Identification Using Neural Networks," *Pipeline Technology Journal* 4, **2023**.
- Colebrook C.F., “Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Between the Smooth and Rough Pipe Laws”, *J. Inst. Civil Engineering London*, vol. 11, **1939**.
- Cybersecurity & Infrastructure Security Agency, “Water and Wastewater Systems Sector.”, **2023**.
- Kindree M., Campbell S., van Pol A., and van Pol J., "Defect Localization Using Free-floating Unconventional ILI Tools Without AGMs," *Pipeline Pigging and Integrity Management*, **2022**.
- Statistics Canada, “Canada's Core Public Infrastructure Survey: Water Infrastructure, 2020”, **2022**.
- Tabuchi H., “\$300 Billion War Beneath the Street: Fighting to Replace America’s Water Pipes,” *New York Times*, **2017**.
- U.S. Geological Survey, “Summary of Estimated Water Use in the United States in 2015.”, **2015**.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, “Report to Congress: Impacts and Control of CSOs and SSOs,” **2004**.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, “State of Technology for Rehabilitation of Wastewater Collection Systems,” **2010**.
- Moody L.F., “Friction Factors for Pipe Flow,” *ASME Transcripts* vol. 66, **1944**.
- Williams G. S., Hazen A., “Hydraulic tables: showing the loss of head due to the friction of water flowing in pipes, aqueducts, sewers, etc. and the discharge over weirs” (first ed.), *New York: John Wiley and Sons*, **1905**.