



ANÁLISE DE DEPÓSITOS E INCRUSTAÇÕES EM DUTOS E ADUTORAS COM LINHAS DE NIVELAMENTO HIDRÁULICO MEDIDAS POR FERRAMENTAS INTERNAS DE FLUTUAÇÃO LIVRE

Felipe Chagas de Oliveira

Físico, CEO - Orion Serviços de Inspeção e Consultoria

John Van Pol

CEO – INGU Solutions

Anouk Van Pol

COO – INGU Solutions

Matthew Kindree

Data Analyst – INGU Solutions

Pedro Dias Machado

Técnico de equipamentos - Orion Serviços de Inspeção e Consultoria

Endereço⁽¹⁾: Orion Serviços de Inspeção e Consultoria - Rua Hélio de Almeida, s/n, Bloco 3, sala 41 – Cidade Universitária da UFRJ – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro - RJ, CEP 21941-614 - Tel: +55 (21) 98109 - e-mail: felipe@orionsic.com.br

RESUMO

Este trabalho demonstra a metodologia para o cálculo da linha de grade hidráulica a partir de ferramentas de inspeção em linha de flutuação livre e a análise de depósito subsequente da classificação de grade hidráulica. Depósitos e incrustações são dois dos maiores vilões na produtividade de dutos e adutoras; para endereçá-los, usamos ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra que medem a pressão ao longo de todo o comprimento do duto/adutora em condições operacionais regulares. A implantação/atuação de várias dessas ferramentas com um curto intervalo de tempo permite que os pontos localizados sejam distinguidos das alterações na operação do duto durante a implantação. As alterações operacionais identificadas durante a implantação são corrigidas antes de calcularmos a linha de nivelamento hidráulico usando um perfil de elevação da tubulação. A linha de nivelamento hidráulico resultante representa a perda de carga de pressão devido ao atrito ao longo da tubulação; locais com perda de carga de pressão mais acentuada indicam restrições na tubulação devido ao acúmulo de depósitos. O gradiente resultante, as especificações da tubulação e a vazão de inspeção são usados em conjunto com a equação de Hazen-Williams para calcular os níveis de depósitos em vários segmentos ao longo da tubulação.

PALAVRAS-CHAVE: Inspeção, Dutos, Depósitos

CONTEÚDO DO TRABALHO

INTRODUÇÃO

O fornecimento de água potável e a remoção de águas residuais de residências e empresas é uma necessidade para comunidades seguras e saudáveis. O Brasil usa, dentre consumo residencial, indústrias e agronegócio, o maior consumidor, 154 litros de água por habitante por dia, totalizando um total de 33,2 bilhões de água por dia (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS, 2022), que devem ser transportados de e para locais residenciais, comerciais e industriais por meio de uma complexa e intrincada rede de dutos e adutoras. O Brasil possui mais de 753,2 mil km de extensão em redes de distribuição de água, e mais de 365 mil quilômetros de redes de esgotamento sanitário (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS, 2021). Essa infraestrutura hídrica está envelhecendo, com a idade média dessas tubulações de água potável e esgoto sendo de mais de 35 anos, com algumas podendo ter mais de 80 anos. Além disso, no Brasil, apesar de termos abastecimento de água tratada na maioria dos municípios - 94,9% - em 2017 (Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017 – IBGE), os sistemas de distribuição e transmissão sofrem perdas que, na média nacional, alcançam 37,8% do total de água potável produzida (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS, 2022) - Portanto, é fundamental que as tubulações de água e esgoto sejam monitoradas para garantir que estejam em condições adequadas e mantenham o desempenho dos sistemas de saneamento, contemplando água e esgoto.

O acúmulo de depósitos dentro de um duto é especificamente preocupante para as adutoras que transferem águas residuais. Os depósitos reduzem a capacidade de uma tubulação, podem levar à corrosão e ao desgaste da parede da tubulação e podem causar o transbordamento dos sistemas sanitários. Em 2004, a EPA constatou que 48% dos eventos de transbordamento do sistema de esgoto sanitário com causa conhecida nos Estados Unidos foram resultados de bloqueios parciais ou completos (U.S. Environmental Protection Agency, 2004). Esses eventos de transbordamento representam um risco para a saúde pública e poluem o meio ambiente.

O acúmulo de depósitos restringirá o diâmetro efetivo da tubulação e causará maiores perdas de pressão por atrito. Assim, os operadores de sistemas monitoram o rendimento das tubulações e quaisquer medições de pressão disponíveis em busca de evidências de uma restrição. No entanto, esses métodos de monitoramento não indicam o local, extensão e/ou o tamanho percentual da restrição presente. As ferramentas de inspeção em linha que medem o perfil de pressão ao longo de toda a extensão de uma tubulação fornecem informações mais detalhadas sobre o desempenho de uma tubulação e facilitam as etapas de localização e dimensionamento. Locais com perdas de pressão por atrito mais acentuadas indicam restrições no duto devido ao acúmulo de depósitos ou bolsões de gás presos, possivelmente com restrições maiores causando perdas mais acentuadas. O cálculo da linha de grade hidráulica (HGL) facilita essa análise, considerando as mudanças na pressão hidrostática ao longo do comprimento da tubulação.

OBJETIVO

Este artigo demonstra a metodologia usada para calcular o HGL a partir de ferramentas de inspeção em linha free-floating e a análise subsequente do HGL para fornecer informações sobre o nível de depósitos dentro de um duto. Primeiro, um background técnico detalha as relações físicas que regem o fluxo através de um duto/adutora e a definição de um HGL. A metodologia de cálculo de um HGL é demonstrada incluindo características importantes da ferramenta em linha; métodos para identificar e corrigir mudanças operacionais durante a inspeção; e o cálculo de um HGL a partir da pressão medida ao longo da tubulação. Finalmente, a análise de um HGL para determinar os níveis de depósitos dentro do duto é detalhada.

METODOLOGIA UTILIZADA

Fluxos de tubos estáveis e incompressíveis são governados pela equação de Bernoulli,

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

onde p é pressão, ρ é densidade de fluido, g é aceleração devido à gravidade, z é a elevação do duto, v é a velocidade do fluido, e o atrito é a perda de carga devido ao atrito. Essa equação pode ser ainda mais simplificada porque a velocidade do fluido é constante ao longo dos segmentos de uma tubulação sem entradas significativas, saídas ou mudanças no diâmetro. Definindo a linha de nivelamento hidráulico, o HGL, como o indicativo de pressão mais a elevação da tubulação ($\text{HGL} = p/(\rho g) + z$), a equação de Bernoulli pode ser ainda mais simplificada para:

$$\text{HGL}_{\text{a montante}} = \text{HGL}_{\text{a jusante}} + h_{\text{atrito}}$$

Assim, alterações no HGL estão diretamente relacionadas à perda de carga por atrito, $\Delta\text{HGL} = h_{\text{atrito}}$.

A perda de carga devido ao atrito é dependente da geometria da tubulação, do material do tubo e da taxa de fluxo através da equação de Darcy-Weisbach,

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

onde Δx é o comprimento ao longo do tubo, D é o diâmetro interno da tubulação, Q é a taxa de fluxo e f é o fator de atrito de Darcy. O fator de atrito de Darcy depende do estado do escoamento (turbulento ou laminar) e é uma função da densidade e viscosidade do fluido; o diâmetro interno do tubo e a rugosidade hidráulica da superfície interna; e a vazão. Essas quantidades são tradicionalmente relacionadas através do diagrama de

Moody (Moody, 1944) ou de uma das várias equações complexas, incluindo a equação de Colebrook (Colebrook, 1939),

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

onde ϵ é a rugosidade hidráulica da superfície interna do tubo que explica materiais de tubos e $Re = 4\rho Q/\mu D$ é o número de Reynolds adimensional do fluxo onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Para água à temperatura ambiente, a relação de Hazen-Williams existe como uma alternativa tradicional à equação de Darcy-Weisbach. Trata-se de uma relação empírica mais simples entre a vazão, o diâmetro interno da tubulação e um coeficiente de rugosidade C , que explica a rugosidade hidráulica de diferentes materiais de tubos. A relação Hazen-Williams é (Williams e Hazen, 1905),

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

Um acúmulo de depósitos restringirá o diâmetro efetivo da tubulação e terá uma rugosidade aumentada em comparação com uma tubulação limpa; ambos os fatores causando aumento do atrito e uma diminuição mais acentuada do HGL. Portanto, analisar o gradiente do HGL em uma dada vazão fornece indicação do nível de depósitos dentro da tubulação. O HGL de uma tubulação pode ser calculado a partir de medições de pressão aferidas por de uma ferramenta de inspeção em linha com flutuação neutra.

METODOLOGIA: FERRAMENTAS DE INSPEÇÃO EM LINHA DE FLUTUAÇÃO NEUTRA

Os métodos tradicionais de inspeção são restritos a medições de pressão de um pequeno número de locais ao longo da tubulação que não fornecem detalhes, repetibilidade e acurácia suficientes do perfil de pressão ao longo do comprimento do duto. As ferramentas de inspeção em linha têm a vantagem de registrar as medições de pressão ao longo de todo o comprimento da tubulação. No entanto, as ferramentas de inspeção em linha mais comuns, conhecidas como pigs inteligentes dependem da pressão da tubulação para impulsionar o pig através do duto e, portanto, não fornecem uma medição representativa da pressão em condições operacionais regulares.

As ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra são ideais para esta aplicação devido à sua natureza flutuante. A característica de flutuação neutra da ferramenta significa que esta tem a mesma gravidade específica que o fluido e, portanto, se move com o fluxo como se fosse parte do fluido. Isso permite que ferramentas flutuantes de forma neutra passem por cima das mudanças de elevação; através de válvulas e mudanças de diâmetro; e passar por derivações e “T”s fechados e restrições, uma vez que viaja conforme o fluxo. A facilidade de implantação e recuperação da ferramenta permite que a inspeção ocorra em condições operacionais regulares para uma medição representativa da pressão da tubulação.

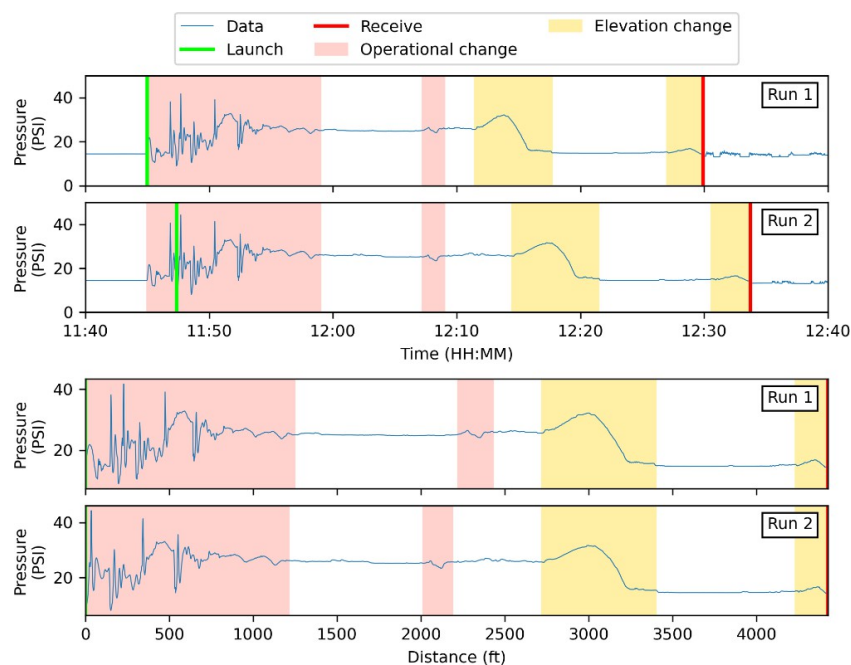
As ferramentas de empuxo neutro utilizadas para a análise descrita neste artigo são denominadas Pipers®. São pequenas esferas esféricas multi-sensores com menos de 3 polegadas de diâmetro. Seu peso pode ser ajustado para corresponder à densidade do fluido da tubulação de modo que elas sejam flutuantes de forma neutra. A ferramenta carrega um conjunto de vários sensores, incluindo uma unidade de medição inercial (acelerômetro triaxial e giroscópio), múltiplos magnetômetros triaxiais para análise de integridade e avaliação de corrosões de dutos ferro-magnéticos, um sensor de pressão e temperatura e um sensor acústico passivo. O conjunto multi-sensores permite que vários aspectos da condição da tubulação sejam monitorados com uma única inspeção. Técnicas avançadas de processamento de dados (Byington, 2023) combinadas com as medições multi-sensores permitem a localização precisa da medição ao longo do comprimento da tubulação sem o uso de marcadores acima do solo (Kindree, 2022). As ferramentas podem ser implantadas pelo operador do duto/adutora em condições operacionais regulares sem modificações no duto.

Assim, essas ferramentas de inspeção em linha de flutuação neutra permitem que a pressão da tubulação seja medida com alta resolução espacial ao longo de todo o comprimento da tubulação em condições operacionais regulares. As medições de pressão de uma inspeção são usadas para calcular o HGL da tubulação e posteriormente analisadas.

METODOLOGIA: MUDANÇAS OPERACIONAIS DURANTE AS IMPLANTAÇÕES

A ferramenta em linha de flutuação livre mede uma combinação variações na pressão ao longo da tubulação e quaisquer alterações operacionais na tubulação durante a inspeção. Várias ferramentas podem ser implantadas no mesmo duto com um pequeno intervalo de tempo entre os lançamentos para permitir que os recursos do duto / adutora sejam distinguidos das alterações operacionais. As flutuações de pressão medidas por ambas as ferramentas no mesmo local indicam características da tubulação, enquanto as flutuações de pressão que não são repetíveis entre as implantações indicam mudanças operacionais durante a inspeção. As duas linhas superiores da Figura 1. mostram a pressão em tempo medida durante uma inspeção e as duas linhas inferiores mostram a pressão em distância. As duas corridas de inspeção foram lançadas e recebidas com cerca de 3 minutos de intervalo (os tempos de lançamento são indicados com linhas verticais verdes e os tempos de recebimento com linhas verticais vermelhas). As mudanças operacionais na pressão da tubulação são destacadas em rosa e são medidas ao mesmo tempo por ambas as ferramentas que estão em locais diferentes dentro da tubulação a qualquer momento. Por outro lado, as alterações de elevação da tubulação são destacadas em amarelo e são medidas quando as ferramentas passam por um local específico, o que ocorre em um momento diferente para cada ferramenta.

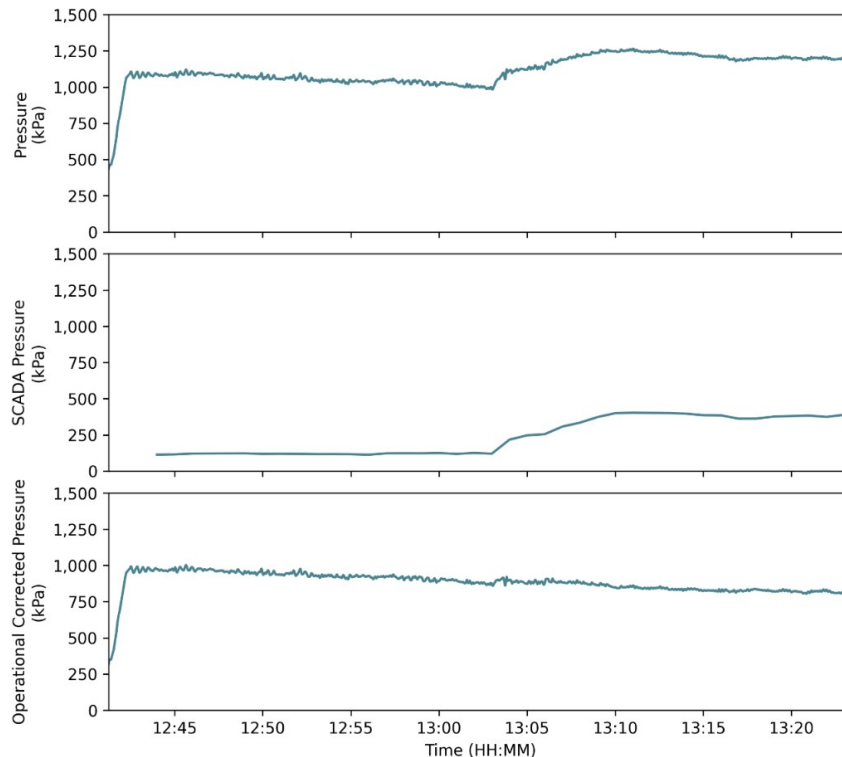
Figura 1 - Medições de pressão de duas etapas da inspeção de um duto com um pequeno intervalo de tempo entre os lançamentos dos Pipers®. As duas linhas superiores mostram a pressão medida no tempo e as duas linhas inferiores mostram a pressão medida em distância. As mudanças operacionais durante a inspeção são destacadas em rosa e as mudanças de elevação ao longo da tubulação são destacadas em amarelo.



Fonte: Print de Software de Análise de dados Orion / INGU

Uma vez identificadas, as mudanças operacionais durante a inspeção podem ser corrigidas antes do cálculo do HGL usando uma de duas técnicas. Na primeira técnica, as medidas de pressão auxiliar da tubulação com resolução temporal suficiente são subtraídas da pressão medida pela ferramenta em linha. As duas primeiras linhas da Figura 2. mostram a pressão medida no tempo a partir de uma inspeção em linha e a pressão SCADA auxiliar medida da tubulação durante a inspeção. As alterações na operação da tubulação são medidas pelas medições de pressão SCADA e pela ferramenta de inspeção em linha ao mesmo tempo. Portanto, a pressão medida da ferramenta de inspeção em linha é corrigida para mudanças operacionais durante a inspeção subtraindo a pressão SCADA. A pressão operacional corrigida resultante é mostrada na linha inferior da Figura 2. e contém apenas a cabeça de pressão que é usada para calcular o HGL.

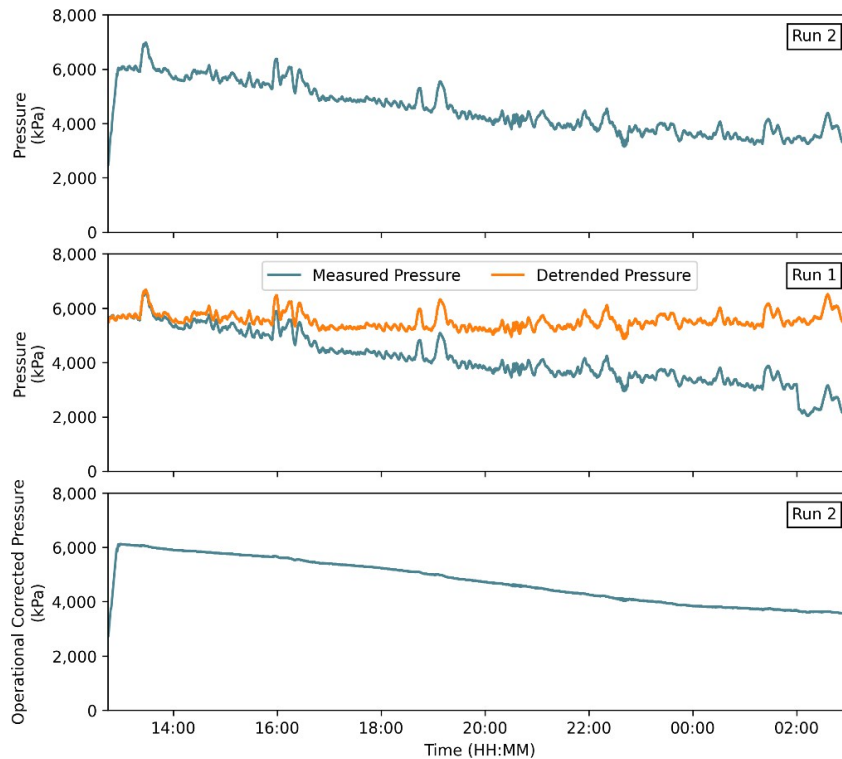
Figura 2. De cima para baixo: pressão medida no tempo a partir de uma inspeção em linha, pressão SCADA auxiliar medida da tubulação e pressão de inspeção em linha medida corrigida para mudanças operacionais durante a inspeção (ou seja, pressão medida menos pressão SCADA).



Fonte: Print de Software de Análise de dados Orion / INGU

Quando possível, ambas as ferramentas são implantadas com um curto intervalo de tempo entre os lançamentos (10-30min), de modo que ambas estejam no duto ao mesmo tempo. Assim, ambas as ferramentas em linha medirão as mesmas mudanças operacionais ao mesmo tempo e um conjunto de medições de pressão pode ser usado para corrigir as mudanças operacionais no segundo conjunto de medições de pressão. As duas primeiras linhas da Figura 3. mostram a pressão medida no tempo de duas execuções de inspeção de uma tubulação. A linha do meio da Figura 3. também mostra a pressão reduzida da primeira corrida de inspeção, onde a tendência decrescente foi removida da pressão medida. As alterações na operação da tubulação são medidas por ambas as ferramentas de inspeção em linha ao mesmo tempo. Portanto, a pressão da primeira inspeção é subtraída da pressão medida da segunda inspeção para corrigir as alterações operacionais ocorridas no intervalo. A pressão operacional corrigida resultante é mostrada na linha inferior da Figura 3. e contém apenas a cabeça de pressão que é usada para calcular o HGL.

Figura 3 - De cima para baixo: a pressão medida da segunda execução de inspeção de uma tubulação, a pressão medida e a pressão reduzida da primeira execução de inspeção de uma tubulação e a pressão medida da segunda execução de inspeção corrigida para alterações operacionais durante a inspeção (isto é, pressão medida da segunda inspeção menos a pressão reduzida da primeira corrida de inspeção).



Fonte: Print de Software de Análise de dados Orion / INGU

METODOLOGIA: A LINHA DE GRADE HIDRÁULICA

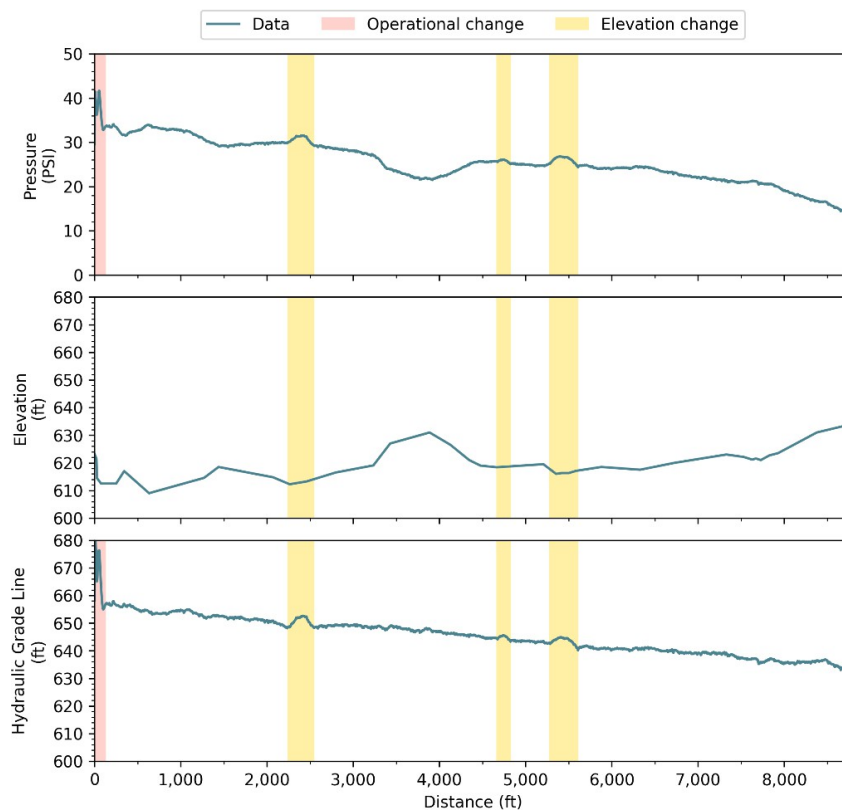
Depois de corrigir as mudanças operacionais durante a pesquisa, o HGL pode ser calculado alinhando o perfil de pressão a um perfil de elevação da tubulação. Os perfis de elevação geralmente estão disponíveis a partir de desenhos de projeto ou as-built da tubulação. No entanto, se os desenhos não estiverem disponíveis, o perfil de elevação acima do solo pode ser obtido de serviços como o Google Earth com apenas um mapa GIS da tubulação e usado para o cálculo do HGL (isso pressupõe que a tubulação esteja enterrada a uma profundidade constante ao longo do comprimento da tubulação). A Figura 4. mostra a pressão medida ao longo da tubulação a partir de uma inspeção em linha, o perfil de elevação da tubulação e o HGL resultante. Observe que a pressão medida (linha superior da Figura 4.) e o perfil de elevação (linha do meio da Figura 4.) são inversamente proporcionais (ou seja, aumentos de pressão são causados por descidas da tubulação e diminuições de pressão causadas por subidas da tubulação).

O HGL resultante fornece informações sobre o desempenho do duto em condições normais de operação. O HGL pode ser analisado de várias maneiras:

- Como o atrito só pode fazer com que o HGL diminua, os locais onde ambas os Pipers® em linha medem um aumento no HGL devem ser causados por uma diminuição adicional na elevação da tubulação não capturada com precisão pelo perfil de elevação. Por outro lado, locais onde ambas as ferramentas em linha medem uma diminuição no HGL podem ser causados por um aumento do atrito (provenientes de uma restrição ao fluxo) ou por um aumento adicional na elevação da tubulação não capturada com precisão pelo perfil de elevação. Com essas informações, consegue-se uma compreensão mais precisa da elevação da tubulação.
- O HGL pode ser usado como entrada, refinamento ou validação de simulações de engenharia mais complexas do sistema de dutos, proporcionando assim um conhecimento mais preciso e detalhado da dinâmica do sistema de dutos. O HGL também pode ser validado contra quaisquer medições de pressão auxiliares da tubulação e fornecer informações sobre o que as medições auxiliares podem indicar para o restante da tubulação.

- O HGL diminui ao longo do comprimento da tubulação devido ao atrito do fluxo com segmentos mais íngremes, indicando maior perda de carga por atrito. Assim, segmentos do HGL com gradientes mais acentuados podem indicar um maior acúmulo de depósitos em relação ao restante do duto. A perda de carga por atrito está relacionada ao diâmetro interno efetivo e à rugosidade hidráulica da tubulação através da equação de Hazen-Williams (ou equação de Darcy-Weisbach). Portanto, gradientes do HGL são medidos e usados com a equação de Hazen-Williams para fornecer medidas quantitativas do nível de depósitos presentes em segmentos ao longo do duto.

Figura 4 - De cima para baixo: pressão medida ao longo da tubulação, perfil de elevação e linha de nivelamento hidráulico (ou seja, cabeça de pressão mais elevação da tubulação). As alterações de elevação ao longo da tubulação que não são capturadas com precisão pelo perfil de elevação são realçadas em amarelo.



Fonte - Print de Software de Análise de dados Orion / INGU

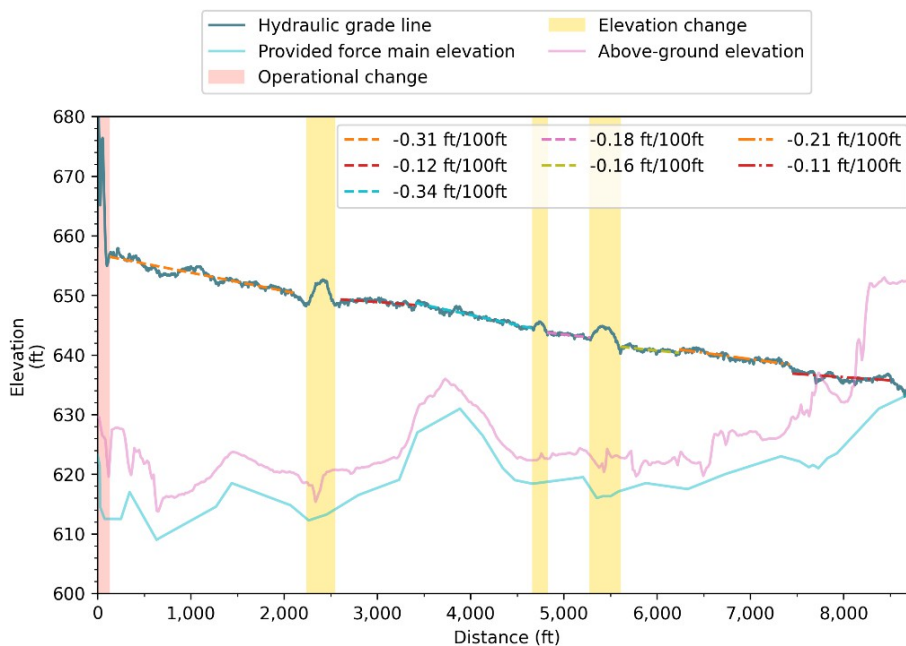
RESULTADOS: ANÁLISE DE DEPÓSITOS

O HGL é dividido em segmentos com gradientes semelhantes e uma linha é ajustada a cada segmento com um método de mínimos quadrados. O método dos mínimos quadrados reduz o impacto de quaisquer pequenas flutuações remanescentes no HGL causadas por pequenas mudanças operacionais durante a implantação ou pequenas discrepâncias entre o perfil de elevação fornecido e a elevação real da tubulação. A Figura 5 mostra o HGL a partir da inspeção em linha de uma força DIP principal de 18 polegadas mostrada na parte inferior da Figura 4 com linhas de melhor ajuste sobrepostas. O perfil de elevação acima do solo obtido do Google Earth e o perfil de elevação da tubulação também estão incluídos para referência.

Os gradientes do HGL; geometria e material de dutos; e a vazão da inspeção são utilizadas com a equação de Hazen-Williams (ou equação de Darcy-Weisbach) para fornecer valores quantitativos para três cenários:

- As diferenças entre o gradiente do HGL e o gradiente esperado para uma tubulação limpa podem ser causadas por 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 a indicada no perfil de elevação). A variação de elevação adicional máxima em cada segmento da tubulação é calculada, o que causaria a diferença observada no gradiente do HGL.
- A superfície interna do tubo pode ser mais áspera devido a um acúmulo de depósitos ou envelhecimento do tubo causando um gradiente mais acentuado do HGL. O coeficiente de rugosidade mínimo que causaria o gradiente mais acentuado do HGL é calculado usando a equação de Hazen-Williams. O coeficiente de rugosidade resultante pode ser comparado com valores de tubo envelhecido ou valores para tubo em bom a mau estado para uma indicação da condição do tubo.
- O diâmetro efetivo da tubulação pode ser restrito devido a um acúmulo de depósitos causando um gradiente mais acentuado do HGL. O diâmetro efetivo que causaria o gradiente mais acentuado do HGL é calculado usando a equação de Hazen-Williams. O diâmetro efetivo resultante é subtraído do diâmetro de um tubo limpo para determinar o nível de depósitos presentes em cada segmento da tubulação.

Figura 5 - HGL com linhas de melhor ajuste sobrepostas, a elevação principal da força fornecida e a elevação acima do solo obtida do Google Earth. As alterações de elevação ao longo da tubulação que não são capturadas com precisão pelo perfil de elevação são realçadas em amarelo.



Fonte: Print de Software de Análise de dados Orion / INGU

Em última análise, segmentos da tubulação com um gradiente mais acentuado do HGL são provavelmente causados por uma conjunção de fatores, uma vez que o perfil de elevação pode não ser completamente preciso e um acúmulo de depósitos restringirá o diâmetro e aumentará a rugosidade hidráulica da tubulação. Os valores máximos dos três cenários são calculados para cada segmento do duto. A Tabela 1. apresenta os resultados desses cálculos para o HGL mostrado na Figura 5. para uma força DIP principal de 18 polegadas.

Tabela 1. Gradientes medidos e esperados do HGL e a restrição de diâmetro máximo correspondente, discrepância máxima de elevação e coeficiente de rugosidade mínimo para cada segmento da tubulação.

Seguimento do tubo (m)	Vazão fornecida (LPM)	HGL medido	HGL esperado	Restrição de diâmetro máximo (in)	Discrepância de elevação máxima (m)	Coeficiente de rugosidade mínimo
		gradiente (m/100m)	gradiente (m/100m)			
130 - 2,100		-0.094488		3	1.03632	89
2,605 - 3,405		-0.036576		n/A	-0.03048	N/A
3,405 - 4,670		-0.103632		3.3	0.79248	84
4,820 - 5,285	9,286	-0.054864	-0.13	1.1	0.06096	119
5,605 - 6,235		-0.048768		0.8	0.06096	125
6,235 - 7,425		-0.064008		1.8	0.3048	108
7,450 - 8,530		-0.033528		N/A	-0.09144	N/A

Fonte: Elaboração própria a partir da análise dos dados acima descritos.

CONCLUSÃO

Uma metodologia para calcular o HGL a partir de ferramentas de inspeção em linha de flutuação livre foi apresentada neste artigo, juntamente com a análise subsequente do HGL para fornecer informações sobre a localização e o nível de depósitos dentro de um duto. A facilidade de implantação e recuperação das ferramentas em linha de flutuação neutra permite que a inspeção ocorra em condições operacionais regulares para uma medição representativa da pressão da tubulação. O método de cálculo do HGL é robusto de tal forma que as mudanças operacionais durante uma inspeção são identificadas e corrigidas usando diferentes técnicas, dependendo das informações disponíveis. O HGL resultante ilustra o desempenho geral do duto / adutora e pode formar a base de uma análise de engenharia adicional. A análise de depósitos do HGL indica segmentos do duto com maior acúmulo de depósitos, além de indicar o nível máximo de restrição de diâmetro causado pelo acúmulo de depósitos. Essas informações ajudam os operadores de tubulação a direcionar e planejar programas de limpeza. Na demonstração do método, vários exemplos dos perfis de pressão de alta resolução e HGL foram apresentados.

A facilidade de implantação permite que essa abordagem seja usada com frequência para monitoramento contínuo da condição do duto. Comparar o HGL de inspeções antes e depois de um programa de limpeza pode medir a eficiência da limpeza. Além disso, comparar o HGL de inspeções após longos períodos de operação normal pode indicar como os depósitos no duto cresceram ou encolheram. Assim, a comparação do HGL a partir de inspeções separadas está atualmente sendo validada.

REFERÊNCIAS

1. Agência de Segurança de Cibersegurança, "Setor de Sistemas de Água e Esgoto.", 2023. Kindree M., Campbell S., van Pol A. e van Pol J., "Defect Localization Using Free-floating Unconventional ILI Tools Without AGMs", Pipeline Pigging and Integrity Management, 2022
2. Byington M., van Pol A. e van Pol J., "Pipeline Joint Identification Using Neural Networks,"
3. Colebrook C.F., "Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Between the Smooth and Rough Pipe Laws", J. Inst.

4. Dados Anuais, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 2022. Disponível em <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2022/12/estudo-do-governo-federal-mostra-que-brasil-tem-753-2-mil-km-de-redes-de-distribuicao-de-agua-e-365-mil-km-de-redes-de-esgoto>
5. Instituto Trata Brasil, Principais Estatísticas Nacionais do uso de Água, 2019. Disponível em [tratabrasil.org.br/principais-estatisticas/agua/#:~:text=O%20consumo%20médio%20de%20água,Organização%20das%20Nações%20Unidas\)%3B](http://tratabrasil.org.br/principais-estatisticas/agua/#:~:text=O%20consumo%20médio%20de%20água,Organização%20das%20Nações%20Unidas)%3B)
6. Moody L.F., "Fatores de Atrito para Fluxo de Tubos", ASME Transcripts vol. 66, 1944.
7. Statistics Canada, "Canada's Core Public Infrastructure Survey: Water Infrastructure, 2020", 2022.
8. Tabuchi H., "Guerra de US\$ 300 bilhões sob a rua: lutando para substituir os canos de água da América", 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" (primeira ed.), Nova Iorque: John Wiley and Sons,