ESTUDO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS NO BOMBEAMENTO DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRAULIC PARAMETERS IN THE PUMPING OF IRON ORE SLURRY

Letícia Jatczak Almeida, Luiz Felipe de Morais da Costa Barros, Arthur Dantas Rezende, Beatriz Sousa Veiga, Pedro Russo Marques, Raoni Melo Medina, Daniel Pereira Medeiros, Vitor da Silva Rosa, Álvaro Luiz Moreira Conrado, Nelize Maria de Almeida Coêlho

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Química
E-mail para contato: leticiajatczak4@gmail.com

RESUMO – *O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo e utiliza, entre outros modais, minerodutos para transportá-lo até os portos para exportação. Essa técnica consiste em se bombear uma polpa formada por água e minério e se destaca pela menor emissão de CO_2 e menor consumo de energia. Como desvantagem, exige elevado consumo de água e carece de dados experimentais sobre parâmetros de bombeamento. O presente trabalho avaliou o escoamento bifásico água/pellet feed em uma unidade de bancada com tubulação de 1" de PVC transparente. Foram determinadas as curvas de perda de carga e identificados os regimes de escoamento em função da vazão e da velocidade do fluido. Os resultados demostraram uma velocidade crítica próxima à 2,0 m/s.*

Palavras-chave: Transporte de polpa mineral; Minério de ferro; Mineroduto, Perda de Carga, Velocidade Crítica.

ABSTRACT – *Brazil is one of the world's largest producers of iron ore and uses, among other modes, pipelines to transport it to ports for export. This technique consists of pumping a slurry composed of water and ore and stands out for its lower CO_2 emissions and reduced energy consumption. As a drawback, it requires a high amount of water and lacks experimental data on pumping parameters. The present study evaluated the two-phase water/pellet feed flow in a bench-scale unit with a 1-inch transparent PVC pipeline. Pressure-loss curves were determined, and flow regimes were identified as a function of flow rate and fluid velocity. The results indicated a critical velocity close to 2.0 m/s.*

Keywords: *Mineral slurry transport; Iron ore; Pipeline, Pressure loss; Critical Velocity.*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a mineração representa uma das principais atividades econômicas, destacando-se a produção de minério de ferro, cuja exploração consolidou o país como um dos maiores exportadores mundiais. Em 2023, foram exportadas 392,3 milhões de toneladas de minérios, gerando uma receita de 42,9 bilhões de dólares, das quais 71% corresponderam ao ferro, com faturamento de 30,5 bilhões de dólares (IBRAM, 2024). No primeiro trimestre de 2024, o minério de ferro respondeu por 63,9 % do Indicador de Produção Mineral (IPM-Total), evidenciando sua relevância para a balança comercial brasileira (ANM, 2024).

As principais reservas de ferro brasileiras concentram-se nas regiões Centro-Sul de Minas Gerais e Serra dos Carajás, no Pará. Por se localizarem em áreas distantes dos grandes portos, torna-se imprescindível a utilização de sistemas de transporte eficientes e economicamente sustentáveis, de modo a viabilizar o escoamento da produção. Entre os modais disponíveis o mineroduto se destaca por apresentar menores custos operacionais e impactos ambientais reduzidos, conforme aponta relatório divulgado em 2022 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Ministério de Minas e Energia (LABTRANS/UFSC, 2022).

Os minerodutos permitem o transporte de minério em suspensão aquosa por dutos em longas distâncias, reduzindo o tráfego rodoviário, as emissões de CO_2 e o consumo energético (MINAS JR CONSULTORIA MINERAL, 2018). Um único mineroduto pode substituir cerca de 1,5 mil caminhões por dia, transportando até 60 mil toneladas de minério. O mineroduto Minas-Rio, por exemplo, é o mais extenso do mundo, com 592 km, ligando Conceição do Mato Dentro (MG) ao Porto do Açu (RJ), e capacidade de movimentar 26,5 milhões de toneladas anuais (ANGLO AMERICAN, 2014).

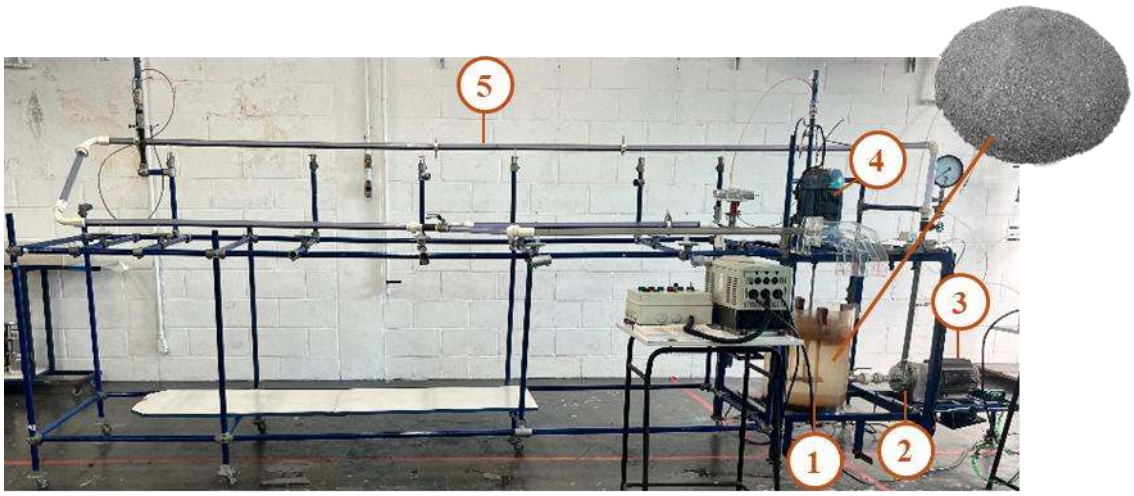
Apesar das vantagens, esse modal apresenta desafios técnicos relacionados ao elevado consumo de água e à necessidade de melhor compreensão dos parâmetros hidráulicos que regem o escoamento multifásico. Variáveis como velocidade crítica, perda de carga, distribuição de sólidos na seção transversal do escoamento e características reológicas da polpa influenciam diretamente a eficiência, a segurança operacional e a sustentabilidade do processo (CHAVES, 2012; TRINCA, 2017; PINTO, 2012). A determinação adequada desses parâmetros é fundamental para evitar sedimentação, obstruções e desgastes prematuros nas tubulações.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente a perda de carga e a distribuição de sólidos na seção transversal do duto no escoamento de uma polpa com concentração volumétrica de 5 % de *pellet feed* de minério de ferro em escala de bancada. A pesquisa buscou gerar subsídios técnicos para contribuir para a otimização do transporte por minerodutos, ampliando a eficiência energética e operacional desse modal logístico estratégico para a mineração brasileira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utilizou minério de ferro do tipo *pellet feed* fornecido pela VALE S.A. (Figura 1 - destaque). Esse material se caracteriza pela elevada concentração de ferro e pelo baixo coeficiente de variação para o diâmetro de partículas, com cerca de 90 % da amostra apresentando diâmetro inferior à 170 µm e um diâmetro médio de Sauter de 46,3 µm.

Figura 1: Unidade experimental para transporte hidráulico de minério de ferro. 1) Tanque equipado com impulsor mecânico para armazenamento e homogeneização da polpa, 2) Bomba com rotor semiaberto, 3) Motor principal para acionamento da bomba, 4) Motor secundário para acionamento do impelidor, 5) Percurso de tubulação para avaliação do escoamento. Em destaque, o pellet feed de minério de ferro.

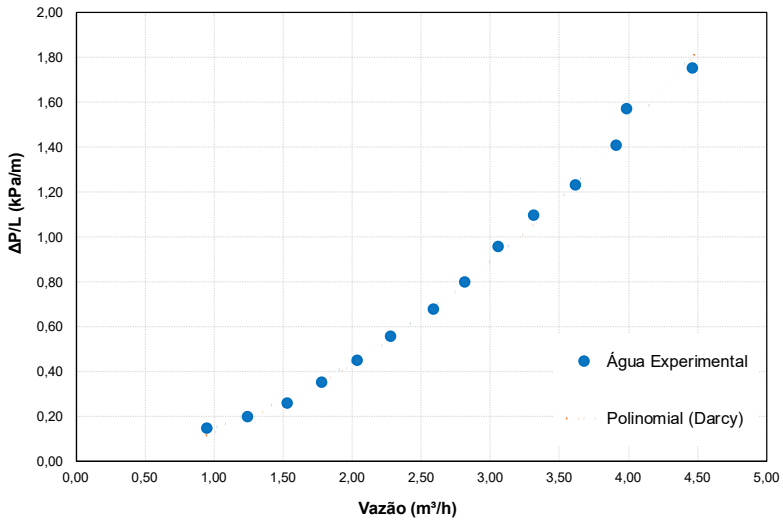


Os ensaios foram realizados em bancada piloto localizada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília (Unisanta), composta por tanque de armazenamento de polpa, impelidor mecânico acionado por motor elétrico com inversor de frequência, bomba centrífuga, tubulação com comprimento total de nove metros e

diâmetro interno de 27 mm, e uma seção horizontal em vidro que permitiu observação visual do escoamento. A aferição da perda de carga foi realizada por meio de manômetro do tipo U invertido, preenchido com água como fluido manométrico de referência.

O manômetro em U foi validado através da comparação da perda de carga teórica, obtida pela equação de Darcy- Weisbach, e da perda de carga experimental, medida com esse instrumento para o escoamento de água pura. A Figura 2 apresenta essa comparação e demonstra a aderência dos pontos experimentais à curva teórica de Darcy.

Figura 2: Validação do tubo em U invertido para medição da perda de carga.



A polpa de *pellet feed* de minério de ferro foi preparada a partir da combinação de certa quantidade de sólido (previamente seco por 24 h à 120 ℃ e posteriormente resfriado até temperatura ambiente) e de água destilada no próprio tanque da unidade de forma a produzir uma mistura com concentração volumétrica de 5 % (Eq. 1). A massa específica da polpa foi obtida empregando-se a Eq. 2.

$$C_v = \frac{V_S}{(V_S + V_L)} . 100 = \frac{\frac{m_S}{\rho_S}}{\left(\frac{m_S}{\rho_S} + \frac{m_L}{\rho_L}\right)} . 100 \quad (1)$$

$$\rho_P = \frac{100}{\left(\frac{C_w}{\rho_S} + \frac{100 - C_w}{\rho_L}\right)} \quad (2)$$

Em que: C_v é a concentração volumétrica da polpa [%]

C_w é a concentração mássica da polpa [%]

V_i é o volume de i, sendo S para o sólido e o L para o líquido $[m^3]$

m_i é a massa de i, sendo S para o sólido e o L para o líquido $[kg]$

ρ_i é a massa específica de i, sendo S para o sólido e o L para o líquido, e P para a polpa mineral $[kg/m^3]$

Antes da execução dos ensaios, a rotação do impelidor foi ajustada para promover a completa suspensão das partículas, tendo sido definida em 460 rpm para esta concentração. A verificação da suspensão ocorreu por meio de um ensaio preliminar de dosagem, em que a suspensão foi coletada em recipiente de massa conhecida em um tempo determinado, sendo posteriormente realizada pesagem e secagem para determinar a massa total de minério recolhido.

Os ensaios de bombeamento da polpa foram realizados controlando a rotação da bomba através do inversor de frequência. Os limites operacionais da unidade experimental limitaram a janela de trabalho entre 900 e 1900 rpm, a qual foi estudada em intervalos de 100 rpm. Os ensaios iniciais consistiram na calibração da faixa de operação em termos de vazão mássica, utilizando a densidade da polpa para se obter a vazão volumétrica. Para isso, utilizou-se um recipiente de massa conhecida, posicionado na saída do circuito hidráulico, no qual foi coletada uma determinada massa em um intervalo de tempo monitorado. Este procedimento foi realizado cinco vezes para cada rotação de trabalho visando obter um valor médio mais próximo do valor real.

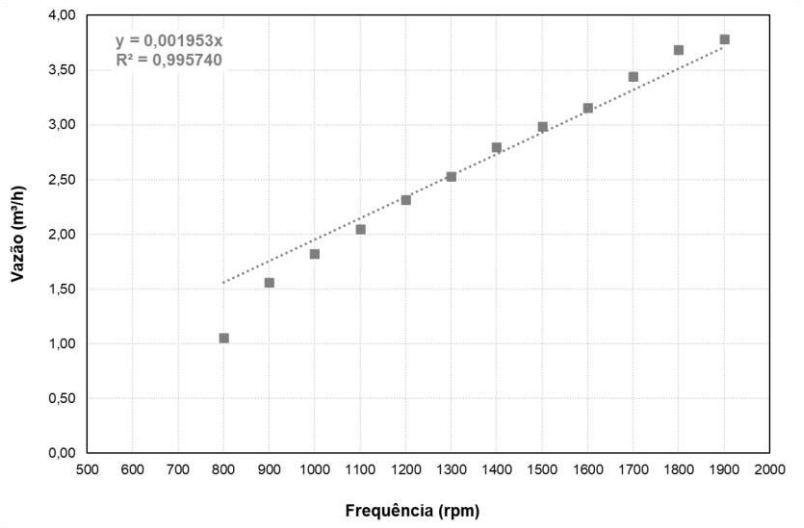
O segundo grupos de ensaios consistiu na determinação da perda de carga em um trecho reto de tubulação. Nesse procedimento foi utilizado um manômetro em U invertido equipado com selo hidráulico com água para resguardar o equipamento. A diferença de pressão entre dois pontos do escoamento foi aferida por meio do manômetro em U, sendo as leituras realizadas em regime permanente e com cinco repetições para mitigação de possíveis erros operacionais. Antes de cada rodada experimental, foi realizada a limpeza da linha de medição, removendo bolhas de ar e partículas aderidas às paredes internas do selo hidráulico. Estes dados permitiram a construção do perfil de perda de carga em função da vazão volumétrica da polpa.

Todos os procedimentos experimentais foram conduzidos seguindo protocolos rigorosos de calibração dos instrumentos, controle da homogeneidade da suspensão, coleta sequencial e registro detalhado dos dados. Essas práticas asseguraram a precisão, confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos para a concentração de trabalho (5 %) ao longo da janela de vazões estudada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração da vazão de polpa para cada rotação empregada no inversor de frequência que controlava o motor da bomba está exibida na Figura 3. Os resultados apresentados demonstram uma ótima aderência dos pontos experimentais a uma reta, com coeficiente de correlação bastante próximo de 1. Notou-se, todavia, que em baixas vazões (por exemplo, aquelas referentes às rotações abaixo de 1000 rpm) houve um desvio maior dos pontos em relação à linha média. A equação exibida na imagem foi, portanto, utilizada para converter a frequência do motor da bomba em vazão volumétrica para a polpa à 5 %.

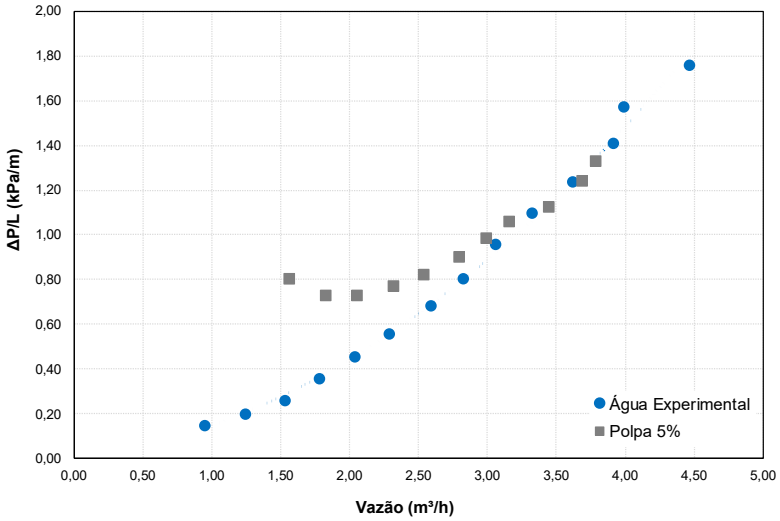
Figura 3: Calibração da vazão da polpa para a faixa de operação da unidade experimental.



Nos ensaios de perda de carga da polpa de minério de ferro, observou-se a manifestação de uma curva característica do escoamento de polpas, evidenciando comportamento distinto em comparação ao escoamento de fluidos puros e limpos, como a água. Em particular, verificou-se que, a partir de determinada vazão, ocorreu uma inversão na tendência da relação entre a vazão e a perda de carga, de modo que em vazões muito baixas, a perda de carga foi maior do que em vazões substancialmente mais altas (Figura 4). Esse fenômeno pode ser explicado pela ocorrência de deposição parcial das partículas minerais ao longo da tubulação em condições de baixa energia do fluxo. Em regimes de escoamento com baixas velocidades, a energia cinética fornecida ao fluido não é suficiente para manter o minério da polpa completamente suspenso, permitindo que

partículas mais pesadas sedimentem, estrangulando a passagem livre do duto e gerando uma resistência adicional ao escoamento, elevando a perda de carga. Por outro lado, em velocidades mais altas, a energia mecânica fornecida pelo sistema é suficiente para manter as partículas da polpa completamente suspensas, mitigando a deposição de partículas e diminuindo a resistência ao escoamento. O comportamento observado no presente estudo foi coerente com a literatura e evidenciou o comportamento característico de sistemas de bombeamento de polpas minerais, em que a deposição e resuspensão de partículas estão diretamente relacionadas ao regime de escoamento e às condições operacionais (CHAVES, 2012; PINTO, 2012).

Figura 4: Comparativo da perda de carga por metro de tubulação para o escoamento de água pura e de polpa de pellet feed de minério de ferro a 5% de concentração volumétrica.

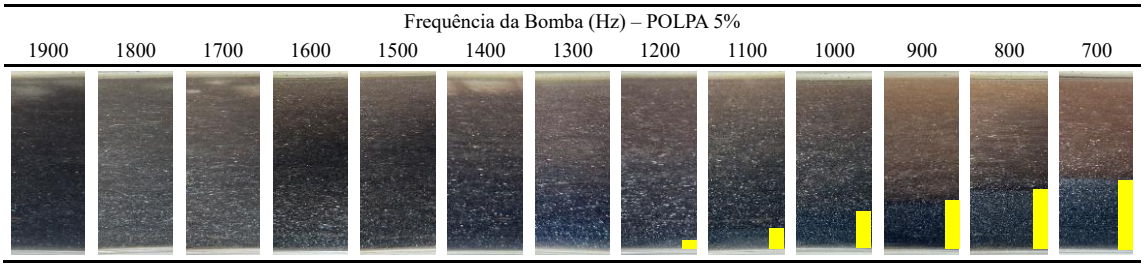


A Figura 4 também permitiu identificar experimentalmente o valor aproximado da velocidade crítica de deposição da polpa na instalação utilizada. Considerando que a velocidade corresponde à condição energética mínima necessária para evitar a sedimentação significativa de partículas na parte inferior da tubulação — garantindo, portanto, o transporte eficiente da suspensão com atrito reduzido entre as partículas e entre as partículas e as paredes do duto — observou-se que, para uma concentração de 5 %vol. e dutos com diâmetro nominal de 1 polegada, a velocidade crítica foi de aproximadamente 1,8 m/s. O ajuste polinomial de segundo grau aplicado aos pares experimentais perda de carga (y) e vazão (x) resultou em uma equação, cuja derivada

demonstrou mínimo local em $x_{crítico} \approx 1{,}75$. Fazendo-se a correlação com a rotação do motor da bomba, obteve-se que a velocidade crítica se apresentou em, aproximadamente, 900 rpm.

A sequência de imagens obtida por meio da seção de vidro transparente do sistema permitiu observar, de forma qualitativa, os diferentes regimes de escoamento da polpa de minério de ferro à medida que a velocidade do fluido aumentava (Figura 5). Nas imagens mais à direita, correspondentes às menores velocidades, notou-se a formação de uma camada sedimentada na parte inferior do tubo. Esse padrão é típico de escoamentos abaixo da velocidade crítica de deposição, nos quais a energia do sistema é insuficiente para manter as partículas completamente em suspensão. Todavia, o aumento da velocidade do fluido proporcionou uma transição gradual do regime estratificado para um padrão mais homogêneo. Essa mudança foi evidenciada pela diminuição da altura da camada de sólidos depositados no fundo do tubo, destacada pelas barras amarelas. A partir de determinado ponto, a camada sedimentada praticamente desapareceu, indicando que as partículas passaram a se manter suspensas ao longo da seção transversal do escoamento. Essa condição caracteriza o regime homogêneo, no qual o fluido apresenta energia cinética suficiente para superar as forças gravitacionais que tendem a provocar a deposição das partículas. O comportamento visual identificado nas imagens sugeriu uma velocidade crítica um pouco superior àquela obtida através da perda de carga, em uma rotação próxima à 1200 rpm, equivalente a uma velocidade de cerca de 2,3 m/s. Considerando, todavia, que o coeficiente de variação foi abaixo de 20 %, presume-se a estimativa da velocidade crítica com o valor médio de 2,0 m/s.

Figura 5: Registros fotográficos do escoamento da polpa para a janela de operação da unidade.



4. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados permitiram compreender o comportamento hidráulico de uma polpa de minério de ferro do tipo *pellet feed*, evidenciando a influência direta da velocidade de escoamento sobre as perdas de carga e a estabilidade do fluxo. Observou-se que, em velocidades inferiores à crítica, ocorreu a deposição parcial das partículas na parte inferior do duto, aumentando a resistência e promovendo mudança de comportamento na curva de perda de carga. A partir de, aproximadamente 2,0 m/s, verificou-se um regime de escoamento próximo ao homogêneo, com as partículas totalmente suspensas e um comportamento regular de perda de carga. Esses resultados demonstraram coerência com a literatura e confirmaram a aplicabilidade dos conceitos teóricos de transporte hidráulico de polpas em escala piloto. Assim, os dados obtidos fornecem subsídios para a definição de parâmetros de projeto e operação de minerodutos, contribuindo para a melhoria do desempenho operacional e da segurança do transporte de polpas.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de ensaios variando a concentração de sólidos e o diâmetro da tubulação, com o objetivo de aprofundar a compreensão do comportamento hidráulico da polpa em diferentes condições operacionais.

5. REFERÊNCIAS

ANGLO AMERICAN. *Relatório Minas-Rio: transporte de minério de ferro*. Rio de Janeiro: Anglo American, 2014.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Indicadores de Produção Mineral – 1º trimestre de 2024*. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anm. Acesso em: 30 set. 2025.

CHAVES, Arthur Pinto. *Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem*. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Informativo Anual 2024: dados da indústria mineral brasileira*. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/. Acesso em: 30 set. 2025.

LABTRANS/UFSC. Relatório final de estudos e pesquisas para a elaboração de levantamento e de análises acerca da infraestrutura do transporte e da logística do setor mineral no Brasil, assim como dos investimentos esperados no setor. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-4-competitividade-da-industria-mineral-brasileira/InfraestruturadeTransporteeLogsticadoSetorMineralBrasileiro.pdf. Acesso em: 27 jun 2024.

MINAS JR CONSULTORIA MINERAL. *Relatório técnico sobre transporte por minerodutos*. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

PINTO, Carlos Augusto de Souza. *Estudo do transporte hidráulico de polpas minerais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

TRINCA, Luciana Aparecida. *Estudo experimental do escoamento de polpas minerais em tubulações de pequeno diâmetro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.