

1

Introdução e comparação de custos conceitual dos métodos não destrutivos

1.1 INTRODUÇÃO

Os métodos não destrutivos (MND) são alternativas ou métodos preferenciais para a construção e renovação de tubulações subterrâneas, como oleodutos, gasodutos e sistemas de distribuição de água e coleta de esgoto, além de estruturas e galerias de drenagem. Mais especificamente, os MNDs são usados quando outros métodos tradicionais, como os métodos de escavação a céu aberto, não são fisicamente possíveis. Outros motivos para os métodos MND estarem sendo adotados cada vez mais por proprietários, engenheiros e empreiteiros é seu baixo impacto ambiental e, com base no projeto e nas condições do local de trabalho, o menor custo por metro de tubulação instalada. Com isso, esses métodos são muito mais eficientes e versáteis, produzindo resultados finais dentro de um período mais curto.

O custo é fundamental! Durante as fases de programação, planejamento, elaboração e construção do projeto, são tomadas decisões importantes com base nos custos esperados. Além dos custos diretos, indiretos e de operação e manutenção, o custo total de um projeto de construção inclui os custos sociais. Por esse motivo, uma estimativa precisa dos custos de ciclo de vida do projeto é necessária para que possamos selecionar os métodos de construção apropriados. Usando uma revisão bibliográfica e a análise estatística dos dados coletados, este capítulo mostra como os MNDs podem ter melhor relação custo-benefício do que os métodos de escavação a céu aberto. O método de escavação a céu aberto exige um maior custo de operação para escavação contínua e medidas de segurança ao longo do alinhamento da tubulação, os métodos não destrutivos exigem escavação apenas nos poços de acesso e de saída, o que reduz os custos de trabalhos desnecessários.

O custo total de um projeto de tubulação varia com diversos fatores, como o tamanho (diâmetro) do tubo, material, comprimento e profundidade da instalação. Ele também varia de acordo com o local do projeto, as

condições de superfície e subsuperfície, a aplicação da tubulação, o nível dos riscos envolvidos e as condições meteorológicas, que podem afetar o custo total do projeto. Usando o método de escavação a céu aberto tradicional, cerca de 70% do custo total de um projeto é destinado a atividades como desvio do trânsito, escavação e escoramento de valas, reaterro e compactação, em vez de concentrar os esforços na atividade principal, que é a instalação do tubo em si.

Devido à importância dos custos, este capítulo apresenta uma comparação de custos entre diversos métodos não destrutivos. Os dados de custos se baseiam em tabulações de licitação de projetos nos Estados Unidos e no Canadá coletadas pelo Center for Underground Infrastructure Research and Education (CUIRE) (www.cuire.org). Não foram poupados esforços para garantir a precisão dos dados de custos, mas o leitor deve ter em mente os seguintes itens enquanto considera as informações de custo apresentadas neste capítulo:

- Cada projeto é especial, e o custo real depende de diversos parâmetros, que por sua vez não foram fornecidos de forma consistente nos dados de custos utilizados.
- Os dados de custos apresentados neste capítulo são os custos diretos¹ e indiretos² totais da construção (empreiteiro) e não incluem os custos pré³- e pós-construção⁴, sociais⁵ e de outras naturezas do proprietário do projeto⁶.
- Os custos são apresentados em dólares americanos (\$), o diâmetro em polegadas e o comprimento do projeto em pés.
- Os dados de custos brutos compilados pela CUIRE são tabulações de licitações de construção de projetos em diferentes anos e foram

¹ Os custos diretos de construção geralmente incluem os custos de mão de obra, material, equipamentos e terceirizados do empreiteiro.

² Os custos indiretos de construção normalmente se referem aos custos do escritório central e o de campo do empreiteiro e abrangem os custos de toda a equipe de supervisão e dos materiais e equipamentos de apoio (todos os custos não diretamente relacionados ou aplicados às operações de construção e instalação de uma tubulação).

³ Os custos pré-construção incluem planejamento, aquisição de terras, servidões, agrimensura, pesquisas geotécnicas, localização de serviços públicos, licenças e alvarás, honorários de consultoria e projeto e assim por diante.

⁴ Os custos pós-construção incluem operação e manutenção, gestão de ativos, reparos e renovação e/ou eliminação.

⁵ Os custos sociais podem incluir inconveniência para o público em geral e danos ao meio ambiente e a estruturas existentes. Os custos sociais também incluem o custo de interrupções do trânsito, danos a estradas e pavimentos, impacto em serviços públicos adjacentes, ruído, poeira, riscos de segurança associados à escavação a céu aberto, interrupções de serviços, alto consumo de combustível, questões de sustentabilidade, etc.

⁶ Os custos do proprietário do projeto incluem todas as categorias de custos mencionadas acima (pré-construção, construção, pós-construção, sociais), além de todos os custos legais, financeiros e administrativos.

modificados para o ano de 2012 usando os Historical Cost Indexes publicados no Building Construction Cost Data de R.S. Means (R.S. Means, 2012).

- A análise de custos neste capítulo se baseia em diâmetro do tubo e comprimento do projeto. Para descobrir a relação matemática entre as variáveis de diâmetro e comprimento e a resposta variável (custo), foi usado um software estatístico chamado Minitab 15. Depois dos dados serem inseridos, é obtida uma opção de regressão estatística, considerando o custo como variável de resposta (dependente) e o diâmetro e o comprimento como as variáveis explicativas (independentes).
- Depois que os diagramas de dispersão foram montados, foi identificada uma curva ajustada significativa baseada na relação entre cada variável e o custo do projeto. Como existem diversos métodos de regressão (linear, logarítmica, de potência e exponencial), foi importante decidir qual curva melhor se ajustava à linha de tendência dentro dos diagramas de dispersão.
- O critério pressuposto para a relação entre os parâmetros acima é o R ao quadrado (R^2); quanto maior o valor de R^2 , mais precisa a linha de tendência obtida. Um valor baixo de R^2 pode não ter fornecido uma relação significativa, mas é incluído apenas para fins de informação.

1.1.1 Contexto

Os métodos não destrutivos são classificados em duas divisões principais: métodos não destrutivos de implantação (MNDI) e métodos não destrutivos de renovação (MNDR), como vemos na Figura 1.1.

O MNDI inclui todos os métodos para novas instalações de serviços públicos e tubulações. O MNDR inclui todos os métodos para a renovação e/ou substituição de uma tubulação ou sistema de serviços públicos existente. Cada uma dessas divisões é subdividida em diferentes métodos de instalação que dependem da precisão, comprimento de instalação máximo, variedade de diâmetro e tipo de aplicação. A Tabela 1.1 apresenta cada método categorizado por divisão, além de suas variedades de diâmetro.



FIGURA 1.1 Principais divisões dos métodos não destrutivos.

TABELA 1.1 Variedades de Diâmetro para Métodos Não Destrutivos (polegadas)

Métodos não destrutivos			
Métodos não destrutivos de implantação (MNDI)		Métodos não destrutivos de renovação (MNR)	
Microtúnel	12–136	CIPP	4–120
Perfuração horizontal direcional (HDD):		Revestimento por inserção:	
• Pequeno	2–12	• Contínuo	4–63
• Médio	12–24	• Segmentado	4–100
• Grande	24–60		
Microtúnel de tubo piloto*	6–30		
Cravação de tubos	42 e acima	SIPP	3–180
Galerias técnicas	42 e acima	Substituição por arrebentamento	3–63

*Também chamado de *tubo piloto*.

1.2 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE IMPLANTAÇÃO

Os métodos não destrutivos de implantação (MNDI) para a instalação de novas tubulações incluem todos os métodos usados para instalar sistemas de serviços públicos abaixo do nível sem instalação direta em uma vala a céu aberto. Suas aplicações incluem tubos de pressão e por gravidade, galerias de drenagem e estruturas de drenagem sob rodovias e ferrovias, travessias fluviais e dutos de cabos e de telecomunicação. A Figura 1.2 ilustra os diversos métodos e aplicações.

1.3 MÉTODO DE MICROTÚNEL

O método de microtúnel é usado principalmente para a instalação de tubulações por gravidade, como esgotos sanitários ou pluviais. As máquinas de perfuração de microtúnel (MTBMs) são guiadas a laser e controladas remotamente. Nelas, o alinhamento e o greide podem ser ajustados à medida que o trabalho avança, de modo que o tubo pode ser instalado com uma precisão de ± 1 polegada. O método pode ser usado para tubos com variedades de diâmetro de 12 polegadas (normalmente, 24 polegadas) até 136 polegadas (normalmente, 96 polegadas) e exige um poço de entrada para a cravação do tubo e um poço de saída para a recuperação da MTBM.

A Tabela 1.2 indica as principais características do método de microtúnel (Najafi, 2010).

A Figura 1.3 ilustra o custo médio do microtúnel para diversos diâmetros.

Como o diâmetro e o comprimento estão entre os principais fatores que afetam o preço dos métodos não destrutivos, a Figura 1.4a ilustra o custo (\$/pé) dependendo do tamanho do tubo em polegadas, enquanto a Figura 1.4b indica o custo (\$/pé) com base no comprimento da tubulação.

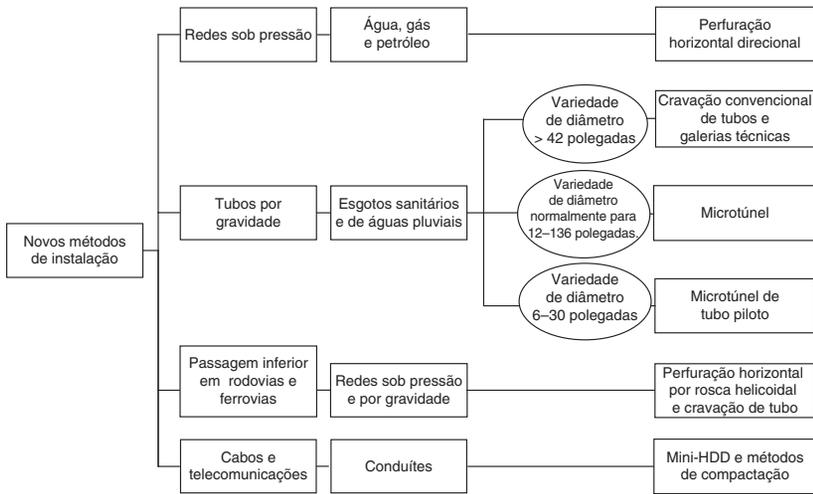


FIGURA 1.2 Aplicações dos métodos de construção não destrutivos (Najafi, 2010).

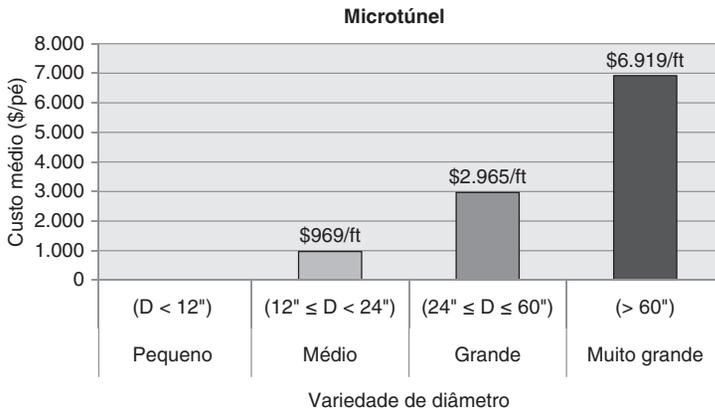


FIGURA 1.3 Custo médio do microtúnel para diversos diâmetros.

TABELA 1.2 Principais características dos métodos de microtúnel (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Material do tubo*	Aplicação típica	Precisão
Microtúnel	12–136	500–1,500	RCP, GRP, VCP, DIP, Aço, PCP	Tubulações por gravidade	±1

*Consulte as abreviaturas no Apêndice A.

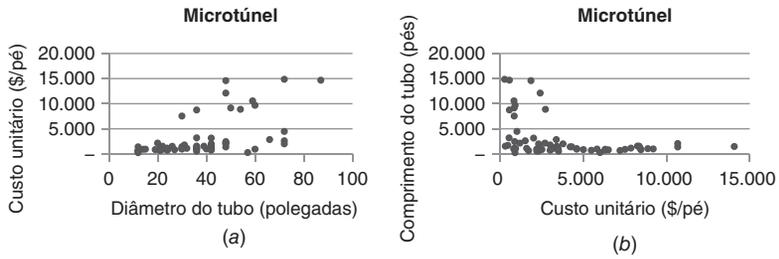


FIGURA 1.4 Dados de custo *versus* (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento da tubulação para microtúnel.

A Figura 1.5 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento para o custo *versus* diâmetro.

As equações e os R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.3. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão exponencial, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 483,29e^{0,0334x}$ e $R^2 = 0,37$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento a partir dos dados coletados. A Figura 1.6 ilustra a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências sobre custo *versus* comprimento.

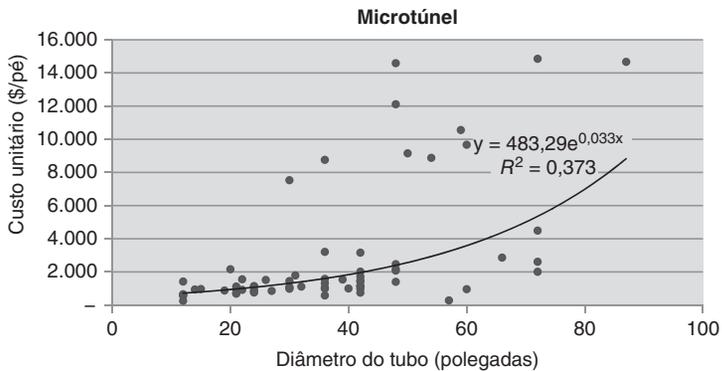


FIGURA 1.5 Dados de custo *versus* diâmetro para microtúnel.

TABELA 1.3 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do microtúnel

Tipo de regressão	Equação	R^2
Linear	$y = 121,82x - 1.665,8$	0,32
Logarítmica	$y = 3.779 \ln x - 10.368$	0,25
Potência	$y = 32,704x^{1,1237}$	0,35
Exponencial	$y = 483,29e^{0,0334x}$	0,37

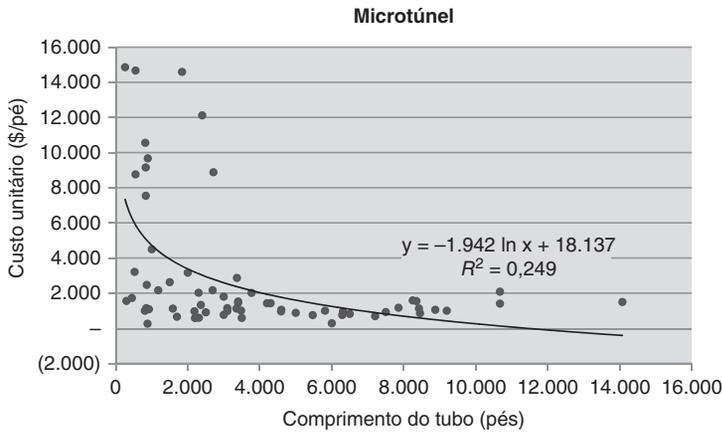


FIGURA 1.6 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para microtúnel.

TABELA 1.4 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento do microtúnel

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,4685x + 4.655,8$	0,15
Logarítmica	$y = -1.942 \ln x + 18.137$	0,25
Potência	$y = 74.876x^{-0,483}$	0,24
Exponencial	$y = 2.594,6e^{-0,04x}$	0,14

A Tabela 1.4 mostra as equações e as linhas de tendência de R² relacionadas. A maior razão de relação está no tipo de regressão logarítmica, com R² de 0,25 e a equação $y = -1.942 \ln x + 18.137$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre microtúneis é:

$$\text{Custo} = 113 \times \text{diâmetro} - 0,384 \times \text{comprimento} + 143 \tag{1.1}$$

1.4 MÉTODO DE PERFURAÇÃO HORIZONTAL DIRECIONAL

O método de perfuração horizontal direcional (HDD) é um sistema dirigível usado principalmente para a instalação de tubulações de pressão e conduítes de cabos. O método envolve um processo em duas fases. A primeira fase é composta da perfuração de um furo piloto de pequeno diâmetro ao longo da linha de centro desejada do perfil proposto. A segunda fase consiste em alargar o furo piloto até o diâmetro desejado para acomodar o tubo de serviço. Como o nome indica, o método tem a capacidade especial de rastrear a cabeça de corte e guiá-la durante o processo de perfuração. O método de

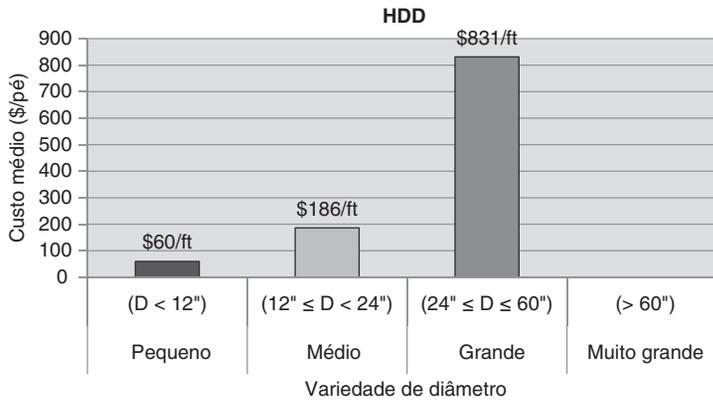


FIGURA 1.7 Custo médio do método não destrutivo HDD classificado por variedades de diâmetro.

perfuração direcional pode ser classificado em três categorias amplas, como mostrado na Tabela 1.5 (Najafi, 2010).

1.4.1 Coleta de dados

Depois que todos os custos de projeto foram ajustados para os custos de 2012, os custos médios (\$/pé) foram classificados por variedades de diâmetro, como mostrado na Figura 1.7. Como vemos na Tabela 1.5, para o método de HDD, o diâmetro máximo é 60 polegadas, então não há informações de custos disponíveis para diâmetros de tubo maiores do que 60 polegadas.

1.4.2 Análise de dados

Depois de coletados, os dados foram analisados usando métodos de regressão. A variável *dependente* é o preço por pé, enquanto as variáveis *independentes* são o diâmetro e o comprimento do tubo.

TABELA 1.5 Principais características dos métodos de HDD (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Profundidade (ft)	Aplicação típica	Precisão
HDD Pequena (Mini)	2–12	Menos de 600	Menos de 15	Conduítes de energia e telecomunicações, tubulações de água e gás	Varia
HDD Média (Midi)	12–24	Entre 600 e 900	Entre 15 e 75	Tubulações de pressão	Varia
HDD Grande (Maxi)	24–60	Entre 900 e 10.000	Menos de 200	Tubulações de pressão	Varia

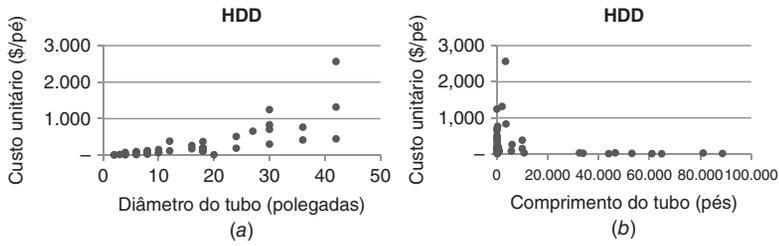


FIGURA 1.8 Diagramas de dispersão de dados de custo *versus* (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para a HDD.

A Figura 1.8a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.8b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento. A Figura 1.9 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro.

As equações e os R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.6. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão de potência, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 3,9566x^{1,3916}$ e $R^2 = 0,74$, onde y é o custo (\$) e x é o diâmetro (polegadas) do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento a partir dos dados coletados. Da mesma forma, a Figura 1.10 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências sobre custo *versus* comprimento.

A Tabela 1.7 mostra as equações e os R^2 relacionados dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no uso do tipo de regressão exponencial, com um R^2 de 0,36 e a equação $y = 185,43e^{-3E-05x}$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre HDD é:

$$\text{Custo} = 32,0 \times \text{diâmetro} + 0,00261 \times \text{comprimento} - 254 \quad (1.2)$$

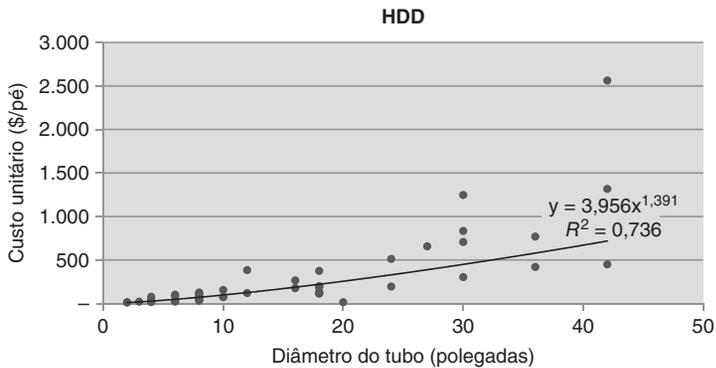


FIGURA 1.9 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro para HDD.

TABELA 1.6 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro da HDD

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = 29,456x - 185,1$	0,56
Logarítmica	$y = 336,98 \ln x - 554,25$	0,38
Potência	$y = 3,9566x^{1,3916}$	0,74
Exponencial	$y = 26,533e^{0,0978x}$	0,71

1.5 MÉTODO DO MICROTÚNEL DE TUBO PILOTO

O microtúnel de tubo piloto (PTMT) é um método híbrido de instalação de tubos que usa recursos da HDD (Capítulo 8), perfuração horizontal por rosca helicoidal (Capítulo 9) e microtúnel (Capítulo 11). Para mais informações sobre o método de tubo piloto, consulte o Capítulo 12. A Figura 1.11 ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.12 indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento em pés do mesmo tubo.

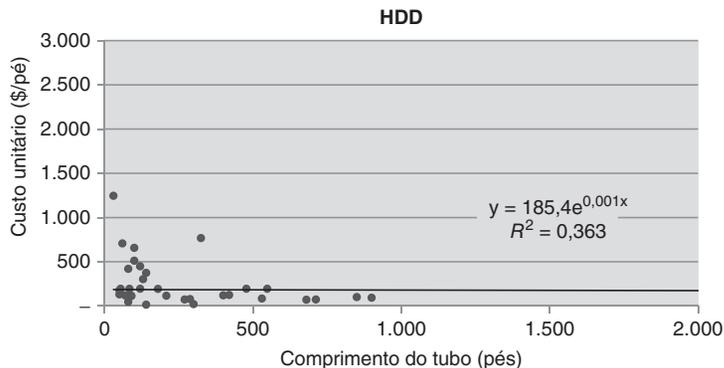
O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento. A Figura 1.11 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento para o custo *versus* comprimento.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados de PTMT é:

$$\text{Custo} = 21,4 \times \text{diâmetro} + 0,0068 \times \text{comprimento} + 52 \quad (1.3)$$

TABELA 1.7 Comparação de custo *versus* comprimento da HDD

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0049x + 338,04$	0,06
Logarítmica	$y = -25,91 \ln x + 457,24$	0,02
Potência	$y = 780,52x^{-0,271}$	0,26
Exponencial	$y = 185,43e^{-0,0005x}$	0,36

**FIGURA 1.10** Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para HDD.

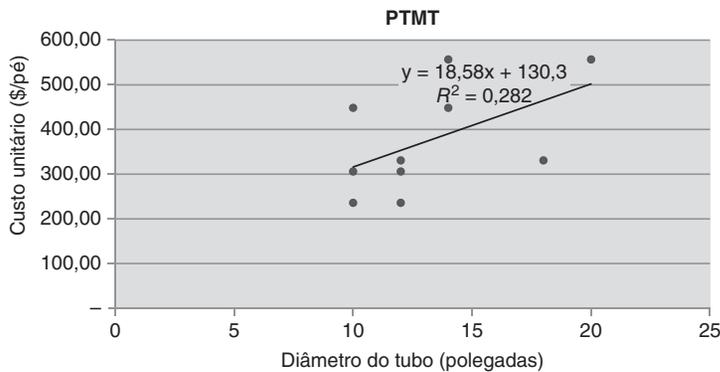


FIGURA 1.11 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro para PTMT.

1.6 CRAVAÇÃO DE TUBOS

O método de cravação convencional de tubos usa a instalação de segmentos de tubo pré-fabricados empurrados atrás da máquina de perfuração de túnel ou outros métodos de escavação de túneis. A instalação começa em um poço de acesso em direção a um poço de saída ou recepção, de modo que a coluna de tubos completa é instalada ao mesmo tempo em que o túnel é escavado. Quando se trabalha com esse método, os trabalhadores podem precisar estar dentro do túnel durante a escavação da face do túnel, remoção do material escavado, operações de cravação de tubos e processo de instalação da sustentação temporária da face, dependendo do tipo de escavação utilizado. O método pode ser usado para diâmetros de tubo a partir de 42 polegadas⁷ e com uma precisão de ± 1 polegadas. A Tabela 1.8 apresenta as principais características do método de cravação de tubos.

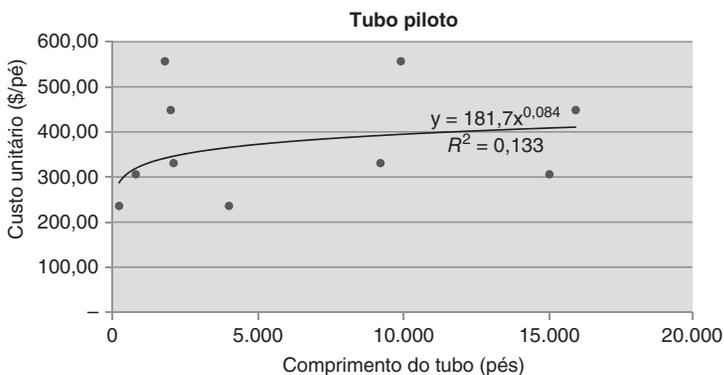


FIGURA 1.12 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para tubo piloto.

⁷ Empreiteiros experientes instalaram diâmetros menores, como 36 polegadas, usando o método de cravação de tubos em condições de projeto e locais apropriados.

TABELA 1.8 Principais características do método de cravação de tubos (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Material do tubo	Aplicação típica	Precisão
Cravação de tubos	42 e acima	1.500	RCP, GRP, Aço	Tubo de pressão e por gravidade	±1

1.6.1 Coleta de dados

A Figura 1.13 mostra os custos médios (\$/pé) classificados por variedades de diâmetro. Como as variedades de diâmetro começam em 42 polegadas e acima quando o método de cravação de tubos é utilizado, não são apresentadas informações de custos para diâmetros inferiores a 42 polegadas.

1.6.2 Análise de dados

A Figura 1.14a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.14b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da mesma tubulação. A Figura 1.15 mostra a linha tendência de regressão de

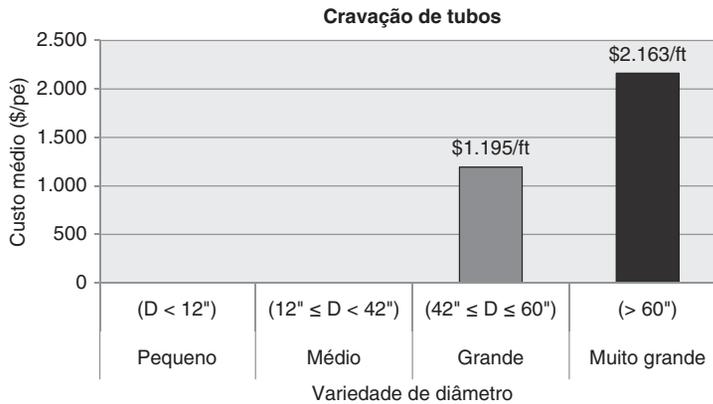


FIGURA 1.13 Custo médio do método não destrutivo de cravação de tubos classificado por variedades de diâmetro.

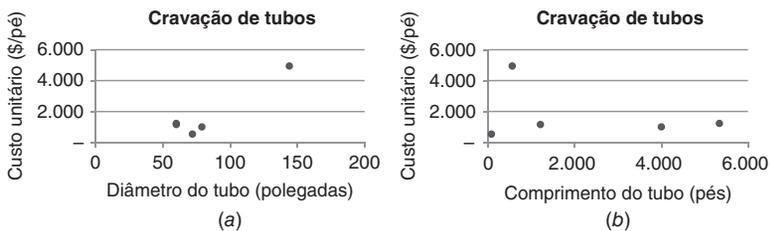


FIGURA 1.14 Diagramas de dispersão de dados de custo versus (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para a cravação de tubos.

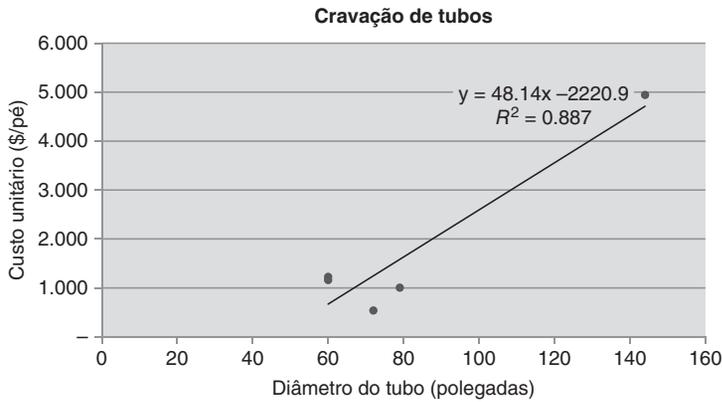


FIGURA 1.15 Tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro para cravação de tubos.

TABELA 1.9 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro da cravação de tubos

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = 48,149x - 2.220,9$	0,89
Logarítmica	$y = 4,493.4 \ln x - 17,820$	0,82
Potência	$y = 0,5335x^{1,7895}$	0,63
Exponencial	$y = 258,05e^{0,0195x}$	0,71

melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro.

A Tabela 1.9 mostra as equações e os R² relacionados de cada tipo de regressão. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão linear, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 48,149x - 2.220,9$ para R² = 0,89, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo. A Figura 1.16 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências sobre custo *versus* comprimento.

A Tabela 1.10 mostra as equações e as linhas de tendência de R² relacionadas. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão linear, com um R² de 0,09 e a equação $y = -0,2387x + 2.308,5$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre cravação de tubos é:

$$\text{Custo} = 50,2 \times \text{diâmetro} + 0,076 \times \text{comprimento} - 2.562 \quad (1.4)$$

1.7 GALERIAS TÉCNICAS

O método de galerias técnicas (UT) segue o mesmo processo que a cravação convencional de tubos, exceto que, nesse método, uma estrutura de susten-

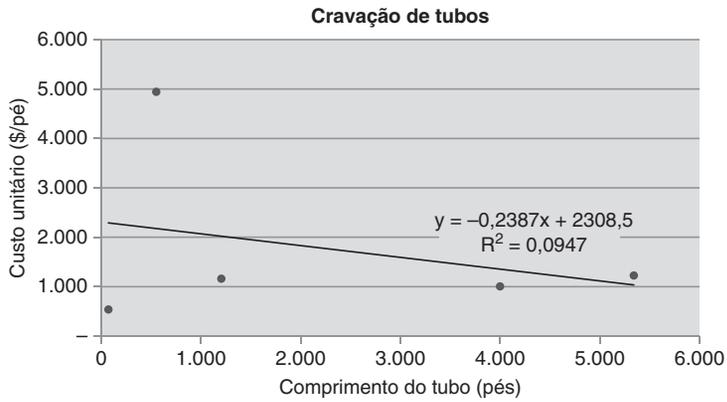


FIGURA 1.16 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para cravação convencional de tubos.

TABELA 1.10 Comparação de linha de tendência de custo versus comprimento da cravação de tubos

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,2387x + 2.308,5$	0,09
Logarítmica	$y = -61,15 \ln x + 2.198,1$	0,00
Potência	$y = 717,86x^{0,0867}$	0,03
Exponencial	$y = 1.431,2e^{-0,00005x}$	0,01

tação temporária (chamada de revestimento) é construída simultaneamente à medida que a escavação do túnel avança. Em geral, a estrutura de sustentação é feita de placas de revestimento de túnel tradicionais (TLPs) ou barras de aço (SRs) com revestimento de madeira (WL). Após a finalização do túnel, as seções de tubo são transportadas dentro do túnel e no espaço anular entre o revestimento e no tubo é injetado um graute. (Najafi, 2010). As características das galerias técnicas são as mesmas que as da cravação de tubos e são apresentadas na Tabela 1.11.

1.7.1 Coleta de dados

A Figura 1.17 mostra os custos médios (\$/pé) classificados por variedades de diâmetro do tubo. Como as variedades de diâmetro começam em 42 polega-

TABELA 1.11 Principais características do método de galerias técnicas (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Material do tubo	Aplicação típica	Precisão
Galerias técnicas	42 e acima	1.500	RCP, GRP, Aço	Tubulações de pressão e por gravidade	1

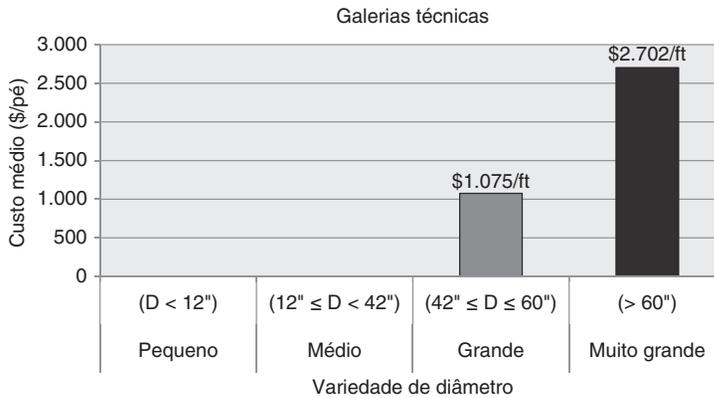


FIGURA 1.17 Custo médio do método de galerias técnicas classificado por variedades de diâmetro.

das para o método de galerias técnicas, não são apresentadas informações de custos para diâmetros inferiores a 42 polegadas.

1.7.2 Análise de dados

A Figura 1.18a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.18b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da mesma tubulação. A Figura 1.19 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro.

As equações e os R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.12. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão de potência, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 12,47x^{1,1474}$ e $R^2 = 0,42$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento. A Figura 1.20 mostra a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências para os dados de custo *versus* comprimento.

A Tabela 1.13 mostra as equações e os valores dos R^2 dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão de potência, com um R^2 de 0,09 e a equação $y = 1124,5x^{0,0278}$.

TABELA 1.12 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro das galerias técnicas

Tipo de regressão	Equação	R^2
Linear	$y = 22,047x + 327,58$	0,13
Logarítmica	$y = 1.724,3 \ln x - 5.307,5$	0,18
Potência	$y = 12,47x^{1,1474}$	0,42
Exponencial	$y = 533,65e^{0,0146x}$	0,31

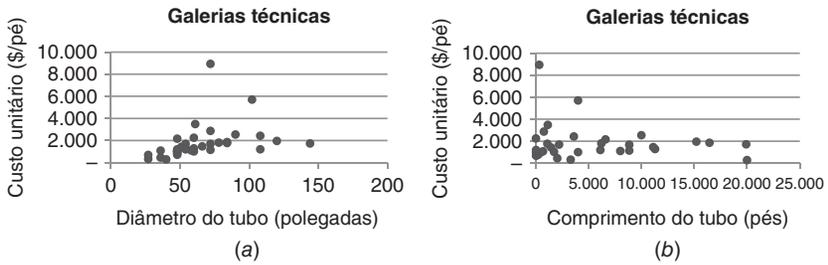


FIGURA 1.18 Diagramas de dispersão de dados de custo *versus* (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para galerias técnicas.

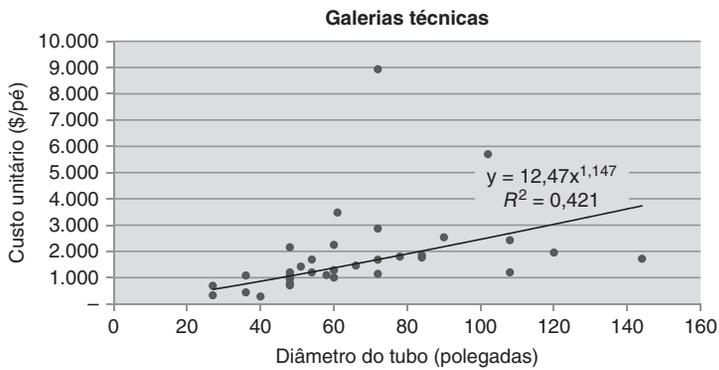


FIGURA 1.19 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro para galerias técnicas.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre galerias técnicas é:

$$\text{Custo} = 33,6 \times \text{diâmetro} - 0,101 \times \text{comprimento} + 73 \quad (1.5)$$

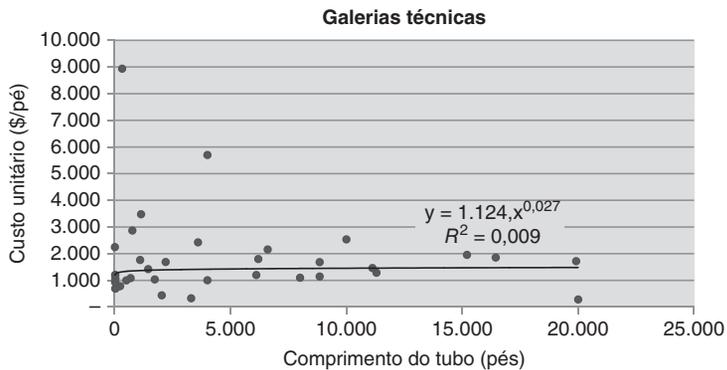


FIGURA 1.20 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para galerias técnicas.

TABELA 1.13 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento das galerias técnicas

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0231x + 1.866$	0,007
Logarítmica	$y = 32,975 \ln x + 1.520,7$	0,002
Potência	$y = 1.124,5x^{0,0278}$	0,009
Exponencial	$y = 1.404,9e^{-0,000006x}$	0,002

1.8 TUBULAÇÃO CURADA IN LOCO

Na tubulação curada in loco (CIPP), um tubo de tecido impregnado de resina é inserido em uma rede existente com o uso de guinchamento ou inversão por água ou ar. Em geral, esse tecido é um material de feltro de poliéster, reforçado com fibra de vidro ou assemelhado. Devido à natureza maleável do tecido saturado, ele é capaz de preencher trincas, fechar lacunas e manobrar através de tecidos de tubos. O CIPP pode ser usado para fins estruturais e não estruturais; além disso, o feltro impregnado de resinado é muito bom para resistência à corrosão (Najafi, 2010). A Tabela 1.14 apresenta as principais características dos métodos de CIPP.

1.8.1 Coleta de dados

A Figura 1.21 mostra os custos médios (\$/pé) por variedades de diâmetro. Como as variedades de diâmetro vão de 4 a 120 polegadas, são apresentados custos para muitos diâmetros de tubo diferentes.

1.8.2 Análise de dados

A Figura 1.22a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.22b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da mesma tubulação.

A Figura 1.23 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro do tubo.

TABELA 1.14 Principais características dos métodos de CIPP (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Material do revestimento	Aplicação típica
Inversão in loco	4–120	3.000	Composto de tecido/resina termo-consolidada	Tubulações de pressão e por gravidade
Guinchado in loco	4–120	1.000	Composto de tecido/resina termo-consolidada	Tubulações de pressão e por gravidade

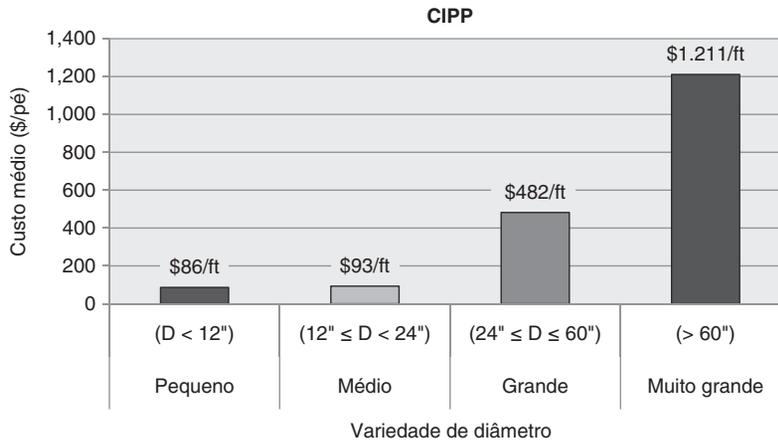


FIGURA 1.21 Custo médio do CIPP por diâmetro do tubo.

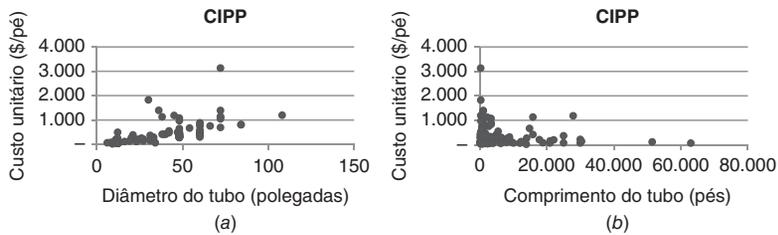


FIGURA 1.22 Diagramas de dispersão de dados de custo versus (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para o CIPP.

As equações e os R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.15. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão de potência, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 3,1323x^{1,291}$ e $R^2 = 0,78$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

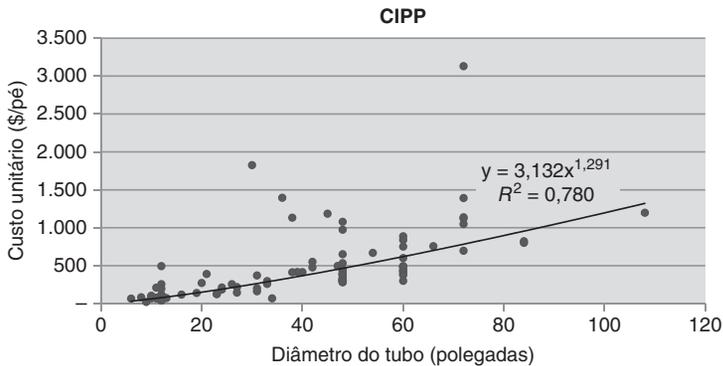
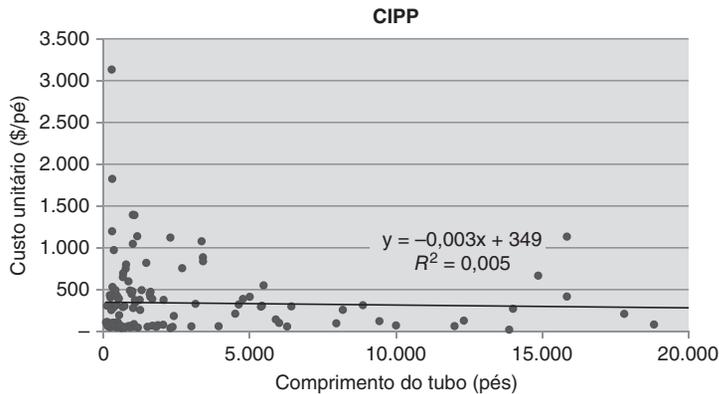


FIGURA 1.23 Linha de tendência de melhor ajustamento para custo e diâmetro para CIPP.

TABELA 1.15 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do CIPP

Tipo de regressão	Equação	R^2
Linear	$y = 12,981x - 67,777$	0,48
Logarítmica	$y = 373,15 \ln x - 848,65$	0,44
Potência	$y = 3,1323x^{1,291}$	0,78
Exponencial	$y = 51,188e^{0,0419x}$	0,74

**FIGURA 1.24** Linha de tendência de melhor ajustamento para custo e comprimento para CIPP.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento. A Figura 1.24 indica o melhor ajustamento para os quatro tipos possíveis de tendências para o custo *versus* comprimento da tubulação.

A Tabela 1.16 mostra as equações e os valores dos R^2 dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão linear, com um R^2 de 0,006 e a equação $y = -0,0034x + 349$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre CIPP é:

$$\text{Custo} = 13,0 \times \text{diâmetro} - 0,00032 \times \text{comprimento} - 65,8 \quad (1.6)$$

1.9 REVESTIMENTO POR INSERÇÃO

O revestimento por inserção é usado principalmente para aplicações estruturais quando a rede existente não tem assentamentos de juntas, desalinhamentos e/ou questões de capacidade hidráulica. O método consiste na inserção de uma nova tubulação de diâmetro menor dentro da rede existente e a injeção do espaço anular entre o tubo de revestimento e a rede existente. O método é simples e relativamente barato. Contudo, ao reduzir o diâmetro interno e por ser dependente do coeficiente de rugosidade do original e do novo, o tubo revestido pode acabar reduzindo sua capacidade hidráulica.

TABELA 1.16 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento do CIPP

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0034x + 349$	0,006
Logarítmica	$y = -7,318 \ln x + 385,63$	0,001
Potência	$y = 147,9x^{0,0323}$	0,002
Exponencial	$y = 192,23e^{-0,0000006x}$	0,003

TABELA 1.17 Principais características do método de revestimento por inserção (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Material típico do revestimento	Aplicação típica
Segmentado	4–100	1.000–2.000	HDPE, PVC, GRP	Tubulações de pressão e por gravidade
Contínuo	4–63	1.000	HDPE, PVC	Tubulações de pressão e por gravidade

ca original. O método pode ser dividido em duas categorias: revestimento por inserção contínua, que envolve acessar o tubo deteriorado em pontos estratégicos e inserir um tubo de polietileno de alta densidade (HDPE) ou cloreto de polivinila (PVC); e revestimento segmentado, que envolve o uso de seções de tubo curtas que incorporam uma junta de camisa embutida, normalmente usada em processos de microtúnel e cravação de tubos (Najafi, 2010). A Tabela 1.17 apresenta as principais características dos métodos de revestimento por inserção.

1.9.1 Coleta de dados

A Figura 1.25 mostra os custos médios (\$/pé) por variedades de diâmetro do tubo. Os dados de custos incluem variedades de diâmetro disponíveis de 4 a 100 polegadas.

1.9.2 Análise de dados

A Figura 1.26a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.26b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da mesma tubulação.

A Figura 1.27 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro do tubo.

As equações e os R² relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.18. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão

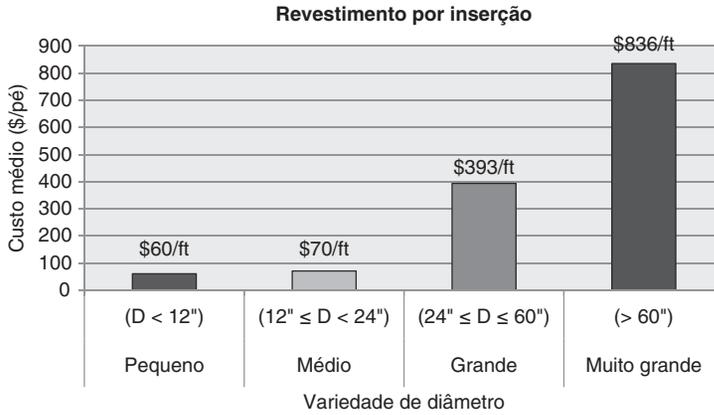


FIGURA 1.25 Custo médio do método de revestimento por inserção por variedades de diâmetro do tubo.

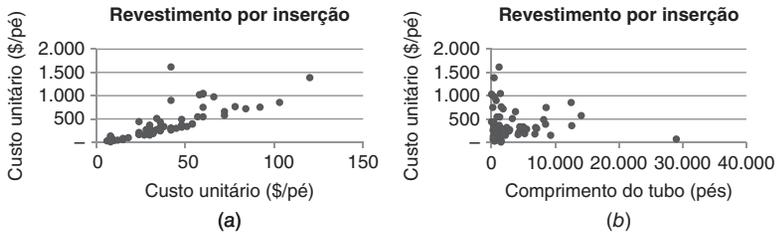


FIGURA 1.26 Diagramas de dispersão de dados de custo versus (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para o revestimento por inserção.

de potência, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 2,9239x^{1,2957}$ e $R^2 = 0,80$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e a variável explicativa de comprimento a partir dos dados coletados.

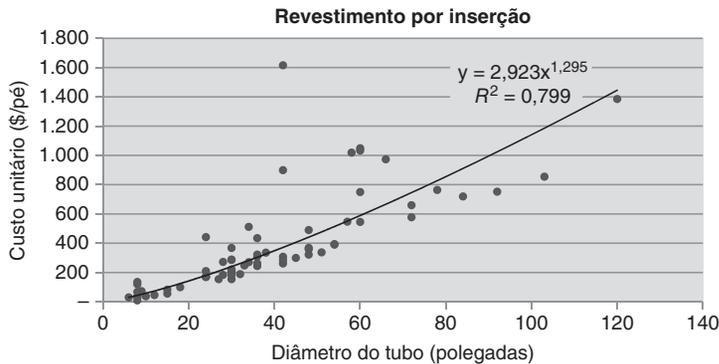
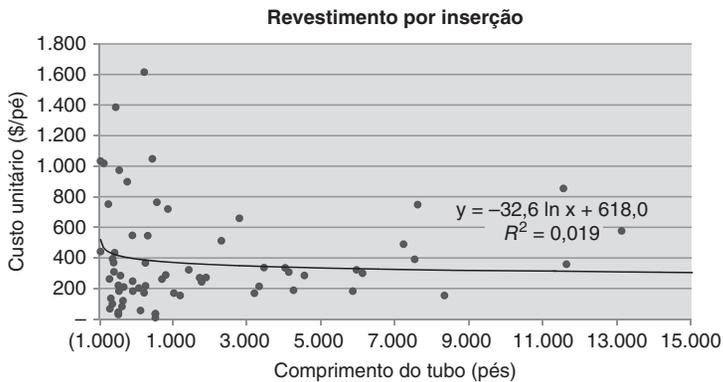


FIGURA 1.27 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro para revestimento por inserção.

TABELA 1.18 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do revestimento por inserção

Tipo de regressão	Equação	R^2
Linear	$y = 10,986x - 43,201$	0,60
Logarítmica	$y = 342,52 \ln x - 800,36$	0,51
Potência	$y = 2,9239x^{1,2957}$	0,80
Exponencial	$y = 67,279e^{0,0345x}$	0,65

**FIGURA 1.28** Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento para revestimento por inserção.

Da mesma forma, a Figura 1.28 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências sobre custo *versus* comprimento.

A Tabela 1.19 mostra as equações e os valores de R^2 relacionados. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão logarítmica, com um R^2 de 0,02 e a equação de $y = -32,66 \ln x + 618,02$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre revestimento por inserção não destrutivo é:

$$\text{Custo} = 11,2 \times \text{diâmetro} - 0,00909 \times \text{comprimento} - 21,3 \quad (1.7)$$

1.10 TUBO DE ASPERSÃO IN LOCO (REVESTIMENTO POR ASPERSÃO)

O método de tubo de aspersão in loco (SIPP) consiste em borrifar um revestimento fino de resina de polímero ou argamassa de cimento na superfície interna do tubo existente. Para tubos sem condições de acesso de pessoal (menos de 48 polegadas), o método pode oferecer melhor proteção contra corrosão e características hidráulicas. Além disso, dependendo do tipo de polímero usado, ele pode melhorar a integridade estrutural da tubulação existente e vedar juntas ou vazamentos. Para tubos com condições de acesso

TABELA 1.19 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento do revestimento por inserção

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0036x + 393,56$	0,00
Logarítmica	$y = -32,66 \ln x + 618,02$	0,02
Potência	$y = 279,48x^{-0,012}$	0,00
Exponencial	$y = 252,51e^{-0,000006x}$	0,00

de pessoal, as argamassas de cimento aspergidas são eficazes e bastante usadas para renovar tubos de pressão e esgotos por gravidade e também podem ser utilizadas para fins estruturais (Najafi, 2010). A Tabela 1.20 apresenta as principais características dos métodos de SIPP.

1.10.1 Coleta de dados

A Figura 1.29 mostra os custos médios (\$/pé) por variedades de diâmetro do tubo. Os dados de custos de SIPP incluem variedades de diâmetro muito variáveis, que vão de 4 a 180 polegadas.

1.10.2 Análise de dados

A Figura 1.30a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.30b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da tubulação do mesmo tubo.

A Figura 1.31 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro do tubo.

As equações e os valores de R² relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.21. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão de potência, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 8,7001x^{0,7557}$ e R² = 0,90, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento da tubulação. A Figura 1.32 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências para os dados de custo *versus* comprimento da tubulação.

TABELA 1.20 Principais características do método de SIPP (Najafi, 2010)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Comprimento de instalação máximo (pés)	Material do revestimento	Aplicação típica
SIPP	4–180	500	Argamassa de cimento, epóxi, poliuretano	Tubulações de pressão e por gravidade

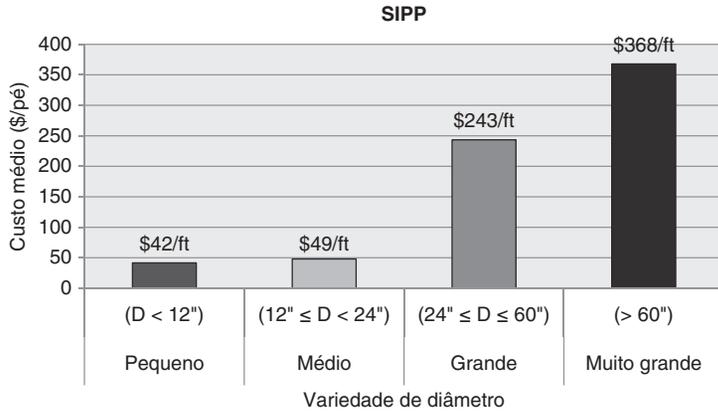


FIGURA 1.29 Custo médio do método de SIPP classificado por diâmetro do tubo.

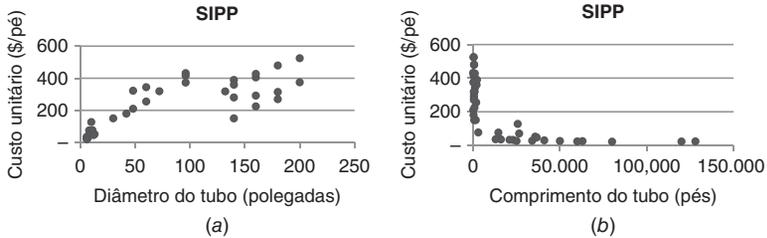


FIGURA 1.30 Diagramas de dispersão de dados de custo versus (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para a SIPP.

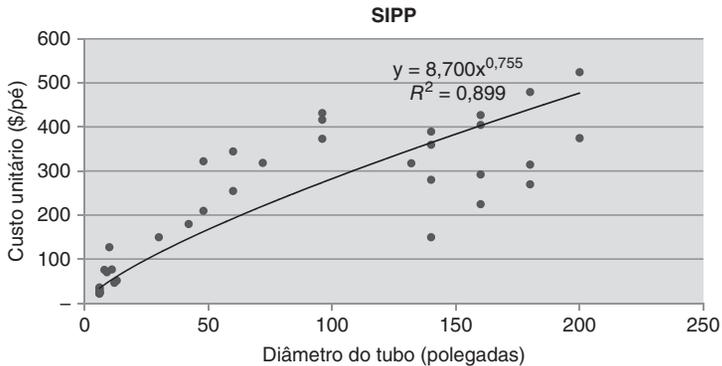


FIGURA 1.31 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo versus diâmetro do tubo para SIPP.

A Tabela 1.22 mostra as equações e os valores dos R^2 relacionados dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão de potência, com um R^2 de 0,82 e a equação $y = 5.495,6x^{-0,47}$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre SIPP é:

$$\text{Custo} = 1,69 \times \text{diâmetro} - 0,00122 \times \text{comprimento} + 106 \quad (1.8)$$

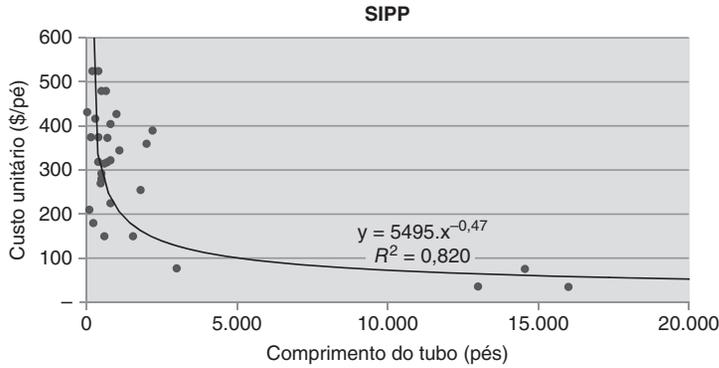


FIGURA 1.32 Linha de tendência de melhor ajustamento para dados de custo e comprimento do tubo para SIPP.

TABELA 1.21 Comparação de linha de tendência de custo versus diâmetro da SIPP

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = 1,9735x + 60,979$	0,75
Logarítmica	$y = 106,55 \ln x - 165,65$	0,84
Potência	$y = 8,7001x^{0,7557}$	0,90
Exponencial	$y = 46,672e^{0,0131x}$	0,70

TABELA 1.22 Comparação de linha de tendência de custo versus comprimento da tubulação da SIPP

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0036x + 282,64$	0,41
Logarítmica	$y = -63,4 \ln x + 721,04$	0,70
Potência	$y = 5.495,6x^{-0,47}$	0,82
Exponencial	$y = 224,16e^{-0,0005x}$	0,59

1.11 SUBSTITUIÇÃO POR ARREBENTAMENTO

O método de substituição por arrebetamento consiste no uso de um martelo pneumático ou carga estática para quebrar o tubo existente e forçar os fragmentos quebrados da rede existente para os solos ao redor ao mesmo tempo em que um novo tubo é puxado e/ou empurrado até sua posição. As três variações principais estão descritas abaixo:

- Substituição por arrebetamento pneumática, na qual um martelo é usado para romper os tubos existentes.
- Substituição por arrebetamento estática, na qual a energia para romper o tubo se baseia na tração sem ação percussiva, com menos vibrações e uma operação mais silenciosa em relação ao método pneumático.

TABELA 1.23 Principais características do método de substituição por arrebentamento (Najafi e Gokhale, 2005)

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)	Instalação máxima (pés)	Materiais típicos de novos tubos	Aplicações típicas
Substituição por arrebentamento	4–48	1.500	HDPE, DI, PVC, VCP, GRP	Tubulações de pressão e por gravidade

- Método de inserção, no qual um novo tubo rígido é cravado na rede existente. A argila e o ferro dúctil são os tubos segmentados utilizados com maior frequência.

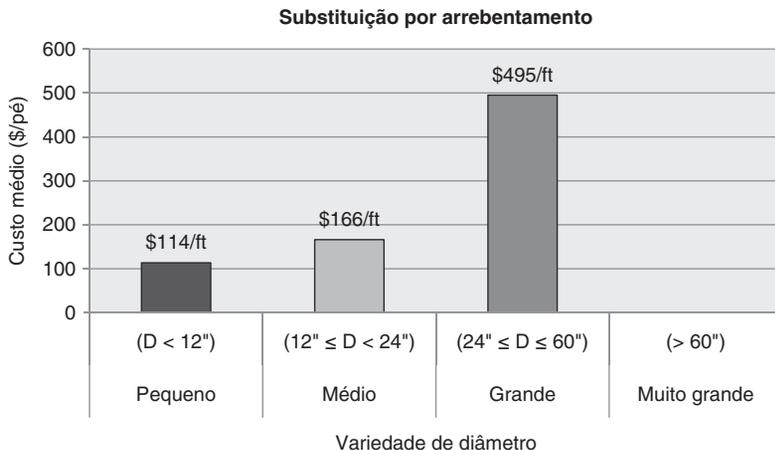
A Tabela 1.23 apresenta as características principais dos métodos de substituição por arrebentamento.

1.11.1 Coleta de dados

A Figura 1.33 mostra os custos médios da substituição por arrebentamento (\$/pé) por variedades de diâmetro do tubo. Os dados de custos incluem variedades de diâmetro disponíveis de 4 a 48 polegadas. Para fins de ilustração, a Figura 1.33 apresenta os custos até 60 polegadas.

1.11.2 Análise de dados

A Figura 1.34a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.34b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da tubulação do mesmo tubo.

**FIGURA 1.33** Custo médio do método de substituição por arrebentamento por variedades de diâmetro.

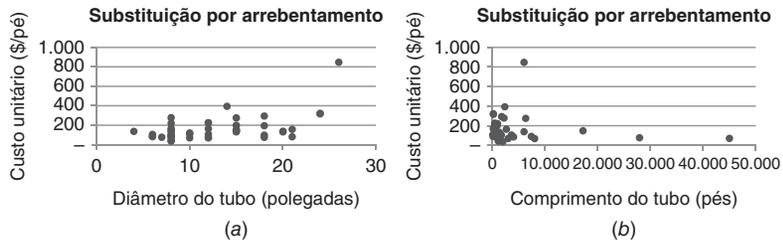


FIGURA 1.34 Diagramas de dispersão de dados de custo *versus* (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para a substituição por arrebatamento.

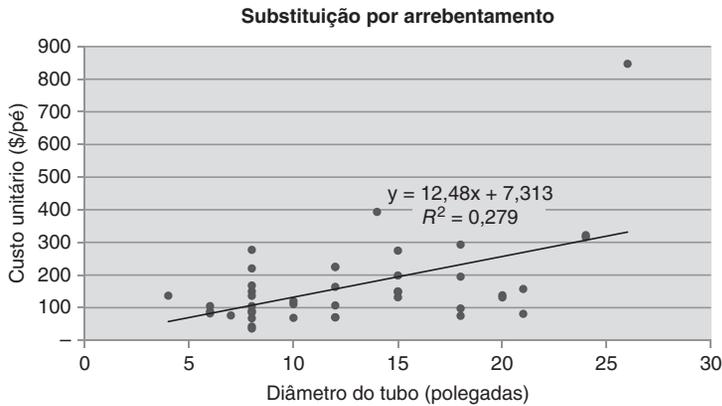


FIGURA 1.35 Linha de tendência de melhor ajustamento para custo e diâmetro para substituição por arrebatamento.

A Figura 1.35 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro do tubo.

As equações e os R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.24. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão linear, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 12,484x + 7,3133$ e $R^2 = 0,28$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

TABELA 1.24 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro da substituição por arrebatamento

Tipo de regressão	Equação	R^2
Linear	$y = 12.484x + 7.3133$	0,28
Logarítmica	$y = 135.24 \ln x - 164.39$	0,21
Potência	$y = 29.436x^{0,6231}$	0,22
Exponencial	$y = 67.387e^{0,0546x}$	0,26

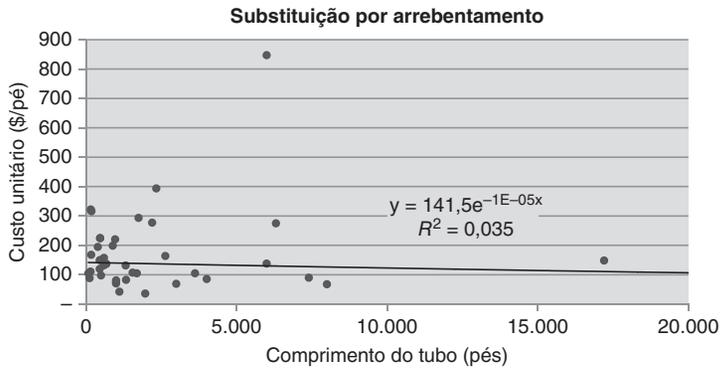


FIGURA 1.36 Linha de tendência de melhor ajustamento para custo e comprimento para substituição por arrematamento.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento. A Figura 1.36 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências para os dados de custo *versus* comprimento da tubulação.

A Tabela 1.25 mostra as equações e os valores dos R^2 relacionados dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão exponencial, com um R^2 de 0,04 e a equação $y = 141,56e^{-1E-05x}$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre substituição por arrematamento é:

$$\text{Custo} = 12,4 \times \text{diâmetro} - 0,00099 \times \text{comprimento} + 12,3 \quad (1.9)$$

1.12 MÉTODO DE ESCAVAÇÃO A CÉU ABERTO

A escavação a céu aberto é o método de instalação e/ou substituição tradicional para sistemas de infraestrutura de tubulação subterrânea. O método inclui o valetamento da superfície do solo para a colocação de uma nova tubulação ou a substituição de uma existente e então a recomposição da superfície. O método pode parecer um processo simples, mas envolve muitas considerações de engenharia e construção, como:

- Seleção e compactação apropriada do solo, estratificação, enterramento e reaterro.
- Controle da configuração geométrica da vala.
- Controle sobre a cobertura do solo apropriada.
- Controle das águas subterrâneas na vala.
- Consideração dos riscos e precauções de segurança da vala.
- Maiores custos sociais.
- Operação ineficiente devido ao manuseio dobrado do solo.

TABELA 1.25 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento da tubulação da substituição por arrebentamento

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,0016x + 170,77$	0,01
Logarítmica	$y = 1,0085 \ln x + 157,48$	0,00
Potência	$y = 206,13x^{-0,06}$	0,02
Exponencial	$y = 141,56e^{-0,05x}$	0,04

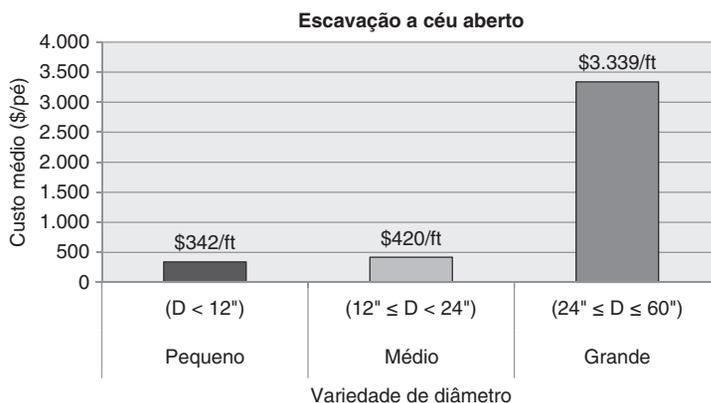
Além disso, é preciso tomar os cuidados necessários durante o transporte, manuseio e instalação do tubo para evitar trincas, desbastes, flambagem e outras formas de danos estruturais (Najafi, 2010).*

1.12.1 Coleta de dados

A Figura 1.37 mostra os custos médios (\$/pé) por diâmetro do tubo. A Figura 1.37 representa os dados coletados de projetos de escavação a céu aberto com diâmetros de até 60 polegadas. Contudo, o método de escavação a céu aberto é capaz de instalar tubulações com diâmetros de até 140 polegadas.

1.12.2 Análise de dados

A Figura 1.38a ilustra o custo (\$/pé) dependente do tamanho do tubo, enquanto a Figura 1.38b indica o custo (\$/pé) dependente do comprimento da tubulação do mesmo tubo.

**FIGURA 1.37** Custo médio do método de escavação a céu aberto por variedades de diâmetro do tubo.

* N. de R. T. O Brasil não tem observado na prática as normas de aterramento, compactação e fechamento de valas a céu aberto, o que também pode justificar parte das patologias mencionadas pelo autor.

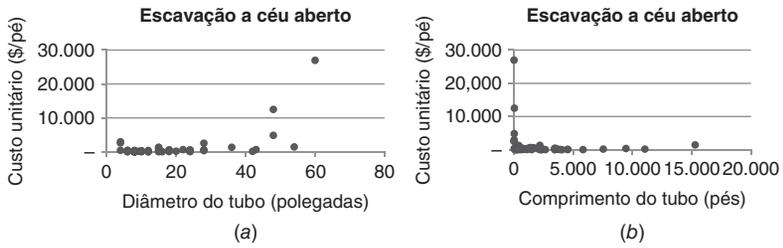


FIGURA 1.38 Diagramas de dispersão de dados de custo *versus* (a) diâmetro do tubo e (b) comprimento do tubo para a escavação a céu aberto.

A Figura 1.39 mostra a linha tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos de regressão diferentes para o custo *versus* diâmetro do tubo.

As equações e os valores de R^2 relacionados para cada tipo de regressão são apresentados na Tabela 1.26. Devido à mais alta razão estar no tipo de regressão exponencial, a equação que melhor se ajusta ao diagrama de dispersão é $y = 91,637e^{0,0653x}$ e $R^2 = 0,35$, onde y é o custo e x é o diâmetro do tubo.

O mesmo processo é realizado para obter a relação entre a variável de custo e o comprimento da tubulação. A Figura 1.40 indica a linha de tendência de regressão de melhor ajustamento dos quatro tipos possíveis de tendências para os dados de custo *versus* comprimento da tubulação.

A Tabela 1.27 mostra as equações e os valores dos R^2 relacionados dessas linhas de tendência. Nesse caso, a maior razão de relação está no tipo de regressão de potência, com um R^2 de 0,26 e a equação $y = 3836,7x^{-0,409}$.

A equação de regressão que melhor se adapta aos dados sobre escavações a céu aberto é:

$$\text{Custo} = +172 \times \text{diâmetro} - 0,250 \times \text{comprimento} - 1229 \tag{1.10}$$

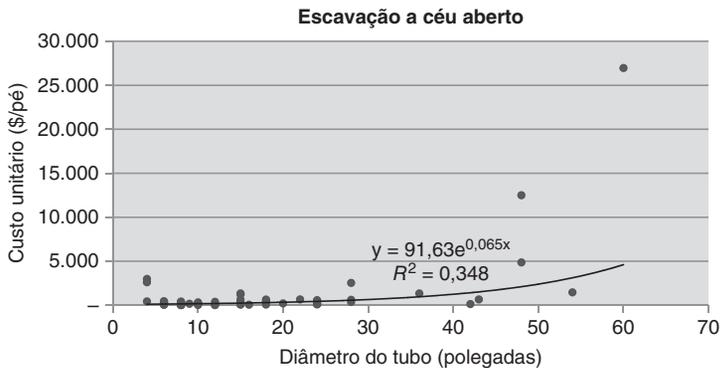


FIGURA 1.39 Tendência de melhor ajustamento para dados de custo e diâmetro do tubo para escavação a céu aberto.

TABELA 1.26 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do tubo da escavação a céu aberto

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = 166,76x - 1,635.9$	0,34
Logarítmica	$y = 2.209,2 \ln x - 4,547.9$	0,16
Potência	$y = 23,218x^{0,95}$	0,21
Exponencial	$y = 91,637e^{0,0653x}$	0,35

TABELA 1.27 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento da tubulação da escavação a céu aberto

Tipo de regressão	Equação	R ²
Linear	$y = -0,179x + 1.447,1$	0,02
Logarítmica	$y = -947,5 \ln x + 7.268,2$	0,21
Potência	$y = 3.836,7x^{-0,409}$	0,26
Exponencial	$y = 306,34e^{-0,00000005x}$	0,02

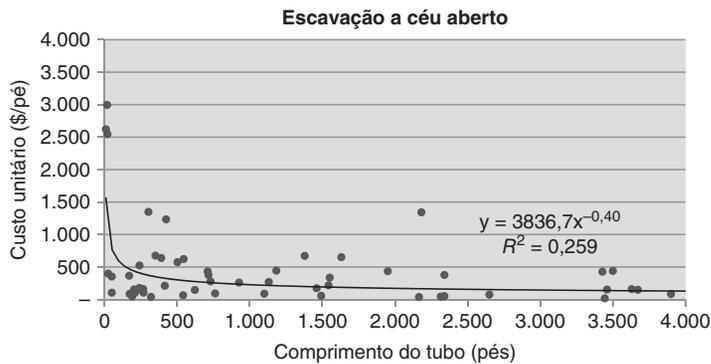


FIGURA 1.40 Linha de tendência de melhor ajustamento para custos e comprimento da tubulação para escavação a céu aberto.

1.13 COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE MNDI

1.13.1 Comparação de custo *versus* diâmetro

A Figura 1.41 mostra uma comparação de custo *versus* diâmetro para as equações de regressão de melhor ajustamento e linhas de tendência para os projetos de MNDI.

É preciso observar que na Figura 1.41, cada método possui uma escala diferente com base em suas variedades de diâmetro, então pode ser difícil comparar os custos. Assim, *apenas para fins de comparação*, na Figura 1.42,

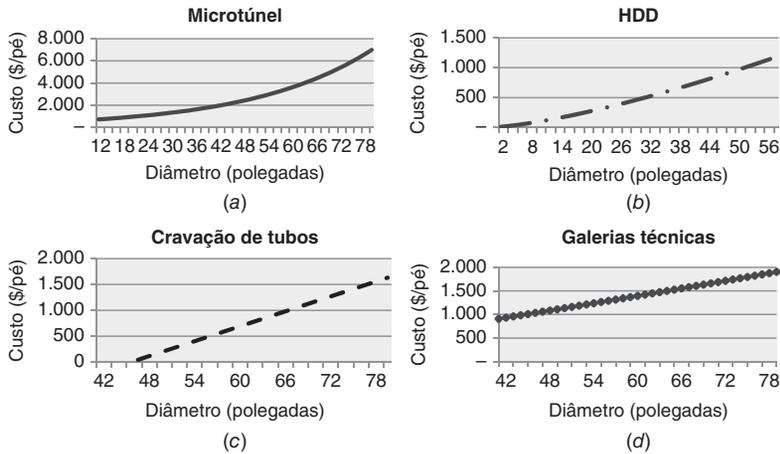


FIGURA 1.41 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do tubo para TCM: (a) microtúnel, (b) HDD, (c) cravação de tubos e (d) galerias técnicas.

foi selecionada uma variedade de diâmetro de tubo comum, entre 42 e 60 polegadas. Essa variedade de diâmetro é comum para os dados de custos de projeto coletados para todos os métodos não destrutivos de implantação (MNDI) e para o método de escavação a céu aberto.

A Figura 1.42 mostra que três dos quatro MNDIs ficam claramente abaixo do custo do método de escavação a céu aberto, com a cravação convencional de tubos sendo a mais barata, seguida pela HDD e as galerias técnicas.

Apesar da curva de incrementos de custo ser aproximadamente igual entre os três métodos (cravação de tubos, HDD e galerias técnicas), há uma indicação de que essa curva de custos provavelmente não será mantida para todos os incrementos de diâmetro. Na realidade, com o aumento do diâme-

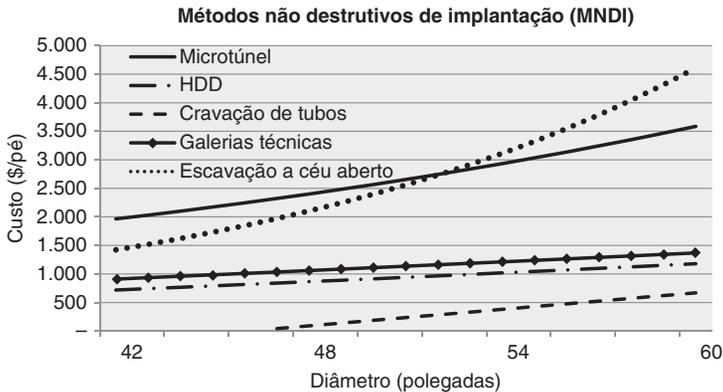


FIGURA 1.42 Comparação de custos *versus* diâmetro entre MNDI e método de escavação a céu aberto.

tro, os projetos não destrutivos se tornam mais complexos, o que pode aumentar significativamente os custos.

Com base nos dados coletados, o custo do método de microtúnel parece ser maior do que o da escavação a céu aberto tradicional, mas isso é verdade até um diâmetro de cerca de 52 polegadas, onde os custos de ambos os métodos se encontram em cerca de \$2.700. Acima de 52 polegadas, todos os métodos não destrutivos se revelam mais baratos do que o método de escavação a céu aberto tradicional.

Da mesma forma, na comparação das curvas das equações, o método de escavação a céu aberto apresenta uma inclinação maior do que o microtúnel, indicando que além do custo do método de escavação a céu aberto ser maior quando usamos diâmetros de 52 polegadas ou mais, a razão do incremento será maior à medida que o tamanho do tubo aumenta.

1.13.2 Comparação custo *versus* comprimento da tubulação

A mesma comparação usada para a variável de diâmetro pode ser feita para a variável do comprimento da tubulação (Figura 1.43).

Para comparar o custo de um tubo em relação a seu comprimento, foi considerada uma distância máxima de 1.500 pés para todos os métodos MNDI, assim como para o método de escavação a céu aberto.

Na Figura 1.44, observamos que todos os MNDIs, incluindo o método de escavação a céu aberto, têm uma relação inversa entre o comprimento e o custo do projeto. Apenas o método de microtúnel apresenta uma redução significativa de custo até uma distância de cerca de 1.100 pés, na qual tende

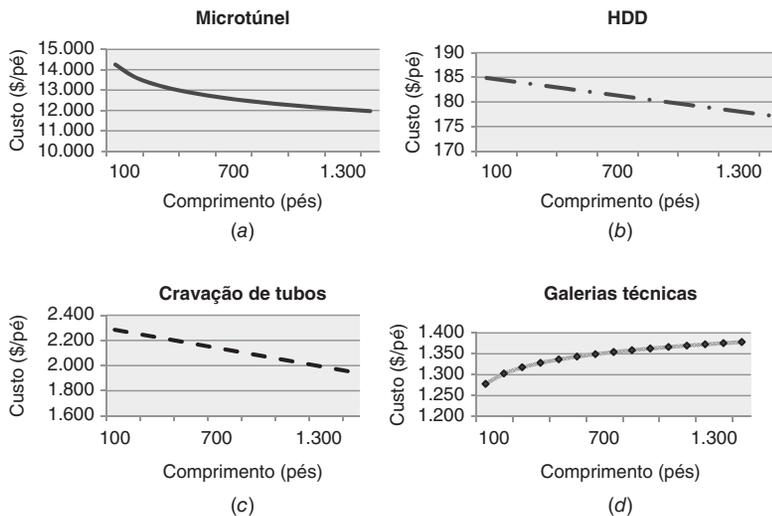


FIGURA 1.43 Comparação de linha de tendência de custos *versus* comprimento da tubulação para MNDI: (a) microtúnel, (b) HDD, (c) cravação de tubos e (d) galerias técnicas.

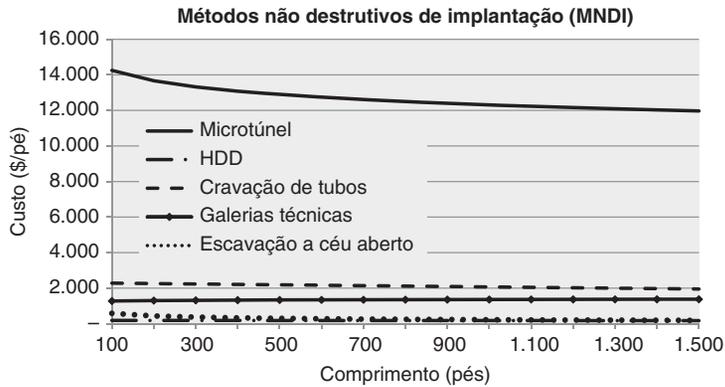


FIGURA 1.44 Comparação de custos *versus* comprimento da tubulação entre MNDI e método de escavação a céu aberto.

a se estabilizar, assim como os outros métodos fazem quando a distância é maior.

Com base nos dados coletados, o método de HDD tem o menor custo por pé, seguido pelo método de escavação a céu aberto, galerias técnicas, cravação de tubos e microtúnel.

1.14 COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE MNDR

O procedimento de comparação usado para a divisão de MNDR é semelhante àquele usado para a divisão de MNDI.

1.14.1 Comparação custo *versus* diâmetro

Após identificar as linhas de tendência e equações de regressão de melhor ajustamento usando os dados de TRM (Figura 1.45), é realizada uma comparação de custo *versus* diâmetro do tubo.

Mais uma vez, como cada método possui uma escala diferente com base em suas variedades de diâmetro, é difícil comparar os custos. Assim, *apenas para fins de comparação*, foi selecionada uma variedade de diâmetro de tubo de 42 a 60 polegadas. Essa variedade de diâmetro é aquela na qual mais dados de custos estão disponíveis para todos os métodos não destrutivos de renovação (MNDR) e a escavação a céu aberto.

Na Figura 1.46, podemos observar que todos os quatro métodos não destrutivos de renovação (MNDR) têm um custo muito menor do que o método de escavação a céu aberto tradicional. Todos os quatro MNDRs têm mais ou menos a mesma inclinação, enquanto o método de escavação a céu aberto começa a ser quase três vezes mais caro do que o MNDR mais caro em um diâmetro de 42 polegadas e acaba sendo nove vezes mais caro do que o mesmo método não destrutivo em um diâmetro de 60 polegadas.

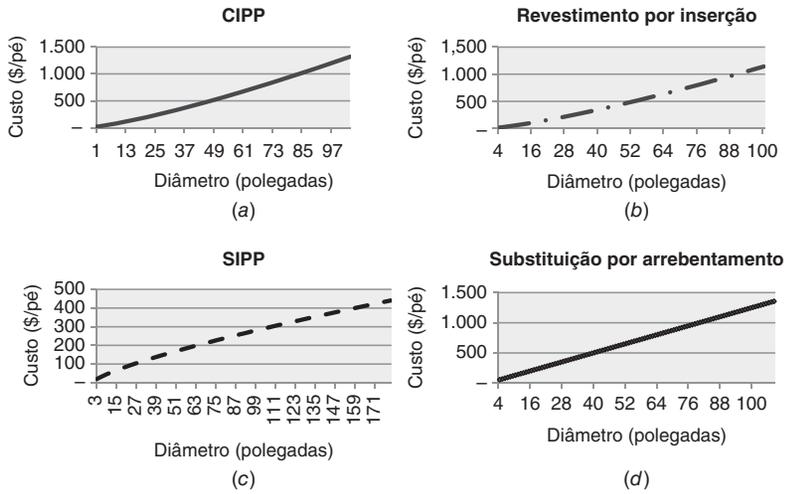


FIGURA 1.45 Comparação de linha de tendência de custo *versus* diâmetro do tubo para MNDR: (a) CIPP, (b) revestimento por inserção, (c) SIPP e (d) substituição por arrebentamento.

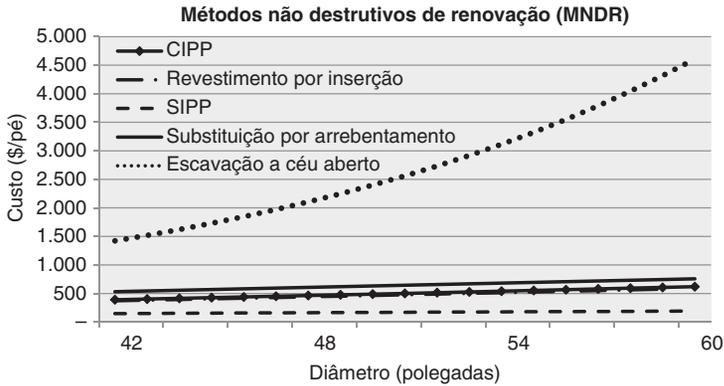


FIGURA 1.46 Comparação de custos *versus* diâmetro do tubo entre MNDR e método de escavação a céu aberto.

Em suma, com base no diâmetro do tubo, o método mais barato entre tubos de 42 a 60 polegadas é a SIPP, seguido pelo revestimento por inserção, o CIPP e a substituição por arrebentamento.

1.14.2 Comparação custo *versus* comprimento da tubulação

O mesmo procedimento de comparação usado para a variável do diâmetro será usado para a variável do comprimento da tubulação (Figura 1.47). *Para fins de comparação*, foi usada a mesma distância de 1.500 pés para comparar o custo de um projeto *versus* seu comprimento para todos os MNDRs e também para o método de escavação a céu aberto.

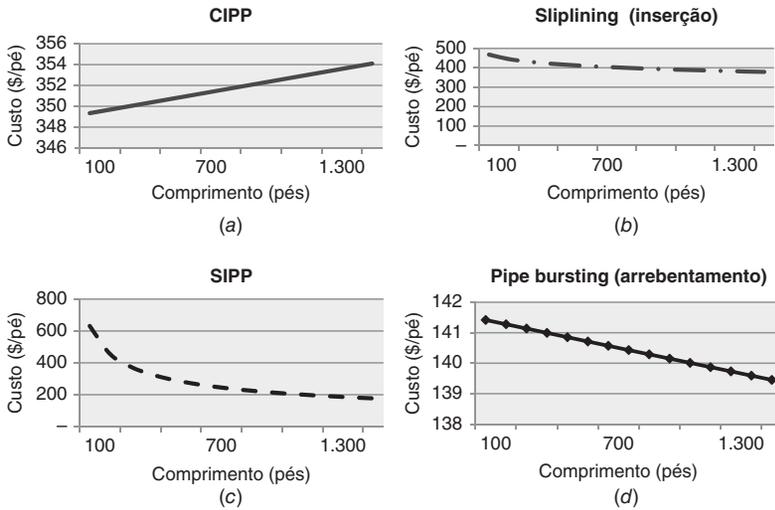


FIGURA 1.47 Comparação de linha de tendência de custo *versus* comprimento da tubulação para MNDR: (a) CIPP, (b) revestimento por inserção, (c) SIPP e (d) substituição por arrebatamento.

Na Figura 1.48, vemos que os métodos de substituição por arrebatamento e CIPP têm uma relação quase plana entre o custo e o comprimento, de cerca de \$150/pé e \$350 pé, respectivamente, enquanto os métodos de SIPP e escavação a céu aberto começam sendo as opções mais caras (\$600/pé), mas então diminuem com uma curva mais inclinada até atingirem um custo menor até que o do método de CIPP.

Com base no comprimento da tubulação, a substituição por arrebatamento parece ser o método mais barato, seguido por SIPP, escavação a céu aberto, CIPP e revestimento por inserção.

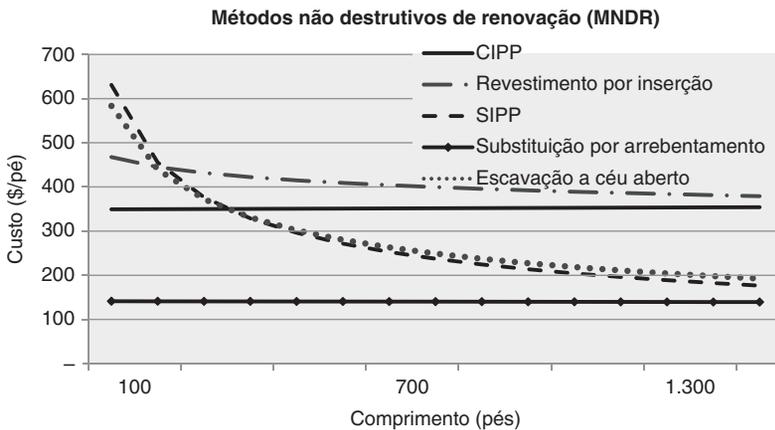


FIGURA 1.48 Comparação de custos *versus* comprimento da tubulação entre MNDR e método de escavação a céu aberto.

1.15 RESUMO DA ANÁLISE DE CUSTO

No total, 520 registros de dados foram compilados usando o banco de dados da CUIRE e a revisão bibliográfica. Com base em pelo menos cinco registros, os custos dos oito métodos não destrutivos são apresentados na Tabela 1.28, junto com aqueles referentes ao método de escavação a céu aberto. Esses custos são expressos em dólares por polegada em diâmetro por pé linear e também em dólares por pé linear para quatro variedades de diâmetro típicas. As duas últimas colunas contêm o número de registros de dados para cada método e observações relevantes para cada método.

Em termos de custos médios totais para a divisão de MNDI, apenas o microtúnel é mais caro do que o método de escavação a céu aberto, a \$69,39/polegada/pé e \$57,31/polegada/pé, respectivamente, para a divisão de MNDI. O método menos caro para essa divisão é a HDD, a \$13,49/polegada/pé, seguido pela cravação convencional de tubos (\$18,87/polegada/pé) e as galerias técnicas (\$26,72/polegada/pé).

Nos custos gerais para a divisão de MNDR, podemos concluir que o método mais barato é a SIPP, a \$4,10/polegada/pé, seguida pelo revestimento por inserção, CIPP e substituição por arrebentamento a \$9,17/polegada/pé, \$9,45/polegada/pé e \$13,75/polegada/pé, respectivamente.

A Tabela 1.28 também indica que não há informações para alguns dos métodos ou que o custo é não aplicável (N/A). O motivo para isso é que, para esses métodos, o diâmetro está além do escopo de suas características (ver observações para as variedades de diâmetro de cada método). A Figura 1.49 mostra uma comparação de todos os oito métodos não destrutivos mais o método de escavação a céu aberto tradicional para uma melhor comparação visual.

1.16 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo abrangeu uma comparação de custos para cinco métodos não destrutivos de implantação, quatro métodos não destrutivos de renovação e o método tradicional de escavação a céu aberto. Foi usado software para criar linhas de regressão que melhor se ajustam a cada um dos métodos considerando duas variáveis principais, o diâmetro e o comprimento da tubulação. Os resultados somente podem ser usados para estudos de viabilidade, comparação e planejamento. É preciso observar que os dados de custos para alguns dos métodos resultaram em um valor baixo de R^2 e que as linhas de tendência não representaram relações significativas. Contudo, os dados fornecem uma ordem de magnitude aproximada dos custos associados com condições de projeto específicas.

É difícil comparar o custo de cada método porque muitos fatores e recursos afetam os custos totais. Fatores como local do projeto, condições do local, clima, tipo de projeto (óleo, gás, água, esgoto, conduíte, etc.), requisitos de proteção contra corrosão, impactos ambientais e sociais, regras e regulamentos locais e regionais, qualidade do projeto e tolerâncias de construção,

TABELA 1.28 Custos médios dos métodos não destrutivos e método de escavação a céu aberto

Método	Variedade de diâmetro (polegadas)						Número de registros de dados	Observações (D)
	Pequeno	Médio	Grande	Muito grande				
	(D < 12 polegadas)	(12 polegadas ≤ D < 24 polegadas)	(24 polegadas ≤ D ≤ 60 polegadas)	(D > 60 polegadas)	(\$/pé)	(\$/pé)		
Custo médio total (\$/polegadas D/pés	comprimento)	comprimento)	comprimento)	comprimento)	comprimento)	comprimento)		
Microtúnel	69,39	N/A*	969	2.965	6.919	65	12–136 polegadas	
HDD	13,49	60	186	831	N/A*	50	2–60 polegadas	
Cravação de tubos	18,87	N/A*	N/A*	1.195	2.163	5	42 polegadas e mais	
Galerias técnicas	26,72	N/A*	N/A*	1.075	2.702	36	42 polegadas e mais	
PTMT	31,49	307	422	N/A*	N/A*	10	6–30 polegadas	
Escavação a céu aberto	57,31	342	420	3.339	N/A*	65		
CIPP	9,45	86	93	482	1.211	142	4–120 polegadas	
Revestimento por inserção	9,17	60	70	393	836	68	4–100 polegadas	
SIPP	4,10	42	49	243	368	46	3–180 polegadas	
Substituição por arrebentamento	13,75	114	166	495	N/A*	43	4–48 polegadas	

*Essa variedade de diâmetro não está disponível para esse método.

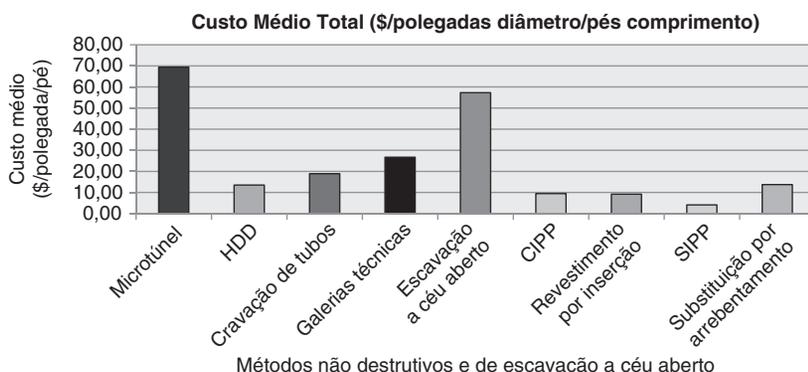


FIGURA 1.49 Custos médios totais dos métodos não destrutivos e de escavação a céu aberto.

entre outros, afetam significativamente a relação custo-benefício de cada projeto específico. Assim, é preciso desenvolver um entendimento claro dos custos de construção durante a fase de projeto.

Em geral, podemos concluir que os custos de projeto aumentam com um incremento de diâmetro do tubo. Contudo, isso pode não valer para alguns projetos de cravação de tubos e galerias técnicas, pois diâmetros maiores têm a possibilidade de permitir a escavação manual. Em alguns métodos e condições, os aumentos de custo devido ao tamanho do tubo se devem ao maior nível de complexidade e dificuldade de instalar a tubulação.

Também podemos concluir que os custos médios totais para o MNDI ou o TRM são menores do que os custos incorridos pelo método de escavação a céu aberto tradicional, com apenas os custos do microtúnel sendo maiores do que o da escavação a céu aberto. Isso é verdade para um diâmetro de até 52 polegadas, no qual todos os MNDIs, incluindo o microtúnel, revelam ter melhor relação custo-benefício. Outro motivo para o custo total do micro-

TABELA 1.29 Custo médio total dos métodos de MNDI, MNDR e escavação a céu aberto

Métodos não destrutivos de implantação (MNDI)		Métodos não destrutivos de renovação (MNDR)	
Método	Custos médios totais (\$/polegada/pé)	Método	Custos médios totais (\$/polegada/pé)
Microtúnel	69,39	SIPP	4,10
HDD	13,49	Revestimento por inserção	9,17
PTMT	31,49	CIPP	9,45
Cravação convencional de tubos	18,87	Galerias técnicas	13,75
Substituição por arrebentamento	26,72		
Escavação a céu aberto			\$57,31

túnel ser maior do que o do método de escavação a céu aberto é que, nesta análise, não estavam disponíveis custos de projetos que usavam diâmetros de tubo superiores a 60 polegadas.

Quando comparamos todos os métodos da divisão de MNDR e o método de escavação a céu aberto, descobrimos que todos os MNDRs têm custos muito menores do que o método de escavação a céu aberto, com este iniciando em aproximadamente o triplo do preço dos métodos não destrutivos de renovação (MNDR) mais caros, como o CIPP. A Tabela 1.29 apresenta o custo médio total (\$/polegada/pé) de todos os métodos não destrutivos, separados por divisão (incluindo a escavação a céu aberto).

É importante mencionar que as conclusões acima se baseiam apenas em tabulações de licitações e na análise dos custos diretos e indiretos dos empreiteiros. Em qualquer projeto, é sempre preciso considerar os custos sociais nas fases de programação, planejamento e projeto para a *seleção de um método específico* e a alocação de um *orçamento para o projeto*.