



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUGUSTO DE MATTOS FREIRE CABRAL

Dimensionamento de um Sistema de Captação de Água para Uso Industrial:
Análise de um Estudo de Caso

Belo Horizonte

2026

AUGUSTO DE MATTOS FREIRE CABRAL

Dimensionamento de um Sistema de Captação de Água para Uso Industrial:
Análise de um Estudo de Caso

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tiago de Freitas Paulino, Dr.

Belo Horizonte

2026

C117d Cabral, Augusto de Mattos Freire
Dimensionamento de um sistema de captação de água para uso industrial: análise de um estudo de caso / Augusto de Mattos Freire Cabral. – 2026.
82 f. : il., gráfs, tabs.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Tiago de Freitas Paulino.

Banca examinadora: Tiago de Freitas Paulino, Márcio Expedito Guzzo, Augusto César Teixeira Malaquias.

Bibliografia: f. 80-82.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tubulações – Materiais – Teses. 2. Mecânica dos fluidos – Análise – Teses. 3. Transitórios hidráulicos – Análise – Teses. 4. Custo do ciclo de vida – Teses.
I. Paulino, Tiago de Freitas. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

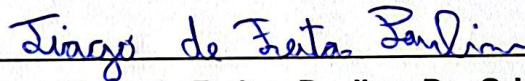
CDD 620.16

AUGUSTO DE MATTOS FREIRE CABRAL

Dimensionamento de um Sistema de Captação de Água para Uso Industrial:
Análise de um Estudo de Caso

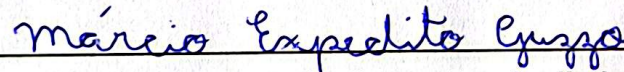
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 15/06/2026



Tiago de Freitas Paulino, Dr., Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais, Campus Nova Suíça
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Márcio Expedito Guzzo, Dr., Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Augusto César Teixeira Malaquias, Dr., Avaliador

Departamento de Engenharia de Materiais, Campus Nova Suíça
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

“Nossos fracassos são, às vezes, mais frutíferos que nossos êxitos.”

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, Guilherme, Eliane, Bruno e Bernardo.

Ao meu pai, Guilherme, Engenheiro Eletricista com mais de 35 anos de atuação e empresário. Sempre uma pessoa que não se deixou estagnar, buscando novos desafios e oportunidades. Meu primeiro exemplo de perseverança e sucesso.

À minha mãe, Eliane, pela formação como pessoa, disciplina e caráter. Cada puxão de orelha na infância me mostra quão importante isso foi para meu desenvolvimento. Obrigado por nunca desistir, mesmo quando eu era resistente em te escutar.

À Bruno e Bernardo, meus irmãos mais velhos, pelos testes de paciência diários e pelo comprometimento em me ajudarem sempre que eu precisei de apoio. Vendo hoje que se tornaram profissionais de sucesso me inspira a sempre almejar por mais. Agradeço de imenso coração por me concederem a honra de ser padrinho de seus filhos Tomás e Sofia. Vou retribuir toda a atenção e carinho que vocês me deram em toda a minha vida.

À Carolina, minha namorada. Seu amor me motivou a aspirar por mais na minha vida. Os momentos com você e sua família sempre me trouxeram conforto e motivação para ser uma pessoa melhor. Obrigado por sempre estar ao meu lado.

Aos profissionais da MIPTEC Engenharia, Tractebel e Ausenco, pelo desenvolvimento da minha formação profissional e pela disponibilidade de informações técnicas usadas neste trabalho.

Ao CEFET-MG, pela formação técnica, humana e gratuita de qualidade ao longo de toda minha graduação.

Ao professor Dr. Tiago de Freitas Paulino, pela atenção no desenvolvimento deste trabalho, apoio imensurável com informações e, sobretudo, pela confiança depositada em mim e neste trabalho.

RESUMO

O abastecimento de água em plantas industriais de operação contínua está condicionado à confiabilidade da adução e ao custo de bombeamento ao longo da vida útil, ambos sensíveis ao material de tubulação. Este trabalho aborda essa decisão por meio do estudo de caso de uma adutora de água bruta em Juiz de Fora, Minas Gerais, que capta água de uma barragem de rejeitos desativada e a transporta a uma planta industrial, com vazão de 800 m³/h ao longo de 2.366 m de linha de recalque aérea e desnível geométrico de 222 m, em horizonte de 20 anos. A instalação aérea e a temperatura de projeto de 35 °C restringem as pressões admissíveis e tornam a seleção do material o ponto central da análise, conduzida sobre aço carbono ASTM A53M Gr. B, ferro fundido dúctil K7 JGS e PEAD PE 100 SDR 9 PN 20. O regime permanente seguiu o método de Darcy-Weisbach conforme a ABNT NBR 12215-1 (2017), com rugosidade projetada para 20 anos pelo modelo parabólico de Abdel-Monim, Ead e Shabayek (2005), a verificação de transiente aplicou a equação de Joukowsky para o limite superior da sobrepressão e a comparação econômica adotou o Custo do Ciclo de Vida a 8% a.a., com os cálculos conduzidos em planilha eletrônica e a seleção do conjunto motobomba em simulador dedicado de fornecedor. O PEAD foi eliminado no regime permanente, pois o fator $f_T = 0,80$ a 35 °C (ABNT NBR 15561, 2017) reduz a pressão máxima de operação para 16 bar, superada em 44% no ponto crítico, enquanto o aço carbono e o ferro fundido dúctil atenderam ao critério estático, com alturas manométricas de 256,12 m e 239,49 m. A análise simplificada de transiente resultou em fatores de utilização de 111% e 114%, hipótese conservadora que, por não incorporar o tempo real de desaceleração do conjunto motobomba nem o amortecimento por atrito, não eliminou as alternativas aprovadas em regime permanente. Na comparação econômica, o aço carbono apresentou CAPEX 64% superior (R\$ 27,2 milhões, ante R\$ 16,6 milhões) e OPEX anual 16,6% superior, com custo do ciclo de vida 28% maior (R\$ 89,1 milhões, ante R\$ 69,7 milhões), resultado mantido entre 4% e 12% a.a. O ferro fundido dúctil K7 JGS é a alternativa recomendada, por reunir o menor custo do ciclo de vida e resistência à corrosão compatível com a água bruta de barragem de rejeitos.

Palavras-chave: adutora de recalque; seleção de materiais; análise de regime permanente; análise de transiente hidráulico; custo do ciclo de vida.

ABSTRACT

Water supply to continuously operating industrial plants depends on the reliability of the transmission main and on the pumping cost over the service life, both sensitive to the pipe material. This work addresses that decision through a case study of a raw water transmission main in Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil, which draws water from a deactivated tailings dam and delivers it to an industrial plant at 800 m³/h over 2,366 m of above-ground discharge line, overcoming a 222 m geometric head, with a 20-year design life. The above-ground installation and the 35 °C design temperature restrict the allowable pressures and make material selection the core of the analysis, carried out for carbon steel ASTM A53M Gr. B, ductile iron K7 JGS, and HDPE PE 100 SDR 9 PN 20. Steady-state design followed the Darcy-Weisbach method in accordance with ABNT NBR 12215-1 (2017), with roughness projected over 20 years using the parabolic model of Abdel-Monim, Ead and Shabayek (2005); the transient assessment applied the Joukowsky equation for the upper bound of the overpressure; and the economic comparison adopted the Life Cycle Cost method at 8% per year, with the calculations carried out in a spreadsheet and the pump set selected in dedicated software. HDPE was eliminated at the steady-state stage, since the factor $f_T = 0.80$ at 35 °C (ABNT NBR 15561, 2017) lowers the maximum allowable operating pressure to 16 bar, exceeded by 44% at the critical point, whereas carbon steel and ductile iron met the static criterion, with total heads of 256.12 m and 239.49 m. The simplified transient analysis yielded utilization factors of 111% and 114%, a conservative hypothesis that, by not accounting for the actual deceleration time of the pump set nor for friction damping, did not eliminate the alternatives approved under steady-state conditions. In the economic comparison, carbon steel showed 64% higher CAPEX (R\$ 27.2 million versus R\$ 16.6 million) and 16.6% higher annual OPEX, with a 28% higher life cycle cost (R\$ 89.1 million versus R\$ 69.7 million), a result that held between 4% and 12% per year. Ductile iron K7 JGS is the recommended alternative, combining the lowest life cycle cost and corrosion resistance compatible with the raw water from a tailings dam.

Keywords: pumped water main; pipe material selection; steady-state analysis; hydraulic transient analysis; life cycle cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Alterações na superfície interna do tubo	22
Figura 4.1 – Perfil topográfico do estudo de caso	35
Figura 4.2 – Processo para dimensionamento para diâmetros de tubulação	39
Figura 4.3 – Roteiro para escolha de bomba	40
Figura 4.4 – Arranjo de sucção e acessórios utilizados.....	43
Figura 4.5 – Tabela de FS sugeridos	45
Figura 4.6 – Demonstração das linhas piezométrica e de carga em condutos forçados.....	47
Figura 4.7 – Ponto de formação de bolsões de ar na tubulação.....	48
Figura 4.8 – Planos de carga e linhas de carga (cenário positivo).....	49
Figura 4.9 – Planos de carga e linhas de carga (cenário negativo).....	49
Figura 5.1 – Comparativo de linhas piezométricas	65
Figura 5.2 – Ampliação localizada entre linhas piezométricas do FoFo e PEAD.....	65
Figura 5.3 – Ampliação localizada entre linhas piezométricas na chegada ao tanque.....	66
Figura 5.4 – Pressão estática ao longo da adutora / Aço Carbono A53M Gr. B.....	67
Figura 5.5 – Pressão estática ao longo da adutora / FoFo K7 JGS.....	68
Figura 5.6 – Pressão estática ao longo da adutora / PEAD PE100 PN 20	68
Figura 5.7 – Curva de desempenho / Bomba Adutora de Aço A53M Gr. B.....	70
Figura 5.8 – Curva de desempenho / Bomba Adutora de FoFo K7 JGS.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Agressividade da água e crescimento anual da rugosidade	23
Tabela 3.2 – Coeficientes de ajuste parabólico do envelhecimento em água bruta	24
Tabela 3.3 – Rugosidade absoluta de tubulações em água pouco agressiva, a 20 °C (mm)	24
Tabela 3.4 – Fatores de redução de pressão entre 25 °C e 50 °C	28
Tabela 4.1 – Coeficientes K de acessórios para perda de carga localizada.....	43
Tabela 4.2 – Fatores c para ancoragem de tubulação	53
Tabela 4.3 - Cálculo da tarifa de energia elétrica adotada (CEMIG, modalidade Verde A4, sem tributos).....	57
Tabela 5.1 – Parâmetros base para cálculo.....	61
Tabela 5.2 – Diâmetros selecionados e velocidades efetivas	62
Tabela 5.3 – Rugosidade absoluta projetada e fator de atrito.....	63
Tabela 5.4 – Perda de carga geral.....	63
Tabela 5.5 – Altura manométrica	64
Tabela 5.6 – Cargas dinâmicas	64
Tabela 5.7 – Verificação de pressão em regime permanente	67
Tabela 5.8 – Potência de acionamento / A53M e FoFo	69
Tabela 5.9 – Vazão e H_{man} de projeto por bomba	69
Tabela 5.10 – Resumo de parâmetros de bombas selecionadas	70
Tabela 5.11 – Verificação NPSH	71
Tabela 5.12 – Parâmetros de entrada da análise simplificada de transiente.....	72
Tabela 5.13 – Resultados da análise simplificada de transiente.....	73
Tabela 5.14 – Custo de implantação (CAPEX) por alternativa.....	75
Tabela 5.15 – Parâmetros e custo anual de energia elétrica	75
Tabela 5.16 – OPEX total por alternativa.....	76
Tabela 5.17 – Custo do Ciclo de Vida (CCV) e comparativo entre alternativas.....	77
Tabela 5.18 – Sensibilidade do CCV à taxa de desconto	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPE	Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas
ABR	Água Bruta
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (custo de implantação)
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
EEAT	Estação Elevatória de Água Tratada
EPCM	<i>Engineering, Procurement and Construction Management</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
FBE	<i>Fusion Bonded Epoxy</i>
FoFo	Ferro Fundido Dúctil
IE3	<i>International Energy-efficiency Class 3</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JGS	Junta tipo ponta e bolsa com anel de borracha (Saint-Gobain)
MOC	<i>Method of Characteristics</i> (Método das Características)
MRS	<i>Minimum Required Strength</i> (Mínima Resistência Requerida)
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
NPS	<i>Nominal Pipe Size</i>

NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
NTN-B	Nota do Tesouro Nacional Série B
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> (custo de operação)
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PSA	Pressão de Serviço Admissível
RHO	Reservatório Hidropneumático
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SCH	<i>Schedule</i>
STD	<i>Standard</i>
TAU	Tanque de Amortecimento Unidirecional
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i> (Custo Ponderado de Capital)

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área da seção transversal da tubulação [m ²]
a	Taxa anual de crescimento da rugosidade [mm/ano]
C_1, C_2, C_3	Coeficientes de ajuste parabólico de Abdel-Monim (2005) [-]
c	Fator adimensional de ancoragem do conduto [-]
ca	<i>Corrosion Allowance</i> (taxa de corrosão) [mm]
C_d	Tarifa de demanda contratada [R\$/kW mês]
C_e	Tarifa de consumo de energia [R\$/kWh]
C_{en}	Custo anual de energia elétrica [R\$/ano]
C_{mt}	Custo anual de manutenção de tubulação [R\$/ano]
$CAPEX$	Custo de implantação [R\$]
CCV	Custo do Ciclo de Vida [R\$]
D_e	Diâmetro externo nominal do tubo [mm]
DI	Diâmetro interno do tubo [mm]
DN	Diâmetro nominal [mm ou m]
E	Módulo de elasticidade do material do conduto [Pa]
e	Espessura da parede do conduto [m]
e_{nom}	Espessura nominal conforme catálogo do fabricante [mm]
E_j	Fator de qualidade da junta longitudinal [-]
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach [-]
FS	Fator de serviço do motor [-]
FU	Fator de utilização [-]
FVP	Fator de Valor Presente [-]
f_T	Fator de redução de pressão em função da temperatura [-]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]

H	Carga piezométrica [m]
H_0	Desnível geométrico [m]
h_f	Perda de carga no trecho da sucção [m]
H_C	Perda de carga contínua [m]
H_e	Altura de carga [m]
H_L	Perda de carga localizada [m]
H_{man}	Altura manométrica [m]
h_{op}	Horas de operação por ano [h/ano]
H_p	Altura piezométrica [m]
i	Taxa de desconto real por ano [-]
I_{tub}	Índice de custo unitário de fornecimento e montagem de tubulação [R\\$/m]
K	Módulo de compressibilidade volumétrica do fluido [Pa]
L	Comprimento da tubulação [m]
LP	Altura piezométrica em regime permanente [m]
m_{op}	Meses de operação por ano [meses]
MRS	Mínima Resistência Requerida [MPa]
n	Horizonte de análise [anos]
N	Potência de acionamento [kW]
N_{fs}	Potência de acionamento corrigida pelo fator de serviço [kW]
N_m	Potência nominal do motor [kW]
$NPSH_d$	NPSH disponível no sistema [m]
$NPSH_r$	NPSH requerido pela bomba [m]
$OPEX$	Custo anual de operação [R\\$/ano]
P	Pressão absoluta no ponto do escoamento [Pa]
P_0	Pressão estática em regime permanente [m.c.a]
P_{adm}	Pressão interna admissível de projeto [Pa]

P_{atm}	Pressão atmosférica [Pa]
$P_0máx$	Pressão estática máxima no sistema [Pa]
$P_{máx}$	Pressão máxima incidente no sistema [Pa]
PMO	Pressão máxima de operação [bar]
PMS	Pressão máxima de serviço [Pa]
PN	Pressão nominal do tubo [bar]
PSO	Sobrepresão admissível máxima para transientes [Pa]
P_v	Pressão de vapor do fluido bombeado [Pa]
Q	Vazão volumétrica [m³/s]
$R(Q)$	Termo de resistência (perda de carga distribuída) [m/s²]
Re	Número de Reynolds [-]
S	Tensão admissível do material à temperatura de projeto [Pa]
SDR	Relação dimensional padronizada (diâmetro externo / espessura) [-]
t	Tempo de operação [anos]; espessura disponível [mm]
T	Vida útil de referência [anos]
T_c	Tempo crítico de propagação da onda [s]
t_f	Tempo de fechamento efetivo [s]
t_m	Espessura nominal requerida [mm]
V	Velocidade média de escoamento [m/s]
W	Fator de redução por temperatura de serviço [-]
x	Coordenada espacial ao longo do eixo do conduto [m]
Y	Coefficiente adimensional em função do material e da temperatura [-]
z	Elevação no ponto [m]
Letras Gregas	
α	Celeridade de propagação da onda de pressão [m/s]
ΔH	Sobrepresão ou subpressão máxima [m.c.a]

ΔP	Sobrepresão em unidade de pressão [Pa]
ΔV	Variação da velocidade média de escoamento [m/s]
ΔZ	Variação de elevação [m]
ε	Rugosidade absoluta [mm]
ε_0	Rugosidade absoluta do tubo novo [mm]
ε_t	Rugosidade absoluta no instante t [mm]
ε/D	Rugosidade relativa [-]
η_b	Rendimento da bomba [-]
η_m	Rendimento do motor [-]
ν	Viscosidade cinemática do fluido [m ² /s]; coeficiente de Poisson [-]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]
ΣK	Somatório de coeficientes de perda de carga localizada [-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs).....	19
3.2	Dimensionamento	21
3.3	Materiais	25
3.4	Seleção de Bombas	28
3.5	Transientes Hidráulicos	30
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	Estudo de Caso	35
4.2	Materiais	37
4.3	Avaliação de Regime Permanente	38
4.4	Análise Simplificada de Regime Transiente	51
4.5	Seleção de Materiais e Análise Econômica	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Análise de Regime Permanente	61
5.2	Verificação por Análise Simplificada de Regime Transiente	71
5.3	Análise Econômica	74
6	CONCLUSÃO.....	78
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80

1 INTRODUÇÃO

A garantia de acesso à água em quantidade e qualidade adequadas constitui fator determinante para o crescimento sustentável (Meireles Faria; Kellner, 2021). No setor industrial, o uso da água é classificado como consuntivo, caracterizando-se pela retirada parcial ou total do recurso hídrico de sua fonte com redução efetiva de sua disponibilidade (ANA, 2022). A utilização do recurso no processo produtivo justifica-se pela sua disponibilidade, pelo baixo custo de captação e pelas propriedades físico-químicas adequadas ao transporte de material e às demandas térmicas dos processos (Gonçalves; Ferreira, 2025). A disponibilidade hídrica determina a capacidade de suporte regional, e as variações na demanda podem limitar a escala e o ritmo do desenvolvimento econômico (Wang *et al.*, 2022), de modo que a interrupção do abastecimento industrial tem repercussão direta sobre a produção.

Quando a captação ocorre em mananciais distantes dos pontos de consumo, os sistemas de adução por recalque viabilizam o transporte do recurso, ainda que envolvam impactos ambientais e custos de implantação que precisam ser contrabalançados pelos benefícios gerados (Claudino *et al.*, 2020). O consumo energético do bombeamento em longas distâncias é parcela expressiva dos custos de operação (Viveiros; Paulino, 2024), de modo que o dimensionamento hidráulico deve considerar não apenas a adequação técnica, mas também o impacto econômico das decisões ao longo da vida útil. Tsutiya (2006) descreve essa etapa como essencial ao planejamento de infraestrutura hídrica, orientada à seleção da solução mais adequada sob os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A seleção adequada dos materiais das tubulações é determinante para garantir a durabilidade, a eficiência energética e a viabilidade econômica do sistema (Viveiros; Paulino, 2024), e deve contemplar fatores como pressão de trabalho, temperatura, fluido conduzido, custo e resistência ao escoamento, sendo ferro fundido dúctil, aço carbono e polietileno de alta densidade (PEAD) as opções mais utilizadas em sistemas de adução (Silva Telles, 2001).

O projeto de uma adutora por recalque não se limita ao regime permanente. Nos sistemas de adução pressurizada, variações de vazão ao longo do tempo configuram transições entre regimes permanentes, originadas por partida ou parada de bombas, abertura ou fechamento de válvulas e rompimento de tubulações (Chaudhry, 2014). Tassinari (2017) aponta que esses eventos podem gerar sobrepressões e subpressões de magnitude suficiente para romper tubulações, danificar equipamentos e interromper o abastecimento. A análise dos transientes hidráulicos é, portanto, etapa necessária no projeto, com reflexos diretos sobre a especificação dos materiais e a definição dos dispositivos de proteção.

O objeto deste trabalho é uma adutora de água bruta localizada no município de Juiz de Fora, Minas Gerais, que capta água de uma barragem de rejeitos desativada e a transporta até o tanque de condicionamento de uma planta industrial. A instalação opera com vazão de projeto de 800 m³/h ao longo de 2.366 m de linha de recalque, vencendo um desnível geométrico de 222 m. A tubulação é aérea em toda a extensão, condição que impõe restrições à seleção de materiais em razão dos efeitos da temperatura de serviço sobre as pressões admissíveis de operação. O horizonte de projeto adotado é de 20 anos.

Este trabalho conduz a análise técnica da adutora em três frentes: verificação do regime permanente pelo método de Darcy-Weisbach, análise simplificada de transiente hidráulico pela equação de Joukowski e comparação econômica pelo Custo do Ciclo de Vida. Com base nos resultados hidráulicos, são avaliados os materiais candidatos (aço carbono, ferro fundido dúctil e polietileno de alta densidade) frente aos critérios de pressão de operação, temperatura de serviço e condições de instalação aérea. A análise é encerrada com a avaliação econômica das alternativas, que exige a consideração dos riscos envolvidos e das possibilidades de retorno associadas ao investimento (Pinto *et al.*, 2006), com base nos custos de implantação (CAPEX) e de operação (OPEX) ao longo do período de projeto.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta os objetivos geral e específicos;
- O Capítulo 3 reúne a revisão bibliográfica, com os fundamentos de sistemas de abastecimento de água, dimensionamento hidráulico, materiais de tubulação, seleção de bombas e análise de transientes hidráulicos;
- O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada, com a caracterização do estudo de caso, os critérios de seleção de materiais e os procedimentos de cálculo em regime permanente e análise simplificada de transiente hidráulico;
- O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos em cada etapa da análise;
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho;
- O Capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Selecionar o material de tubulação mais adequado para uma adutora de água bruta de uso industrial, com base no dimensionamento hidráulico em regime permanente, na avaliação de transientes hidráulicos por análise simplificada e na comparação econômica entre as alternativas candidatas, por meio de um estudo de caso.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir critérios de projeto para transporte de água e realizar a seleção de materiais baseada nestes critérios;
- Dimensionar as linhas de recalque e de sucção em regime permanente, determinando diâmetros, perdas de carga, altura manométrica e linhas piezométricas, além de verificar a pressão admissível de cada material frente às condições de operação;
- Selecionar o conjunto motobomba para cada alternativa aprovada em regime permanente e realizar verificação do NPSH disponível do sistema perante NPSH requerido, conforme catálogo de fabricante;
- Quantificar a sobrepressão máxima decorrente do golpe de aríete por análise simplificada e verificar a integridade de cada material frente à pressão admissível de transiente;
- Comparar as alternativas de material pelo método do Custo do Ciclo de Vida, avaliando CAPEX de tubulação, OPEX de energia elétrica e manutenção, e a sensibilidade do resultado à taxa de desconto adotada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs)

Tsutiya (2006) sugere que a concepção acerca de um sistema de abastecimento de água se refere ao conjunto de estudos e conclusões relativos para o estabelecimento de diretrizes, normativas, parâmetros e definições que, por sua vez, são necessárias para o sistema a ser projetado. Além disso é necessário que o sistema de abastecimento cumpra seu objetivo principal, que é fornecer água na qualidade requerida em quantidade suficiente e pressão adequada para consumo.

No Brasil, a ABNT NBR 12211 (1992) determina as exigências mínimas para desenvolvimento de projetos de sistemas públicos de abastecimento de água. A concepção parte da definição do objetivo, do grau de detalhamento requerido e das condições econômico-financeiras, observando os seguintes propósitos:

- Delimitação dos parâmetros fundamentais para o desenvolvimento do projeto;
- Realização do pré-dimensionamento das unidades constituintes dos sistemas, com base nas alternativas previamente selecionadas;
- Seleção da alternativa mais apropriada, considerando critérios técnicos, econômicos e de sustentabilidade ambiental;
- Estabelecimento das diretrizes gerais de projeto, acompanhadas das estimativas quantitativas dos serviços previstos para a fase de elaboração do projeto executivo.

De forma simplificada, Tsutiya (2006) determina que a concepção de um SAA deve estender-se aos inúmeros componentes que possam compô-lo. Dentre eles, temos:

- Manancial: corpo hídrico, superficial ou subterrâneo, utilizado como fonte de captação. Considera-se manancial abastecedor aquele com condições sanitárias adequadas e vazão suficiente, isolada ou combinada, para atender à demanda máxima projetada.
- Captação: Conjunto de estruturas e dispositivos instalados junto ao manancial, destinados à retirada de água para alimentação do sistema de abastecimento.
- Estação Elevatória: unidade composta por equipamentos destinados ao bombeamento para a etapa seguinte. Compreende Estações Elevatórias de Água Bruta (EEAB) e de Água Tratada (EEAT), além de boosters, estações compactas de pressurização instaladas em trechos estratégicos da rede.

- Adutora: tubulação destinada ao transporte de água entre unidades anteriores à rede de distribuição, sem fornecimento direto aos consumidores. As adutoras podem operar com água bruta ou tratada, conforme a etapa do sistema.
- Estação de Tratamento de Água (ETA): conjunto de unidades destinadas ao tratamento da água captada para adequação aos padrões de potabilidade.
- Reservatório: componente da etapa de distribuição, responsável por compensar as variações entre as vazões de adução e de consumo e por estabilizar as pressões da rede.
- Rede de Distribuição: sistema de tubulações que disponibiliza água aos consumidores em quantidade e pressão compatíveis com o projeto.

Com os componentes básicos de um SAA definidos, é necessário definir qual rota a tubulação irá percorrer e quem serão os consumidores finais desse sistema. A concepção do SAA de uma determinada região requer uma investigação cautelosa pelo projetista responsável, a fim de obter-se o modelo mais adequado e conveniente, conforme Kellner (2014).

Dessa forma, a norma ABNT NBR 12211 (1992) orienta que sejam considerados e avaliados determinados aspectos específicos durante os estudos preliminares de concepção, entre os quais se destacam:

a) Levantamento topográfico da área de interesse: a representação cartográfica pode basear-se em mapas, aerofotogrametria, levantamentos topográficos, planimétricos, planialtimétricos ou de campo. Os documentos devem cobrir a totalidade da zona a abastecer, incluindo áreas de expansão futura e trechos isolados do sistema, bem como as áreas dos potenciais mananciais e os corredores de terreno para as tubulações de interligação.

b) Perfil dos usuários: deve contemplar a população residente permanente e os setores comerciais, industriais, institucionais e de serviços que compõem a demanda da área em estudo.

Os estudos e projetos das obras devem ter a capacidade determinada para necessidades imediatas e para atendimento futuro em caso de expansão (Azevedo Netto; Fernández y Fernández, 2015). Isso implica estimativas da quantidade de água exigida e das vazões de projeto ao longo do escopo previsto, integrações com sistemas existentes ou futuros, definição das fontes de captação e do método de operação. Definidas as premissas, é possível prever etapas de implantação, comparar alternativas técnico-econômicas e definir a viabilidade do projeto.

Gonçalves e Ferreira (2025) descrevem o balanço hídrico como a quantificação e análise dos fluxos de entrada, saída, acumulação e utilização da água em determinada instalação, com estabelecimento das premissas e estimativas de vazão por aplicação e do volume dos reservatórios. Segundo Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015), a estimativa da demanda em sistemas industriais é influenciada por:

- Qualidade da água fornecida;
- Tipo de indústria;
- Perdas físicas no sistema (vazamentos, idade e condição da rede, sobrepressões).

A definição dessas vazões é baseada em parâmetros do projeto, conforme critérios técnicos estabelecidos, em conjunto com adoção de boas práticas de projetos no setor. A vazão média de consumo é a média horária do volume total utilizado em um ciclo diário completo, distribuído uniformemente nas 24 horas, independentemente de o regime ser contínuo ou intermitente.

A determinação da velocidade de escoamento é um dos principais desafios do dimensionamento de adutoras, pois influencia diretamente o CAPEX e o OPEX. Tubulações de maior diâmetro possuem maior custo de aquisição e montagem, porém menor perda de carga de escoamento, resultando em menor consumo energético e menor desgaste de equipamentos ao longo do projeto. O inverso é igualmente aplicável: tubulações de menor diâmetro possuem menor CAPEX, porém maior perda de carga, elevando o consumo energético e a frequência de manutenção. Nesse contexto, torna-se necessário aplicar o conceito de velocidade econômica como critério de projeto, fornecendo o equilíbrio entre CAPEX e OPEX e possibilitando a redução do custo do sistema ao longo da vida útil do projeto.

3.2 Dimensionamento

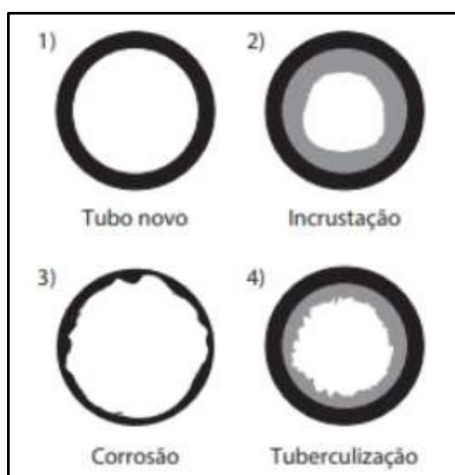
Definidas as vazões de processo, a topografia da rota e a concepção de projeto, é necessário calcular as condições para atender às vazões na pressão desejada. Carvalho (1999) conduziu seu trabalho para seleção de instalações elevatórias de maneira que esta seria realizada por meio de dois parâmetros, vazão (Q) e altura manométrica (H_{man}). A altura manométrica é definida pela quantidade de energia por unidade de peso que um fluido deve absorver pela bomba para que vença o desnível entre instalações, a diferença de pressão entre dois reservatórios e a perda de carga. Em tubulações de curto trajeto, o desnível e a diferença de pressão são os principais responsáveis pela determinação da altura manométrica, entretanto, em

sistemas mais complexos, com maior comprimento e maior quantidade de acessórios, a perda de carga pode ser um agravante para o dimensionamento e escolha da bomba.

3.2.1 Perda de Carga

O efeito da perda de carga é potencializado ao longo da vida útil do sistema, uma vez que fenômenos como corrosão, tuberculização e deposição de substâncias presentes no fluido bombeado promovem o aumento progressivo da rugosidade interna das tubulações, reduzindo seu diâmetro útil e elevando a perda de carga com o tempo de operação (Azevedo Netto; Fernández y Fernández, 2015). A Figura 3.1 exemplifica os fenômenos de envelhecimento de tubulações.

Figura 3.1 – Alterações na superfície interna do tubo



Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

Como esses fenômenos são governados pela qualidade da água e pelo material da tubulação, o dimensionamento os incorpora por meio de uma rugosidade absoluta projetada para o horizonte de operação, e não pela velocidade de escoamento. Em projetos industriais, o sistema de bombeamento opera em regime contínuo durante a vida útil da planta, o que requer um nível elevado de confiabilidade. A vida útil de plantas industriais como usinas de beneficiamento de minério situa-se tipicamente entre 5 e 20 anos de operação, intervalo que orienta a seleção de materiais e os critérios de dimensionamento da adutora. A ABNT NBR 12215-1 (2017) determina que o dimensionamento hidráulico considere, para o horizonte de projeto, o envelhecimento, a incrustação e a deposição nas paredes da tubulação, com estudo separado para água bruta e tratada. Em práticas de projeto, recomenda-se a adoção de valores conservadores de rugosidade absoluta, de modo a evitar a subestimação das perdas de carga.

Uma alternativa para estimar a evolução temporal da rugosidade se dá pelo método proposto por Lamont (1981), baseado no conceito de taxa uniforme de crescimento

originalmente formulado por Colebrook e White. A rugosidade absoluta após t anos de operação é obtida pela Equação 3.1.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + a \cdot t \quad (3.1)$$

Onde

ε_t Rugosidade absoluta no instante t [mm];

ε_0 Rugosidade absoluta do tubo novo [mm];

a taxa anual de crescimento [mm/ano];

t Tempo de operação [anos].

Lamont (1981) classifica a agressividade da água em quatro tendências de ataque corrosivo, conforme a Tabela 3.1, com taxas obtidas a partir de experimentos em tubos de ferro fundido revestido com betume. A tendência adotada no projeto deve refletir a qualidade da água transportada, fornecendo a rugosidade prevista para o final do horizonte.

Tabela 3.1 – Agressividade da água e crescimento anual da rugosidade

Tendência	Grau de ataque corrosivo	Taxa anual de crescimento a (mm/ano)
1	Leve	0,025
2	Moderado	0,076
3	Apreciável	0,250
4	Severo	0,760

Fonte: Lamont (1981).

A Equação 3.1 e as taxas da Tabela 3.1 foram obtidas originalmente para tubos de ferro fundido revestido com betume (*coated cast iron*) e são empregadas por analogia para tubos metálicos sem revestimento. Ressalta-se que essa extrapolação é uma aproximação, pois os valores dados por Lamont (1981) não foram desenvolvidos especificamente para outros materiais, podendo haver desvios em função da natureza do tubo, da condição superficial interna e da composição físico-química da água.

Abdel-Monim, Ead e Shabayek (2005) complementa essa abordagem ao ajustar a evolução da rugosidade relativa por função parabólica a partir de medições em tubos com idades entre zero e 50 anos em materiais diversos. A Tabela 3.2 aborda os coeficientes utilizado nesta equação para cálculo em função do material ferro fundido dúctil revestido com argamassa de cimento e aço carbono sem revestimento.

$$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_0} = C1 \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 + C2 \cdot \left(\frac{t}{T}\right) + C3 \quad (3.2)$$

Onde

ε_t Rugosidade absoluta no instante t [mm];

ε_0 Rugosidade absoluta do tubo novo [mm];

t Tempo de operação [anos];

T Vida útil de referência [anos].

Por fim, $C1$, $C2$ e $C3$ são correspondentes aos coeficientes de ajuste experimental (adimensionais), função do material e da qualidade da água.

Tabela 3.2 – Coeficientes de ajuste parabólico do envelhecimento em água bruta

Material de Tubo	Categoria Experimental	C1	C2	C3	r ²
Aço Carbono	Steel (S)	168,050	7,564	-1,424	0,994
Ferro fundido dúctil	CCI (<i>cement mortar lined cast iron</i>)	34,744	3,701	1,400	0,998

Fonte: Abdel-Monim, Ead e Shabayek (2005).

O tubo de ferro fundido dúctil comercial é fornecido com revestimento interno de argamassa de cimento centrifugada (*spun cement-lined*) conforme ISO 4179 (2024). O revestimento isola o ferro do contato com a água e impede a tuberculação formada, mostrada na Figura 3.1.

O tubo de PEAD é classificado como hidraulicamente liso (*smooth pipe*), sem efeitos de envelhecimento significativos em água tratada, conforme Lamont (1981). Ambos os estudos não apresentam categoria experimental específica para PEAD, tão quanto a aplicação dos métodos de cálculo por analogia configura aproximação metodológica não respaldada por dado primário do material. Nesse sentido, para estimar o envelhecimento do PEAD em água bruta, adota-se os valores empíricos de rugosidade absoluta apresentados por Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015), mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Rugosidade absoluta de tubulações em água pouco agressiva, a 20 °C (mm)

Material de Tubo	Novos	Usados (10 anos)	Usados (20 anos)
PEAD	0,0025	0,0100	0,0200

Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015).

3.3 Materiais

Definidos os critérios de cálculo da rugosidade absoluta adotada para o horizonte de projeto, é necessário contextualizar os materiais nos quais estes parâmetros serão aplicados, bem como os aspectos técnicos e econômicos que orientam sua seleção em adutoras. A escolha entre aço carbono, ferro fundido dúctil e PEAD não é limitada somente ao desempenho hidráulico, mas contempla resistência mecânica, compatibilidade com o método de assentamento, requisitos de proteção contra corrosão e intempéries, comportamento frente aos transitórios hidráulicos e custos de aquisição, instalação, operação e manutenção.

3.3.1 Aço Carbono

O aço carbono é o material de adução de maior maturidade em projetos industriais, com cadeia de fornecimento consolidada e normalização nacional e internacional alinhadas. No Brasil, os requisitos de fabricação e fornecimento dos tubos com ou sem solda longitudinal são estabelecidos pela ABNT NBR 5590 (2015), que contempla os graus A e B, fornecimento preto ou galvanizado por imersão a quente e faixa dimensional de NPS 1/8 a 26 (ABNT, 2015). Para o grau B, equivalente nacional do ASTM A53 Gr. B adotado neste trabalho, o limite de resistência à tração mínimo é de 415 MPa e o limite de escoamento mínimo é de 240 MPa (ABNT, 2015). Esses parâmetros caracterizam a resistência mecânica do material e definem a disponibilidade para absorver as solicitações de pressão interna ao longo da vida útil do sistema. Em projetos EPCM (Engineering, Procurement and Construction Management), a maturidade do aço carbono reduz risco de suprimento e padroniza a interface entre o pacote de tubulação e os equipamentos pressurizados, como conjuntos de bombeamento, reservatórios e instrumentação.

Tsutiya (2006) atribui ao aço carbono alta resistência a pressões internas e externas, ocorrência praticamente nula de vazamentos em juntas soldadas, baixa fragilidade e disponibilidade comercial em diversos diâmetros e tipos de junta. Como contraponto, o material tem baixa resistência à corrosão externa, exige cuidados específicos de transporte e armazenamento e demanda dimensionamento quanto à dilatação térmica e ao colapso por pressão externa. A rigidez mecânica favorece sua aplicação em instalações industriais sujeitas a esforços externos relevantes, como atravessamentos e regiões de circulação de cargas.

As juntas podem ser soldadas, flangeadas ou elásticas, com escolha definida pela pressão de serviço e pelas condições de montagem. Para tubulações enterradas, Tsutiya (2006) recomenda revestimento externo em FBE (*fusion bonded epoxy*), polietileno tripla camada ou

poliuretano TAR, e revestimento interno em *coal tar epoxy*. Silva Telles (2001) destaca que toda tubulação metálica enterrada exige tratamento externo protetivo e, conforme a agressividade do solo, sistema de proteção catódica e drenagem adequada, requisitos que ampliam o custo de aquisição e o escopo de manutenção ao longo da vida útil.

O tubo de aço carbono novo sem revestimento interno permanente apresenta rugosidade absoluta $\varepsilon = 0,046$ mm, conforme Pritchard (2011). O módulo de elasticidade dos aços com teor de carbono igual ou inferior a 0,30%, faixa que abrange o ASTM A53 Gr. B, é de 202 GPa a 25 °C e 198 GPa a 100 °C, conforme ASME B31.3 (2024). O aço carbono novo tem rigidez elevada e rugosidade superficial baixa. Sob operação contínua, esse conjunto resulta em comportamento hidráulico previsível e estável.

3.3.2 Ferro Fundido Dúctil (FoFo)

O ferro fundido dúctil (FoFo dúctil) é obtido pela introdução de pequena quantidade de magnésio ao ferro gusa, processo que cristaliza a grafita em esferas ou nódulos e confere ao material elasticidade, resistência à tração e resistência ao impacto superiores às do ferro fundido cinzento (Tsutiya, 2006). No Brasil, os requisitos para tubos e conexões de ferro fundido dúctil destinados a sistemas de adução e distribuição de água são estabelecidos pela ABNT NBR 7675 (2022). Em projetos EPCM, a oferta consolidada de tubos, conexões e juntas elásticas em catálogos padronizados simplifica o suprimento de peças especiais para travessias, derivações e acessórios.

Silva Telles (2001) registra o emprego do ferro fundido no transporte de água, gás, água salgada e esgoto, em serviços de baixa a média pressão e em temperatura ambiente. Como característica, possui elevada resistência à corrosão pelo solo e durabilidade. Os principais tipos de junta associados ao ferro fundido dúctil listados por Tsutiya (2006) são quatro: a junta elástica é a de maior uso em tubulações de ponta e bolsa. A junta elástica travada é recomendada para travessias, declives acentuados e solos de baixa resistência. A junta mecânica é adequada a diâmetros médios e grandes sob altas pressões. A junta flangeada é aplicada em pontos sujeitos a desmontagens, como captação, tomada de água e estações elevatórias.

O revestimento interno da tubulação é executado em argamassa de cimento aplicada por centrifugação, conforme requisitos de natureza do material, método de aplicação, condição superficial, desempenho e espessura mínima estabelecidos pela ISO 4179 (2024). O revestimento externo recebe uma camada de zinco metálico puro seguida de pintura betuminosa aplicada após a cura do cimento, conjunto que protege a parede em solos de agressividade

moderada. A elevada massa específica do material aumenta o custo logístico de transporte e exige equipamentos robustos para movimentação e mão de obra especializada para o manuseio em campo, fatores que impactam o CAPEX da implantação (Viveiros; Paulino, 2024).

O ferro fundido dúctil revestido internamente com argamassa de cimento centrifugada apresenta rugosidade absoluta $\varepsilon = 0,020$ mm em condição de tubo novo, conforme Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015). O material é caracterizado por elevada rigidez mecânica e por baixa rugosidade efetiva da superfície interna em condição nova, propriedades que o qualificam como material de comportamento hidráulico estável e desempenho consistente ao longo da vida útil.

3.3.3 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

O polietileno de alta densidade (PEAD) é um termoplástico derivado do eteno, introduzido comercialmente na década de 1950, caracterizado por alta resistência ao impacto, inclusive em baixas temperaturas e boa resistência a agentes químicos (Tsutiya, 2006).

As principais vantagens do emprego do PEAD em adutoras são a resistência à corrosão, a baixa rugosidade interna, o baixo peso linear, a flexibilidade e a elevada durabilidade. A flexibilidade do material permite raio de curvatura permanente da ordem de 30 vezes o diâmetro externo do tubo, o que reduz a necessidade de conexões em curvas e facilita a adaptação ao traçado (Tsutiya, 2006). Essa característica traduz-se em vantagem de montagem, pois o fornecimento em barras longas ou em bobinas reduz o número de juntas executadas em campo, todas unidas por termofusão ou eletrofusão em emendas monolíticas, conforme o manual da Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas (ABPE, 2013).

O PEAD com junta soldada apresenta rugosidade absoluta $\varepsilon = 0,0025$ mm em condição de tubo novo, conforme Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015). Por se tratar de um material viscoelástico, o PEAD apresenta módulo de elasticidade dependente do tempo de aplicação da carga, com valores de curto prazo substancialmente superiores aos de longo prazo, comportamento que deve ser considerado tanto no cálculo de deflexões e deformações ao longo da vida útil quanto na análise de transitórios hidráulicos. A combinação entre baixa rugosidade efetiva da superfície interna em condição nova e comportamento viscoelástico característico caracteriza o PEAD como material de elevada eficiência hidráulica e demanda específica de modelagem mecânica.

A pressão admissível dos tubos de PEAD depende da classe da resina, da relação dimensional padronizada (SDR), da temperatura de operação e da exposição à radiação solar.

As resinas comerciais de polietileno (PE) são classificadas pela Mínima Resistência Requerida (MRS - *Minimum Required Strength*), determinada por curvas de regressão para vida útil de 50 anos a 20 °C, sendo as classes mais usuais o PE 80 e o PE 100 (ABPE, 2013; Tsutiya, 2006). A Pressão Nominal (PN) do tubo, expressa em bar, é obtida a partir do MRS, do SDR e do fator de segurança aplicado pela norma de fabricação adotada pelo fornecedor (Tsutiya, 2006), sendo referenciada à temperatura de 20 °C. Para temperaturas de operação superiores a 20 °C, a Pressão Máxima de Operação (PMO) deve ser corrigida pelo fator de redução de pressão em função da temperatura (f_T), conforme a Equação 3.3 (ABPE, 2013):

$$PMO = PN \cdot f_T \quad (3.3)$$

Onde

PMO Pressão máxima de operação [bar];

PN Pressão nominal do tubo [bar];

f_T Fator de redução em função da temperatura [-].

Os valores de f_T para PE 80 e PE 100 entre 25 °C e 50 °C são apresentados na Tabela 3.4. Acima de 45 °C, a vida útil do tubo é limitada a 15 anos, e a temperatura máxima de serviço do material é de 80 °C (ABPE, 2013).

Tabela 3.4 – Fatores de redução de pressão entre 25 °C e 50 °C

Temperatura	25 ° C	27,5 ° C	30 ° C	35 ° C	40 ° C	45 ° C	50 ° C
F_t	1,0	0,90	0,87	0,80	0,74	0,67	0,61

Fonte: ABNT NBR 15561 (2017)

Uma restrição prática do PEAD está na limitação da faixa comercial de classes de pressão para água. Tsutiya (2006) registra a faixa comercial entre 0,25 e 2,0 Mpa, enquanto o Manual ABPE (2013) indica o PEAD PE 100 preto como opção predominante em mineração para pressões de até 20 bar. Em sistemas cuja pressão estática, somada às sobrepressões transientes, ultrapassa esse patamar, o emprego do PEAD se torna inviável, restando ao projetista a especificação de materiais metálicos como aço e ferro fundido. Em travessias aéreas, a flexibilidade do material demanda estruturas de apoio mais reforçadas, fator que motiva a substituição do PEAD por aço nesses trechos (Santos, Oliveira e Resende, 2017).

3.4 Seleção de Bombas

Para a seleção do conjunto de bombas, Carvalho (1999) sugere que os gráficos de seleção, ofertados por fornecedores, devem ser consultados. Estes levam em consideração os

parâmetros de vazão (Q) e altura manométrica (H_{man}). Estes gráficos possuem curvas de rendimento que variam conforme diâmetro do rotor, frequência da rede elétrica, rotação e rendimento do motor empregado. A escolha final do equipamento deverá considerar a alternativa mais vantajosa, conforme os seguintes aspectos:

- Análise de viabilidade econômica comparativa entre o investimento inicial na aquisição do conjunto motobomba e os custos associados à sua operação, sendo que um desempenho mais eficiente implica menor consumo energético;
- Compatibilidade entre os materiais construtivos da bomba e as características físico-químicas do fluido a ser bombeado, de modo a garantir durabilidade e segurança operacional.
- Adequação entre a capacidade de aspiração da bomba selecionada e a altura de aspiração existente na instalação, com o objetivo de evitar o fenômeno da cavitação.

Em sistemas de adução de grande extensão, a altura manométrica (H_{man}) e a vazão (Q) requeridas podem ultrapassar a capacidade de uma única bomba comercial, situação em que se recorre à associação de bombas, em paralelo ou em série, conforme o parâmetro limitante seja a vazão ou a altura manométrica (Azevedo Netto; Fernández y Fernández, 2015).

Na associação em paralelo, as unidades descarregam em uma mesma tubulação e operam sob a mesma altura manométrica, de forma que a curva característica conjunta é obtida somando as vazões individuais para cada valor de altura. O ponto de operação corresponde à interseção dessa curva conjunta com a curva do sistema. Como o aumento da vazão total eleva a perda de carga e, com ela, a altura manométrica de operação, a vazão resultante é inferior ao dobro da vazão que uma única bomba forneceria isoladamente. Essa configuração é indicada quando o parâmetro limitante é a vazão. Bombas de capacidades diferentes podem operar em paralelo desde que suas curvas sejam próximas. Quando são muito distintas, a de menor altura manométrica máxima pode ser levada à vazão nula (*shutoff*), deixando de contribuir para o sistema. A operação prolongada nessa condição provoca superaquecimento, por não haver escoamento que dissipe o calor gerado, o que pode danificar a unidade.

Já para a associação em série, a mesma vazão atravessa as unidades, e a curva característica conjunta é obtida somando-se as alturas manométricas individuais para cada valor de vazão. O ponto de operação, dado pela interseção com a curva do sistema, apresenta altura manométrica e vazão superiores às de uma única bomba. Essa configuração é indicada quando o parâmetro limitante é a altura manométrica.

3.5 Transientes Hidráulicos

O dimensionamento de um sistema hidráulico deve considerar não apenas as condições de escoamento em regime permanente, mas também as respostas do sistema frente aos eventos transitórios nos regimes transientes (Silva; Diniz, 2024). Essa abordagem abrangente é essencial para assegurar o desempenho adequado e a integridade do sistema ao longo de sua operação. Por fim, para que o abastecimento de água seja funcional durante a vida útil de projeto estimada, é necessário realizar a análise de transiente hidráulico incidente sobre o sistema de bombeamento e tubulações.

O transiente hidráulico é um fenômeno que ocorre sempre em que há uma transição entre dois regimes permanentes, onde surge uma variação súbita de pressão em um conduto forçado que está associada a uma mudança abrupta de velocidade, traduzindo-se em sub ou sobre pressões internas na tubulação e acessórios (Tassinari, 2017). Essas transições geralmente decorrem de manobras operacionais, como a abertura ou fechamento de válvulas, ou de eventos imprevistos, como a parada súbita de bombas. Este processo resulta em uma força de impacto incidente na tubulação, podendo se romper, assim comprometendo o processo produtivo da instalação, conforme Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015). As consequências do golpe de aríete podem ser severas, manifestando-se na ruptura de tubulações, colapso de paredes do conduto por subpressão, danos a válvulas, conexões e equipamentos de bombeamento, além da interrupção do fornecimento de água ao sistema. Em casos extremos, o fenômeno pode comprometer estruturalmente toda a adutora, gerando prejuízos operacionais e financeiros significativos, o que torna o seu controle e prevenção aspectos indispensáveis no projeto de sistemas de adução.

Embora o transiente hidráulico represente um risco significativo à integridade dos sistemas de adução, os estudos de bombeamento frequentemente limitam-se à análise do regime permanente. A ABNT NBR 12211 (1992), que estabelece as diretrizes para a concepção de sistemas públicos de abastecimento de água, não inclui a avaliação de efeitos transitórios em seu escopo. Todavia, essa análise torna-se mandatória para as normas ABNT NBR 12214 (2020) e ABNT NBR 12215-1 (2017). Estas normas, voltadas respectivamente a estações elevatórias e adutoras em condutos forçados, formalizam o estudo do golpe de aríete como um requisito essencial de segurança e dimensionamento.

A análise dos fenômenos transitórios é fundamental para aumentar a proteção contra os efeitos indesejáveis desses eventos, otimizar o funcionamento dos dispositivos de segurança e

controle, e, conseqüentemente, garantir maior confiabilidade ao sistema de captação de água. (Soares, 2007).

O estudo do transiente hidráulico fundamenta-se em duas equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento do escoamento em condutos forçados sujeitos a variações bruscas de pressão e vazão, sendo estas a equação do movimento e a equação da continuidade, derivadas, respectivamente, dos princípios de conservação da quantidade de movimento linear e da massa. A necessidade de utilizar essa formulação em derivadas parciais decorre do acréscimo da variável independente tempo à análise, o que impõe uma matemática mais complexa do que aquela utilizada para o regime permanente (Tassinari, 2017).

O equacionamento do fenômeno pode ser abordado a partir de duas teorias distintas. A teoria da coluna rígida desconsidera a compressibilidade do fluido e a elasticidade das paredes do conduto, sendo aplicável a manobras muito lentas e ao estudo de dispositivos como chaminés de equilíbrio. Já a teoria da coluna elástica, que constitui a base do equacionamento apresentado nesta seção, considera o fluido compressível e as paredes do conduto elásticas, tendo um espectro mais amplo de aplicação e maior aproximação da realidade (Tassinari, 2017).

A equação da continuidade, derivada do princípio de conservação de massa considerando a compressibilidade do fluido e a elasticidade da parede do conduto, é dada pela Equação 3.4:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

Onde

Q Vazão [m³/s];

H Carga piezométrica [m].

x Coordenada espacial ao longo do eixo do conduto [m];

t Instante de tempo analisado [s];

g Constante de aceleração gravitacional [m/s²];

A Área da seção transversal do conduto [m²];

α Celeridade de propagação da onda de pressão [m/s].

A equação do movimento, obtida pela aplicação da Segunda Lei de Newton a um volume de controle infinitesimal de fluido em escoamento pressurizado, é expressa pela Equação 3.5:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + R(Q) = 0 \quad (3.5)$$

O termo $R(Q)$, denominado termo de resistência, representa as perdas de carga distribuídas ao longo da tubulação e é dado pela Equação 3.6:

$$R(Q) = \frac{f}{2DA} Q|Q| \quad (3.6)$$

Onde

f Fator de atrito de Darcy-Weisbach [-];

D Diâmetro interno do conduto [m].

O módulo $|Q|$ assegura que a resistência se oponha ao escoamento independentemente do seu sentido. Cabe destacar que essa formulação adota o modelo de atrito quasi-estacionário, no qual se assume que o perfil de velocidades durante o transiente é equivalente ao do regime permanente, aplicando-se a resistência viscosa de instante a instante ao longo do fenômeno.

Conforme Tassinari (2017), essa simplificação fornece boa aproximação dos primeiros picos de oscilação de pressão, contudo, a dissipação de energia ocorre muito mais lentamente do que o observado em ensaios de laboratório ou medições de campo.

No entanto, para fins de projeto em sistemas de abastecimento de água, esse modelo é amplamente aceito, sendo suficiente para o dimensionamento de dispositivos de proteção. Destaca-se ainda a ressalva de Maestri (1985 *apud* Tassinari, 2017), de que maiores sofisticções nos modelos matemáticos, como a consideração de perda de carga dependente do tempo, não se justificam para problemas práticos correntes, pois a melhora no resultado numérico fica absorvida pelos erros decorrentes do desconhecimento parcial das condições de contorno.

As Equações 3.5 e 3.6 não possuem solução analítica exata para a maioria dos casos práticos, sendo necessário o uso de métodos numéricos para sua resolução. O Método das Características (MOC - *Method of Characteristics*) é o mais utilizado para esse fim, dada sua precisão e a facilidade de implementação computacional (Chaudhry, 2014; Wylie; Streeter, 1993).

Para estimativa preliminar da variação de pressão máxima decorrente do transiente, aplica-se a expressão de Joukowsky, dada pela Equação 3.7, válida para fechamento instantâneo de válvula ou parada brusca de bomba:

$$\Delta H = \alpha \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (3.7)$$

Onde

α Celeridade da onda de pressão [m/s];

ΔH Sobrepressão ou subpressão máxima [m.c.a];

ΔV Variação da velocidade média de escoamento [m/s].

A expressão de Joukowsky pressupõe fechamento instantâneo, tubulação de geometria simples e a ausência de amortecimento por atrito. Em sistemas reais, o atrito dissipa progressivamente a amplitude das ondas sem alterar seus períodos, de modo que a equação superestima a sobrepressão efetiva (Chaudhry, 2014).

Para manobras com tempo efetivo $t_f > 2L/a$, caracterizando fechamento lento, a variação de pressão é proporcional ao tempo de fechamento e é inferior ao limite de Joukowsky. Nesse caso, utiliza-se a Equação 3.8.

$$\Delta H = \frac{2L \cdot \Delta V}{g \cdot t_f} \quad (3.8)$$

Onde

L Comprimento total da tubulação avaliada [m];

t_f Tempo de fechamento efetivo [s];

As Equações 3.7 e 3.8 são formulações simplificadas, aplicáveis a sistemas de geometria simples e que não contemplam a presença de dispositivos de proteção contra o golpe de aríete, tais como Reservatórios Hidropneumáticos (RHO), Tanque de Amortecimento Unidirecional (TAU), ventosas, válvulas de alívio e volantes de inércia. Esses dispositivos atuam modificando a amplitude e a forma das ondas de pressão ao longo do sistema, alterando as condições de contorno do problema de forma que as hipóteses adotadas por Joukowsky, de fechamento instantâneo, tubulação simples e sem amortecimento deixam de ser aplicáveis.

Dessa forma, sua utilização deve se restringir a estimativas preliminares de sobrepressão e subpressão, sendo recomendável, para o dimensionamento definitivo de sistemas com

dispositivos de proteção, o emprego do MOC com as condições de contorno adequadamente modeladas.

Por fim, a compreensão dos efeitos do golpe de aríete são, portanto, imprescindíveis para garantir a continuidade do abastecimento de água e para a correta seleção dos dispositivos de proteção, prevenindo o rompimento de tubulações e a interrupção do funcionamento do sistema.

4 METODOLOGIA

4.1 Estudo de Caso

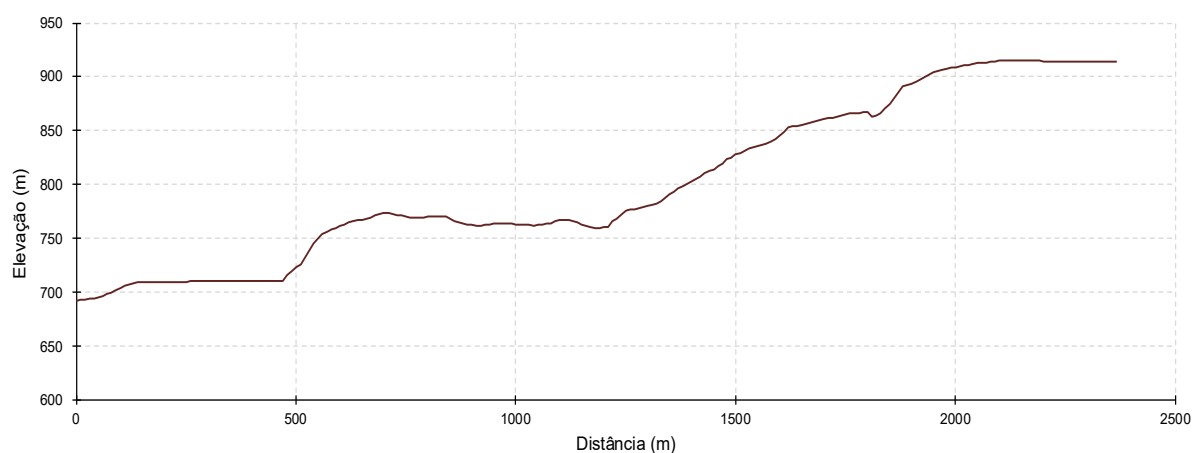
4.1.1 Descrição do Sistema

O estudo de caso deste trabalho retrata o dimensionamento de uma adutora existente no município de Juiz de Fora, no estado de Minas Gerais. O sistema capta água bruta de uma barragem de rejeitos desativada e a transporta até um tanque de condicionamento, localizado em uma planta industrial, onde a água será utilizada no processo produtivo. Por questões de confidencialidade, dados sensíveis são omitidos. Os parâmetros do critério de projeto adotados neste trabalho são:

- Vazão de projeto (Q): 800 m³/h;
- Comprimento de tubulação de recalque: 2366 m;
- Comprimento de tubulação de sucção: 10 m;
- Tanque de condicionamento aberto (pressão de descarga igual a atmosférica);
- Nível do ponto de sucção está 1,5 m abaixo do bocal de sucção da bomba.
- Regime de operação contínuo, 24 horas por dia, 7 dias por semana.

O perfil topográfico do traçado da adutora é apresentado na Figura 4.1. A captação ocorre na elevação de 692 m e a entrega no tanque de condicionamento na elevação de 914 m, totalizando um desnível geométrico de 222 m ao longo dos 2.366 m de recalque.

Figura 4.1 – Perfil topográfico do estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente, não haverá o uso de tubulações enterradas, com o objetivo de simplificação. Será considerado somente tubulação aérea, apoiada por batentes. Para elevação da adutora, foi considerado que a linha de centro está 0,30 metros acima do perfil topográfico.

Para fins de simplificação de projeto, apesar de ser um item essencial, não será previsto conjuntos motobombas reservas, apenas operacionais. Entretanto, será avaliado o arranjo de bombas em série e paralelo para seleção de bombas para o sistema. Por fim, o projeto possui horizonte de 20 anos de operação, conforme estabelecido no critério de projeto, logo os parâmetros adotados no dimensionamento estão de acordo com esta premissa.

4.1.2 Condições de Operação

Os parâmetros de fluido e de localidade adotados no dimensionamento são apresentados a seguir.

- Dados de Fluido:
 - Fluido: Água Bruta (ABR);
 - Temperatura ambiente média: 25°C;
 - Massa específica do fluido (ρ): 997 kg/m³;
 - Viscosidade cinemática (ν): 8,93 x 10⁻⁷ m²/s;
 - Pressão de vapor (P_{vap}) da água a 25° C: 3,17 kPa;
 - Módulo de compressibilidade volumétrica (K): 2,19 GPa.
 - Temperatura de operação do sistema: 35°C.
 - Pressão de vapor (P_{vap}) da água a 35° C: 5,63 kPa.
- Dados de Local:
 - Altitude: 678 m;
 - Pressão atmosférica (P_{atm}): 93,8 kPa;
 - Aceleração da gravidade (g): 9,78 m/s²;

A captação ocorre em barragem desativada, com água em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente média anual da região de 25 °C. Isto posto, as propriedades físicas do fluido adotadas correspondem à esta temperatura. A linha de recalque é aérea, sem isolamento térmico, sujeita a exposição solar direta e ao aquecimento por dissipação de energia no conjunto motobomba. A temperatura de projeto de 35 °C corresponde à condição máxima admitida para o material da tubulação ao longo do horizonte de 20 anos de operação e é o valor adotado para a definição dos parâmetros normativos de cada material avaliado.

A origem da água em barragem de rejeitos implica potencial corrosivo do fluido, condição que será considerada na definição de parâmetros de corrosão e envelhecimento adotado para os materiais metálicos.

Os cálculos de regime permanente, da análise simplificada de transiente e do custo do ciclo de vida são conduzidos em planilha eletrônica (Microsoft Excel). A seleção comercial do conjunto motobomba é realizada no simulador KSB Easy Select.

4.2 Materiais

Neste trabalho, serão avaliados três materiais de tubulação, representativos de classes distintas de resistência mecânica, comportamento elástico e compatibilidade química com água bruta:

- Aço carbono ASTM A53M Gr. B;
- Ferro fundido dúctil classe K7 com junta JGS;
- PEAD PE100.

Os três materiais pertencem a classes de materiais distintas quanto ao comportamento mecânico: metálico rígido, metálico dúctil e polimérico viscoelástico. Além disso, diferem na forma como respondem a variações de pressão, em particular durante eventos de transientes hidráulicos. Os materiais possuem normas técnicas brasileiras ou internacionais que regulam sua fabricação e dimensionamento para uso em adutoras, e são produzidos nos diâmetros nominais compatíveis com a vazão de projeto estabelecida.

O aço carbono e o ferro fundido dúctil são amplamente empregados em adutoras industriais de recalque no setor de mineração. O PEAD tem uso crescente nesse mesmo setor em trechos de menor pressão, devido a sua resistência à corrosão e à abrasão em contato com água bruta de barragens de rejeitos.

4.2.1 Aço Carbono ASTM A53M Gr. B

Neste trabalho, adota-se o tubo sem costura, designação S/B, fabricado conforme a norma ASTM A53M e com dimensões reguladas pela ABNT NBR 5590 (2015), fornecida sem revestimento interno. Por fim, a união entre elementos é realizada por solda de topo, formando junta monolítica sem liberdade de expansão axial.

4.2.2 Ferro Fundido Dúctil K7 JGS

A tubulação é fabricada conforme ABNT NBR 7675 (2022). A classe K7 define a espessura mínima de parede em função do diâmetro nominal. A junta JGS é do tipo ponta e bolsa com anel de borracha, que permite movimentação longitudinal entre elementos. O tubo é fornecido com revestimento interno de argamassa de cimento aplicada por centrifugação, que

isola a parede metálica do contato direto com o fluido e dispensa a adoção de tolerância de corrosão sobre a espessura de parede.

4.2.3 PEAD PE 100 SDR 9

O PEAD PE 100 é fornecido e fabricado conforme a ABNT NBR 15561 (2017). A classe SDR 9 define a relação entre diâmetro externo e espessura de parede, resultando na pressão nominal PN 20 (20 bar) a 20 °C. A união entre elementos é realizada por termofusão de topo, formando junta monolítica sem liberdade de expansão axial. O diâmetro externo nominal adotado e a espessura de parede correspondente são extraídos da tabela dimensional do Manual ABPE (2013), elaborada conforme ABNT NBR 15561 (2017).

4.3 Avaliação de Regime Permanente

4.3.1 Diâmetros

A seleção do diâmetro pode ser feita de forma preliminar utilizando a ABNT NBR 12215-1 (2017), que define velocidades mínimas para escoamento em adutoras. Para água bruta, deve ser adotada a velocidade que esteja entre o mínimo de 0,6 m/s e máximo de 3 m/s, podendo haver exceções caso seja economicamente justificado.

Tsutiya (2006), recomenda que adutoras de recalque operem na faixa de 1,0 a 1,5 m/s, sendo valores que levem em consideração os aspectos econômico-financeiros. Neste dimensionamento, será utilizado o método das velocidades econômicas, justificado por produzir diâmetros que equilibram custo de fornecimento de tubulação e consumo de energia. Para isto, serão utilizadas as Equações 4.1 e 4.2, dadas por:

$$Q = V.A \quad (4.1)$$

Onde

Q Vazão volumétrica [m³/s];

V Velocidade média de escoamento [m/s];

A Área da seção transversal da tubulação [m²].

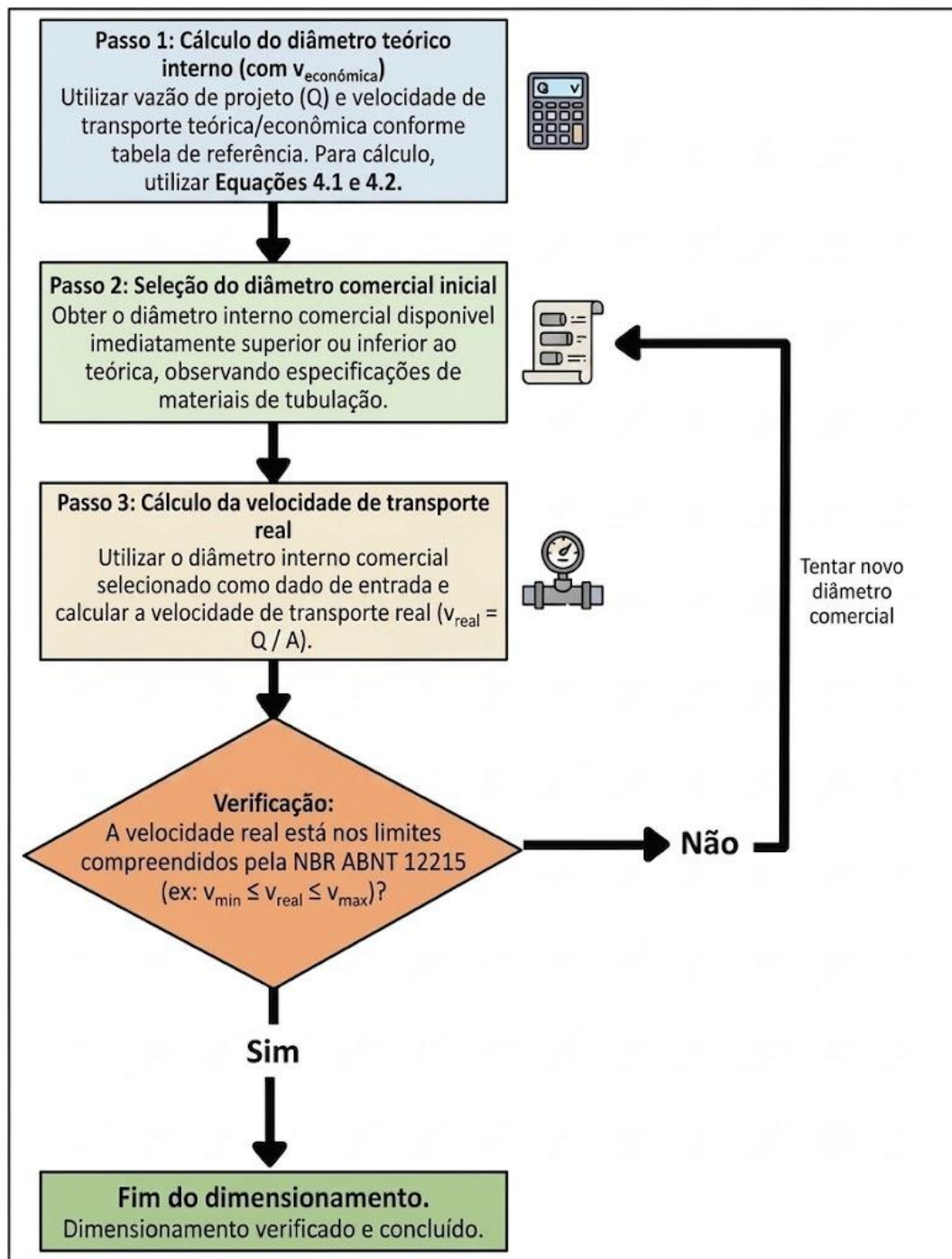
$$A = \frac{\pi.D^2}{4} \quad (4.2)$$

Onde

D Diâmetro interno da tubulação [m].

Dadas as equações, o roteiro para dimensionamento via método das velocidades econômicas é demonstrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Processo para dimensionamento para diâmetros de tubulação



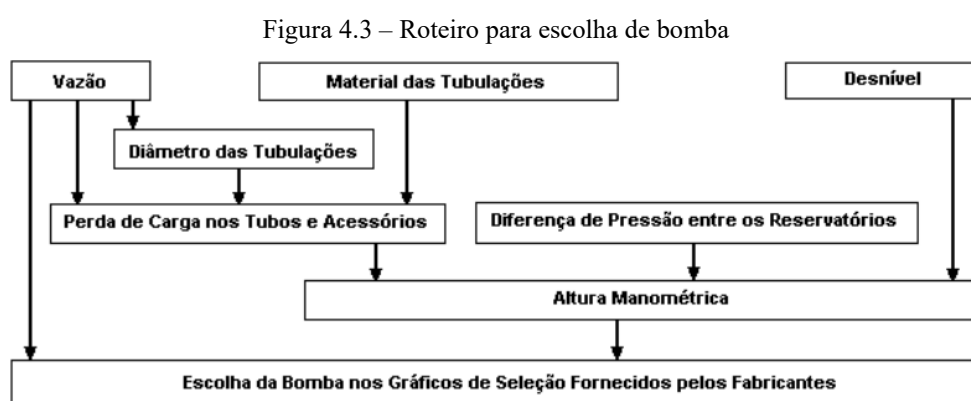
Fonte: Elaborado pelo autor

Após realizados os cálculos, para a linha de recalque da bomba deverá ser adotado o diâmetro comercial mais próximo do calculado. Para a linha de sucção, adota-se o diâmetro imediatamente superior ao utilizado na linha de recalque.

A adoção do diâmetro comercial mais próximo no recalque mantém a velocidade efetiva dentro da faixa requerida pela ABNT NBR 12215-1 (2017) e próxima da faixa econômica de 1,0 a 1,5 m/s indicada por Tsutiya (2006). O diâmetro superior na sucção reduz a velocidade no trecho e amplia a margem de NPSH disponível.

4.3.2 Dimensionamento de bombas

O dimensionamento de uma instalação elevatória considera dois parâmetros principais: vazão (Q) e altura manométrica (H_{man}). A Figura 4.3 apresenta um roteiro simplificado para dimensionamento e seleção de uma bomba.



Fonte: Carvalho (1999)

4.3.2.1 Altura manométrica

A altura manométrica de um sistema pode ser definida pela Equação 4.3:

$$H_{man} = H_0 + \frac{P_r - P_a}{\rho \cdot g} + \Delta H \quad (4.3)$$

Onde

H_{man} Altura manométrica [m];

H_0 Desnível geométrico [m];

P_a Pressão no reservatório de sucção [Pa];

P_r Pressão no reservatório de recalque [Pa];

ρ Massa específica do fluido [kg/m³];

g Aceleração da gravidade [m/s²];

ΔH Perda de carga nas tubulações e nos acessórios [m].

Para o estudo de caso deste trabalho, o tanque de condicionamento e a captação estão sujeitos a pressão atmosférica, logo a Equação 4.3 se transforma na Equação 4.4, dada por:

$$H_{man} = H_0 + \Delta H \quad (4.4)$$

4.3.2.2 Perdas de carga no sistema

A perda de carga consiste na resistência oferecida pelas tubulações e pelos acessórios ao escoamento do fluido (Carvalho, 1999). Nesse sentido, as perdas de carga podem ser classificadas em perdas contínuas (que ocorre no interior das tubulações) e perdas localizadas (ocorre em acessórios, tais como curvas, válvulas, conexões etc.). A Equação 4.5 a seguir detalha a relação citada.

$$\Delta H = H_c + H_L \quad (4.5)$$

A perda de carga contínua pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach, expressa pela Equação 4.6:

$$H_c = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.6)$$

Onde

f Coeficiente de atrito, dependente do regime de escoamento [-];

L Comprimento da tubulação [m];

Para determinação do coeficiente de atrito (f), é necessário determinar qual regime de escoamento o sistema se encontra. Para isso, é utilizado o número de Reynolds (Re), onde para $Re < 2300$ o escoamento é laminar, e para $Re > 4000$ o escoamento é turbulento. Na faixa intermediária ($2300 < Re < 4000$), o regime é de transição. A Equação 4.7 pode ser usada para calcular o número de Reynolds do sistema, dada por:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4.7)$$

Onde

ν Viscosidade cinemática do fluido [m²/s];

Re Número de Reynolds [-].

Dessa forma, se $Re < 2300$, o escoamento se configura como laminar e o coeficiente de atrito pode ser calculado pela Equação 4.8, definida por:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.8)$$

Entretanto, caso seja demonstrado que $Re > 4000$, o escoamento se torna turbulento. Nesta perspectiva, o cálculo do fator de atrito se dá pela equação de Colebrook, expressa pela Equação 4.9. Os parâmetros de entrada serão o número de Reynolds e a rugosidade relativa (ϵ/D), podendo ser calculado utilizando os parâmetros de rugosidade absoluta (ϵ) e o diâmetro interno da tubulação (D).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (4.9)$$

No entanto, esta equação possui o fator “f” em ambos os lados da igualdade, logo será necessário um processo iterativo para resolução. Para isso, será utilizado o recurso “Atingir Meta” do software Microsoft Excel®, convergindo a equação para zero. Este recurso fornecerá o fator de atrito após n interações para o número de Reynolds calculado e rugosidade relativa especificada.

A rugosidade absoluta adotada para o horizonte de 20 anos é calculada conforme o modelo parabólico de Abdel-Monim, Ead e Shabayek (2005) para o ferro fundido dúctil revestido com argamassa de cimento e para o aço carbono sem revestimento. Para o PEAD, adotam-se os valores tabelados de Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015) para 20 anos de operação.

O modelo parabólico foi adotado por dispor de dados experimentais primários para as duas categorias metálicas avaliadas, além de possuir elevada confiabilidade ($r^2 \geq 0,994$, Tabela 3.2) e por cobrir o horizonte do projeto dentro da faixa de medições do estudo (0 a 50 anos). O modelo linear de Lamont (1981), obtido em tubos de ferro fundido revestido com betume, demandaria extrapolação por analogia para os materiais avaliados, impactando na confiabilidade dos resultados obtidos.

Para as perdas de cargas localizadas no recalque, será adotado um percentual de 4% do valor de ΔH calculado para perdas de carga contínua, sob a premissa que adutoras em geral possuem traçado retilíneo e pouco acessórios (curvas, conexões e válvulas), logo este valor não têm grande significância para o valor total de ΔH . Entretanto, para a sucção, por ser tratar de um arranjo curto e simples, será feito o cálculo de perdas de cargas localizadas, conforme Equação 4.10 a seguir:

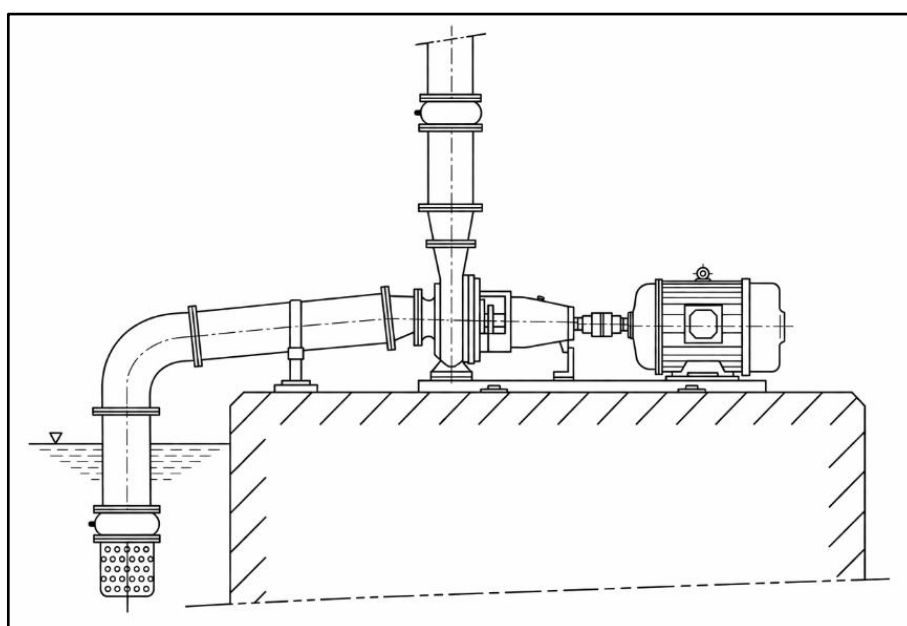
$$H_L = (\sum K) \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.10)$$

Onde

$\sum K$ Somatório de coeficientes de perda de carga localizada [adimensional].

O coeficiente K , utilizado no cálculo das perdas de carga localizadas é obtido via catálogos de fabricantes ou por meio de tabelas consolidadas presentes na literatura técnica especializada, sendo que seu valor depende da singularidade, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e das condições de escoamento (Claudino *et al.*, 2020,). Neste trabalho, os valores de K serão adotados com base nos dados tabelados de Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015). A Figura 4.4 mostra o arranjo adotado para a sucção e os acessórios utilizados para melhor funcionamento do bombeamento.

Figura 4.4 – Arranjo de sucção e acessórios utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Os coeficientes K dos acessórios da sucção foram retirados de Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015), que apresenta os valores em faixas. Adotam-se os pontos médios das faixas tabuladas, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Coeficientes K de acessórios para perda de carga localizada

Acessório	K
Válvula de Pé 100 % Aberta	4,5
Crivo	4,5
Curva 90° Raio Longo	0,28
Redução Excêntrica	0,7
Total $\sum K$	9,98

Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

4.3.2.3 Potência de eixo

Para o conjunto motobomba deste trabalho, será adotado os valores de referência da literatura técnica para a fase de estudo de concepção: $\eta_b = 0,75$, valor compreendido dentro da faixa típica de 0,70 a 0,85 para bombas centrífugas de adução de água bruta (Tsutiya, 2006), e $\eta_m = 0,95$, conforme classe IE3 / NEMA Premium para motores de indução trifásicos aplicados em bombeamento industrial (ABNT NBR 17094-1, 2018). Caso seja necessária a conversão para o sistema técnico, adota-se a relação: 1 cv = 735,5 W. A potência de eixo é calculada pela Equação 4.11:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot \dot{Q} \cdot H_{man}}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_b} \quad (4.11)$$

Onde

- N Potência de eixo [kW];
 $\dot{Q}$ Vazão [m³/h];
 η_b Rendimento da bomba [-].

A Equação 4.11a aplica o rendimento η_m do motor trifásico para calcular a potência consumida, sendo esta a potência elétrica ativa demandada da rede elétrica

$$N_m = \frac{N}{\eta_m} \quad (4.11a)$$

Onde

- N_m Potência consumida [kW];
 η_m Rendimento do motor [-].

Para a seleção do motor comercial, é aplicado o fator de serviço definido pela ABNT NBR 17094-1 (2018), que estabelece a capacidade do motor de operar acima da potência nominal sem danos térmicos ou mecânicos. A potência nominal do motor é obtida pela Equação 4.12:

$$N_{fs} = N_m \cdot FS \quad (4.12)$$

Onde

- N_{fs} Potência de acionamento corrigida pelo fator de serviço [kW];
 FS Fator de serviço do motor [-].

A Figura 4.5 a seguir é utilizada para consulta dos fatores de serviço de motores comerciais.

Figura 4.5 – Tabela de FS sugeridos

Potência nominal	Fator de serviço			
kW	Rotação síncrona			
	rpm			
	3 600	1 800	1 200	900
0,037	1,4	1,4	1,4	1,4
0,06	1,4	1,4	1,4	1,4
0,09	1,4	1,4	1,4	1,4
0,12	1,35	1,35	1,35	1,35
0,18	1,35	1,35	1,35	1,35
0,25	1,35	1,35	1,35	1,35
0,37	1,25	1,25	1,25	1,15 ^a
0,55	1,25	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a
0,75	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a
1,1 a 150	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a

Fonte: ABNT NBR 17094-1 (2018)

A escolha do arranjo é feita pela compatibilidade entre o ponto de operação do sistema e a curva característica do conjunto motobomba disponível em catálogo. A potência de eixo absorvida pelo arranjo é equivalente à de uma única bomba hipotética operando com Q e H_{man} do sistema, dado que a potência hidráulica total é conservada na associação

A potência consumida total, utilizada no dimensionamento da demanda contratada na concessionária de energia, corresponde à soma das potências de cada unidade em operação simultânea. O regime contínuo de operação adotado no critério de projeto implica que a demanda contratada é dimensionada para a operação simultânea das unidades em regime de projeto. Eventuais picos de demanda associados à partida dos motores são mitigados por escalonamento temporal da partida das unidades, prática de operação que não compõe a demanda contratada de regime contínuo. Dessa forma, é adotado a premissa de que todas as unidades do arranjo operam continuamente após a partida inicial do sistema.

4.3.3 Escolha primária da bomba

A seleção da bomba é realizada pela construção e comparação das curvas características do sistema e do equipamento. A curva do sistema é construída por aplicações sucessivas da Equação 4.4 para uma sequência de vazões em torno da vazão de projeto. Cada aplicação

fornece um par (Q , H_{man}) e o conjunto desses pares define a relação $H_{\text{man}}(Q)$ representativa da resistência hidráulica imposta ao escoamento.

A curva da bomba é extraída do catálogo do fabricante para a rotação nominal e o diâmetro de rotor avaliado. O ponto de operação corresponde à interseção entre as duas curvas e deve situar-se na faixa de melhor rendimento da bomba selecionada. Quando o ponto requerido excede a capacidade comercial de uma única unidade, aplica-se o procedimento de associação de bombas descrito na seção anterior.

4.3.4 Cálculo de NPSH

O NPSH (*Net Positive Suction Head*) refere-se a quanto de energia na forma de pressão pode ser transformada em cinética, potencial gravitacional ou dissipada, sem que o fluido atinja sua pressão de vapor. O fabricante da bomba declara o NPSH requerido (NPSH_r), enquanto o projetista calcula o NPSH disponível (NPSH_d) e verifica se $\text{NPSH}_d > \text{NPSH}_r$. Quando essa condição não é atendida, o fluido se vaporiza na zona de baixa pressão (sucção), formando bolhas que implodem ao atingir a zona de alta pressão (recalque), causando erosão nos elementos rotativos da bomba pelo processo de cavitação.

O NPSH disponível é calculado pela Equação 4.13

$$\text{NPSH}_d = \frac{P_{\text{atm}} - P_v}{\rho g} \pm \Delta z - h_f \quad (4.13)$$

Onde

NPSH_d NPSH disponível no sistema [m];

P_{atm} Pressão atmosférica na sucção [Pa];

P_v Pressão de vapor do fluido bombeado [Pa];

Δz Distância vertical entre o nível do líquido no reservatório e o centro do rotor da bomba. [m];

h_f Perda de carga no trecho da sucção [m].

O sinal do termo Δz depende da posição do nível do líquido em relação ao centro do rotor da bomba. Quando o nível do reservatório está acima do rotor (instalação afogada), a coluna estática soma-se à energia disponível e adota-se o sinal positivo. Quando o nível está abaixo do rotor (instalação em aspiração), a bomba precisa vencer o desnível geométrico de sucção, reduzindo o NPSH disponível. Desta forma, adota-se o sinal negativo.

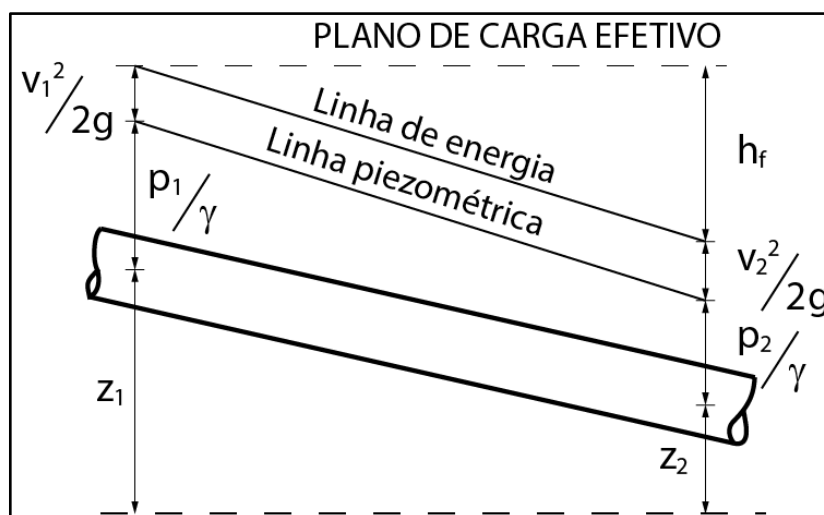
Para o cálculo de $NPSH_d$, adota-se a pressão de vapor correspondente à temperatura do fluido no reservatório de captação, definido nas condições de operação da adutora.

O critério de verificação adotado é $NPSH_d \geq NPSH_r + 1,0$ m, conforme ABNT NBR 12214 (2020). No estudo de caso, o nível do reservatório de captação está 1,5 m abaixo do bocal de sucção, situando-se abaixo do centro do rotor da bomba e configurando instalação em aspiração. Para esta condição, Δz é subtraído de $NPSH_d$ na Equação 4.13.

4.3.5 Linha piezométrica e linha de carga

No estudo do escoamento em condutos forçados, consideram-se dois planos de referência: o plano de carga absoluta, correspondente à pressão atmosférica, e o plano de carga efetiva, relacionado ao nível piezométrico de montante, conforme Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015). A partir desses planos, definem-se duas linhas fundamentais para a análise hidráulica: a linha de carga total absoluta, que representa a energia total do escoamento em relação ao plano de pressão atmosférica, e a linha de carga efetiva, que expressa essa energia em relação ao nível piezométrico do reservatório de montante. A Figura 4.6 a seguir exibe a construção das linhas piezométrica e de carga em condutos forçados:

Figura 4.6 – Demonstração das linhas piezométrica e de carga em condutos forçados



Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

Com base nisso, é possível calcular as linhas piezométricas e de carga conforme Equações 4.14 e 4.15, demonstradas por:

$$H_p = \frac{P}{\rho g} + z \quad (4.14)$$

Onde

H_p Altura piezométrica (ou linha) [m];

P Pressão absoluta no ponto do escoamento [Pa];

z Elevação no ponto [m].

$$H_e = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (4.15)$$

Onde

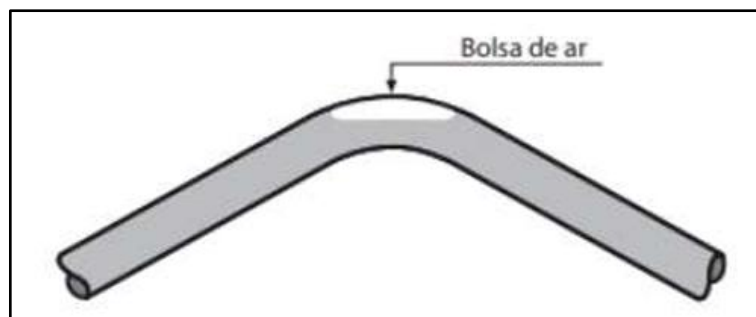
H_e altura de carga total [m];

$\frac{V^2}{2g}$ Parcela de energia dinâmica [m];

A construção das linhas piezométrica e de carga ao longo da adutora é realizada por procedimento sequencial. O eixo do conduto é discretizado em estações com base no perfil topográfico, com refinamento nos pontos de variação de declividade. A estação inicial corresponde à saída da bomba, onde a altura de carga total é conhecida pela soma da elevação, da carga de velocidade e da pressão fornecida pelo conjunto motobomba. Para cada estação subsequente, a altura de carga total é obtida pela subtração da perda de carga acumulada entre a estação inicial e a estação corrente, calculada conforme as Equações 4.5 e 4.6 para o trecho percorrido.

Considerando esse contexto, é necessário avaliar se a quantidade de energia fornecida pela bomba para o fluido é suficiente para que o bombeamento seja exitoso. No entanto, também se faz necessário avaliar se a linha piezométrica intercepta o traçado da tubulação em determinada elevação, o que pode gerar zonas de subpressão e, consequentemente, bolsões de ar na tubulação, como apresenta a Figura 4.7.

Figura 4.7 – Ponto de formação de bolsões de ar na tubulação



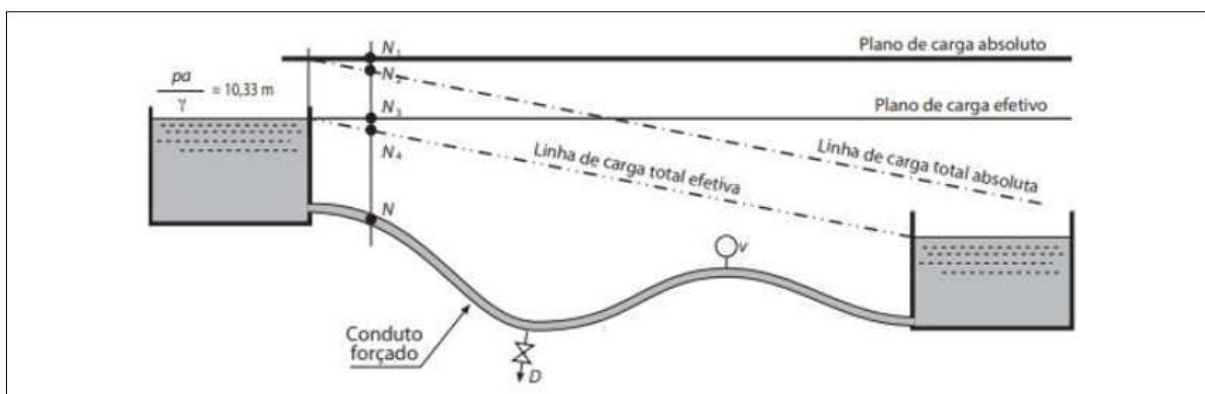
Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

O impacto referente ao surgimento de bolsões de ar se dá pela redução da seção transversal do tubo, o que implica no aumento da velocidade de escoamento, resultando em maior perda de carga. Como forma de controlar esse fenômeno, é recomendado a instalação de

válvulas do tipo ventosa nos pontos altos do traçado. As ventosas atuam nas duas condições de pressão: quando a pressão interna é positiva, expulsam o ar acumulado na tubulação, e quando ocorre subpressão, admitem ar para equalizar a pressão e impedir o colapso do conduto.

A relação entre a linha piezométrica e o perfil da tubulação define dois cenários. No cenário positivo, ilustrado na Figura 4.8, a linha piezométrica permanece acima do perfil em toda a extensão, de modo que a pressão interna é positiva ao longo de toda a linha e não há condição para a formação de bolsões de ar.

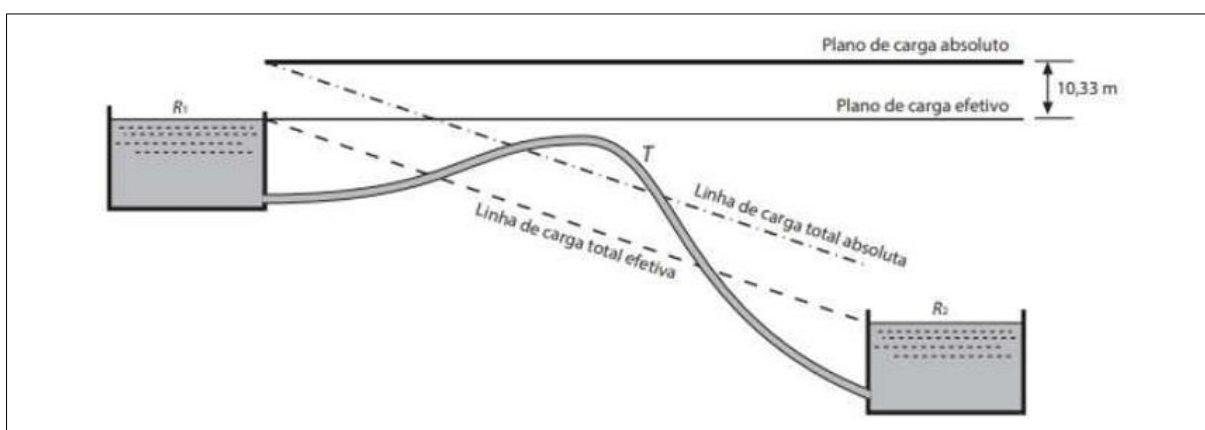
Figura 4.8 – Planos de carga e linhas de carga (cenário positivo)



Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

No cenário negativo, exibido na Figura 4.9, a linha piezométrica intercepta o perfil em um ponto elevado, gerando uma zona de subpressão. Nessa região, o ar se desprende do líquido e se acumula no ponto alto, formando o bolsão de ar.

Figura 4.9 – Planos de carga e linhas de carga (cenário negativo)



Fonte: Azevedo Netto e Fernández y Fernández (2015)

Portanto, para o dimensionamento adequado da adutora, é necessário que as linhas piezométrica e de carga não interceptem a topografia do terreno em hipótese alguma, com o objetivo de evitar a formação dos bolsões de ar e consequentemente, o desgaste prematuro dos equipamentos de tubulação.

4.3.6 Pressão admissível em regime permanente

4.3.6.1 Aço carbono A53M Gr. B

A pressão admissível de projeto dos tubos de aço carbono é calculada pela equação de pressão interna para tubos retos, conforme ASME B31.3:2024, considerando tolerância de corrosão sobre a parede metálica. O cálculo é dado pelas Equações 4.16, 4.17 e 4.18 a seguir:

$$P_{adm} = \frac{2 \cdot t \cdot (S \cdot E_j \cdot W)}{D - 2 \cdot Y \cdot t} \quad (4.16)$$

$$t = t_m - ca \quad (4.17)$$

$$t_m = e_{nom} \cdot 0,875 \quad (4.18)$$

Onde

P_{adm} Pressão interna admissível de projeto [MPa];

t Espessura disponível [mm];

t_m Espessura mínima de fornecimento conforme ABNT NBR 5590 (2015) [mm];

e_{nom} Espessura nominal conforme catálogo de fabricante [mm];

ca Taxa de corrosão [mm];

S Tensão admissível do material à temperatura de projeto [MPa];

E_j Fator de qualidade da junta longitudinal [-];

W Fator de redução por temperatura de serviço [-];

D Diâmetro externo nominal do tubo [mm];

Y Coeficiente adimensional dependente do material e da temperatura [-].

Os parâmetros são obtidos conforme ASME B31.3:2024 e ABNT NBR 5590 (2015). $S = 138$ MPa para o material A53 Gr. B a 35 °C. $E_j = 1,00$ para tubo sem costura. $W = 1,00$ para temperatura inferior a 510 °C. $Y = 0,4$ para aços ferríticos na temperatura de operação. A espessura disponível t desconta 12,5% da espessura nominal, tolerância negativa máxima de fabricação conforme ABNT NBR 5590 (2015). A tolerância de corrosão $ca = 2,0$ mm, correspondente a 0,1 mm/ano ao longo de 20 anos, é adotada como estimativa de projeto na ausência de análise físico-química da água usada, sendo este valor compatível com taxas de corrosão para aço carbono em serviço de água bruta de baixa a moderada agressividade, conforme prática corrente em estudos de concepção.

A Equação 4.16 é aplicável a tubos com $t < D/6$, condição estabelecida na ASME B31.3:2024 para a formulação de pressão interna simplificada. Para $t \geq D/6$, a análise requer formulação completa com consideração de teoria de falha, efeitos de fadiga e tensão térmica, hipótese não verificada para o tubo adotado e não tratada nesta análise.

4.3.6.2 Ferro fundido dúctil K7 JGS

A pressão estática máxima $P_{0\text{máx}}$ deve ser inferior ou igual à PSA (Pressão de Serviço Admissível), dado pelo catálogo de fabricante, onde o componente pode suportar com total segurança, de forma contínua, em regime hidráulico permanente.

4.3.6.3 PEAD PE100 SDR 9 PN 20

A pressão estática máxima $P_{0\text{máx}}$ deve ser inferior ou igual ao PMO dado pela Equação 3.3, corrigida pelos fatores de temperatura da Tabela 3.4.

4.4 Análise Simplificada de Regime Transiente

O dimensionamento em regime permanente apresentado fornece a pressão estática e a altura manométrica do sistema, mas não verifica a integridade da tubulação frente a imprevistos e manobras operacionais. A análise do regime transiente quantifica as sobrepressões geradas pela parada brusca da bomba ou pelo fechamento de válvula, sendo necessária em estudos de concepção de sistemas de bombeamento, para a seleção da classe de pressão dos tubos (Tassinari, 2017; Chaudhry, 2014).

A análise simplificada adotada quantifica a sobrepressão máxima incidente em cada material proposto, considerando apenas a tubulação, sem dispositivos de proteção. O procedimento aplica equacionamento analítico da literatura técnica para o cálculo da celeridade da onda de pressão, da classificação da manobra e da sobrepressão de projeto.

4.4.1 Premissas

A análise cobre apenas a linha de recalque. A sucção é desconsiderada, visto que seu comprimento é desprezível frente ao recalque, tornando sua contribuição sobre os parâmetros de transiente irrelevante. Na parada brusca do conjunto motobomba, a onda de sobrepressão propaga-se para o recalque, trecho em que a pressão estática é máxima e o comprimento da linha amplifica os efeitos do transiente hidráulico. Portanto, a análise da linha de recalque configura o cenário mais desfavorável para a verificação de admissibilidade de pressão e para a seleção de materiais.

4.4.2 Pressão Admissível em Regime Transiente

4.4.2.1 Aço carbono A53M Gr. B

A ASME B31.3:2024 estabelece como critério geral de pressão de projeto a pressão correspondente à condição mais severa coincidente de pressão interna e temperatura esperada em serviço, incluindo surtos de pressão entre as fontes a considerar. A pressão máxima incidente $P_{\text{máx}}$ deve ser inferior ou igual à P_{adm} , calculada pela Equação 4.16. A ASME B31.3:2024 não distingue limites entre os dois regimes na via adotada, de forma que P_{adm} constitui envelope único para a condição estática e para o pico transiente.

4.4.2.2 Ferro fundido dúctil K7 JGS

A pressão admissível do ferro fundido dúctil é obtida por catálogo de fabricante. O catálogo define a Pressão Máxima de Serviço (PMS) como a pressão máxima admissível, valor que compreende tanto a pressão estática de operação quanto a sobrepressão de transientes hidráulicos.

4.4.2.3 PEAD PE100 SDR 9 PN 20

Tratando-se do PEAD, a pressão máxima de operação é obtida a partir da pressão nominal PN, corrigida pelo fator de temperatura, conforme Equação 3.3 e Tabela 3.4. Nesse sentido, a pressão admissível é obtida conforme Manual ABPE (2013), dada pela Equação 4.19.

$$PSO = 1,5 \cdot PMO \quad (4.19)$$

Onde

PSO Sobrepressão admissível máxima para transientes hidráulicos [MPa];

PMO Pressão máxima de operação de regime permanente [MPa];

O critério de verificação estabelece que a pressão máxima incidente não deve ultrapassar PSO , conforme Manual ABPE (2013). O módulo de elasticidade do PEAD adotado refere-se ao comportamento de curto prazo, compatível com a duração característica do transiente, da ordem de segundos (Chaudhry, 2014).

4.4.3 Equacionamento

A celeridade de propagação da onda de pressão (α) é calculada conforme a Equação 4.20:

$$\alpha = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + c \cdot \frac{KD}{eE}}} \quad (4.20)$$

Onde

- α Celeridade da onda de pressão [m/s];
- K Módulo de compressibilidade volumétrica da água [Pa];
- e Espessura da parede do conduto [m];
- E Módulo de elasticidade do material do conduto [Pa];
- c Fator adimensional de ancoragem do conduto [-].

O fator c depende da condição de ancoragem e do tipo de junta da tubulação, apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fatores c para ancoragem de tubulação

Condição	c
Ancorado em uma extremidade, livre na outra	$1 - \nu/2$
Ancorada, axialmente rígida	$1 - \nu^2$
Com juntas de expansão	1

Fonte: Tsutiya, (2006).

Onde

- ν coeficiente de Poisson do material do conduto utilizado [-].

Para o ferro fundido dúctil K7 com junta JGS, a liberdade de movimentação longitudinal entre elementos caracteriza a condição de juntas de expansão, adotando-se $c = 1$. Para o PEAD PE 100 com união por termofusão e para o aço carbono A53M Gr. B com junta soldada, a ausência de liberdade axial caracteriza a condição ancorada axialmente rígida, adotando-se $c = 1 - \nu^2$. O tempo crítico T_c representa o intervalo necessário para a onda de pressão percorrer o comprimento da linha de recalque e retornar ao ponto de origem da perturbação, dada pela Equação 4.21:

$$T_c = \frac{2 \cdot L}{\alpha} \quad (4.21)$$

Onde

- T_c Tempo crítico [s];
- L Comprimento da linha de recalque [m];

O tempo de fechamento efetivo (t_f) é o intervalo de tempo em que ocorre a manobra de fechamento, seja o fechamento de uma válvula ou de parada de bomba, que gera o transiente hidráulico. Para $t_f \leq T_c$ (manobra rápida), a sobrepressão máxima é calculada pela Equação 4.22:

$$\Delta H = \alpha \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (4.22)$$

ΔH Sobrepressão ou subpressão máxima [m.c.a];

ΔV Variação da velocidade média de escoamento [m/s].

A análise simplificada adota t_f tendendo a zero, condição que corresponde à manobra rápida e fornece o limite superior da sobrepressão pela Equação 4.22. Para sistemas em que $t_f > T_c$, a sobrepressão é calculada pela Equação 3.8, a fórmula de Michaud. Entretanto, essa condição não se aplica a análise simplificada, pois o tempo real de desaceleração do conjunto motobomba, dependente do momento de inércia declarado em catálogo de fabricante, só pode ser avaliado pela simulação numérica através do MOC.

4.4.4 Pressão máxima incidente e fator de utilização

A pressão estática em cada ponto da linha de recalque é calculada pela diferença entre a linha piezométrica em regime permanente e a elevação do terreno naquele ponto, expressa pela Equação 4.23:

$$P_0(x) = (LP(x) - Z(x)) \cdot \rho \cdot g \quad (4.23)$$

Onde

$P_0(x)$ Pressão estática no ponto x da adutora [Pa];

$LP(x)$ Altura piezométrica no ponto x em regime permanente [m];

$Z(x)$ Elevação do terreno no ponto x [m].

A pressão estática varia ao longo do perfil em função da perda de carga acumulada e da topografia do sistema, de maneira que o ponto crítico corresponde à posição em que a diferença $LP(x) - Z(x)$ é máxima. A pressão máxima incidente em cada ponto soma a parcela estática e a sobrepressão transiente, conforme Equação 4.24:

$$P_{m\acute{a}x} = (P_0m\acute{a}x + \Delta H) \cdot \rho \cdot g \quad (4.24)$$

Onde

$P_{m\acute{a}x}$ Pressão máxima incidente no sistema [Pa];

O resultado das equações clássicas para cálculo de sobrepressão fornecem grandezas m.c.a. (metros de coluna de água). Entretanto, para padronização com o Sistema Internacional, será realizada a conversão para Pa, conforme realizado nas Equações 4.23 e 4.24.

A verificação de integridade compara a pressão máxima incidente no ponto crítico à pressão admissível da classe especificada, mostrada na Equação 4.25:

$$FU = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{adm}} \quad (4.25)$$

Onde

FU Fator de utilização [adimensional];

O critério de aceitação adotado é $FU \leq 1$. Entretanto, devido ao caráter conservador da análise, a reprovação nesta etapa não elimina automaticamente o material, devendo ser interpretada conforme a natureza da falha.

Quando $P_{0m\acute{a}x}$ ultrapassa a pressão admissível de regime permanente do material, a alternativa é eliminada. Neste cenário, a coluna hidrostática estável excede o envelope do material na condição de operação, de maneira que nenhum dispositivo de proteção contra golpe de aríete resolveria o problema. Quando $P_{0m\acute{a}x}$ atende ao limite de regime permanente, mas $P_{m\acute{a}x}$ ultrapassa o limite de regime transiente, a alternativa permanece em avaliação, sendo encaminhada para a análise econômica. Portanto, a análise simplificada cumpriu sua função de identificar o sistema como criticamente sensível ao golpe de aríete.

4.5 Seleção de Materiais e Análise Econômica

4.5.1 Especificação técnica das tubulações

Para cada alternativa de material avaliada, a especificação técnica de tubulação é consolidada a partir dos resultados do dimensionamento hidráulico e das verificações de regime transiente. Os parâmetros registrados por alternativa são: diâmetro nominal comercial, schedule ou classe de pressão, espessura de parede e diâmetro interno útil. O fator de utilização (FU) obtido na verificação de pressão é registrado como atributo técnico de cada alternativa.

4.5.2 Custo de implantação (CAPEX)

A análise de CAPEX considera o custo de fornecimento e montagem de tubulação. Os demais componentes do custo de implantação, como equipamentos de bombeamento, obras

civis e serviços de engenharia, são tratados como equivalentes entre as alternativas e, por isso, não serão considerados na análise comparativa. Essa simplificação é consistente com o objetivo da análise, que é identificar o diferencial de custo de implantação atribuível à escolha do material de tubulação.

O custo de tubulação é obtido pelo produto entre um índice de custo unitário, expresso em R\$/m. O índice contempla o fornecimento do tubo e a montagem em campo, sendo específico para cada material, refletindo as diferenças de peso, tipo de junta e mão de obra especializada exigida em cada processo de instalação. Viveiros e Paulino (2024), além de Silva e Diniz (2024), adotam procedimento equivalente, obtendo preços unitários de fornecimento e montagem a partir de base interna de fornecedores com histórico de preços praticados em contratos de instalações eletromecânicas de porte similar. O comprimento da adutora é o mesmo para as três alternativas, visto que o traçado não varia com o material escolhido. O CAPEX de cada alternativa é dado pela Equação 4.26:

$$CAPEX = I_{tub} \cdot L \quad (4.26)$$

Onde

I_{tub} Índice de custo unitário de fornecimento e montagem de tubulação [R\$/m];

L Comprimento da linha de recalque [m].

4.5.3 Custo de operação (OPEX)

4.5.3.1 Energia elétrica

A potência de eixo será definida pelas Equações 4.11 e 4.12. O custo anual de energia é composto pela tarifa de consumo e pela tarifa de demanda, conforme a Equação 4.27.

$$C_{en} = N_m \cdot ((h_{op} \cdot C_e) + (C_d \cdot m_{op})) \quad (4.27)$$

Onde

C_{en} Custo anual de energia elétrica [R\$/ano];

N_m Potência consumida pelo motor [kW];

h_{op} Horas de operação por ano [h/ano];

C_e Tarifa de consumo de energia [R\$/kWh];

C_d Tarifa de demanda contratada [R\$/kW. mês];

m_{op} Meses de operação por ano [meses].

O custo operacional de energia elétrica é calculado para cada alternativa de material. Cada simulação de regime permanente produz uma altura manométrica distinta, em razão das diferentes perdas de carga obtidas no dimensionamento em regime permanente, o que resulta em demandas de potência e consumos energéticos distintos por alternativa. O regime de operação da adutora é contínuo. A classificação tarifária da unidade consumidora segue a estrutura estabelecida pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, com a modalidade definida em função da potência instalada e do regime de operação. Para sistemas de bombeamento industrial em regime contínuo, com potência instalada compatível com fornecimento em alta tensão, é adotada a modalidade tarifária Verde do subgrupo A4 (2,3 a 25 kV), caracterizada por tarifa única de demanda e tarifas de consumo diferenciadas por posto tarifário (ponta e fora de ponta). A tarifa de consumo (C_e) é calculada como a média ponderada anual entre as tarifas de ponta e fora de ponta, conforme a estrutura horária regulada da modalidade Verde: 3 horas em posto de ponta nos dias úteis e fora de ponta no restante do tempo, incluindo sábados, domingos e feriados nacionais. Os valores adotados correspondem às tarifas reguladas pela ANEEL para a CEMIG, sem inclusão de tributos (PIS, COFINS, ICMS). Os valores para cálculo da tarifa de energia estão contemplados na Tabela 4.3 a seguir:

Tabela 4.3 - Cálculo da tarifa de energia elétrica adotada (CEMIG, modalidade Verde A4, sem tributos)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Horas de ponta por dia útil	h_{pd}	3	h/dia
Dias úteis no ano	d_{ut}	252	dias
Horas de ponta por ano	h_{ponta}	756	h/ano
Horas de operação por ano	h_{op}	8.760	h/ano
Horas fora de ponta por ano	h_{fp}	8.004	h/ano
Tarifa de consumo de ponta	C_{ep}	2,28496	R\$/kWh
Tarifa de consumo fora de ponta	C_{efp}	0,45000	R\$/kWh
Tarifa de consumo média ponderada	C_e	0,608360	R\$/kWh
Tarifa de demanda contratada	C_d	22,81	R\$/kW. mês

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.3.2 Custos de manutenção

A ABNT NBR 12215-1 (2017) determina que o estudo de alternativas de material para adutoras deve contemplar o custo de manutenção, de peças de reposição e de sobressalentes como fator de avaliação entre os materiais candidatos. O custo anual de manutenção de tubulação será estimado como um valor percentual sobre o CAPEX de tubulação de cada alternativa, prática corrente em estudos de concepção de sistemas de adução em fase conceitual.

Para tanto, bases internas de histórico de manutenção de instalações similares são a fonte usual para fixação dessas taxas, dado que dados normativos específicos por material não estão disponíveis na literatura técnica de forma consolidada.

Neste trabalho, o custo anual de manutenção de tubulação será fixado em 5% do CAPEX de cada alternativa, simplificação que diferencia os materiais na proporção direta de seus custos de implantação. O custo anual de manutenção é dado pela Equação 4.28:

$$C_{mt} = 0,05 \cdot CAPEX \quad (4.28)$$

Onde

C_{mt} custo anual de manutenção [R\$/ano].

Sobre o subtotal operacional, aplica-se uma contingência de 10% para cobrir despesas operacionais não previstas em orçamento. Os demais itens de custo operacional do sistema, como manutenção de bomba e motor, mão de obra de operação, inspeção de instrumentação e seguro patrimonial, são comuns entre as alternativas e não compõem o escopo deste comparativo, pela mesma razão aplicada aos demais componentes do CAPEX. O OPEX total de cada alternativa é dado pela Equação 4.29:

$$OPEX = (C_{en} + C_{mt}) \cdot 1,10 \quad (4.29)$$

Onde

C_{en} custo anual de energia elétrica [R\$/ano];

C_{mt} custo anual de manutenção de tubulação [R\$/ano].

4.5.4 Custo do Ciclo de Vida (CCV) e Comparativo entre Alternativas

O comparativo entre as alternativas adota o Custo do Ciclo de Vida (CCV) como critério de seleção. Este método consolida, em uma mesma data-base pelo método do valor presente, o investimento inicial e o fluxo de custos operacionais anuais projetados para a vida útil do sistema. Tsutiya (2006) aponta que os custos acumulados de energia e manutenção ao longo da vida útil tendem a superar o capital de aquisição em sistemas de bombeamento de grande porte, o que torna o CCV um dos critérios mais adequados para decisão econômica do que apenas a análise isolada do CAPEX.

O horizonte de análise de 20 anos é o mesmo estabelecido no critério de projeto da seção 4.1. A análise é conduzida em framework real: os custos são expressos em moeda da data-base e a taxa de desconto adotada é a taxa real i , conforme Tsutiya (2006). Quando os custos

nominais são reajustados pela inflação ao longo dos anos, o custo em moeda constante permanece invariante, e o efeito da inflação se cancela algebricamente entre o crescimento nominal do fluxo e a taxa nominal de desconto.

O valor presente do fluxo operacional é calculado pelo Fator de Valor Presente (FVP), resultado analítico da somatória das parcelas anuais descontadas a taxa constante, dado pela Equação 4.30:

$$FVP(i, n) = \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \quad (4.30)$$

Onde

i Taxa de desconto real por ano [-];

n Horizonte de análise [anos].

A taxa de desconto real é selecionada conforme benchmark aplicável e já incorpora a taxa de inflação esperada do período. O CCV de cada alternativa é calculado pela Equação 4.31:

$$CCV = CAPEX + OPEX \cdot FVP(i, n) \quad (4.31)$$

O CAPEX é lançado integralmente no Ano 0. A alternativa de menor CCV é a economicamente mais favorável dentro do conjunto comparado. Alternativas reprovadas no critério $FU \leq 1$ participam do comparativo econômico com o CAPEX e OPEX calculados exclusivamente a partir dos parâmetros de tubulação (Eq. 4.26 a 4.29), sem inclusão do custo do dispositivo de proteção. O CCV obtido nessas condições é interpretado como limite inferior de custo para a alternativa, dado que o dispositivo de proteção elevará o CAPEX e, potencialmente, o OPEX de manutenção, de maneira que a interpretação dos resultados considera essa limitação na recomendação final.

Dado que a taxa de desconto real envolve incerteza na projeção de longo prazo, realiza-se uma análise de sensibilidade variando i de 4% a 12% ao ano, mantendo fixos o horizonte N e os demais parâmetros do OPEX. Os limites da faixa são ancorados em dois referenciais de mercado. O primeiro é o custo de oportunidade soberano de longo prazo, representado pela Nota do Tesouro Nacional série B (NTN-B) com vencimento em 2045, tratando-se de um título público federal indexado ao IPCA, que remunera o investidor pela inflação acrescida de uma taxa real fixada na emissão, da ordem de 7% ao ano, e que expressa o retorno real de uma aplicação de baixo risco com horizonte compatível com o do projeto.

O segundo é o custo médio ponderado de capital (WACC) regulatório de infraestrutura, definido pela ANEEL para a remuneração do capital investido em ativos do setor elétrico, em torno de 8% ao ano em termos reais, adotado como valor central do desconto. A faixa de 4% a 12% envolve esses dois referenciais, e a alternativa de menor CCV deve ser a mesma em toda a faixa para que o resultado seja considerado robusto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de Regime Permanente

A análise do regime permanente reúne, para as três alternativas de material, as grandezas hidráulicas e mecânicas necessárias ao dimensionamento das linhas de recalque e de sucção. Os parâmetros constantes do sistema que serão utilizados para os cálculos subsequentes são apresentados a seguir na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros base para cálculo

Parâmetro base	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão de projeto	$\dot{Q}$	800 (0,22)	m³/h (m³/s)
Comprimento da linha de recalque	L	2366,0	m
Comprimento da linha de sucção	L	10,0	m
Desnível geométrico do recalque	H_0	222,0	m
Desnível reservatório–bocal de sucção	Δz	1,5	m
Massa específica da água (25 °C)	ρ	997	kg/m³
Viscosidade cinemática (25 °C)	ν	$8,93 \times 10^{-7}$	m²/s
Aceleração da gravidade local	g	9,78	m/s²
Pressão atmosférica local	P_{atm}	93,8	kPa
Pressão de vapor (25 °C)	P_v	3,17	kPa
Velocidade de referência	V	2,0	m/s
Rendimento da bomba	η_b	0,75	-
Rendimento do motor	η_m	0,95	-
Somatório K na sucção	$\sum K$	9,98	-

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1 Diâmetros

A definição dos diâmetros utiliza o método das velocidades econômicas, conforme expresso na metodologia. As Equações 4.1 e 4.2 fornecem o diâmetro teórico para a vazão de projeto.

A seleção comercial adota o diâmetro imediatamente superior para linha de recalque. Para a sucção, será escolhido o diâmetro comercial acima do escolhido no recalque, mantendo o material da linha em ambos os trechos. O diâmetro interno do ferro fundido dúctil K7 considera o desconto do revestimento interno de argamassa de cimento centrifugada (4,5 mm), conforme ABNT NBR 7675 (2022). Os diâmetros selecionados e velocidade efetivas são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Diâmetros selecionados e velocidades efetivas

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Diâmetro calculado	D	376,1	376,1	376,1	mm
Designação comercial do recalque	-	16" STD SCH 30	DN 400 K7 JGS	DE 500 SDR 9 PN 20	-
Diâmetro externo do recalque	D_{er}	406,4	429,0	500,0	mm
Espessura de parede do recalque	e_r	9,53	6,3	55,6	mm
Diâmetro interno do recalque	D_{ir}	387,36	407,4	388,8	mm
Velocidade efetiva no recalque	V_r	1,886	1,705	1,872	m/s
Designação comercial da sucção	-	18" STD	DN 450 K7 JGS	DE 560 SDR 9 PN 20	-
Diâmetro interno da sucção	D_{is}	437,96	457,6	435,56	mm
Velocidade efetiva na sucção	V_s	1,475	1,351	1,491	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor

As velocidades efetivas situam-se entre 1,35 e 1,89 m/s, dentro da faixa normativa adotada, conforme Tsutiya (2006) e ABNT NBR 12215-1 (2017).

A espessura de parede de 55,6 mm do PEAD decorre da relação dimensional SDR 9 ($e = D_e/SDR = 500/9$), inerente à classe PN 20, não sendo comparável às espessuras dos tubos metálicos, dimensionadas por resistência da parede.

5.1.2 Rugosidade absoluta de projeto e fator de atrito

O regime de escoamento é caracterizado pelo número de Reynolds (Equação 4.7) e o fator de atrito segue a equação de Colebrook-White (Equação 4.9), resolvida por aproximação iterativa com a ferramenta “Atingir Meta” do Microsoft Excel.

A rugosidade absoluta projetada para 20 anos é obtida pelo modelo parabólico de Abdel-Monim, Ead e Shabayek (Equação 3.2) para o aço carbono (categoria *Steel*) e para o ferro fundido dúctil (categoria CCI), com vida útil de referência $T = 50$ anos. Para o PEAD, é adotado o valor tabelado por Azevedo Netto e Fernández (2015), conforme Tabela 3.3. Todos os materiais escoam em regime turbulento e o fator de atrito reflete a hierarquia de rugosidade. O aço carbono apresenta fator de atrito 63% superior ao ferro fundido dúctil e 109% superior ao PEAD, em consequência da corrosão progressiva sem revestimento permanente em contato com água bruta e da diferença de rugosidade dos materiais. A Tabela 5.3 a seguir exhibe os resultados de rugosidade projetada e fator de atrito para cada material.

Tabela 5.3 – Rugosidade absoluta projetada e fator de atrito

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Rugosidade absoluta do tubo novo	ε_0	0,046	0,020	0,0025	mm
Razão $\varepsilon_t/\varepsilon_0$ (Eq. 3.2, t = 20 anos)	-	28,49	8,44	-	—
Rugosidade absoluta projetada (20 anos)	ε_t	1,311	0,169	0,020	mm
Reynolds no recalque	Re_r	$8,18 \times 10^5$	$7,78 \times 10^5$	$8,15 \times 10^5$	-
Reynolds na sucção	Re_s	$7,24 \times 10^5$	$6,92 \times 10^5$	$7,27 \times 10^5$	-
Rugosidade relativa no recalque	$\frac{\varepsilon_t}{D_{ir}}$	$3,38 \times 10^{-3}$	$4,14 \times 10^{-4}$	$5,14 \times 10^{-5}$	-
Rugosidade relativa na sucção	$\frac{\varepsilon_t}{D_{is}}$	$2,99 \times 10^{-3}$	$3,69 \times 10^{-4}$	$4,59 \times 10^{-5}$	-
Fator de atrito no recalque	f_r	0,0272	0,0167	0,0130	-
Fator de atrito na sucção	f_s	0,0263	0,0165	0,0131	-

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.3 Perda de carga

A perda de carga total combina parcelas contínua e localizada (Equação 4.5). No recalque, a parcela contínua segue a equação de Darcy-Weisbach (Equação 4.6) e a localizada é estimada em 4% da contínua, premissa aplicável a traçados retilíneos. Na sucção, a parcela localizada é calculada pela Equação 4.10 com o somatório de coeficientes da Tabela 4.1 aplicado à velocidade do trecho. A Tabela 5.4 reúne os valores de perda de carga do sistema.

Tabela 5.4 – Perda de carga geral

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Perda contínua no recalque	H_{cr}	30,23	14,45	14,15	m
Perda localizada no recalque	H_{lr}	1,21	0,58	0,57	m
Perda total no recalque	h_{fr}	31,44	15,03	14,72	m
Perda contínua na sucção	H_{cs}	0,07	0,03	0,03	m
Perda localizada na sucção	H_{ls}	1,11	0,93	1,13	m
Perda total na sucção	h_{fs}	1,18	0,96	1,17	m
Perda de carga total do sistema	ΔH	32,61	15,99	15,89	m
Perda por metro no recalque	j_r	0,01329	0,00635	0,00622	m/m

Fonte: Elaborado pelo autor

A perda de carga total do aço carbono é 104% superior à das demais alternativas. A causa é a rugosidade projetada para 20 anos: o aço sem revestimento permanente acumula 1,311 mm, contra 0,169 mm do ferro fundido dúctil revestido. O ferro fundido dúctil e o PEAD

apresentam perda equivalente, com diferença de 0,10 m. O acréscimo de perda no recalque do aço eleva a altura manométrica e, por consequência, a potência de bombeamento e o consumo de energia ao longo do horizonte de projeto.

5.1.4 Altura manométrica

A altura manométrica de bombeamento é obtida pela Equação 4.4, soma do desnível geométrico total e da perda de carga total. Os valores resultantes por alternativa de material são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Altura manométrica

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Desnível geométrico total	ΔZ	223,5	223,5	223,5	m
Perda de carga total	ΔH	32,61	15,99	15,89	m
Altura manométrica	H_{man}	256,11	239,49	239,39	m

Fonte: Elaborado pelo autor

A altura manométrica do A53M Gr. B excede a do ferro fundido dúctil em 16,6 m. Pela Equação 4.11, a potência de eixo cresce em proporção direta à altura manométrica, o que eleva a potência consumida e o custo anual de energia, refletido na análise econômica.

5.1.5 Linhas piezométrica e de carga

As linhas piezométrica e de carga, dadas pelas Equações 4.14 e 4.15, são traçadas ao longo do recalque a partir da saída da bomba. As cargas dinâmicas permanecem inferiores a 0,2 m em todos os pontos, valor desprezível frente à coluna piezométrica, sendo apresentadas na Tabela 5.6.

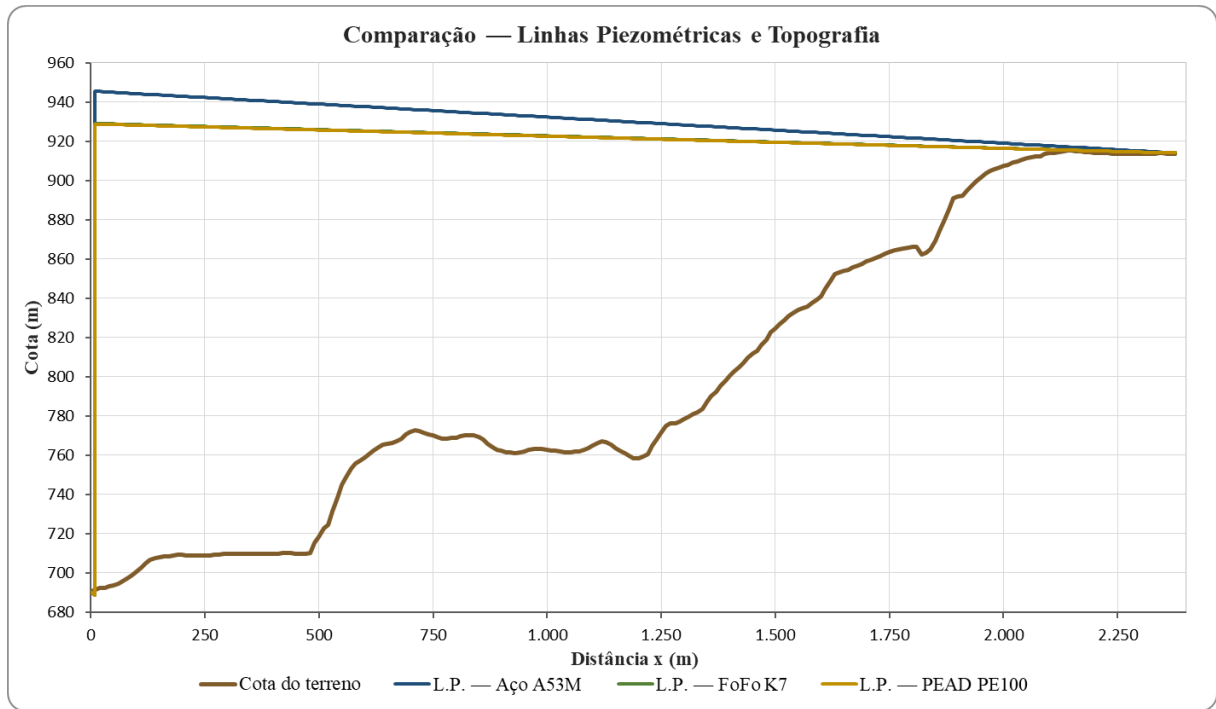
Tabela 5.6 – Cargas dinâmicas

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Carga dinâmica no recalque	H_{er}	0,182	0,149	0,179	m
Carga dinâmica na sucção	H_{es}	0,111	0,093	0,114	m

Fonte: Elaborado pelo autor

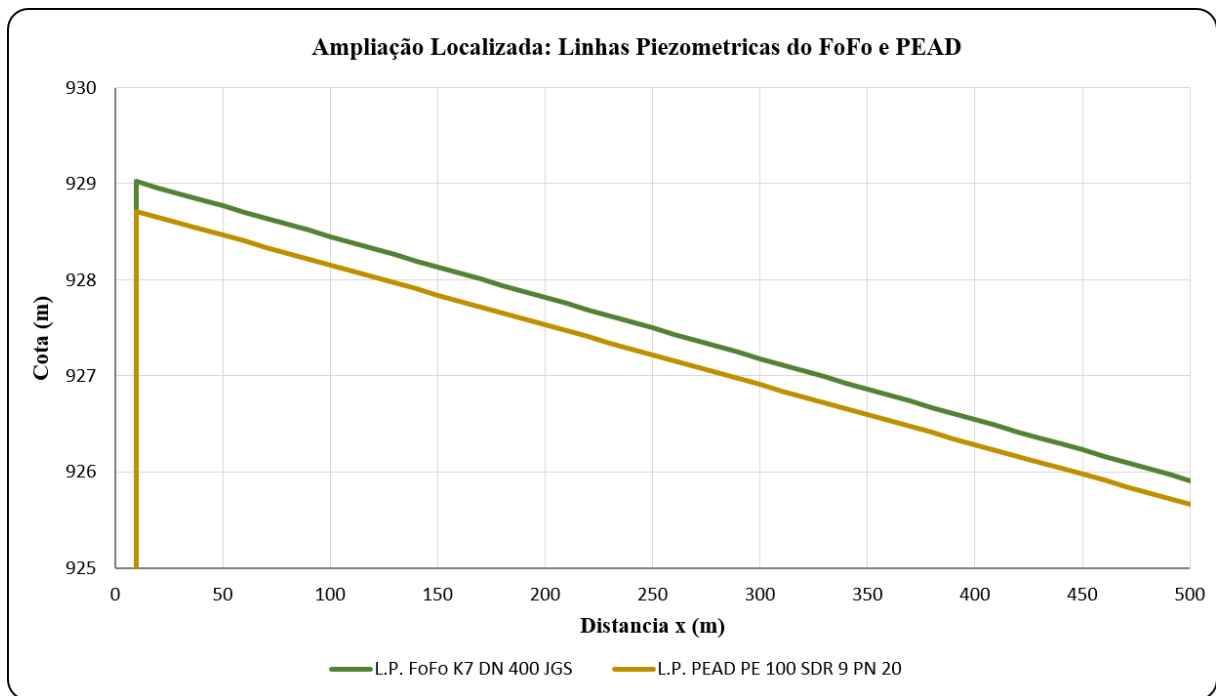
A linha piezométrica do aço carbono apresenta o maior pico de pressão entre as alternativas, em consequência da maior altura manométrica decorrente da rugosidade acumulada, conforme exibido na Figura 5.1. As linhas do ferro fundido dúctil e do PEAD aparecem sobrepostas no gráfico, em razão dos valores praticamente idênticos de H_{man} . A Figura 5.2 faz uma ampliação das linhas piezométricas destes materiais para identificação destas.

Figura 5.1 – Comparativo de linhas piezométricas



Fonte: Elaborado pelo autor

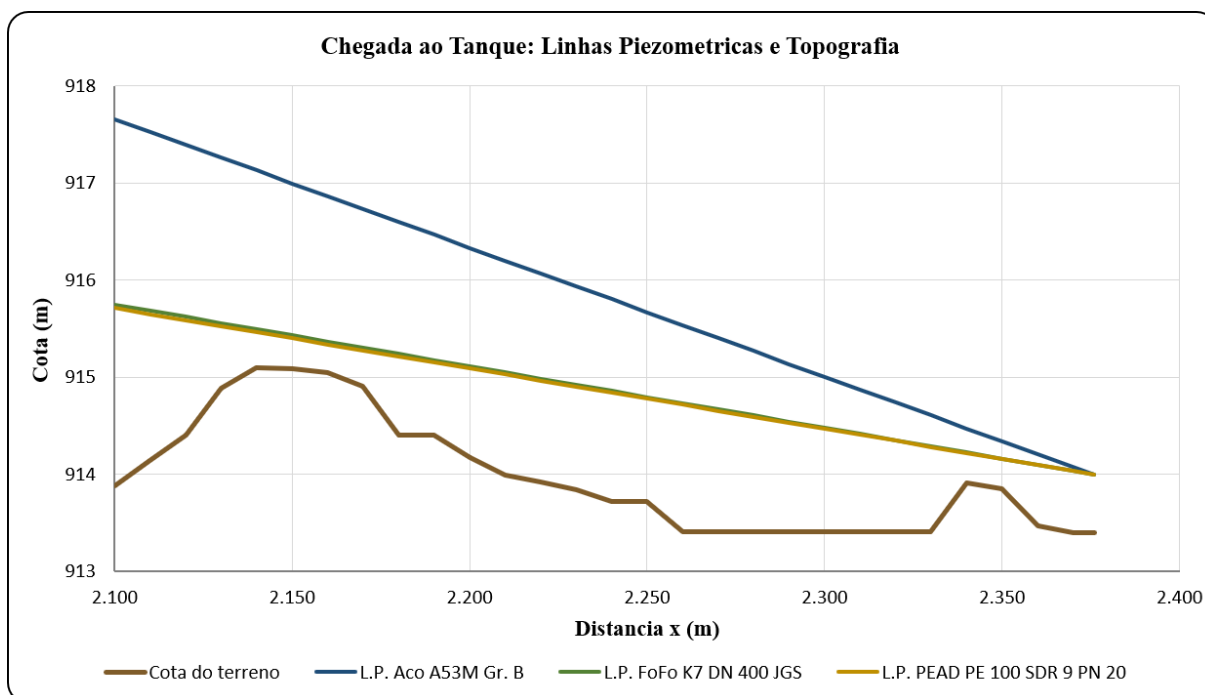
Figura 5.2 – Ampliação localizada entre linhas piezométricas do FoFo e PEAD



Fonte: Elaborado pelo autor

Em nenhuma das três alternativas a linha piezométrica no recalque intercepta o perfil topográfico, descartando o risco de formação de bolsões de ar em regime permanente, podendo ser visualizado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Ampliação localizada entre linhas piezométricas na chegada ao tanque



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.6 Pressão estática e verificação em regime permanente

A pressão estática em cada ponto da linha de recalque é calculada pela Equação 4.23. O ponto crítico corresponde à posição em que $LP(x) - Z(x)$ é máxima, evento que ocorre na saída da bomba.

A pressão admissível de regime permanente segue critério próprio para cada material. Para o aço carbono A53M Gr. B 16" STD, a P_{adm} é obtida pela aplicação direta das Equações 4.16, 4.17 e 4.18, com os parâmetros adotados na metodologia. A espessura mínima de fornecimento, calculada pela Equação 4.18 com tolerância negativa de 12,5% sobre a espessura nominal de 9,53 mm, será $t_m = 8,339$ mm. A espessura disponível para projeto, descontada a tolerância de corrosão de 2,0 mm pela Equação 4.17, resulta em $t = 6,339$ mm.

A aplicação da Equação 4.16 fornece $P_{adm} = 4\,360$ kPa. A condição $t < D/6 = 67,73$ mm da formulação simplificada da ASME B31.3:2024 é atendida.

O ferro fundido dúctil adota a Pressão de Serviço Admissível (PSA) do catálogo Saint-Gobain. O PEAD utiliza a PMO corrigida pela temperatura, conforme Equação 3.3 e Tabela 3.4. A verificação compara o perfil de $P_0(x)$, calculado pela Equação 4.23, com a pressão admissível ao longo de toda a extensão da linha de recalque. A Tabela 5.7 a seguir consolida os parâmetros e o resultado da verificação.

Tabela 5.7 – Verificação de pressão em regime permanente

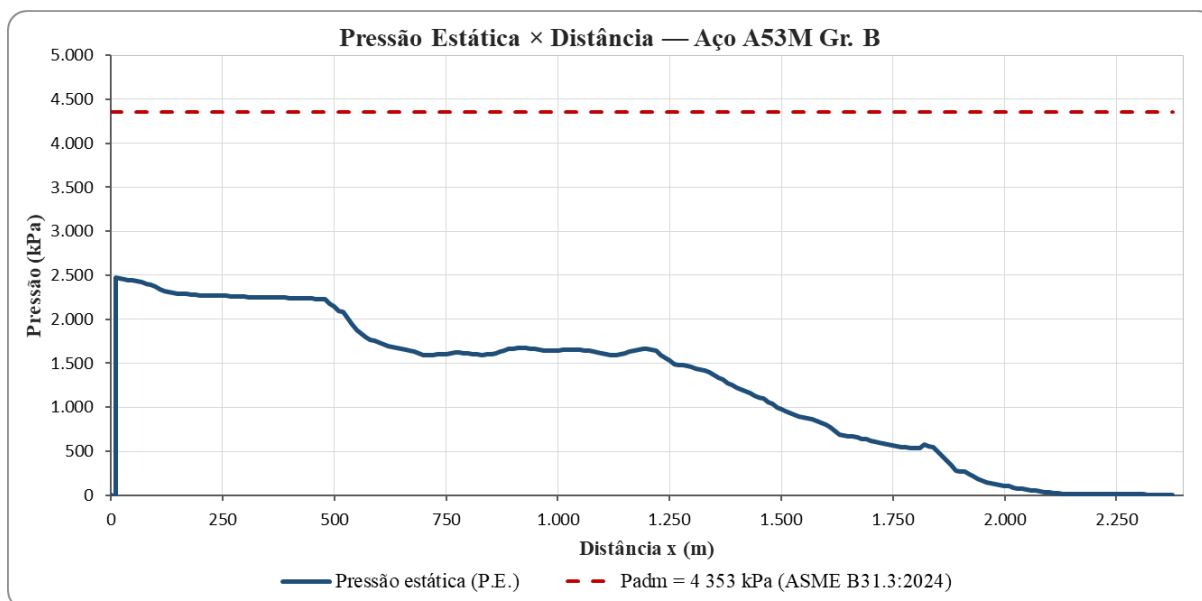
Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	PEAD PE 100 DN 500 PN 20	Unidade
Altura piezométrica no ponto crítico	$LP(0)$	945,4	929,0	928,7	m
Elevação do terreno no ponto crítico	$Z(0)$	692,0	692,0	692,0	m
Pressão estática máxima (saída da bomba)	$P_{0máx}$	253,4 (2.471,2)	237,0 (2.311,2)	236,7 (2.308,2)	m.c.a (kPa)
Pressão admissível em R. P	$P_{adm,p}$	4360	3.000	1.600	kPa
Utilização do limite	-	57%	77%	144%	-
Verificação	-	Atende	Atende	Não Atende	-

Fonte: Elaborado pelo autor

O aço carbono e o ferro fundido dúctil atendem ao critério $P_0(x) \leq P_{adm} RP$ em toda a extensão do recalque, com utilização de 57% para o AC e 77% para o ferro fundido dúctil. O PEAD PE 100 SDR 9 PN 20 opera acima da pressão admissível entre $x = 10$ m e $x \approx 600$ m, trecho equivalente a 25% do comprimento total do recalque. A pressão estática máxima do PEAD atinge 2.308 kPa, 44% superior à PMO a 35 °C. Esse comportamento inviabiliza o PEAD como solução única na linha de recalque sob as premissas de projeto adotadas. Em virtude disto, o PEAD será eliminado como alternativa de material para o estudo de caso.

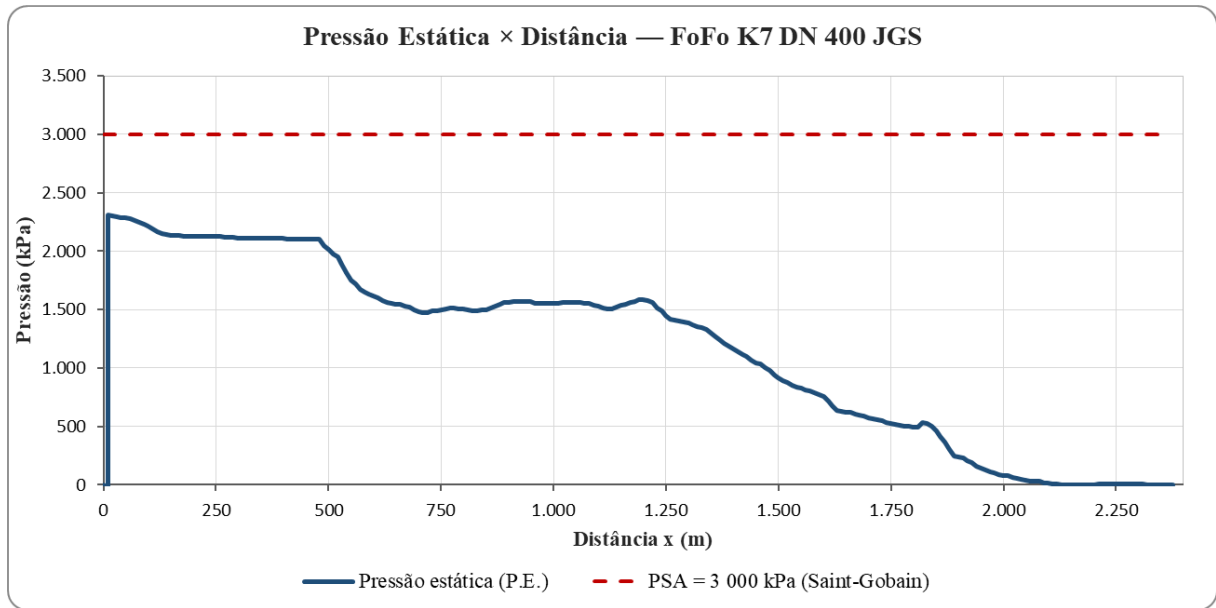
As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam o perfil de $P_0(x)$ ao longo do recalque para cada material, sobreposto à pressão admissível indicada por linha horizontal para cada um dos materiais analisados.

Figura 5.4 – Pressão estática ao longo da adutora / Aço Carbono A53M Gr. B



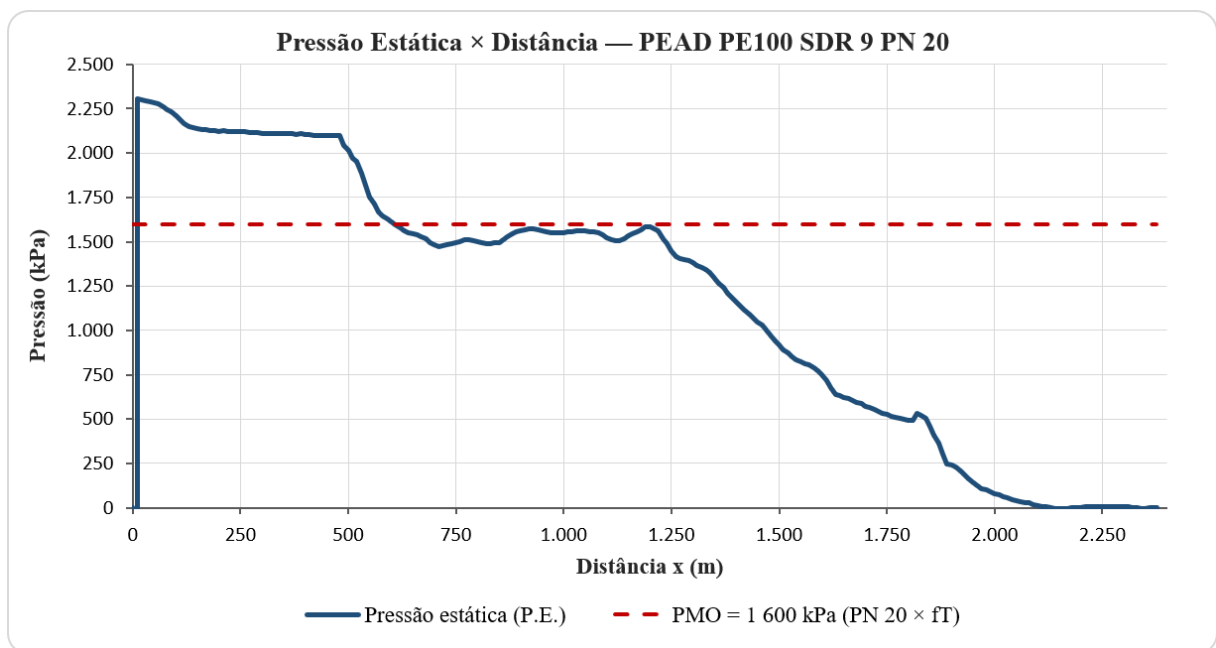
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.5 – Pressão estática ao longo da adutora / FoFo K7 JGS



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.6 – Pressão estática ao longo da adutora / PEAD PE100 PN 20



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir deste ponto, o PEAD deixa de ser avaliado como alternativa de material no estudo, uma vez que não apresenta resistência estrutural compatível com a análise de regime permanente.

5.1.7 Potência de acionamento

A determinação da potência segue três etapas: a potência de eixo (Equação 4.11) com rendimento da bomba, a potência elétrica consumida pelo motor (Equação 4.11a) com

rendimento do motor da classe IE3/NEMA Premium conforme ABNT NBR 17094-1 (2018) e a potência nominal do motor (Equação 4.12) com aplicação do fator de serviço. A Tabela 5.8 exibe os valores de potência para cada material.

Tabela 5.8 – Potência de acionamento / A53M e FoFo

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Potência de eixo	N	739,94	691,92	kW
Potência consumida	N_m	778,88	728,34	kW
Potência nominal do motor	N_{fs}	895,71 (1218)	837,59 (1139)	kW (CV)

Fonte: Elaborado pelo autor

O aço carbono demanda potência nominal 7% superior ao ferro fundido dúctil, que será refletido como acréscimo na demanda elétrica do conjunto motobomba em operação contínua.

5.1.8 Seleção de bomba comercial

A seleção comercial do conjunto motobomba é executada no simulador KSB Easy Select. Os parâmetros de entrada são a vazão de projeto e a altura manométrica de cada alternativa, o fluido (água bruta) e a temperatura de operação. Para cada alternativa aprovada em regime permanente, o simulador retorna o modelo de bomba, a rotação nominal, o diâmetro do rotor, o rendimento no ponto de operação, a potência absorvida pela bomba e o NPSH requerido.

O arranjo adotado contempla quatro bombas em operação, dispostas em dois ramais paralelos com dois conjuntos em série por ramal. Cada bomba opera com metade da vazão do sistema e metade da altura manométrica do trecho, conforme Tabela 5.9 a seguir

Tabela 5.9 – Vazão e H_{man} de projeto por bomba

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Vazão Volumétrica	$\dot{Q}$	400	400	m ³ /h
H_{man}	H_{man}	128,41	120,02	m

Fonte: Elaborado pelo autor

Todas as bombas selecionadas operam com razão Q/Q_{bep} acima de 95%, indicando que estão operando na faixa de maior eficiência operacional. A Tabela 5.10 exibe as informações das bombas selecionadas para cada alternativa de material:

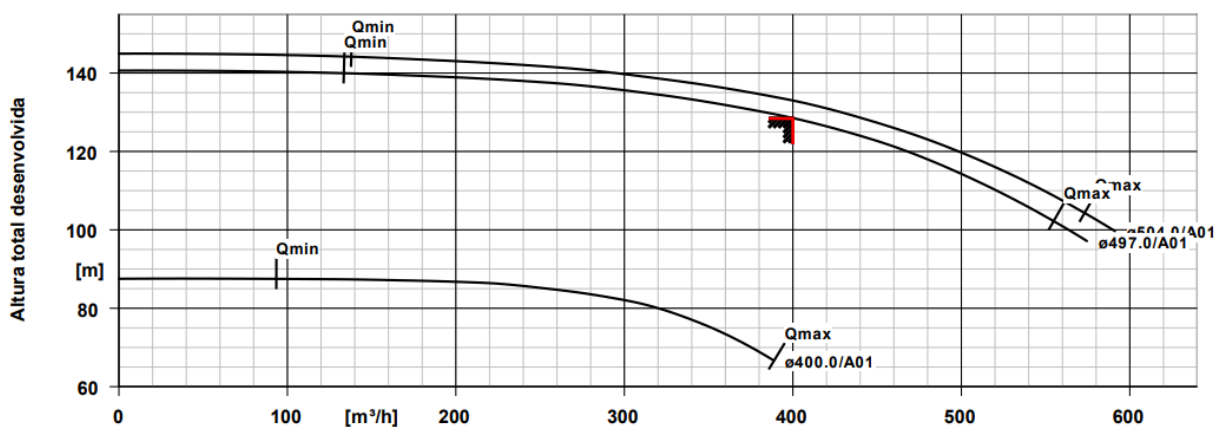
Tabela 5.10 – Resumo de parâmetros de bombas selecionadas

Alternativa	Modelo	Vazão (m ³ /h)	H _{man} (m)	NPSH requerido (m)	Rendimento (%)	Diâmetro do rotor (mm)	Rotação nominal (rpm)
Aço A53M Gr. B 16" STD	METN 200-150-500 GG NP1 22004A	400,00	128,44	3,78	74,9	497,00	1792
FoFo K7 DN 400 JGS	METN200-150-500 GG NP1 18504A	400,00	120,04	3,78	75,3	484,00	1791

Fonte: Elaborado pelo autor

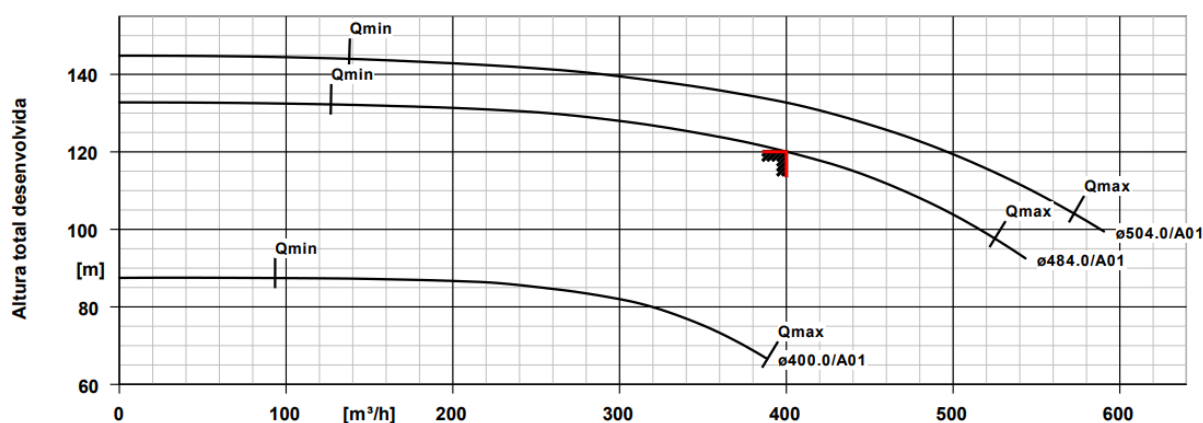
A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam a curva característica da bomba selecionada para cada alternativa, com o ponto de operação destacado.

Figura 5.7 – Curva de desempenho / Bomba Adutora de Aço A53M Gr. B



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.8 – Curva de desempenho / Bomba Adutora de FoFo K7 JGS



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas correspondem aos diâmetros de rotor disponíveis em catálogo. A curva com $\varnothing = 400$ mm representa o menor rotor da família e a curva com $\varnothing = 504$ mm representa o maior, ambas apresentadas para contextualizar a faixa de operação. Para a operação, adotou-se o rotor

cuja curva melhor se ajusta ao ponto de projeto: $\varnothing = 497$ mm para o aço A53M Gr. B e $\varnothing = 484$ mm para o ferro fundido dúctil K7 JGS.

5.1.9 NPSH disponível

A verificação contra cavitação compara o NPSH disponível, dado pela Equação 4.13 com o NPSH requerido informado pelo fabricante da bomba selecionada. Adota-se a pressão de vapor correspondente à temperatura da água na captação. O desnível geométrico é subtraído na equação, dado que o reservatório se situa abaixo do bocal de sucção. Os resultados são apresentados na Tabela 5.11 e indicam que para ambos casos o NPSH disponível é superior ao requerido.

Tabela 5.11 – Verificação NPSH

Grandeza	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Coluna manométrica de Patm	$\frac{P_{atm}}{\rho g}$	9,620	9,620	m
Coluna equivalente de Pv (25 °C)	$\frac{P_v}{\rho g}$	0,325	0,325	m
Desnível reservatório - bocal	Δz	-1,5	-1,5	m
Perda de carga na sucção	h_f	1,18	0,96	m
NPSH disponível	$NPSH_d$	6,62	6,83	m
NPSH requerido	$NPSH_r$	3,78	3,78	m
Verificação $NPSH_d \geq NPSH_r + 1,0$	(-)	4, 78 (Atende)	4, 78 (Atende)	m

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.10 Síntese

O ferro fundido dúctil e o aço carbono atendem aos critérios de pressão admissível em regime permanente e de NPSH disponível. O PEAD PE 100 SDR 9 PN 20 foi eliminado por exceder a PMO em 44% no ponto crítico. As alternativas aprovadas seguem para a verificação em regime transiente e para a análise econômica do ciclo de vida.

5.2 Verificação por Análise Simplificada de Regime Transiente

5.2.1 Celeridade da onda de pressão

A celeridade (α) é calculada pela Equação 4.20, com os parâmetros geométricos e mecânicos adotados para cada material apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Parâmetros de entrada da análise simplificada de transiente

Parâmetro	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Diâmetro interno do recalque	D_{ir}	387,36	416,40	mm
Espessura da parede	e	9,53	6,30	mm
Módulo de elasticidade	E	202	152	GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,30	0,27	-
Velocidade no recalque	V	1,886	1,705	m/s
Condição de junta	-	Soldada de topo	JGS – Expansão	-
Módulo de compressibilidade volumétrica da água	K	2,19	2,19	GPa
Fator de ancoragem	c	$1 - \nu^2 = 0,91$	1	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o ferro fundido dúctil K7 DN 400, com revestimento interno de argamassa de cimento, o diâmetro D adotado é o da parede metálica (416,4 mm), uma vez que a argamassa não é considerada camada estrutural por aderência apenas por contato, comportamento frágil e rigidez circunferencial reduzida frente à do ferro fundido. Para o aço carbono, sem revestimento interno, as definições de diâmetro estrutural e hidráulico coincidem.

A aplicação da Equação 4.20 aos parâmetros da Tabela 5.12 fornece $\alpha = 1\,252,2$ m/s para o aço carbono e $\alpha = 1\,060,7$ m/s para o ferro fundido dúctil. O aço apresenta o valor mais elevado, próximo ao limite teórico de propagação acústica em meio fluido para tubos rígidos. A celeridade do ferro fundido é aproximadamente 15% inferior, pelo módulo de elasticidade menor e pela condição de junta JGS, que reduz a restrição estrutural à deformação radial.

5.2.2 Tempo crítico e classificação de manobra

O tempo crítico T_c é dado pelo intervalo necessário para a onda de pressão percorrer a linha de recalque e retornar ao ponto de origem da perturbação. A aplicação da Equação 4.21, com $L = 2\,366$ m, fornece $T_c = 3,78$ s para o aço carbono e $T_c = 4,46$ s para o ferro fundido dúctil. A sobrepressão máxima é dada pela Equação 4.22, aplicável à condição de manobra rápida.

5.2.3 Sobrepressão de regime transiente

A sobrepressão obtida pela Equação 4.22, com ΔV igual à velocidade de regime permanente, pode ser dada por $\Delta P = 2\,354,5$ kPa para o aço carbono e $\Delta P = 1\,803,1$ kPa para o ferro fundido dúctil. A sobrepressão do aço carbono é maior pela combinação entre celeridade alta e velocidade de escoamento elevada. O ferro fundido dúctil apresenta valor

aproximadamente 23% menor, redução proveniente da celeridade 15% inferior e da velocidade de escoamento 10% menor, esta última associada ao diâmetro hidráulico maior do tubo.

5.2.4 Pressão máxima incidente e fator de utilização

A pressão máxima incidente $P_{m\acute{a}x}$, calculada pela Equação 4.24, é a soma entre a pressão estática máxima $P_{0m\acute{a}x}$ calculada na Seção 5.1 e a sobrepressão transiente ΔP . O fator de utilização FU é calculado pela Equação 4.25 contra a pressão admissível P_{adm} de cada material, conforme critérios estabelecidos anteriormente neste trabalho. A Tabela 5.13 consolida os resultados da verificação.

Tabela 5.13 – Resultados da análise simplificada de transiente

Material	α (m/s)	T_c (s)	ΔH (m.c.a)	ΔP (kPa)	$P_{0m\acute{a}x}$ (kPa)	$P_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$P_{adm.t}$ (kPa)	FU (-)
AC A53M Gr. B	1 252,2	3,78	241,4	2.354,1	2 471,2	4 825,3	4 360	111%
FoFo K7 JGS	1 060,7	4,46	184,9	1.802,8	2 311,2	4 114,0	3 600	114%

Fonte: Elaborado pelo autor

Ambos os materiais metálicos apresentam fator de utilização superior a 100%, com 111% para o aço carbono A53M Gr. B e 114% para o ferro fundido dúctil K7 JGS, e reprovam no critério $FU \leq 1$ sob a hipótese de manobra rápida sem dispositivos de proteção. A reprovação é mais acentuada no ferro fundido dúctil em termos relativos, apesar da sobrepressão absoluta menor, porque a PMS de catálogo é cerca de 17% inferior à P_{adm} calculada para o aço carbono, o que reduz a margem disponível para absorver o golpe.

A equação de Joukowsky com fechamento instantâneo ($t_f \rightarrow 0$) não atua como critério de reprovação, mas como envelope superior da sobrepressão. O fator de utilização acima de 100% é o resultado esperado sob essa hipótese e cumpre três funções: delimita o pior caso sem exigir os dados de inércia do conjunto motobomba, quantifica a sensibilidade do sistema ao transiente e estabelece a manobra controlada ($t_f > T_c$) como requisito de operação. A hipótese superestima a sobrepressão efetiva, pois não incorpora o amortecimento por atrito ao longo da linha nem a desaceleração progressiva do conjunto motobomba.

A reprovação não elimina as alternativas aprovadas em regime permanente. As duas pressões estáticas máximas atendem ao limite de regime permanente com folga de utilização, condição verificada no critério estático, de modo que a reprovação ocorre exclusivamente no pico transiente. Sob manobra controlada ($t_f > T_c$, com $T_c = 3,78$ s para o aço carbono e 4,46 s para o ferro fundido dúctil), a pressão máxima retorna à faixa admissível. A admissibilidade

definitiva depende da sobrepressão real, inferior ao limite de Joukowsky, a ser quantificada pela simulação por MOC e pela especificação de dispositivos de proteção em etapa posterior de projeto.

A análise simplificada de regime transiente cumpre, com esses resultados, a função que lhe cabe na etapa conceitual. O método fornece um diagnóstico conservador e um requisito de operação verificável sem demandar dados consolidados do projeto executivo, e demarca o ponto a partir do qual a simulação por MOC assume a análise, ao quantificar a sobrepressão efetiva e dimensionar os dispositivos de proteção. As duas alternativas metálicas, aprovadas em regime permanente e condicionadas à manobra controlada, seguem para a análise econômica.

5.3 Análise Econômica

A análise econômica consolida os custos de implantação e de operação das duas alternativas aprovadas no critério de pressão admissível em regime permanente, aço carbono A53M Gr. B 16" STD e ferro fundido dúctil K7 DN 400 JGS, pelo método do Custo do Ciclo de Vida (CCV). O PEAD foi eliminado por exceder a PMO corrigida pela temperatura, não compondo este comparativo.

5.3.1 Especificação técnica e massa linear das tubulações

Para a composição do CAPEX, o índice adotado é praticado por quilograma de material. Para o aço carbono A53M Gr. B 16" STD, a massa linear é a nominal tabelada pela ABNT NBR 5590 (2015) para a classe STD, resultando em 93,17 kg/m. Para o ferro fundido dúctil K7 DN 400 JGS, a massa linear é dada pelo catálogo Saint Gobain Linha Industrial. Para o tubo K7 DN 400 JGS, a massa linear é do valor de 77,9 kg/m.

A massa linear do FoFo K7 DN 400 é 20% inferior à do AC 16" STD, em razão da menor espessura de parede da tubulação metálica, mesmo com o acréscimo da camada de argamassa.

5.3.2 Custo de implantação (CAPEX)

O CAPEX considera o custo de fornecimento e montagem da tubulação do recalque, conforme Equação 4.26. O índice de fornecimento é praticado por quilograma de material e o índice de montagem por metro linear instalado. Ambos os valores foram obtidos de base interna de fornecedores para a configuração aérea de tubulação.

O custo de fornecimento por metro é o produto entre a massa linear da tubulação e o preço unitário do respectivo material. Somado ao índice de montagem, resulta no índice unitário

total I_{tub} , que multiplicado pelo comprimento da linha de recalque (2.366 m) fornece o CAPEX de cada alternativa. A Tabela 5.14 apresenta os valores por alternativa:

Tabela 5.14 – Custo de implantação (CAPEX) por alternativa

Componente	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Preço unitário de fornecimento	I_f	23,15	11,85	R\$/kg
Preço unitário de montagem	I_m	9.350,00	6.100,00	R\$/m
Custo de fornecimento por metro	—	2.156,89	923,12	R\$/m
Índice unitário total	I_t	11.506,89	7.023,12	R\$/m
CAPEX	CAPEX	27.225.291,00	16.616.690,00	R\$

Fonte: Elaborado pelo autor

O CAPEX do aço carbono é 64% superior ao do ferro fundido dúctil. A diferença decorre tanto do preço unitário de fornecimento por quilograma, 95% maior para o aço, quanto do índice de montagem, 53% maior, sendo justificado pela exigência de soldagem topo a topo.

5.3.3 Custo anual de energia elétrica

O custo anual de energia é dado conforme Equação 4.27. As tarifas adotadas correspondem à modalidade Verde do subgrupo A4 (2,3 a 25 kV) da CEMIG, sem incidência de tributos, conforme estabelecido na metodologia. A operação contínua do sistema implica 8.760 horas de operação por ano em 12 meses de demanda contratada. Desta forma, aplica-se a Equação 4.27 com os parâmetros da Tabela 5.15 para encontrar o custo anual de energia.

Tabela 5.15 – Parâmetros e custo anual de energia elétrica

Componente	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Potência absorvida	N_m	778,88	728,34	kW
Potência nominal corrigida pelo FS	N_{fs}	896	838	kW
Horas de operação	hop	8.760	8.760	h/ano
Meses de operação	mop	12	12	meses
Tarifa de consumo	C_e	0,608360	0,608360	R\$/kWh
Tarifa de demanda contratada	C_d	22,81	22,81	R\$/kW.mês
Parcela de consumo ($N_m \cdot hop \cdot C_e$)	-	4.150.835	3.881.465	R\$/ano
Parcela de demanda ($N_m \cdot C_d \cdot mop$)	-	213.195	199.360	R\$/ano
Custo anual de energia	C_{en}	4.364.031	4.080.825	R\$/ano

Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença entre as alternativas é estabelecida pela altura manométrica do sistema, calculada na Seção 5.1, que determina a potência de acionamento de cada conjunto motobomba.

O ferro fundido dúctil apresenta menor consumo de energia em consequência direta da menor altura manométrica do sistema. A diferença de 50,55 kW entre as potências mecânicas de eixo reduz tanto a parcela de consumo quanto a parcela de demanda contratada em favor do ferro fundido dúctil, resultando em um custo anual de energia 6,5% inferior ao do aço carbono.

5.3.4 Custo anual de manutenção e OPEX

O custo anual de manutenção da tubulação corresponde a 5% do CAPEX de cada alternativa, conforme premissa adotada. A diferenciação entre os materiais ocorre na proporção direta dos respectivos CAPEX. Adicionalmente, sobre a soma do custo anual de energia e do custo anual de manutenção é aplicado a contingência operacional de 10%, conforme Equação 4.29, totalizando o OPEX de cada alternativa. A Tabela 5.16 consolida os valores calculados:

Tabela 5.16 – OPEX total por alternativa

Componente	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Unidade
Custo anual de energia	C_{en}	4.364.031	4.080.825	R\$/ano
Custo anual de manutenção	C_{mt}	1.361.265	830.835	R\$/ano
Contingência operacional	—	10 %	10 %	-
OPEX anual total	OPEX	6.297.825	5.402.825	R\$/ano
Variação (AC/FoFo)	-	16,5%	0%	-

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.5 Custo do Ciclo de Vida (CCV) e comparativo entre alternativas

O CCV consolida o CAPEX, lançado integralmente no Ano 0, com o valor presente do fluxo de OPEX anual ao longo do horizonte de 20 anos, conforme Equação 4.31.

A análise é conduzida com OPEX expresso em moeda da data-base e taxa de desconto real $i = 8\%$ a.a., determinada pelo método de construção por componentes: taxa livre de risco de 7% a.a. (yield NTN-B 2045, maio/2026) acrescida de prêmio de risco de infraestrutura de 1 p.p. (diferença entre o WACC regulatório ANEEL 2026 para transmissão e geração e o mesmo benchmark soberano).

O valor presente é obtido pela aplicação do Fator de Valor Presente (FVP) calculado pela Equação 4.30. A Tabela 5.17 apresenta o comparativo:

Tabela 5.17 – Custo do Ciclo de Vida (CCV) e comparativo entre alternativas

Componente	Símbolo	Aço A53M Gr. B 16" STD	FoFo K7 DN 400 JGS	Variação AC/FoFo	Unidade
CAPEX	CAPEX	27.225.291	16.616.690	64%	R\$
OPEX	OPEX	6.297.825	5.402.825	17%	R\$/ano
Fator de Valor Presente	FVP	9,82	9,82	-	-
Valor presente do OPEX	—	61.832.971	53.045.735	17%	R\$
CCV	CCV	89.058.262	69.662.425	28%	R\$

Fonte: Elaborado pelo autor

O aço carbono apresenta CCV 28% superior ao do ferro fundido dúctil, configurando vantagem nominal econômica de R\$ 19,4 milhões para o segundo material.

5.3.6 Análise de sensibilidade da taxa de desconto

O resultado do comparativo de CCV depende da taxa de desconto adotada, uma vez que esta determina o peso relativo do OPEX em valor presente frente ao CAPEX no Ano 0. Para verificar a robustez da decisão, a taxa i é variada de 4% a 12% ao ano, conforme descrito na metodologia. A Tabela 5.18 verifica a sensibilidade do CCV à taxa de desconto.

Tabela 5.18 – Sensibilidade do CCV à taxa de desconto

i (% a.a.)	FVP	CCV AC A53M (R\$)	CCV FoFo K7 (R\$)	Diferença
4%	13,59	R\$ 112.814.784	R\$ 90.042.849	25%
6%	11,47	R\$ 99.460.844	R\$ 78.586.671	27%
8%	9,82	R\$ 89.058.262	R\$ 69.662.425	28%
10%	8,51	R\$ 80.842.223	R\$ 62.613.988	29%
12%	7,47	R\$ 74.266.537	R\$ 56.972.789	30%

Fonte: Elaborado pelo autor

O ferro fundido dúctil apresenta o menor CCV em toda a faixa de testes. A decisão econômica se mostra insensível à escolha da taxa de desconto.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o sistema de adução existente sob três frentes sequenciais: dimensionamento hidráulico em regime permanente, avaliação de transientes hidráulicos e análise econômica pelo Custo do Ciclo de Vida. Os resultados permitem hierarquizar as alternativas de material com base em critérios técnicos e econômicos objetivos.

O regime permanente eliminou o PEAD PE 100 SDR 9 PN 20 na primeira etapa da verificação. A instalação aérea da linha de recalque, combinada com a temperatura de projeto de 35°C, impõe fator de redução $f_T = 0,80$ sobre a pressão nominal do tubo, reduzindo a pressão máxima de operação de 20 bar para 16 bar (1.600 kPa). A pressão estática máxima calculada para o PEAD atingiu 2.308 kPa no ponto imediatamente à saída da bomba, 44% acima do limite admissível. O material, portanto, não apresenta viabilidade técnica como solução única na linha de recalque nas condições de projeto adotadas, de forma que sua aplicação ficaria restrita a trechos de menor pressão em solução mista, opção que ultrapassa o escopo deste estudo de caso. O aço carbono ASTM A53M Gr. B e o ferro fundido dúctil K7 JGS atenderam ao critério de pressão admissível em toda a extensão da adutora, com margens de solicitação de 57% e 77%, respectivamente, e alturas manométricas de 256,12 m e 239,49 m.

A avaliação de transiente, conduzida pela equação de Joukowsky com fechamento instantâneo ($t_f \rightarrow 0$), fornece o limite superior da sobrepressão. Sob essa hipótese, os dois materiais metálicos reprovam no critério $FU \leq 1$, com fator de utilização de 111% para o aço carbono e 114% para o ferro fundido dúctil. O resultado não elimina as alternativas aprovadas em regime permanente, por três razões. O fechamento instantâneo representa o pior caso e superestima a sobrepressão efetiva, pois não incorpora o amortecimento por atrito ao longo da linha nem a desaceleração progressiva do conjunto motobomba. A reprovação restringe-se ao pico transiente, visto que as duas pressões estáticas máximas atendem ao regime permanente com folga de utilização. A manobra controlada, com tempo de fechamento superior ao tempo crítico ($T_c = 3,78$ s para o aço carbono e 4,46 s para o ferro fundido dúctil), recoloca a pressão máxima dentro da faixa admissível. A admissibilidade definitiva fica condicionada à simulação pelo Método das Características (MOC) e à especificação dos dispositivos de proteção, em etapa posterior de projeto.

A análise econômica pelo Custo do Ciclo de Vida demonstrou vantagem consistente do ferro fundido dúctil K7 JGS em todas as componentes avaliadas. O CAPEX do ferro fundido dúctil somou R\$ 16,6 milhões, frente a R\$ 27,2 milhões do aço carbono, diferença de R\$ 10,6

milhões decorrente do menor custo de fornecimento por quilograma e da menor potência de bombeamento requerida. O OPEX anual do ferro fundido dúctil foi de R\$ 5,40 milhões, contra R\$ 6,30 milhões do aço carbono (16,6% superior), reflexo da menor altura manométrica e da consequente redução na demanda elétrica contratada. O Custo do Ciclo de Vida de 20 anos, trazido a valor presente com taxa de desconto de 8% a.a., foi de R\$ 69,7 milhões para o ferro fundido dúctil e de R\$ 89,1 milhões para o aço carbono, diferença de R\$ 19,4 milhões. A análise de sensibilidade confirmou a superioridade do ferro fundido dúctil para taxas de desconto entre 4% e 12% ao ano, com diferença no CCV variando de R\$ 17,3 a R\$ 22,8 milhões, de forma que a decisão se mantém para todas as taxas de desconto da faixa testada.

O ferro fundido dúctil K7 JGS é a alternativa recomendada para a adutora existente. Reúne menor perda de carga, menor demanda de potência instalada, menor custo total ao longo do ciclo de vida e resistência à corrosão intrínseca pelo revestimento interno de argamassa de cimento, atributo particularmente relevante dado o potencial corrosivo da água bruta de barragem de rejeitos. A condição de elevado desnível da adutora, que motivou a eliminação do PEAD, não impõe restrições ao ferro fundido dúctil com junta JGS, cujas tolerâncias de deflexão por ponta e bolsa acomodam as variações de alinhamento de instalações aéreas sem solicitações adicionais na junta. O dimensionamento definitivo do sistema deve incluir análise detalhada do transiente para fixação dos tempos de manobra, a especificação dos dispositivos de proteção transitória e a verificação da linha piezométrica sob condições de sub e sobrepressão ao longo de toda a extensão do recalque.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, identificam-se as seguintes frentes de continuidade:

a) verificação definitiva do regime transiente por simulação numérica pelo Método das Características (MOC) em software dedicado, incorporando o tempo real de fechamento da válvula, a inércia do conjunto motobomba e o amortecimento por atrito ao longo da adutora, com o dimensionamento dos dispositivos de proteção (tanques de amortecimento unidirecional, chaminés de equilíbrio, reservatórios hidropneumáticos e válvulas de alívio), de modo a substituir a estimativa conservadora de Joukowsky pela sobrepressão efetiva e validar a admissibilidade das alternativas metálicas.

b) análise de flexibilidade da tubulação aérea, verificando as tensões decorrentes da expansão térmica na temperatura de serviço, o espaçamento dos suportes e os esforços sobre ancoragens e juntas, segundo os critérios de tensão admissível aplicáveis.

c) solução com materiais combinados, prevista pela ABNT NBR 12215-1:2017, associando o PEAD aos trechos de menor pressão e os materiais metálicos aos trechos em que a pressão excede o limite admissível do polímero corrigido pela temperatura de projeto, com dimensionamento individualizado por trecho, definição do ponto de transição, elementos de interface conforme ABNT NBR 15593:2008, blocos de ancoragem e comparação de custo do ciclo de vida frente às alternativas de material único.

d) análise transiente do cenário combinado, que envolve fenômenos ausentes em sistemas de material único: a interface entre materiais de celeridades distintas (da ordem de 1.000 m/s no aço e de 250 a 400 m/s no PEAD) constitui descontinuidade acústica com reflexão e transmissão parciais das ondas, sendo que o comportamento viscoelástico do PEAD introduz amortecimento não captado por modelos elásticos lineares (Tassinari, 2017). O trecho em PEAD, sujeito a subpressões que podem atingir a pressão de vapor, demanda a verificação da separação de coluna líquida e o dimensionamento dos dispositivos de proteção correspondentes (Tsutiya, 2006).

e) levantamento da curva do sistema ($H_{man} \times Q$) e da curva de NPSH disponível ao longo da faixa de operação, com avaliação do efeito da variação da vazão sobre a altura manométrica, a potência de bombeamento e a margem de cavitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-MONIM, Y. K.; EAD, S. A.; SHABAYEK, S. A. *Effect of time on pipe roughness*. In: CANADIAN HYDROTECHNICAL CONFERENCE, 17., 2005, Edmonton. Anais [...]. Edmonton: Canadian Society for Civil Engineering, 2005. p. 1-10.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Usos da água. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua>. Acesso em: 08 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A53/A53M-22: standard specification for pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless*. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME B31.3: process piping*. New York: ASME, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12211: *estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água: procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15593: *sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — requisitos para conexões soldáveis de polietileno PE 80 e PE 100*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5590: *tubos de aço-carbono com requisitos de qualidade para condução de fluidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12215-1: *projeto de adutora de água — Parte 1: conduto forçado*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15561: *sistemas de tubulações plásticas para sistemas de suprimento de água sob pressão — polietileno (PE)*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17094-1: *máquinas elétricas girantes — Parte 1: motores de indução trifásicos — requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12214: *projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água — requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7675: *tubos e conexões de ferro fundido dúctil para sistemas de adução e distribuição de água — requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. *Manual de boas práticas*. São Paulo: ABPE, 2013.

AZEVEDO NETTO, J. M. de; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. *Manual de hidráulica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CARVALHO, Djalma Francisco. *Instalações elevatórias: bombas*. 6. ed. Belo Horizonte: FUMARC/PUC-MG, 1999.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). Valores e tarifas: tarifas vigentes. Belo Horizonte: CEMIG, 2026. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/valores-e-tarifas/tarifas-vigentes/>. Acesso em: 24 abril 2026.

CHAUDHRY, M. H. *Applied hydraulic transients*. 3. ed. New York: Springer, 2014.

CLAUDINO, Cinthia Maria de Abreu; DINIZ, Maria Ingridy Lacerda; SILVA, Andresa de Oliveira; SENA, Thiago de Sá. *Sistema de adutoras: uma abordagem quanto à classificação e os aspectos de projeto*. 2020. Trabalho acadêmico — Universidade Federal da Paraíba / Universidade Federal de Campina Grande, João Pessoa, 2020.

GONÇALVES, J. M.; FERREIRA, A. G. *Utilização de recursos hídricos na mineração*. 2025. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4179: *ductile iron pipes and fittings for pressure and non-pressure pipelines: cement mortar lining*. 4. ed. Geneva: ISO, 2024.

KELLNER, Erich. *Introdução aos sistemas de saneamento*. São Carlos: UFSCar, 2014.

LAMONT, P. A. *Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness*. Journal AWWA, Denver, v. 73, n. 5, p. 274-280, maio 1981.

MEIRELES FARIA, Í.; KELLNER, E. *Desenvolvimento de modelo computacional para simulação de transiente hidráulico em linhas de recalque*. Revista DAE, v. 69, n. 233, p. 27-36, nov. 2021.

PINTO, M. M.; OLINQUEVITCH, J. L.; THEODORO, A. J.; MOROZINI, J. F.; GUTH, S. C.; FASSINA, P. H. *Análise de viabilidade econômica de projetos de investimento: métodos utilizados em empresas fabricantes de balas do Estado do Rio Grande do Sul*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 13., 2006, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Custos, 2006.

PRITCHARD, Philip J. *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics*. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

SANTOS, R. A. C.; OLIVEIRA, J. L. A.; RESENDE, F. A. E. *Montagem e manutenção de tubulações de PEAD com grandes diâmetros*. Revista Hydro, São Paulo, ano XII, n. 131, set. 2017.

SILVA, M. O.; DINIZ, A. B. N. *Análise comparativa da resposta ao transitório hidráulico em tubulação de aço carbono e PEAD*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

SILVA TELLES, Pedro Carlos. *Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

SOARES, A. K. *Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório*. 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva. *Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção*. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

TSUTIYA, M. *Abastecimento de água*. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VIVEIROS, R. T.; PAULINO, T. F. *Análise de alternativa conceitual: utilização de FoFo ou PRFV para transporte de água em dutos enterrados*. 2024. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

WANG, Yifeng; SUN, Ken; LI, Li; LEI, Yalin; WU, Sanmang; WANG, Fang; LUO, Jingyi. *The optimal allocation and the evaluation of water resources carrying capacity in Shendong mining area*. Resources Policy, v. 77, p. 102738, 2022.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. *Fluid transients in systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.