



ADOLPHO DA FONSECA MAIA

RAFAELA LARES CAMPAGNANI

**DIÂMETROS ÓTIMOS EM UMA ADUTORA DE
ÁGUA: COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS
BASEADAS NO PESO DAS TUBULAÇÕES E VARIAÇÃO
LINEAR DOS CUSTOS**

LAVRAS – MG

2022

ADOLPHO DA FONSECA MAIA
RAFAELA LARES CAMPAGNANI

**DIÂMETROS ÓTIMOS EM UMA ADUTORA DE ÁGUA:
COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS BASEADAS NO
PESO DAS TUBULAÇÕES E VARIAÇÃO LINEAR DOS CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Civil, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista

Orientador

LAVRAS – MG

2022

ADOLPHO DA FONSECA MAIA

RAFAELA LARES CAMPAGNANI

**DIÂMETROS ÓTIMOS EM UMA ADUTORA DE ÁGUA:
COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS BASEADAS NO PESO DAS
TUBULAÇÕES E VARIAÇÃO LINEAR DOS CUSTOS**

**OPTIMUM DIAMETERS IN A WATER PIPELINE: COMPARISON
BETWEEN METHODOLOGIES BASED ON THE WEIGHT OF PIPES AND
LINEAR VARIATION OF COSTS**

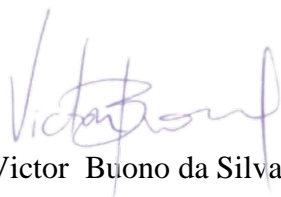
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Civil, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 20 de maio de 2022.

Dr^a. Gabriela Rezende de Souza – UFLA

Dr. Felipe Schwerz – UFLA

Dr. Victor Buono da Silva Baptista – UFLA



Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista

Orientador

LAVRAS – MG

2022

*À Deus e as nossas famílias por
terem apoiado essa loucura de
fazermos uma segunda enge-
nharia na mesma Federal.
Obrigado por confiarem.
Dedicamos*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por sempre iluminar nossos caminhos e pela vida maravilhosa que nos deu, aos nossos familiares, por toda a força, amor e conselhos sempre sábios na hora certa, por toda ajuda e apoio nas nossas vidas.

Um muito obrigado pelos ótimos momentos e lembranças a todos nossos amigos que de alguma maneira fizeram que esse momento se tornasse possível.

Ao nosso professor orientador, Victor Buono da Silva Baptista, por nos auxiliar durante todo esse processo envolvendo o trabalho de conclusão de curso, e a todos os professores da engenharia que se dispuseram a ajudar, responder todas as dúvidas e questionamentos pertinentes ao trabalho.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite para avaliar a apresentação deste estudo.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade de estudar e assim realizar a graduação em Engenharia Civil, sendo de grande valia para a nossa formação pessoal e profissional.

A TODOS O NOSSO MUITO OBRIGADO!

“Eu quase nada sei. Mas desconfio de muita coisa”

João Guilherme Rosa

Grande Sertões Veredas

RESUMO

Este estudo se refere ao dimensionamento econômico de uma adutora com o propósito de melhorar o desempenho do sistema hídrico na cidade de Posses localizada no município de Leme do Prado – Minas Gerais. A utilização dos sistemas hídricos é relevante para a manutenção da vida, sobretudo levando em consideração a essencialidade da água como recurso essencial. O fornecimento de água segue padrões e por isso é necessário considerar os custos que envolvem o dimensionamento adutor em razão do diâmetro, comprimento da tubulação, pressão, motor, dentre outros componentes inerentes a este tipo de sistema. As variações existentes nos aspectos mencionados tendem a influenciar o dimensionamento econômico das adutoras, ademais, este é um procedimento importante para garantir o melhoramento do sistema de distribuição, abastecimento e utilização do recurso hídrico. O dimensionamento adutor conta com elementos técnicos e econômicos para que a construção seja apropriadamente executada. Deste modo, o estudo justifica-se mediante a importância social e acadêmica que as tratativas apresentam, assim, é possível colaborar com a disseminação de conhecimento técnico e científico sobre a temática acerca do sistema adutor projetado para assegurar a viabilidade de seu dimensionamento econômico. O propósito central do estudo diz respeito a comparar o emprego de distintas metodologias de dimensionamento econômico adutor considerando o sistema adutor por recalque (água bruta) de um projeto existente e para a obtenção desse objetivo, foi preciso efetuar o dimensionamento econômico da adutora por meio da Fórmula de Bresse, levantar um comparativo entre este dimensionamento com o método baseado no peso das tubulações e o método da variação linear dos custos das tubulações, além de expor os resultados obtidos durante a etapa de dimensionamento econômico a fim de validar se o projeto foi corretamente dimensionado tendo em vista o aspecto econômico. Dado o objetivo geral, a construção deste estudo considerou a aplicação das seguintes metodologias: Fórmula de Bresse, Método baseado no Peso das Tubulações e Método da Variação Linear dos Custos das Tubulações considerando os parâmetros que podem influenciar a escolha do diâmetro econômico, assim, foi realizada a análise comparativa do sistema adutor para a descoberta dos resultados relacionados à aplicação dos três métodos selecionados para a verificação da escolha econômica do projeto estudado. Os resultados mostraram que para a tubulação de PVC-PBA o diâmetro que melhor se adequou ao projeto da adutora para a cidade de Posses, é o de 100 mm. Já para o conduto de ferro fundido PN-16, o diâmetro ótimo seria o de 75 mm. Porém, ao analisarmos a disponibilidade comercial de tal conduto, devido à classe de pressão do material, o mesmo não foi encontrado. Deste modo, considera-se para ambas as tubulações o diâmetro comercial DN100. Conclui-se que o projeto apresenta a escolha mais econômica visando suas particularidades ao utilizar os diâmetros de 100 mm para ambos os materiais (ferro fundido ou PVC).

Palavras-chave: Adução. Água. Economia. Método. Sistema.

ABSTRACT

This study refers to the economic sizing of a water main with the purpose of improving the performance of the water system in the city of Posses located in the municipality of Leme do Prado - Minas Gerais. The use of water systems is relevant for the maintenance of life, especially considering the essentiality of water as an essential resource. The water supply follows standards and therefore it is necessary to consider the costs involved in the sizing of the adductor in terms of diameter, pipe length, pressure, motor, among other components inherent to this type of system. The existing variations in the mentioned aspects tend to influence the economic dimensioning of the water mains, moreover, this is an important procedure to guarantee the improvement of the distribution system, supply and use of the water resource. The adductor sizing has technical and economic elements so that the construction is properly executed. In this way, the study is justified by the social and academic importance that the negotiations present, thus, it is possible to collaborate with the dissemination of technical and scientific knowledge on the subject of the pipeline system designed to ensure the viability of its economic dimension. The main purpose of the study concerns to compare the use of different methodologies of economic pipeline dimensioning considering the pipeline system by discharge (raw water) of an existing project and to obtain this objective, it was necessary to carry out the economic dimensioning of the pipeline through the Bresse's formula, to compare this design with the method based on the weight of the pipes and the method of linear variation of pipe costs, in addition to exposing the results obtained during the economic design stage in order to validate if the project was correctly dimensioned in view of the economic aspect. Given the general objective, the construction of this study considered the application of the following methodologies: Bresse's Formula, Method based on the Weight of Pipes and Method of Linear Variation of Pipe Costs considering the parameters that can influence the choice of the economic diameter, thus, it was a comparative analysis of the pipeline system was carried out to discover the results related to the application of the three selected methods to verify the economic choice of the project studied. The results showed that for the PVC-PBA pipe, the diameter that best suited the water main project for the city of Posses is 100 mm. As for the PN-16 cast iron conduit, the optimal diameter would be 75 mm. However, when analyzing the commercial availability of such a conduit, due to the pressure class of the material, it was not found. Thus, the commercial diameter DN100 is considered for both pipes. It is concluded that the project presents the most economical choice in view of its particularities when using 100 mm diameters for both materials (cast iron or PVC).

Keywords: Adduction. Water. Economy. Method. System.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 O saneamento básico e o abastecimento hídrico	12
2.2 Linhas adutoras	13
2.3 Tubulações	14
2.3.1 PVC – Poly Vinyl Chloride	15
2.3.2 Ferro fundido	15
2.4 Métodos de dimensionamento de adutora	16
2.4.1 Fórmula de Bresse	17
2.4.2 Método baseado no peso das tubulações	19
2.4.3 Método da variação linear dos custos das tubulações	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Sistema Adutor em estudo	28
3.2 Metodologias do dimensionamento econômico realizado	34
3.3 Método de Bresse	34
3.4 Cálculos das perdas de carga no sistema	36
3.5 Cálculos para o projeto	38
3.6 Cálculo do novo diâmetro – Método baseado no peso das tubulações	44
3.7 Cálculo do novo diâmetro – Método baseado na variação linear dos custos das tubulações	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O uso dos sistemas hídricos apresenta diversas serventias, sobretudo no que tange o propósito de ser aplicada em domicílio, indústria, atividade agrícola, bem como para gerar a manutenção à vida, visto que todos os seres vivos são dependentes da água para as respectivas sobrevivências. Neste cenário, é válido ressaltar que o elemento água é demasiadamente relevante para os indivíduos, levando em consideração que este é um recurso natural essencial para a maioria das atividades humanas.

O ato de fornecer a água tratada para a população é considerado parte da revolução decorrente da melhoria dos padrões de vida do homem, e isso inclui os aspectos de saneamento básico, limpeza dos centros urbanos, manejo hídrico pluvial, coleta e tratamento de esgoto, bem como o abastecimento de água potável.

Diante disso, dentre as partes fundamentais do abastecimento de água existem as adutoras, de modo que estas apresentam a funcionalidade de transportar a água captada em mananciais até determinada estação de tratamento hídrico para posteriormente efetivar o abastecimento de água integralmente tratada nos reservatórios, os quais irão distribuir a água nos locais de consumo (residência, indústria, dentre outros). Portanto, a adutora corresponde ao encaminhamento da água para os locais.

A partir do momento em que se considera um projeto de adutora, os custos devem ser considerados, pois isso tende a ser influenciado por variáveis distintas, tais como o diâmetro da adutora, visto que este é basicamente definido pela vazão transportada, bem como o comprimento da tubulação, pressão, linha elétrica (bombeamento motor), dentre as especificidades físicas do local de construção, além de todas as exigências relacionadas aos equipamentos úteis para o funcionamento da adutora.

Deste modo, segundo Silva (et al., 2013), todas as variações inerentes ao diâmetro, potência da bomba utilizada e demais alterações nos quesitos variáveis, intensificam a compreensão de que há custo fixo e variável no sistema adutor e torna-se muito importante gerar ênfase a estes custos para a definição da seleção dos componentes da adutora, visto que o dimensionamento econômico de adutoras é parte fundamental para assegurar a otimização do sistema de distribuição, abastecimento e utilização da água como um todo.

Ou seja, baseado no momento em que inexistia a obediência relacionada às restrições de caráter técnico a fim de atender as especificidades econômicas dos projetos de adutora, os investimentos podem agregar custos altos e fora do padrão requerido, assim, a busca por soluções para a realização do dimensionamento econômico de adutoras conta com o uso de técnicas que tendem a otimizar o critério econômico tendo em vista os procedimentos metodológicos aplicados em prol de favorecer a atividade de dimensionar os sistemas de abastecimento hídrico.

Os elementos de ordem técnica e natureza econômica dos projetos de adutora necessitam ser levados em consideração com a finalidade de que a construção seja segura e o sistema efetivo mediante as escolhas mais apropriadas no que tange o diâmetro da tubulação e diante disso, são aplicadas as metodologias de dimensionamento econômico, assim, estes métodos são os objetos de estudo da presente pesquisa.

Portanto, este trabalho justifica-se mediante a relevância social e acadêmica que as tratativas abordadas apresentam, de modo que por meio do estudo realizado é possível fomentar o nível de informações pertinentes acerca dos aspectos conceituais inerentes ao tema, além de contribuir para a disseminação de dados relacionados ao dimensionamento econômico de adutora, validando a grande importância das tubulações que compõem o sistema de abastecimento de água.

Assim o objetivo geral desta pesquisa é comparar o emprego de distintas metodologias de dimensionamento econômico de adutora considerando o sistema adutor por recalque (água bruta) de um projeto existente, e os objetivos específicos se referem a efetuar o dimensionamento econômico de uma adutora utilizando Fórmula de Bresse, levantar um comparativo entre este dimensionamento supracitado com o método baseado no peso das tubulações e o método da variação linear dos custos das tubulações, expor os resultados obtidos durante as etapas de dimensionamento econômico e avaliar se o projeto foi corretamente dimensionado tendo em vista o aspecto econômico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O saneamento básico e o abastecimento hídrico

O advento dos aspectos inerentes ao saneamento básico existe desde os primórdios civilizatórios, considerando o surgimento das diversas doenças correlacionadas à utilização e ao contato de água sem tratamento, além dos esgotos a céu aberto. De acordo com Cirilo (2003), o cenário social inclui a Engenharia de Recursos Hídricos, a qual é muito relevante para contribuir com a transformação da água em bem econômico de primeira ordem aos seres humanos. Diante disso, o Saneamento Básico e as questões hidráulicas desempenham funções de extrema importância para as edificações residenciais, industriais e outras.

Neste as questões hídricas dizem respeito à captação, adução e distribuição de água com a finalidade de abastecer os pólos urbanos e industriais, desde o momento da coleta e esgotamento sanitário e drenagem pluvial até as estações de tratamento de água e esgoto (CIRILO, 2003).

O abastecimento de água pode ser definido e compreendido como um conjunto de obras, equipamentos e serviços que se destinam a abastecer a água potável de uma localidade para suprir com o consumo doméstico, industrial, entre outros. O fornecimento dessa água passa por um sistema que deve possuir quantidade suficiente e qualidade satisfatória (físico, químico, bacteriológico), conforme afirma o autor Azevedo Netto (1998). De modo geral, o autor discorre sobre o sistema de abastecimento público de água compreender distintas unidades, tais como o manancial (captação), adução e subadução (água bruta ou tratada), tratamento, reservação, distribuição e estações elevatórias ou de recalque (se necessário).

Para Tsutiya (2008), o abastecimento hídrico possui parâmetros, diretrizes e definições cujas funções são altamente necessárias para caracterizar o sistema a fim de projetá-lo de maneira assertiva. Garcez (1981) mostra que a quantidade de água disponível pode ser suficiente a fim de satisfazer determinada demanda, assim como pode indicar a necessidade de construir o reservatório de acumulação e diante disso, existe a ETA – Estação de Tratamento de Água, além da necessidade de criar uma Estação de Recalque.

2.2 Linhas adutoras

De acordo com Azevedo Netto (1998), a caracterização de linhas adutoras se dá através do entendimento de que funcionam como canalizações de ordem principal que são empregadas para a condução da água às unidades de uso (sistema público de abastecimento), ou seja, atividade que antecede a distribuição hídrica que correlaciona a captação à estação de tratamento de água, assim como encaminha o volume hídrico aos reservatórios de um sistema.

Diante disso, a adução se refere a um conjunto de encanamentos que detém peças específicas destinadas à promoção de circulação da água no momento do abastecimento e nesse contexto existe a captação e o reservatório de distribuição, a captação e a ETA, a estação de tratamento e o reservatório e o reservatório e a rede de distribuição (GARCEZ, 1981).

O autor também salienta que as adutoras se tratam de tubulações muito relevantes para o sistema hídrico, sobretudo no que tange a paralisação do funcionamento, a qual pode comprometer as unidades de utilização, bem como o reabastecimento do fluxo podendo ocasionar um grande caos para a população.

Com base nas informações expostas por Azevedo Netto (1998), as adutoras também podem se classificar quanto a natureza da água conduzida. A adutora de água bruta diz respeito às tubulações que transportam a água sem tratamento, assim, nota-se que esse tipo de adutora capta a água em seu curso até o transporte para ETA. Já a adutora de água tratada se refere àquelas que transportam a água que já passou pelo tratamento na ETA, assim, esta adutora encaminha a água até os reservatórios (AZEVEDO NETTO, 1998).

Portanto, as linhas adutoras também apresentam a especificidade acerca da movimentação da água. De acordo com Tsutiya (2006), as adutoras podem apresentar distinções quanto à energia utilizada para gerar a movimentação da água e diante disso podem ser: linhas por gravidade de conduto livre ou forçado, linhas por recalque ou linhas mistas (combinação de gravidade com recalque).

Deste modo, inicialmente é necessário compreender que o escoamento hídrico pode ocorrer através da gravidade, ou seja, sem pressão externa do sistema e isso caracteriza o funcionamento das adutoras por gravidade, sendo que o percurso (transporte

de água) é realizado pela ação gravitacional (TSUTIYA, 2006). Outro modelo se trata do transporte de água de um ponto mais baixo para um local elevado, ou seja, utiliza-se a adutora por recalque. Diante disso, este sistema transporta a água a fim de que o conjunto de bombas eleve a cota hídrica, assim, a elevação é altamente necessária e a estação elevatória forma um recalque simples (TSUTIYA, 2006).

Contudo, em grande parte dos casos, o trecho das adutoras (instalação) possui variedade de relevo, sendo necessários os dois sistemas supracitados, o que torna a adutora mista, composta por gravidade e recalque, como expõe Tsutiya (2006).

2.3 Tubulações

A tubulação se trata de uma série de tubos e conexões cuja finalidade é transportar um fluido líquido ou sólido, bem como quaisquer misturas de um ponto a outro (HARTMANN, 2019).

Diante disso, é preciso destacar que a escolha das tubulações como componentes importantes às adutoras, tendem a influenciar o processo de dimensionamento desse tipo de sistema e para que ocorra uma seleção assertiva acerca das tubulações, é preciso considerar diversos aspectos inerentes a esse elemento, tais como o diâmetro, custo do tubo, pressão, carga externa que atuam sobre a tubulação, custo da instalação, manutenção, qualidade da água a ser transportada, bem como as especificações do terreno onde ocorrerá a instalação dos condutos (MISAWA, 1975).

Portanto, a condição dos materiais empregados em linhas adutoras deve obedecer determinadas características, principalmente considerando a diferença entre estes materiais. Em outras palavras, os materiais usados são diversos, a saber, ferro fundido (revestido internamente ou não), ferro dúctil, aço soldado, concreto armado simples ou protendido, PVC, plástico, fibra de vidro, polietileno e materiais especiais (PRFV: poliéster reforçado com fibra de vidro), de acordo com a contribuição de Misawa (1975).

Com relação às condições do emprego desses materiais, é válido considerar a água, sobretudo a quantidade, qualidade e pressão, além do aspecto econômico inerente a resistência dos materiais durante as fases de carga e descarga, assentamento, cortes, furos, leveza, transporte, juntas, conexões, condição técnica, redução de custo, aumento da durabilidade e permissão de operar com mínima manutenção (JÚNIOR, 1997).

2.3.1 PVC – Poly Vinyl Chloride

Segundo Akros (2000), o PVC é um material constituído por dois recursos naturais, o sal e o petróleo e isso ocorre por intermédio da refinação do petróleo para a obtenção de etileno, assim, através da eletrólise (reação química), ocorre à passagem de corrente elétrica. Logo, ocorrem ligações químicas para a obtenção de MVC – Monômero de Cloreto de Vinila, diante disso, ocorrem outros processos químicos que cooperam para a formação do Policloreto de Vinila (PVC),

O autor também explana que a resina (pó fino e branco), quando misturado com aditivos como os plastificantes, óleos, estabilizantes, pigmentos e demais elementos, origina o PVC. Portanto, o PVC possui quantidades e tipos de aditivos diferentes que se tornam específicos conforme as especificidades atreladas a performance do produto de transformação.

Os tubos e conexões PBA são aplicados em sistemas de adução e distribuição de água à temperatura ambiente, destinados à empresas públicas e privadas responsáveis pela instalação e manutenção de redes de abastecimento. São regidos pela norma NBR 5647 de 2019 com classificação dos tubos na classe 12 (pressão de serviço e temperatura de 20°C de 0,6 Kgf/cm²), na classe 15 (pressão de serviço e temperatura de 20°C de 0,75MPa ou 7,5 Kgf/cm²) ou classe 20 (pressão de serviço e temperatura de 20°C de 1,0MPa ou 10,0Kgf/cm²).

2.3.2 Ferro fundido

De acordo com Barbará (2000), os tubos fabricados em ferro fundido podem ser utilizados em obras cuja função é de captar fluidos, como é o caso da aplicação em adutoras, sobretudo acerca das redes de distribuição. O conceito de ferro fundido se estende a uma grande variedade de ligas e existe diferença mediante a estrutura metálica (GARCEZ, 1981).

A qualidade mecânica do ferro se altera devido a sensibilidade existente no material considerando a tentativa de reduzir ou eliminar os efeitos provocados pela grafita lamelar (lamelas, de acordo com o Garcez (1981).

Os tubos de ferro fundido são classificados segundo o processo produtivo que envolve o material, assim, existem: tubos fundidos em moldes fixos e tubos

centrifugados. Ademais, o tipo de juntas também é levado em consideração, tais como, tubos ponta e bolsa, tubos de flange e tubos com juntas especiais (MISAWA, 1975).

O autor também explana sobre o revestimento do tubo, o qual pode ser asfáltico ou cimentado e essa condição se atrela com a resistência de tração, resistência de carga e impactos, limite elástico e alongamento elevado (BARBARÁ, 2000). Ou seja, são elementos presentes no ferro fundido dúctil, visto que há qualidade mecânica do ferro fundido tradicional, como por exemplo, a resistência à compressão, corrosão e fadiga, bem como a facilidade de moldagem.

Azevedo Netto (1998) destaca que os tubos de ferro fundido dúctil podem apresentar os seguintes diâmetros: 50, 75, 100, 150, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e 1200 mm, conforme exposto pela NBR 07560, 07662 e 07663.

2.4 Métodos de dimensionamento de adutora

A priori, vale enfatizar que o dimensionamento de um sistema adutor elevatório de água é uma problemática solucionada mediante estudos técnicos de caráter econômico. O dimensionamento dos sistemas de adução considera três elementos, o horizonte do projeto, a vazão de adução e o período de funcionamento da adução (SILVA et al., 2003).

Diante disso, o horizonte do projeto se refere ao período de vida útil da obra, bem como a evolução da demanda hídrica, o custo da obra, a flexibilidade no aumento do sistema e o custo de energia elétrica envolvida (TSUTIYA, 2006). Ademais, o conhecimento da vazão a ser aduzida é igualmente relevante, visto que as demandas e os diâmetros se correlacionam com a vazão e para que ocorra o estabelecimento dessa vazão é necessário considerar a quantidade de água demandada com base no consumo per capita populacional, bem como na variação da vazão e nos horários de funcionamento do sistema adutor, conforme Melo (1996).

De acordo com a NBR (Norma Brasileira) 12215, com relação ao período de funcionamento da adutora, alguns aspectos importantes precisam ser considerados, tais como o dimensionamento hidráulico, o tipo de sistema e os custos que envolvem o período de utilização do sistema supracitado. Além disso, a NBR12215 assegura que as adutoras que funcionam através da gravidade podem chegar a um período de

funcionamento diário de 24 horas, porém, as adutoras por recalque costumam utilizar o período de bombeamento diário de 16 a 20 horas, visto que nos momentos de menor consumo as bombas realizam paradas a fim de promover certa econômica energética (2017).

Para a efetivação do dimensionamento dos sistemas adutores para o recalque, existem distintos métodos que possibilitam calcular o diâmetro mais adequado, e estes podem trazer resultados superficiais a fim de um pré-dimensionamento capaz de nortear o aprofundamento dos dados utilizados para o projeto, assim como existem metodologias com maior quantidade de parâmetros que tendem a promover resultados mais viáveis.

Segundo Marques e Sousa (2009), o diâmetro do tubo na implantação da adutora interfere diretamente nas demais etapas do sistema e isso se inicia desde a aquisição e instalação até a fase operacional do sistema, visto que as instalações impactam as demais atividades do sistema adutor.

2.4.1 Fórmula de Bresse

Esta é considerada uma das fórmulas mais clássicas da hidráulica no que tange o dimensionamento econômico de tubulações, visto que é muito utilizada mesmo com o passar do tempo. De acordo com Ávila (1975), esta fórmula é aplicada para encontrar um diâmetro distinto do comercialmente usado, deste modo é preciso projetar um valor comercial mais próximo.

O critério de dimensionamento elaborado por Bresse é simples e extremamente conservador, pois funciona como uma aproximação do dimensionamento real. Em outras palavras, trata-se de um pré-dimensionamento para que seja possível obter um diâmetro excelente com a finalidade de assumir conveniência aos parâmetros inerentes à ordem econômica dos projetos de adução (ÁVILA, 1975).

A fórmula é baseada na vazão de adução, diâmetro da tubulação e coeficiente de Bresse, de modo que este coeficiente é altamente incerto, pois é determinado mediante diversos fatores e também se limitam à experiência do projetista quando se trata do aspecto econômico da tubulação. Abaixo a Fórmula de Bresse.

$$D = K_{Bresse} \cdot \sqrt{Q} \quad (1)$$

Em que Q corresponde a vazão de adução (m^3/s); D é o diâmetro da tubulação (m) e K_{Bresse} é o coeficiente de Bresse.

Azevedo Netto (et al., 1975) afirmam que este coeficiente é variável conforme o peso da água, o regime de trabalho do sistema, rendimento do elevatório, material da tubulação, preço da unidade de potência do conjunto elevatório e da unidade de comprimento do tubo, além do diâmetro unitário. De modo geral, os autores asseguram que a Fórmula de Bresse refere-se à velocidade média de circulação hídrica que também se denomina como velocidade econômica.

No entanto, os critérios da aplicação da Fórmula de Bresse são simples e isso comprova o motivo pelo qual é uma fórmula que utiliza a aproximação do dimensionamento para conseguir obter um diâmetro “bom” a fim de ser conveniente para a adutora em razão do aspecto econômico investigado e nesse contexto, o coeficiente de Bresse (K) é uma função de diversos fatores que tornam esse tipo de dimensionamento impreciso quando o foco é a economia relacionada à tubulação.

Este coeficiente (K_{Bresse}) é variável de 0,70 a 1,60 (ÁVILA, 1975) e diante disso, a Fórmula de Bresse anseia fixar uma velocidade média com relação à circulação hídrica para denominar a velocidade econômica e isso é calculado através da equação da continuidade, como exposto nas equações 2, 3, 4 e 5.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Em que: A se refere à área da seção transversal da tubulação em m^2 e Q é a vazão em m^3/s obtendo uma velocidade econômica V em m/s , portanto:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (3)$$

Logo, substitui-se a equação (1) na (3) e se obtém:

$$V = \frac{4}{\pi \cdot K_{Bresse}^2} \quad (4)$$

Deste modo, a equação usada para determinar o coeficiente K_{Bresse} é a seguinte:

$$K_{Bresse} = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot V}} \quad (5)$$

Porém surgiram novas metodologias para efetivar o dimensionamento econômico, tais como o Método baseado no Peso das Tubulações e o Método da Variação Linear dos Custos das Tubulações, os quais também foram aplicados no projeto adutor. Assim, o Método do Peso das Tubulações levanta o pressuposto de que o custo da tubulação é proporcional ao peso desta.

2.4.2 Método baseado no peso das tubulações

Com relação às tratativas desta metodologia, existe o pressuposto de que o custo da tubulação é proporcional ao seu peso, neste contexto surge o nome do método, conforme exposto por Melzer (1964). Frente a isso, é realizado um estudo inerente ao esforço hidráulico, visto que as tubulações se encontram submetidas à condução da água.

Deste modo, também é válido enfatizar o aspecto da pressão interna da água que circula no tubo, assim, esta gera tensão sobre as paredes das tubulações e fazem o material operar a tração levando em consideração que a espessura das paredes da tubulação precisa ser calculada em função da pressão supracitada (MELZER, 1964).

Portanto, a partir do momento em que se anseia realizar um projeto desse tipo de instalação, é relevante considerar a pressão interna da tubulação visto que é necessário possuir capacidade para suportar tal pressão. Em outras palavras, a espessura das paredes do tubo se dá em função do diâmetro da tubulação, bem como do material utilizado.

Com isso, esse método verifica os parâmetros da tubulação considerando o comprimento unitário do tubo, a espessura das paredes e o diâmetro interno do tubo. Ademais, a pressão de ruptura e a tensão de tração do material também são consideradas (MELZER, 1964).

Neste panorama, a projeção da instalação deve considerar a pressão interna que a tubulação é capaz de suportar e isso representa a relação da espessura das paredes do tubo junto ao seu diâmetro considerando o material utilizado. Com isso, a espessura das paredes do tubo de comprimento unitário é caracterizada como (e) e o diâmetro do tubo é (D). Já a pressão interna é nomeada de (p).

A resultante das forças interiores será composta pelo Componente Vertical (F_v):

$$Fv = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cdot \cos\alpha \cdot dS = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cdot \frac{D}{2} \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha = p \cdot D \quad (6)$$

E pelo Componente Horizontal (Fh):

$$Fh = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \sin\alpha \cdot dS = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha = 0 \quad (7)$$

Em que o equilíbrio existente entre o componente vertical e as reações normais nas paredes do tubo proporciona:

$$p \cdot D = \sigma \cdot e + \sigma \cdot e \quad (8)$$

$$p \cdot D = 2 \cdot \sigma \cdot e \quad (9)$$

Portanto, existe a tensão que será submetida o material, logo:

$$\sigma = \frac{p \cdot D}{2 \cdot e} \quad (10)$$

Assim, existem condições limites para a máxima pressão de ruptura que a tubulação suporta, então:

$$P_{max} = Pr \frac{2 \cdot e \cdot \sigma_{adm}}{D} \quad (11)$$

Já a espessura das paredes do tubo é dada por:

$$e = \frac{Pr \cdot D}{2 \cdot \sigma} \quad (12)$$

Em que (Pr) é a pressão de ruptura, σ é a tensão máxima de tração do material e (D) é o diâmetro da tubulação. Portanto, área de um anel circular é dada por:

$$A = \pi \cdot \frac{(D_{ex}^2 - D^2)}{4} \quad (13)$$

Logo, (D_{ex}) é o diâmetro externo do anel e (D) é o diâmetro interno. Assim, a fórmula do peso por metro de comprimento é a seguinte:

$$Peso = \gamma \cdot \pi \cdot \frac{[(D+2e)^2 - D^2]}{4} = \gamma \cdot \pi \cdot (eD + e^2) \quad (14)$$

Portanto, (γ) é o peso específico do material e (V) é o volume do tubo com 1 metro de comprimento.

Assim, substitui-se a equação (12) na (14) e terá:

$$Peso = \gamma \cdot \pi \cdot \frac{Pr}{2\sigma} \left(1 = \frac{Pr}{2\sigma} \right) D^2 \quad (15)$$

O método proposto por Melzer (1970), parte do pressuposto que o custo do tubo é proporcional ao peso do mesmo (Freire, 2000). Assim é possível concluir o peso e o preço da tubulação. Nota-se, então que o preço da tubulação é proporcional ao quadrado do diâmetro, logo, a equação do custo é:

$$C(D) = C \cdot D^2 \quad (16)$$

Em que $C(D)$ é o custo da tubulação em metro de comprimento (R\$/m); (C) é o custo por metro de comprimento e por metro de diâmetro (R\$/m².m) e (D) é o diâmetro do tubo em metro (m).

O custo total do sistema de recalque se compõe através de dois elementos: os custos de instalação do sistema e a energia gasta para recalcar a água até o destino final (custo operacional). Assim, com relação à instalação, é possível calcular o investimento por meio da seguinte equação:

$$I = C(D) \cdot L$$

$$I = C \cdot D^2 \cdot L \quad (R\$) \quad (17)$$

Em que L é o comprimento da tubulação em metros.

Considerando que as instalações possuem vida útil, é necessário conhecer a amortização anual deste investimento. Logo, esta é definida pelo coeficiente de amortização, obtido por meio de juros compostos através da expressão abaixo:

$$\alpha = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (18)$$

Onde, (r) é a taxa de juros anual, em decimal e (T) é o período de amortização dado em anos. Deste modo, os custos anuais das instalações dos sistemas se dão através de:

$$C_{inst} = I \cdot \alpha$$

$$C_{inst} = C \cdot D^2 \cdot L \cdot \alpha \quad (\text{reais por ano}) \quad (19)$$

Já com relação aos custos anuais em virtude da energia se dá através de:

$$C_e = P \cdot n \cdot p \quad (20)$$

Portanto, (P) equivale a potência do conjunto de moto bomba (W), (n) é o número anual referente às horas de funcionamento do conjunto supracitado e (p) é o preço do KWh em reais.

Diante disso, existe a importância de efetivar o cálculo inerente a potência consumida por este conjunto de moto bomba, assim:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{n} \quad (21)$$

Deste modo: (P) represente a potência do conjunto de moto bomba, (γ) corresponde ao peso da água (N/m^3), (Q) é a vazão (m^3/s), (H_{man}) é a altura manométrica(m) e (n) é o rendimento global relacionado ao conjunto moto bomba, em decimal.

Com isso, é necessário transformar a potência para kW, logo, é preciso dividir por 1000 a fim de obter:

$$P = \frac{9810 \cdot Q \cdot H_{man}}{1000 \cdot \eta} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \quad (22)$$

Em que P é a potência do conjunto moto bomba (kW), H_g é a altura geométrica de elevação(m) e h_f equivale às perdas de carga da instalação (m).

Portanto, a equação correspondente aos custos energéticos anuais se dá através da substituição da Potência (P) da equação (22) na equação (20):

$$C_e = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (23)$$

O custo total anual referente à instalação ($C_T(D)$) é composto pela somatória dos custos de instalação do sistema junto aos custos energéticos, logo:

$$C_T(D) = C_{INST} + C_e \quad (24)$$

Portanto, é preciso substituir, logo:

$$C_T(D) = C \cdot D^2 \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (25)$$

E diante disso, as perdas das cargas são dadas pela fórmula de Hazen-Willians pela seguinte equação:

$$h_f = h_{li} + \frac{10,646 \cdot L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \quad (26)$$

Em que h_f é a perda de carga em metros, L refere-se ao comprimento equivalente da tubulação (m), D equivale ao diâmetro do tubo, em metros; Q é a vazão requerida pelo conjunto (m³/s), e C_{HW} é o coeficiente de rugosidade do material sendo o PVC PBA de classe 20, com C_{HW} para o diâmetro nominal (DN) de 100mm igual a 140, e para tubulações de fofo PN16 para tem-se o coeficiente de rugosidade igual à 135 de acordo com (Netto, 1998), h_{li} corresponde a perda de carga localizada calculada através da equação 27.

$$h_{fLi} = K_i \cdot \left(\frac{V_i}{2,9} \right)^2 \quad (27)$$

Sendo (K_i) um coeficiente empírico que possui valores já definidos para os elementos mais utilizados nas tubulações, (V_i) a velocidade média do fluxo e (g) a aceleração da gravidade, em m/s². Em decorrência disto, a perda de carga total (h_{ftotal}) ao longo de uma canalização é o resultado da soma das perdas de carga ao longo dos trechos retilíneos (perda de carga contínua) com as perdas de carga nas conexões e peças especiais (perda de carga localizada).

$$h_{ftotal} = h_f + h_{fLi} \quad (28)$$

Essa constante é tabelada podendo ser facilmente encontrada na literatura. Segue a tabela 1 com alguns valores de k correspondente à alguns acessórios.

Tabela 1 – Valores de k – Adimensional

Acessório	k
Curva de raio curto (cotovelo de 90°)	0,9 até 1,5
Curva de raio longo	0,25 a 0,40
Cotovelo de 45°	0,4
Curva de 45°	0,2
Curva de 90°	0,4
Tê, passagem direita	0,6
Tê, saída lateral	1,3
Tê de saída bilateral	1,8
Válvula de gaveta aberta	0,2
Válvula de ângulo aberta	5,0
Válvula de globo aberta	10,0
Crivo	0,75
Entrada	0,5
Válvula de retenção	2,5
Válvula de pé	1,75
Bocais	2,75

Fonte: Os autores (2022).

Ademais, a equação do custo total anual da instalação será:

$$C_T(D) = C \cdot D \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot \left\{ H_g + \left[10,646 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \right] \right\}}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (29)$$

Assim, é preciso derivar $C_T(D)$ em virtude do diâmetro para igualar a zero e obter o valor que reduz a função, logo:

$$\frac{dC_T(D)}{dD} = C \cdot D \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot \left\{ H_g + \left[10,646 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \right] \right\}}{\eta} \cdot n \cdot p = 0 \quad (30)$$

$$2 \cdot C \cdot D \cdot L \cdot \alpha - \frac{508,609 \cdot L \cdot Q^{2,852}}{D^{5,87} \cdot C_{HW} \cdot \eta} \cdot n \cdot p = 0$$

$$2 \cdot C \cdot D \cdot L \cdot \alpha = \frac{508,609 \cdot L \cdot Q^{2,852}}{D^{5,87} \cdot C_{HW} \cdot \eta} \cdot n \cdot p$$

Isso resulta na seguinte expressão referente ao diâmetro ótimo (D_{OT}) da tubulação em metros:

$$D_{OT} = 2,239 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,14556} \cdot \left(\frac{Q^{0,415}}{C_{HW}^{0,27}} \right) \quad (31)$$

A obtenção deste diâmetro ótimo através do C custo por metro de comprimento ser aproximada para o comercial, o qual pode ser consecutivo superior ou inferior, de acordo com a metodologia baseada no peso das tubulações.

2.4.3 Método da variação linear dos custos das tubulações

De acordo com Mendiluce (1966), a variação linear dos custos das tubulações é o princípio básico acerca do custo da tubulação no que tange o efeito de variar linearmente com o diâmetro do tubo, assim, é considerado o custo da tubulação através do comprimento, bem como o custo por comprimento e diâmetro, além do diâmetro do tubo.

$$C(D) = C \cdot D \quad (32)$$

Em que $C(D)$ é o custo da tubulação, (C) é o custo por metro de comprimento e metro de diâmetro e (D) é o diâmetro do tubo.

O autor também discorre sobre o custo total que envolve o sistema de recalque e afirma que este é caracterizado por duas partes diferentes, sendo o custo de instalação do sistema e a energia gasta para recalcar a água até o seu destino ideal.

Assim o custo total do sistema de recalque inclui o custo da instalação e o investimento:

$$I = C(D) \cdot L$$

$$I = C \cdot D \cdot L \quad (R\$) \quad (33)$$

Segundo Freire (2000), a amortização anual referente ao investimento também entra nesta base de cálculo, justamente devido à onerosidade de instalar o sistema. Deste modo, os custos anuais de instalação do sistema, o custo por metro de comprimento e por metro de diâmetro, o diâmetro do tubo e o comprimento da tubulação, bem como o coeficiente de amortização anual do investimento, são todos considerados na aplicação desta metodologia de dimensionamento econômico.

Considerando a vida útil da instalação é preciso destacar a amortização anual do investimento, definindo o coeficiente de amortização, conforme a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (34)$$

Logo, os custos anuais de instalação são compreendidos através de:

$$C_{INST} = I \cdot \alpha$$

$$C_{INST} = C \cdot D \cdot L \cdot \alpha \quad (\text{reias por ano}) \quad (35)$$

Ademais, considera-se também os custos anuais relacionados à energia, como demonstrado abaixo:

$$C_e = P \cdot n \cdot p \quad (36)$$

Assim, a potência é (P).

Para transformar a potência em de W para kW, é preciso dividir por 1000 como na equação (22), tem-se:

$$P = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \quad (37)$$

Em que a equação dos custos energéticos anuais será:

$$C_e = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (38)$$

Assim o custo anual da instalação ($C_T(D)$) é composto pela seguinte somatória:

$$C_T(D) = C \cdot D \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (39)$$

Substituindo a perda de carga (h_f) do sistema pela fórmula de perda de carga de Hazen-Willians (Equação 26)

$$C_T(D) = C \cdot D \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot \left\{ H_g + \left[10,646 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \right] \right\}}{\eta} \cdot n \cdot p \quad (40)$$

Assim, é preciso derivar $C_T(D)$ em virtude do diâmetro para igualar a zero e obter o valor que reduz a função, logo:

$$\frac{dC_T(D)}{dD} = C \cdot L \cdot \alpha + \frac{9,81 \cdot Q \cdot \left\{ H_g + \left[10,646 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \right] \right\}}{\eta} \cdot n \cdot p = 0 \quad (41)$$

$$C \cdot L \cdot \alpha - \frac{508,609 \cdot L \cdot Q^{2,852}}{C_{HW}^{1,852} D^{5,87} \cdot \eta} \cdot n \cdot p = 0$$

$$C \cdot L \cdot \alpha = \frac{508,609 \cdot L \cdot Q^{2,852}}{C_{HW}^{1,852} D^{5,87} \cdot \eta} \cdot n \cdot p$$

Isso resulta na seguinte expressão referente ao diâmetro (ótimo) da tubulação:

$$D_{OT} = 2,891 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{Q^{0,486}}{C_{HW}^{0,316}} \right) \quad (42)$$

Portanto, este diâmetro é obtido por meio de aproximação (comercial) consecutiva superior ou inferior tendo em vista o método baseado no peso das tubulações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dado o propósito de comparar a aplicabilidade de diferentes metodologias de dimensionamento econômico de adutora de um projeto específico, foram escolhidos três métodos para a realização do dimensionamento econômico levando em consideração a facilidades de utilização dos mesmos, tornando mais fácil a compreensão e aplicação.

Procedeu-se então com a aplicação dos seguintes métodos: Fórmula de Bresse, Método baseado no Peso das Tubulações e por fim, o Método da Variação Linear dos Custos das Tubulações. Neste cenário, assim como notado, o conjunto de parâmetros distintos tende a influenciar a escolha do diâmetro econômico e por meio disso recebe classificação diferente acerca dos custos de investimentos, custos operacionais e de manutenção.

Portanto, foi realizada uma análise comparativa na qual o diâmetro foi projetado para o sistema adutor mencionado a fim de efetivar a comparação dos resultados que emergem da aplicação dos três métodos citados de modo a verificar a escolha econômica através dos parâmetros do projeto.

3.1 Sistema Adutor em estudo

O projeto em estudo refere-se à ampliação para o melhoramento do sistema de abastecimento hídrico de um bairro localizado na cidade de Posses no município de Leme do Prado, Minas Gerais. O município localiza-se no norte de Minas Gerais, na mesorregião do Jequitinhonha. Ademais, o município se limita com Botumirim, José Gonçalves de Minas, Chapada do Norte, Minas Novas e Turmalina, além de que está a 711 km de distância da cidade de Belo Horizonte. Assim, a cidade está situada à aproximadamente 884 m de altitude.

Diante disso, o sistema de abastecimento de água de Posses faz uso de uma ETA – Estação de Tratamento de Água pré-fabricada que detém capacidade para 3,00 L/s, mas opera com capacidade superior e chega a tratar 5,00 L/s, de acordo com as informações obtidas no projeto em questão.

O local do estudo possui dois reservatórios apoiados a fim de promover o abastecimento hídrico, de modo que um deles apresenta a capacidade de 20 m³ na área da ETA, já o segundo encontra-se no ponto alto da localidade, com a capacidade de reservar 15 m³ de água.

Frente a isso, o projeto em estudo objetivou ampliar o sistema produtor de água de Posses em Leme do Prado – Minas Gerais, e para isso, foi dimensionado um conjunto moto bomba para o poço, bem como os estudos inerentes a implantação da adutora de água bruta que serviu para interligar o poço mencionado a um reservatório apoiado de 5m³, o qual serviu como caixa de passagem. Portanto, a adutora de água bruta tende a interligar o reservatório de apoio (RAP) de 5m³ a ETA, e na Estação de Tratamento de Água já existia um sistema de bombeamento compacto (*Booster*).

O presente trabalho analisou o primeiro trecho de adução por recalque que corresponde a uma distância linear de 446 m e desnível geométrico máximo de 105,87m. Os demais dados do projeto estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Especificidades do poço

Diâmetro.....	6" (150 mm);
Vazão de Produção.....	8,70 L/s;
Vazão de exploração.....	5,00 L/s;
Cota do Terreno	624,122 m;
Nível Dinâmico	49,91 m;
Cota de Nível Dinâmico	574,212 m;
Cota de instalação da Bomba	514,212 m;
Nível Estático.....	4,00 m;
Cota de Nível Estático	620,122 m;
Líquido a recalcar	Água Bruta;
Cota de Chegada ao RAP 5m3 a implantar	680,080 m;
Desnível geométrico máximo	105,87 m;
Diâmetro de recalque (barrilete de saída da bomba)	100 mm;
Diâmetro de recalque (adutora)	100 mm;
Extensão e material	446 m – FoFo DN100;
Velocidade de recalque	0,64 m/s;
Altura manométrica	108,57 m;
Potência	11,0 cv.

Fonte: Projeto em estudo (2018).

Para a bomba utilizada na sucção da água bruta segue os dados apresentados na Figura 2:

Figura 2 – Complemento das informações do poço

- Tipo	Submersa para poço profundo;
- Marca	LEÃO;
- Modelo	R20A-10 610;
- Potência Instalada	11,0 cv;
- Rotação	3450 rpm.

Fonte: Projeto em estudo (2018).

De acordo com o projeto serão utilizadas as conexões apresentadas na figura 3:

Figura 3 – Peças especiais ao longo da adutora

Sucção:

Especificação	Quantidade
Crivo	1,00
Entrada	1,00
TOTAL	

Recalque:

Especificação	Quantidade
Curva 90°	1,00
Válvula de retenção	1,00
Registro de gaveta	2,00
Tê passagem lateral	1,00
Cotovelo 45°	2,00
Peças e conexões ao longo da adutora	-
Tubulação (Adutora) L= 446 m	
TOTAL	

Fonte: Projeto em estudo (2018).

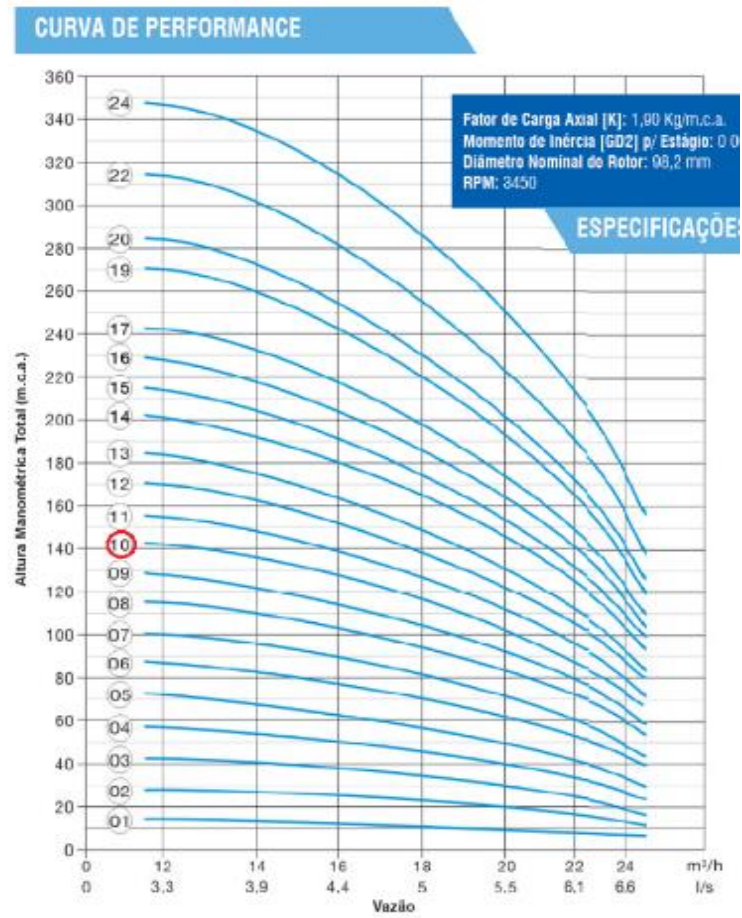
Considerando o modelo da bomba R20A-10 610:

Figura 4 – Catálogo do fabricante para a seleção do conjunto motobomba.

Modelo	Potência (cv)	Estágios	Características Hidráulicas								Peso (Kg)	Ø mínimo do Poço (pol.)	Ø Recalque
			Vazão (m³/h)										
			0	12	14	16	18	20	22	24			
Altura Manométrica Total (m.c.a.)													
R20A-01 500	1	1	17,5	14	13,5	12,5	11	10	8,5	7	42,1		
R20A-02 500	2	2	35	28	27	25	22,5	20	17	13	49,1		
R20A-03 500	3	3	53	42,5	40,5	37,5	33,5	29,5	25	19	55,3		
R20A-04 500	4,5	4	70	57	54	50	45	40	34	27	58,5		
R20A-05 500	5,5	5	88	72	67,5	63	56	50	42,5	33,5	65,4		
R20A-06 500	6	6	106	87	82	78	71	61,5	53	44	69,7		
R20A-07 500	7	7	122	100	95	90	81	71	61	49	71,8		
R20A-08 610	8	8	140	115	110	103	94	83	72	60,5	81,4		
R20A-09 610	9	9	157	128	122	114	104	92	79	66	83,6		
R20A-10 610	11	10	175	142	136	128	116	104	89	75	88,5		
R20A-11 610	11	11	192	155	148	139	126,5	112	96	80	93,5	6"	2 1/2" BSP
R20A-12 610	12	12	209	170	162	151	138	123	105	88	99,8		
R20A-13 610	13	13	227	184	175	163	148	132	112	93	101,4		
R20A-14 710	15	14	246	201	192	180	165	146	124	104	123,1		
R20A-15 710	16	15	264	214	204	192	174	154	131	110	131,2		
R20A-16 710	17	16	281	228	218	205	187	164	141	117	135,3		
R20A-17 710	18	17	298	242	232	218	198	174	148	123	137,4		
R20A-19 710	19	19	333	270	259	241	219	192	165	136	144,2		
R20A-20 710	20	20	351	284	273	253	230	202	173	142	146,3		
R20A-22 710	22,5	22	386	314	302	282	257	222	193	157	155,9		
R20A-24 760	25	24	422	347	334	312	289	248	215	177	162,3		

Fonte: ISO (2012)

Figura 5 – Curva característica da bomba.



Fonte: Projeto em estudo (2018).

Para as características hidráulicas da adutora têm-se os dados a seguir:

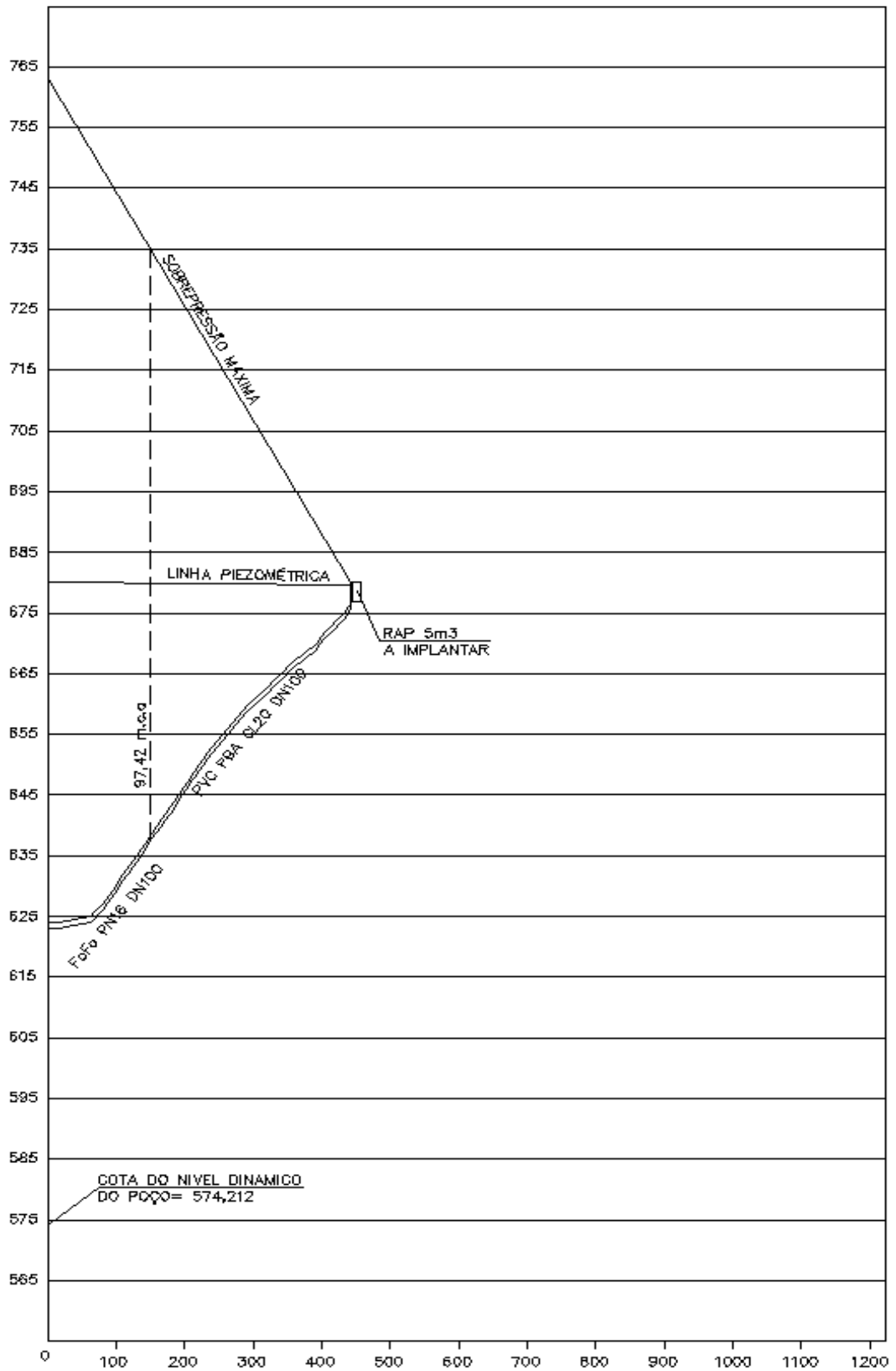
Figura 6 – Especificações da adutora de água bruta (AAB 01) por recalque

- Q (vazão)	5,00 l/s;
- Comprimento (Primeiro Trecho)	150,00 m;
- Material	FoFo PN16;
- Diâmetro	DN100;
- Comprimento (Segundo Trecho)	296,00 m;
- Material	PVC PBA CL20;
- Diâmetro	DN100;
- Comprimento Total	446,00 m;
- Velocidade	0,64 m/s;
- Cota de Chegada ao RAP 5m3	680,080 m;
- Cota de Nível Dinâmico	574,212 m;
- Hf total	2,70 m;
- Desnível geométrico máximo de recalque	105,87 m;
- Altura manométrica	108,57 m.

Fonte: Projeto em estudo (2018).

De acordo com o gráfico piezométrico que será apresentado a seguir, a pressão máxima na tubulação será de 188,70 m (18,87 kgf/cm²). Esta pressão máxima é encontrada na cota de instalação da Bomba. A pressão encontrada no início da AAB 01 será de 138,79 m (13,87 kgf/cm²). Sendo necessária a utilização de 150,00 metros de tubo FoFo DN100 PN16 que suporta pressões de até 160,00m (16,0 kgf/cm²) e 296,00 metros de tubo PVC PBA CL20 DN100 que suporta pressões de até 100,00m (10,0 kgf/cm²). Apresenta-se a seguir o perfil hidráulico da adutora.

Figura 7 – Perfil hidráulico da adutora (AAB 01)



Fonte: Projeto em estudo (2018).

3.2 Metodologias do dimensionamento econômico realizado

No presente estudo, foram aplicadas três metodologias de dimensionamento econômico de adutoras. Frente a isso, a Fórmula de Bresse foi utilizada, visto que serve como um pré-dimensionamento e possui o propósito de aproximá-lo ao real dimensionamento para que seja possível usufruir dos parâmetros relacionados à natureza econômica da adutora. Além disso, esta Fórmula possui ênfase na vazão de adução e no diâmetro da tubulação tendo em vista o coeficiente incerto referente à Bresse.

3.3 Método de Bresse

Primeiramente usou-se a fórmula de Bresse para determinar o diâmetro de anteprojeto, que será utilizado posteriormente para comparar o método dos pesos das tubulações com o método da variação linear dos custos das tubulações, e encontrar assim o valor do diâmetro ótimo.

Para a constante K_{Bresse} da fórmula de Bresse, partiu-se de um valor no intervalo de 0,7 a 1,6. Utilizando a equação 1 para uma vazão de projeto de 0,005 m³/s, obtêm-se a relação entre K_{Bresse} e D (diâmetro), e utilizando a equação 4 têm-se a relação de K_{Bresse} e V (velocidade) como mostra os respectivos valores na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Constante de Bresse variando de acordo com o diâmetro e velocidade

K_{Bresse}	D (m)	V (m/s)
0,70	0,0495	2,5984
0,75	0,0530	2,2635
0,80	0,0566	1,9894
0,85	0,0601	1,7623
0,90	0,0636	1,5719
0,95	0,0672	1,4108
1,00	0,0707	1,2732
1,05	0,0742	1,1549
1,10	0,0778	1,0523
1,15	0,0813	0,9628
1,20	0,0849	0,8842
1,25	0,0884	0,8149
1,30	0,0919	0,7534
1,35	0,0955	0,6986
1,40	0,0990	0,6496
1,45	0,1025	0,6056
1,50	0,1061	0,5659
1,55	0,1096	0,5300
1,60	0,1131	0,4974

Fonte: Os autores (2022)

Uma vez que a constante k_{Bresse} é função de numerosos fatores, como foram descritos no referencial, possuindo assim um grau de incerteza elevado, deve ser arbitrada conforme experiência do projetista. Uma das formas de determinar a constante de Bresse é através da velocidade, o que seria mais economicamente viável.

De acordo com Azevedo Netto (1998) a velocidade máxima da água nas tubulações obedece alguns fatores como: condições econômicas, condições relacionadas ao bom funcionamento dos sistemas, possibilidade de ocorrência de efeitos nocivos (sobrepessão prejudiciais), controle da corrosão, ruídos desagradáveis, limitações da perda de carga e erosão (desgaste das tubulações e peças).

Através da tabela 1 mostrada e pela equação da continuidade (equação 03) dada pela velocidade ser igual à vazão dividida pela área da seção transversal do tubo, nota-se que a velocidade diminui com o aumento do diâmetro. Pela equação da perda de carga, quanto maior a velocidade maior será o valor da perda de carga, o que leva a golpes de aríete e desgaste da tubulação, ao contrário, quanto menor a velocidade maior chance de obstrução das tubulações por deposição de sedimentos.

Segundo Ávila (1975), para tubulações de sucção em bombas centrífugas a velocidade deve estar compreendida entre 0,50m/s. à 1,00m/s. o que gera um coeficiente de Bresse entre 1,10 e 1,60, já para tubo de descarga em bombas essa constante varia de 0,70 à 1,00. Considerando o projeto a ser analisado, admite-se uma velocidade de 0,75m/s obtendo um K_{Bresse} de 1,30 temos um diâmetro respectivo de 0,092m, sendo o diâmetro comercial mais próximos de 100mm (DN100).

Com o diâmetro já definido analisaremos dois materiais para a tubulação, utilizados em linhas de recalque de água bruta, sendo os ideais para redes adutoras por suportarem maiores pressões os descritos a seguir.

- Ferro Fundido(fofoPN 16) que suporta pressões de até 1,6 MPa ou 16,0 kgf/cm²;
- *Poly Vinyl Chloride* PVC PBA (Policloreto de Vinila) de classe 20 (pressão de serviço e temperatura de 20°C de 1,0 MPa ou 10,0 kgf/cm²).

3.4 Cálculos das perdas de carga no sistema

Para o cálculo da perda de carga do sistema, através da fórmula de Hazen-Willians (equação 26) é necessário calcular as perdas de carga localizada, através das peças especiais existentes no projeto da tubulação adutora (figura 3), e a tabela 1 para valores de k, chegou ao valor de k_{Li} igual à 16,65.

Segue a tabela 3 definindo os valores de k a ser multiplicado pelo número de peças utilizadas no sistema.

Tabela 3 - Cálculo perda de carga localizada

Peças	Quantidade	k	k_i
Crivo	1	0,75	0,75
Entrada	1	0,5	0,5
Curva 90°	1	0,4	0,4
Válvula de retenção	1	2,5	2,5
Registro de gaveta	2	0,2	0,4
Tê passagem lateral	1	1,3	1,3
Cotovelo 45°	2	0,4	0,8
peças ao longo da adutora	1	10	10
Valor total de k_i =			16,65

Fonte: Os autores (2022)

A vazão de projeto é de 5 L/s e o diâmetro comercial são utilizados o cálculo através da Fórmula de Bresse no anteprojeto, DN100. Assim fez-se os cálculos da velocidade através da equação 3, utilizando os diâmetros internos respectivos de cada tubulação. Assim para o cálculo da perda de carga localizada através da equação 27, considerando a aceleração da gravidade como 9,81 m/s², têm-se:

Tabela 4 – Cálculo da Perda de carga localizada – DN100

PVC PBA		
Di (m)	V (m/s)	h_{fli} (m)
0,1	0,6366	0,3439
Ferro Fundido PN16		
Di (m)	V (m/s)	h_{fli} (m)
0,108	0,5458	0,2528

Fonte: Os autores (2022)

Com a perda de carga localizada calculada, determina-se então a perda de carga contínua, para um comprimento de tubulação L = 446m e Q=0,005m³/s.

- PVC PBA – C_{HW} =140

$$h_f = 10,646 \cdot \frac{446}{0,1^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,005}{140}\right)^{1,852} = 2,0435 \text{ m}$$

- FOFO PN16 – C_{HW} =135

$$h_f = 10,646 \cdot \frac{446}{0,108^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,005}{135}\right)^{1,852} = 1,5026 \text{ m}$$

Somando-se as perdas de carga do sistema (equação 28) para cada material têm-se a perda de carga total calculada.

- PVC PBA – C_{HW} =140

$$h_{ftotal} = 0,3439 + 2,0435 = 2,3874 \text{ m}$$

- FOFO PN16 – C_{HW} =135

$$h_{ftotal} = 0,2528 + 1,5026 = 1,7554 \text{ m}$$

O desnível do Poço C01 até o reservatório apoiado (RAP) de 5 m³ sendo a cota do nível dinâmico equivalente a 574,212 m e a cota de chegada ao RAP igual a 680,08 tem-se a altura geométrica (H_g) = 105,86m.

$$H_{\text{man}} = H_g + h_{\text{ftotal}} \quad (43)$$

Assim temos H_{man} igual à 108,2574m para a tubulação em PVC PBA e de 107,6255 para a tubulação de ferro fundido PN16.

3.5 Cálculos para o projeto.

O coeficiente de amortização pela equação 18 é calculado para um período de 50 anos considerando a taxa de juros básica acumulada ao ano até março de 2022 igual a 11,75%, tem-se o coeficiente de amortização $\alpha = 0,1179$.

Para os cálculos do custo de serviço foi analisado os valores dados pela planilha da caixa econômica SINAPI_Planilha de Insumos e Composições desonerado, considerando um DBI de 32,82%.

Tabela 5 – Custo de serviços referentes aos movimentos de terra DN 100.

Material	Custo por tipo de Serviço (R\$/m de vala)				Custo Total de Serviços (R\$/m)
	Escavação	Aterro	Bota-Fora	Assentamento do Tubo	
Fofo PN16	7,11	11,25	2,04	4,81	25,21
PVC PBA classe 20	4,73	6,93	1,41	2,66	15,73

Fonte: Adaptado SINAPI (2009)

Tabela 6 – Custo de implantação, por metro linear, das tubulações de PVC PBA CL20 com classe de pressão 10 (1 MPa), fabricante Tigre.

Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Custo do Tubo (R\$/m)	Custo dos Serviços (movim.de terra) (R\$/m)	Custo da Tubulação Instalada - C(D) (R\$/m)
100	100	106,07	15,73	121,80

Fonte: Adaptado SINAPI (2009)

Tabela 7 – Custo de implantação, por metro linear, das tubulações de fofo PN16, fabricante Saint Gobain.

Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Custo do Tubo (R\$/m)	Custo dos Serviços (movim. de terra) (R\$/m)	Custo da Tubulação Instalada - C(D) (R\$/m)
100	108,4	600	25,21	625,21

Fonte: Adaptado de Sinapi (2009)

Para aduções de água por gravidade se considera um período de 24h. No caso de sistemas de recalque são utilizados normalmente períodos de bombeamento de 16h a 20h, devido à necessidade de manutenção dos equipamentos eletromecânicos, falta de energia, etc.

Outro fato a ser considerado é o bombeamento fora de ponta, do sistema elétrico, que poderá diminuir custos com energia elétrica. Esse período compreende de 3hs a ser definida pela concessionária entre as 17hs às 22hs de segunda a sexta-feira. Considerando a carga horária de bombeamento de acordo com o projeto de 16 horas diárias, temos um total de 5.840 horas de funcionamento do conjunto motor-bomba ao longo de um ano.

Analisando o custo de energia elétrica, considerando atividade de abastecimento de água, órgão público/privado de acordo com o centro de distribuição de energia de Minas Gerais (CEMIG) temos:

Tabela 8: Custo de energia elétrica em R\$ por kWh em Minas Gerais.

Tarifa	Bandeira Verde (R\$/kWh)	Bandeira Verde (R\$/kWh)	Bandeira Verde (R\$/kWh)	Bandeira Verde (R\$/kWh)	Bandeira Escassez Hídrica (R\$/kWh)	Média (R\$/kWh)
B3 – Demais Classes – Intermediário	0,79218	0,81092	0,83189	0,8871	0,93818	0,852054

Fonte: CEMIG (2022)

É necessário para o dimensionamento econômico da rede adutora o cálculo do rendimento da bomba (η), encontrado através da fórmula da potência (equação 22), convertendo para cavalos (cv):

$$\eta = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot P_{ot}} \quad (44)$$

Sendo P_{ot} a potência da bomba em cv, γ é o peso específico da água (líquido a recalcar) definido como 1000kgf/m³, Q a vazão de operação da bomba, em m³/s; H_{man} em m.c.a e η o rendimento esperado da bomba apresentado em decimais.

Com o modelo da bomba descrito na metodologia (bomba R20A-10 610), através da figura 8 abaixo, é possível traçar o gráfico da curva da bomba.

Figura 8 – Características hidráulicas para diversos modelos de bomba

TABELA DE SELEÇÃO																	
Modelo	Potência (cv)	Estágios	Características Hidráulicas								Peso (Kg)	Ø mínimo do Poço (pol.)	Ø Recalque (pol.)	Dimensões (mm)			
			Vazão (m³/h)											Ø do Conjunto	Motor	Bombeador	Conjunto
			0	12	14	16	18	20	22	24							
Altura Manométrica Total (m.c.a.)																	
R20A-01 500	1	1	17,5	14	13,5	12,5	11	10	8,5	7	42,1	6"	2 1/2" BSP	147	454	461	915
R20A-02 500	2	2	35	28	27	25	22,5	20	17	13	49,1				479	508	987
R20A-03 500	3	3	53	42,5	40,5	37,5	33,5	29,5	25	19	55,3				519	555	1074
R20A-04 500	4,5	4	70	57	54	50	45	40	34	27	58,5				579	602	1181
R20A-05 500	5,5	5	88	72	67,5	63	56	50	42,5	33,5	65,4				599	649	1248
R20A-06 500	6	6	106	87	82	78	71	61,5	53	44	69,7				709	696	1405
R20A-07 500	7	7	122	100	95	90	81	71	61	49	71,6				709	743	1452
R20A-08 610	8	8	140	115	110	103	94	83	72	60,5	81,4				744	790	1534
R20A-09 610	9	9	157	128	122	114	104	92	79	66	83,6				744	837	1581
R20A-10 610	11	10	175	142	136	128	116	104	89	75	88,5				744	884	1628
R20A-11 610	11	11	192	155	148	139	126,5	112	96	80	93,5				744	931	1675
R20A-12 610	12	12	209	170	162	151	138	123	105	88	99,8				824	978	1802
R20A-13 610	13	13	227	184	175	163	148	132	112	93	101,4				824	1025	1849
R20A-14 710	15	14	246	201	192	180	163	146	124	104	123,1				987	1072	2059
R20A-15 710	16	15	264	214	204	192	174	154	131	110	131,2				1047	1119	2166
R20A-16 710	17	16	281	228	218	205	187	164	141	117	135,3				1047	1221	2268
R20A-17 710	18	17	298	242	232	218	198	174	148	123	137,4				1047	1268	2315
R20A-19 710	19	19	333	270	259	241	219	192	165	136	144,2				1067	1362	2429
R20A-20 710	20	20	351	284	273	253	230	202	173	142	146,3				1067	1409	2476
R20A-22 710	22,5	22	386	314	302	282	257	222	193	157	155,9				1097	1558	2655
R20A-24 760	25	24	422	347	334	312	289	248	215	177	162,3				1152	1652	2804

Corpo da válvula, corpo de sucção e corpo de estágio em ferro fundido. Rotor e crivo em aço inox. Difusor incorporado ao corpo de estágio. Para verificar a possibilidade de alteração nos componentes, consulte o Suporte Técnico da Fábrica através do 0800 648 0200.

Fonte: ISO (2012)

Tabela 9 – Curva da bomba Modelo R20A 10 610

Q (m³/h)	0	12	14	16	18	20	22	24
H _{man} (m)	175	142	136	128	116	104	89	75

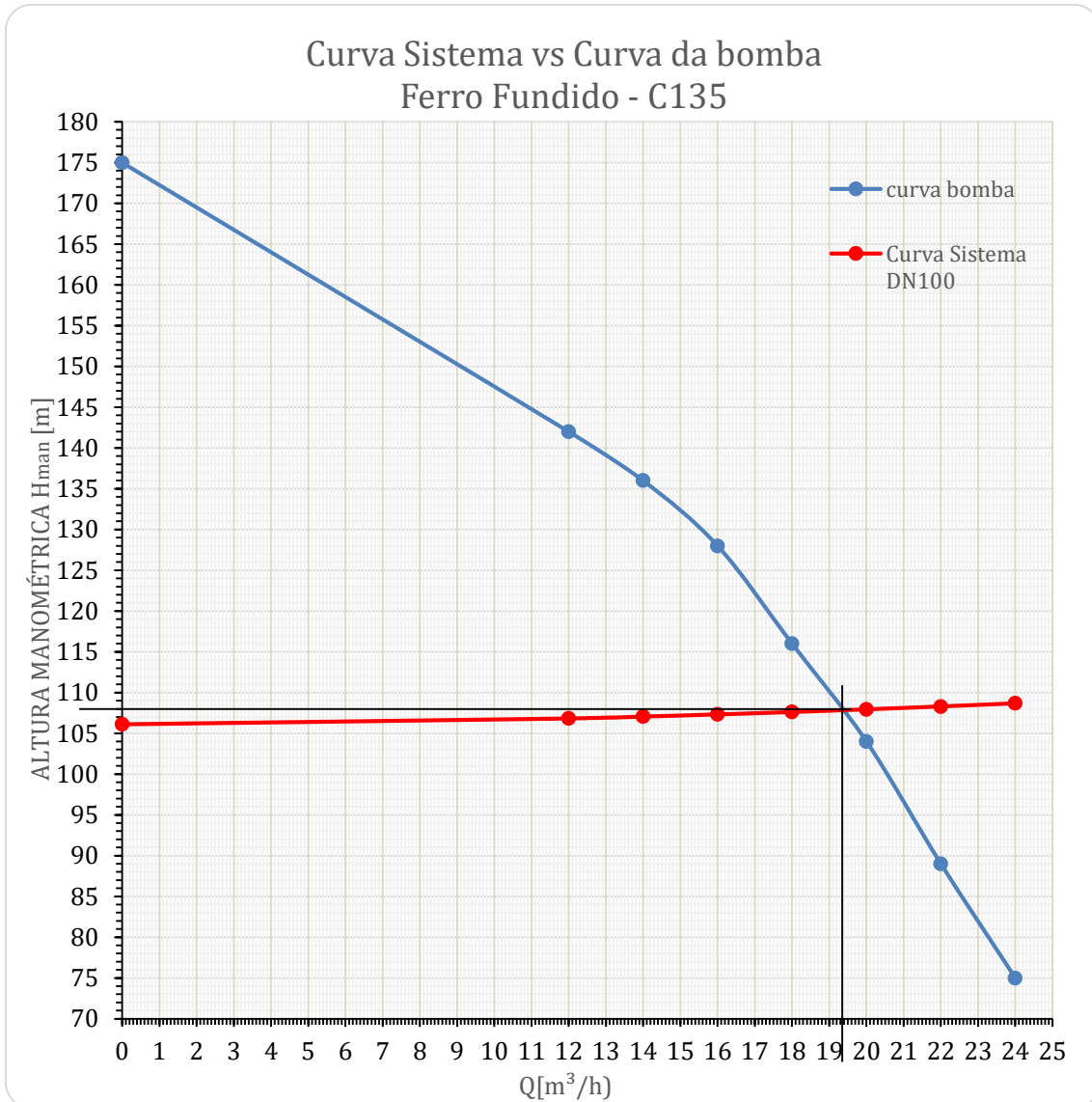
Fonte: Adaptado ISO (2012)

Pela fórmula de Hazen-Williams traça-se a curva do sistema afim de encontrar o ponto de operação da bomba para o cálculo do rendimento.

Tabela 10 – Curvas dos Sistemas para diferentes materiais

Fofo PN16		PVC PBA CL20	
Hazen-Willians $C_{HW}=135$		Hazen-Willians $C_{HW}=140$	
Q (m ³ /h)	Hman (m)	Q (m ³ /h)	Hman (m)
0	106,1228	0	106,2139
12	106,8320	12	107,1783
14	107,0663	14	107,4970
16	107,3310	16	107,8569
18	107,6255	18	108,2574
20	107,9492	20	108,6978
22	108,3018	22	109,1773
24	108,6829	24	109,6954

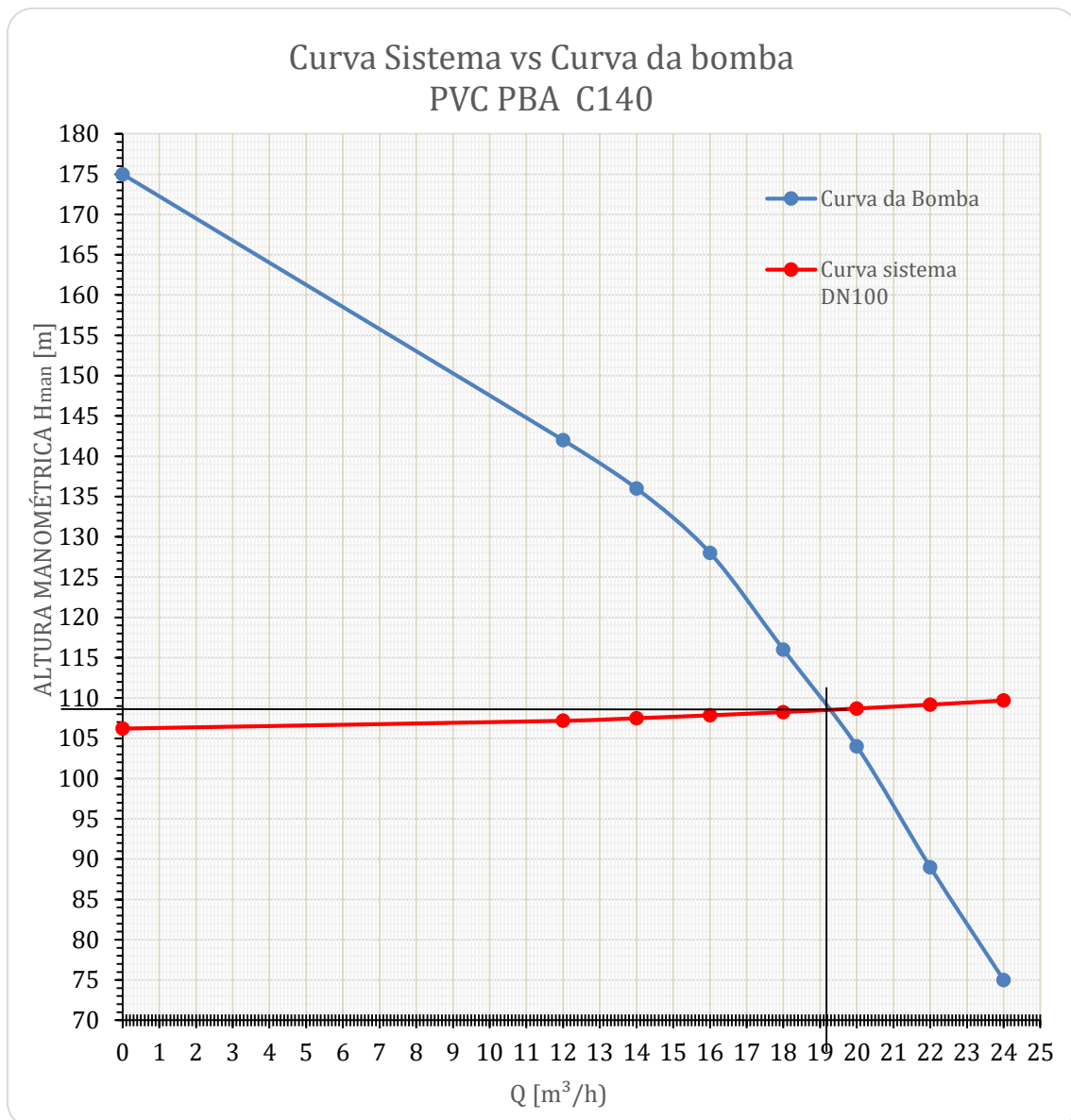
Gráfico 1 – Curva da Bomba *versus* Curva do Sistema para tubulação de ferro Fundido PN16.



Fonte: Os autores (2022)

Obtendo através do ponto de encontro entre a curva da bomba e a curva do sistema o ponto de operação que resulta em uma altura manométrica H_{man} de 107,89m e uma vazão ótima de 19,39m³/h equivalente a 0,005386m³/s para a tubulação de ferro fundido PN16.

Gráfico 2 – Curva da Bomba vs Curva do Sistema para tubulação de PVC PBA



Fonte: Os autores (2022)

Obtendo o ponto de operação que resulta em uma altura manométrica H_{man} de 108,65m e uma Vazão ótima de 19,28m³h equivalente a 0,005356m³/s para a tubulação de PVC PBA.

Com os dados do projeto de Pot igual a 11cv e considerando o peso específico da água igual a 1000 kgf/m³ temos um rendimento de bomba para as diferentes tubulações.

- PVC PBA: $\eta = 70,54\%$;
- Fofó PN16: $\eta = 70,44\%$.

De acordo com o diâmetro de anteprojeto (DN 100) foram calculados todos os dados necessários para o cálculo do diâmetro ótimo. Os dados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Variáveis necessárias para o cálculo do diâmetro ótimo.

(L) Comprimento total da adutora (m)	L_{Total} = 446,00m	
(D) Diâmetro comercial (mm)	100 mm	
(a) coef. de amortização (decimal)	0,1180	
(p) preço do kwh (R\$)	0,852 R\$/kWh	
(n) tempo anual de bombeamento (h)	5840 h	
Materiais	PVC PBA classe 20	Fofo PN16
(H_{man}) Altura manométrica (m)	108,65 m	107,89m
(Q) Vazão de demanda (m³/s)	0,005356m ³ /s	0,005386 m ³ /s
(η) Rendimento do grupo moto-bomba	0,7054	0,7044
C(D) Custo final de instalação (R\$/m)	121,80 R\$/m	625,21 R\$/m
Coeficiente de Hazen-Willians	140	135

Fonte: Os autores (2022)

De posse dos dados, nos itens seguintes será calculado o novo diâmetro do sistema adutor baseado nas metodologias do peso dos condutos e a variação linear dos custos.

3.6 Cálculo do novo diâmetro – Método baseado no peso das tubulações.

Iniciam-se os cálculos através do valor do custo por metro de comprimento e por metro de diâmetro (equação 16). Para PVC PBA:

$$C(D) = C \cdot Di^2 \rightarrow C = \frac{C(D)}{Di^2} = \frac{121,80}{0,1^2} = 12.180,00 \frac{R\$}{m \cdot m^2}$$

Utilizando o mesmo cálculo para fofo PN16 temos um custo de:

$$C(D) = C \cdot Di^2 \rightarrow C = \frac{C(D)}{Di^2} = \frac{625,21}{0,1084^2} = 53.206,83 \frac{R\$}{m \cdot m^2}$$

Os custos anuais de instalação do sistema, equação 19, são:

$$C_{inst} = C \cdot Di^2 \cdot L \cdot a$$

$$C_{instPVC} = 12180,00 \cdot 0,1^2 \cdot 446 \cdot 0,1180 = 6.410,09 \frac{R\$}{ano}$$

$$C_{instFOFO} = 53.206,83 \cdot 0,1084^2 \cdot 446 \cdot 0,1180 = 32903,55 \frac{R\$}{ano}$$

Já os custos anuais de energia elétrica são dados por:

$$C_e = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H_{man}}{\eta} \cdot n \cdot p$$

$$C_{ePVC} = \frac{9,81 \cdot 0,00535 \cdot 108,6}{0,7050} \cdot 5840 \cdot 0,852 = 40.270,20 \frac{R\$}{ano}$$

$$C_{eFOFO} = \frac{9,81 \cdot 0,00545 \cdot 107,9}{0,7139} \cdot 5840 \cdot 0,852 = 40.269,59 \frac{R\$}{ano}$$

Para os custos totais anuais, somam-se os custos de instalação e energia, conforme:

$$C_{TPVC}(D) = C_{inst} + C_e = 6.410,09 + 40.270,20 = 46.680,29 \frac{R\$}{ano}$$

$$C_{TFOFO}(D) = C_{inst} + C_e = 32.903,55 + 40.269,59 = 73.173,14 \frac{R\$}{ano}$$

E por final, o diâmetro ótimo para PVC PBA será:

$$D_{OT} = 2,239 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,14556} \cdot \left(\frac{Q^{0,415}}{C_{HW}^{0,27}} \right)$$

$$D_{OT} = 2,239 \cdot \left(\frac{5840 \cdot 0,852}{12180,00 \cdot 0,1180 \cdot 0,7050} \right)^{0,14556} \cdot \left(\frac{0,00535^{0,415}}{140^{0,27}} \right)$$

$$D_{OT} = 0,08485 \text{ m} = 84,85 \text{ mm}$$

Aproximando para o diâmetro comercial mais próximo será: $D_{ot} = 100 \text{ mm}$.

O diâmetro ótimo para fofo PN16 será:

$$D_{OT} = 2,239 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,14556} \cdot \left(\frac{Q^{0,415}}{C_{HW}^{0,27}} \right)$$

$$D_{OT} = 2,239 \cdot \left(\frac{5840 \cdot 0,852}{53206,83 \cdot 0,1180 \cdot 0,7139} \right)^{0,14556} \cdot \left(\frac{0,00545^{0,415}}{135^{0,27}} \right)$$

$$D_{OT} = 0,069563 \text{ m} = 69,53 \text{ mm}$$

Aproximando para o diâmetro comercial mais próximo será: $D_{ot} = 75$ mm.

Este mesmo procedimento foi feito para cada um dos diâmetros gerados para os diferentes K_{Bresse} dentro do intervalo de 0,7 a 1,6, seguem os resultados na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Diâmetros ótimos encontrados pelo método baseado no peso das tubulações, para valores de K no intervalo de 0,7 a 1,6.

K	Diâmetro Encontrado (m)	D. Ótimo Comercial - PVC PBA CL20 (mm)	D. Ótimo – FOFO PN16 (mm)
0,7	0,0495	DN 100	DN 75
0,8	0,0566	DN 100	DN 75
0,9	0,0636	DN 100	DN 100
1,0	0,0707	DN 100	DN 100
1,1	0,0778	DN 100	DN 100
1,2	0,0849	DN 100	DN 100
1,3	0,0919	DN 100	DN 100
1,4	0,0990	DN 100	DN 100
1,5	0,1061	DN 100	DN 100
1,6	0,1131	DN 100	DN 100

Fonte: Os autores (2022)

3.7 Cálculo do novo diâmetro – Método baseado na variação linear dos custos das tubulações

De acordo com o diâmetro de anteprojeto (DN 100) pelo método de Bresse, seguindo o mesmo passo a passo descrito anteriormente, calculando o valor do custo agora por metro de comprimento e por metro de diâmetro (C), para PVC PBA CL20:

$$C(D) = C \cdot D \rightarrow C = \frac{C(D)}{Di} = \frac{121,80}{0,1} = 1.218,00 \frac{R\$}{m \cdot m}$$

Utilizando o mesmo cálculo para fofo PN16 temos um custo de

$$C(D) = C \cdot D \rightarrow C = \frac{C(D)}{Di} = \frac{625,21}{0,1084} = 5.767,62 \frac{R\$}{m \cdot m}$$

Os custos anuais de instalação do sistema são:

$$C_{inst} = C \cdot Di \cdot L \cdot a$$

$$C_{instPVC} = 1218,00 \cdot 0,1 \cdot 446 \cdot 0,1180 = 6.410,09 \frac{R\$}{ano}$$

$$C_{instFOFO} = 5767,62 \cdot 0,1084 \cdot 446 \cdot 0,1180 = 32903,55 \frac{R\$}{ano}$$

Já os custos anuais de energia elétrica são dados por:

$$C_e = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H_g + h_f)}{\eta} \cdot n \cdot p$$

$$C_{ePVC} = \frac{9,81 \cdot 0,00535 \cdot 108,6}{0,7050} \cdot 5840 \cdot 0,852 = 40.270,20$$

$$C_{eFOFO} = \frac{9,81 \cdot 0,00536 \cdot 107,9}{0,7139} \cdot 5840 \cdot 0,852 = 40.269,59$$

Para os custos totais anuais, somam-se os custos de instalação e energia, conforme:

$$C_{TPVC}(D) = C_{inst} + C_e = 6410,09 + 40270,20 = 46680,29 \frac{R\$}{ano}$$

$$C_{TFOFO}(D) = C_{inst} + C_e = 32903,55 + 40269,59 = 73173,14 \frac{R\$}{ano}$$

E por final, o diâmetro ótimo para PVC PBA pelo método da variação linear dos custos será:

$$D_{OT} = 2,891 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{Q^{0,486}}{C_{HW}^{0,316}} \right)$$

$$D_{OT} = 2,891 \cdot \left(\frac{5840 \cdot 0,852}{1218,00 \cdot 0,1180 \cdot 0,7050} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{0,00535^{0,486}}{140^{0,316}} \right)$$

$$D_{OT} = 0,0926 \text{ m} = 92,60 \text{ mm}$$

Aproximando para o diâmetro comercial mais próximo será: $D_{ot} = 100 \text{ mm}$.

O diâmetro ótimo para fofo PN16 será:

$$D_{OT} = 2,891 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{C \cdot \alpha \cdot \eta} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{Q^{0,486}}{C_{HW}^{0,316}} \right)$$

$$D_{OT} = 2,891 \cdot \left(\frac{5840 \cdot 0,852}{5767,62 \cdot 0,1180 \cdot 0,7139} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{0,00545^{0,486}}{135^{0,316}} \right)$$

$$D_{OT} = 0,0721 \text{ m} = 72,10 \text{ mm}$$

Aproximando para o diâmetro comercial mais próximo será: $D_{ot} = 75 \text{ mm}$.

Este mesmo procedimento foi feito para cada um dos diâmetros gerados para os diferentes KBresse dentro do intervalo de 0,7 a 1,6, seguem os resultados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 – Diâmetros ótimos encontrados pelo método da variação linear dos custos, para valores de K no intervalo de 0,7 a 1,6.

K	Diâmetro Encontrado (m)	D. Ótimo Comercial - PVC PBA CL20 (mm)	D. Ótimo – FOFO PN16 (mm)
0,7	0,0495	DN 100	DN 100
0,8	0,0566	DN 100	DN 100
0,9	0,0636	DN 100	DN 100
1,0	0,0707	DN 100	DN 100
1,1	0,0778	DN 100	DN 100
1,2	0,0849	DN 100	DN 100
1,3	0,0919	DN 100	DN 100
1,4	0,0990	DN 100	DN 100
1,5	0,1061	DN 100	DN 100
1,6	0,1131	DN 100	DN 100

Fonte: Os autores (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente deve-se destacar que as metodologias de dimensionamento econômico estudadas no presente trabalho, assim como as aplicações das mesmas referem-se ao custo relativo às canalizações, suas instalações e do consumo energético necessário para o bombeamento como mostrado no referencial teórico anteriormente.

A parte civil usada em ancoragem da canalização, caixas de registros e dispositivos de manobra e segurança, custos referentes à administração, projeto e parte

ambiental são custos específicos de cada obra, variando de acordo com a região e não possuem relação e influência com a determinação do diâmetro econômico.

Com isso, foram considerados os cálculos utilizados para a obtenção de um novo diâmetro econômico, sabendo que o custo de instalação da adutora ocorre no início da obra e o custo de energia elétrica atua ao longo da duração do sistema, sendo assim, com a finalidade de somar tais custos, foi considerada a amortização dos custos de instalação (α) em 50 anos e ambos os custos foram calculados em valores anuais.

Como alternativa para a não utilização da fórmula de Bresse para o cálculo do diâmetro aproximado de anteprojeto nos métodos baseado no peso dos condutos e da variação linear dos custos, adotou-se também como diâmetro inicial, um valor dentre os diâmetros comerciais existentes para os materiais estudados. Segue as tabelas 14 e 15 abaixo referente aos resultados encontrados.

Tabela – 14 Diâmetros ótimos encontrados para diâmetros de anteprojeto comercial Método baseado no peso das tubulações.

Diâmetro Anteprojeto (mm)	Diâmetro PVC –PBA CL20 (mm)	Diâmetro fofo-PN16 (mm)
50	75	50
75	100	75
100	100	75
150	100	75
200	100	75

Fonte: Os autores (2022)

Tabela – 15 Diâmetros ótimo encontrados para diâmetros de anteprojeto comercial Método da variação linear dos custos

Diâmetro Anteprojeto (mm)	Diâmetro PVC –PBA CL20 (mm)	Diâmetro fofo-PN16 (mm)
50	75	50
75	100	75
100	100	75
150	100	75
200	100	75

Fonte: Os autores (2022)

Os resultados mostraram que para a tubulação de PVC-PBA CL20 o diâmetro que melhor se adequou ao projeto da adutora para a cidade de Posses, é o de 100 mm. Já para o conduto de ferro fundido PN-16, o diâmetro ótimo seria o de 75 mm. Porém, ao

analisarmos a disponibilidade comercial de tal conduto, devido a classe de pressão do material, o mesmo não foi encontrado. Desse modo, considera-se para ambas as tubulações o diâmetro comercial DN100.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho traz como tema o dimensionamento econômico em busca de um diâmetro ótimo para um sistema de captação de água bruta em um poço que irá para um reservatório apoiado de 5m³ no município de Posses, distrito de Leme do Prado, a fim de atender a crescente população, onde a cidade já abastece com 2 reservatórios de capacidade de reservação de 20m³ e 15m³.

Comparou-se duas metodologias de dimensionamento econômico, métodos baseado no peso das tubulações e método da variação linear dos custos por meio da equação de Hazen-Willians, partindo de um pré-dimensionamento através da Equação de Bresse.

A utilização da fórmula de Bresse é um método que traz um resultado apenas aproximado, sendo o valor de K_{Bresse} uma constante dependente das perdas de carga totais na adutora, do custo energético, do regime de bombeamento, do custo de implantação da tubulação e do rendimento do conjunto elevatório, o que aumenta o grau de incerteza dessa equação.

Mesmo encontrando algumas metodologias que ditam um intervalo ao coeficiente K_{Bresse} , os mesmos não resultam em diâmetros ótimos e nada diz sobre uma escolha eficiente dessa constante, ficando a critério de experiência do projetista, podendo ser qualquer valor de K_{Bresse} dentro desse intervalo.

Os métodos baseados no peso das tubulações e da variação linear dos custos foram testados para os materiais de PVC-PBA Classe 20 e Ferro Fundido PN-16, de modo a avaliar o diâmetro utilizado no projeto citado e verificar os custos para os diferentes condutos. Ao analisarmos os intervalos de K_{Bresse} de 0,7 a 1,6, como estabelecidas por Ávila (1975) para velocidades no intervalo de 0,5 a 3,0 m/s; por ambos os métodos apresentados neste trabalho, obteve-se valores de diâmetro ótimo iguais ou com uma pequena variação entre um diâmetro comercial superior ou inferior. Estes resultados

implicam que o coeficiente de K_{bresse} da fórmula de Bresse, não influencia o resultado encontrado.

Para os materiais estudados, os valores dos diâmetros ótimos comerciais encontrados, nas duas metodologias (método baseado no peso das tubulações e o método da variação linear dos custos) foram de 100 mm, uma vez que não existe no mercado DN75 para tubulações de ferro fundido PN 16. Através dos resultados obtidos, nota-se que os dois métodos conduzem a resultados satisfatórios, não havendo superioridade de um sobre o outro, obtendo os mesmos custos.

Referente ao investimento do projeto em relação ao material, o valor final para os condutos de fofo PN16 é aproximadamente 35% maior que o custo final para as tubulações de PVC PBA Classe 20. A escolha do primeiro material no projeto se dá devido à pressão máxima encontrada na cota de instalação da Bomba ser de 13,87 kgf/cm². Sendo necessária a utilização de 150,00 metros de tubo FoFo DN100 PN16 que suporta pressões de até 160,00m (16,0 kgf/cm²) e o restante do comprimento da tubulação, 296,00 metros, a utilização de PVC PBA CL20 que suporta pressões de até 100,00m (10,0 kgf/cm²).

Portanto, é possível concluir que o projeto apresenta a escolha mais econômica visando suas particularidades ao utilizar os diâmetros de 100 mm para ambos os materiais.

REFERÊNCIAS

- AKROS. **Catálogo**: Tubos, conexões e acessórios. Disponível em: <http://akros.com.br/>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- ALZAMORA, F. M.; TÁRREGA, F. S. **Curso de Ingeniería Hidraulica Aplicada a los Sistemas de Distribucion de Água**. Cátedra de Mecánica de Fluidos. Universidade Politecnica de Valencia, Madrid, 1987.
- ÁVILA, G. S. **Hidráulica General**. México, Editora Limusa, 1975.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Projeto de sistemas de distribuição de água**. Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e Controle de Poluição das Águas, CETESB, 335 p. São Paulo, 1975.
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. Editora Edgard Blucher, 670 p. São Paulo, 1998.
- BARABARÁ. Disponível em: <http://www.barbara.ind.br/>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- CARVALHO, F. S. Estudos sobre perdas no sistema de abastecimento de água da cidade de Maceió. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 7, 2004, São Luís. Anais. São Luis: ABRH, 2014.
- CIRILO, J. A. **Hidráulica Aplicada**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- FREIRE, P. K. C. **Estudo comparativo entre metodologias de dimensionamento econômico de adutoras**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.
- GARCEZ, L. N. **Elementos de engenharia hidráulica e sanitária**, 1981.
- HARTMANN, N. I. D. **Projeto de um diâmetro econômico para um sistema de adução de água bruta por recalque**. Panambi: Departamento de Ciências Exatas e Engenharias. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2019.
- LENCASTRE, A. **Hidráulica Urbana e Industrial** - Memórias Técnicas, Volume II. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- MARQUES, J. A.; SOUSA, J. J. **Hidráulica urbana**: sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais. 2. ed. Coimbra, 2009.
- MELO, J. R. C. **Sistemas de abastecimento de água**. Apostila do curso de graduação em engenharia civil. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 1996.
- MELZER, A. **Sur le calcul du diamètre économique d'une conduite de refoulement**. Centre Belge d'étude et documentation des eaux. Janvier, 1964.
- MENDILUCE, E. Cálculo de lãs tuberías de impulsión. **Revista de Obras Públicas**. Enero, 1966.

MISAWA, T. **Tubulação utilizada em sistema de abastecimento de água**: projeto de sistemas de distribuição de água. Companhia estadual de tecnologia e saneamento básico e controle de poluição das águas, CETESB, 335 p. São Paulo, 1975.

NBR 12215. **Projeto de adutora de água para abastecimento público**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

NEUMANN, B. F. **Estudo comparativo entre alternativas de implantação de um sistema de abastecimento de água no município de Cruzeiro Do Sul**. Trabalho de conclusão (Engenharia Civil). Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz Do Sul, 128 f, 2015.

SILVA, J. F. F.; VIEIRA, J. M. P.; HAIE, N. Dimensionamento Otimizado de Sistemas Adutores Elevatórios de Água: uma ferramenta essencial para o planejamento e gestão dos sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Civil – UM**, n. 16, 2013.

SILVA, R. C. A.; GOMES, H. P. **Programa para dimensionamento econômico de instalações de recalque**, Anais do XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, São Paulo, 2003.

SOBRINHO, A. P.; CONTRERA, R. C. **Adutoras**. Apresentação da disciplina Saneamento II. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2019/10/Aula-5-Adutoras.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

TIGRE. **Tubos, conexões e acessórios**. Disponível em: <http://www.tigre.com.br/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

TORRES, H. L. H. **Dimensionamento Econômico de Tubulações em Sistemas de Irrigação Localizada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1998.

TSUTIYA. M. T. **Abastecimento de Água**. 4 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.