



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – PROFESSORA MARIA DA PENHA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

WAMBERTO ALCÂNTARA FARIAS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS PREDIAIS
DE ÁGUA FRIA**

ARARUNA

2017

WAMBERTO ALCÂNTARA FARIAS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS PREDIAIS
DE ÁGUA FRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado na Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Hidráulica.

Orientadora: Prof. Msc. Maria José de Sousa Cordão.

ARARUNA

2017

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F224d Farias, Wamberto Alcântara .
Dimensionamento e otimização de sistemas hidráulicos prediais de água fria [manuscrito] : / Wamberto Alcântara Farias. - 2017.
84 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2018.

"Orientação : Profa. Ma. Maria José de Sousa Cordão, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Sistema Hidráulico Predial. 2. Otimização. 3. Engenharia Hidráulica.

21. ed. CDD 627

WAMBERTO ALCÂNTARA FARIAS

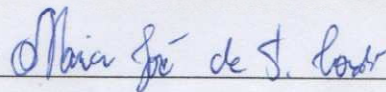
DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS PREDIAIS DE
ÁGUA FRIA

Trabalho de Conclusão de Curso em
Engenharia Civil apresentado na Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Área de concentração: Hidráulica.

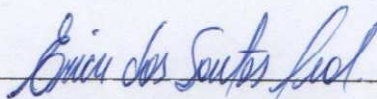
Aprovada em: 13/12/2017.

BANCA EXAMINADORA



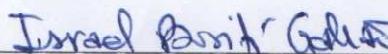
Prof. Me. Maria José de Sousa Cordão (Orientadora)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Erick dos Santos Leal

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Israel Buriti Galvão

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus, por ter me iluminado até aqui, à minha mãe pela paciência e confiança, ao meu pai, pela dedicação, companheirismo e amizade, aos meus irmãos, que sempre estiveram ao meu lado nesta jornada, DEDICO este trabalho a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado a cada semestre para que um dia o sonho de ser engenheiro pudesse se tornar real.

À professora Maria José de Sousa Cordão, que sempre acreditou em mim mais do que eu merecia, procurando sempre me dar oportunidades de crescer academicamente, pela orientação e pela dedicação.

À minha mãe Patrícia de Fátima, por todo amor, carinho, paciência, e preocupação com meu bem estar, demonstrando ser uma mãe muito cuidadosa. Ao meu avô materno (*in memoriam*) que já está fisicamente ausente, e um dia me falou para ser engenheiro civil.

Ao meu pai Vanderlei Farias, que um dia sonhou em me ver formado para que eu fosse um profissional qualificado, sempre me dando todo apoio e acreditando que eu poderia conseguir.

À minha irmã Isabela, que sempre me enxergou como seu exemplo, porém é uma menina muito mais brilhante do que imagina. Ao meu irmão Victor, um menino excelente que sempre me ajudou nas tarefas diárias para que eu pudesse estudar, sendo também um menino com um futuro muito promissor. À irmã caçula Maria, que sempre sente minha falta quando eu me ausento para estudar.

A todos os meus professores da UEPB, em especial ao professor Israel Galvão, que desde as primeiras disciplinas de cálculo me incentivou ao estudo e dedicação para o futuro, me ajudando também neste trabalho de conclusão de curso.

Aos colegas de turma, por estarem comigo durante os anos de graduação, pela amizade e apoio, em especial ao amigo Alex, pelo companheirismo e amizade.

A todos os meus amigos, pelo carinho, confiança e conselhos.

À minha namorada Waldégia Heloísa, por todo o carinho e atenção, e por compartilhar bons momentos comigo, inclusive a minha conclusão de curso.

RESUMO

Na atual prática da engenharia civil, se torna cada vez mais frequente a busca por novos métodos, novas técnicas e novos materiais que tornem a construção de edificações mais rápida, dinâmica e eficiente, em termos técnicos e econômicos. Neste âmbito, a melhoria nos projetos estruturais, arquitetônicos, elétricos e hidráulicos, têm sido pesquisada e estudada, de modo que se obtenham outros caminhos viáveis, assim como meios de otimização de tempo e de custos. Surgem então, novas formas de dimensionamento e novos materiais em todos os setores da construção, como nos sistemas hidráulicos prediais de água (SHPA), a exemplo do uso do PEX (polietileno reticulado), empregado como um material alternativo em relação ao PVC (policloreto de vinila), que é o mais convencional. Neste sentido, este estudo tem o objetivo de avaliar a viabilidade hidráulica, econômica e construtiva da utilização do PEX em um SHPA. Foram analisados dois tipos de instalação de água, um sistema ramificado, mais usual, e um sistema denominado ponto a ponto. Para tal, foi adotada uma edificação residencial hipotética, na qual a análise foi efetuada para atender aos pontos de consumo de água dos apartamentos. O dimensionamento adotou os dois materiais, o PVC e o PEX, efetuando também as verificações hidráulicas e o orçamento econômico para os traçados adotados. Na etapa de otimização do orçamento utilizou-se funções não-lineares obtidas no software LAB Fit, que foram minimizadas por um procedimento iterativo, considerando algumas condições de contorno hidráulicas. A simulação hidráulica demonstrou que o PEX obteve menores perdas de carga em relação ao PVC, o que leva a concluir que, hidraulicamente a sua utilização é vantajosa. Sob o ponto de vista econômico, este novo material é mais dispendioso que o PVC. Porém, vale ressaltar que o PEX traz muitas vantagens, como sua grande flexibilidade, durabilidade, resistência à ruptura, assim como a praticidade de instalação, o que torna a construção mais rápida. A otimização econômica reduziu o diâmetro das tubulações em alguns trechos do dimensionamento, respeitando as restrições hidráulicas. Os resultados evidenciam que o PEX apresenta uma boa viabilidade hidráulica para edificações de grande porte, cuja qualidade e durabilidade é imprescindível. Pela flexibilidade, este novo material pode assumir variadas formas de traçado, viabilizando sua utilização na construção civil, ampliando as possibilidades de inovação nas instalações hidráulicas.

Palavras-chave: Sistema Hidráulico Predial. PEX. Otimização.

ABSTRACT

In the current practice of civil engineering, the search for new methods, new techniques and new materials that make building construction faster, more dynamic and efficient in technical and economic terms is becoming more frequent. In this context, the improvement in structural, architectural, electrical and hydraulic projects has been researched and studied, in order to obtain other viable paths, as well as ways of optimizing time and costs. New dimensions and new materials appear in all sectors of the construction, such as hydraulic building systems (SHPA), such as the use of PEX (crosslinked polyethylene), used as an alternative material to PVC vinyl), which is the most conventional. In this sense, this study has the objective of evaluating the hydraulic, economical and constructive viability of the use of PEX in a SHPA. Two types of water installation, a more usual branched system, and a system called point to point were analyzed. To this end, a hypothetical residential building was adopted, in which the analysis was carried out to meet the water consumption points of the apartments. The sizing adopted the two materials, the PVC and the PEX, also effecting the hydraulic checks and the economic budget for the adopted tracings. In the budget optimization stage, nonlinear functions obtained in the LAB Fit software were used, which were minimized by an iterative procedure, considering some hydraulic contour conditions. The hydraulic simulation showed that the PEX obtained lower losses of load in relation to the PVC, which leads to the conclusion that, hydraulically, its use is advantageous. From an economic point of view, this new material is more expensive than PVC. However, it is worth mentioning that the PEX has many advantages, such as its great flexibility, durability, resistance to rupture, as well as the practicality of installation, which makes the construction faster. The economic optimization reduced the diameter of the pipes in some sections of the design, respecting the hydraulic restrictions. The results show that the PEX presents a good hydraulic feasibility for large buildings, whose quality and durability is essential. Due to its flexibility, this new material can take on various forms of layout, making it feasible to use it in civil construction, increasing the possibilities of innovation in hydraulic installations.

Keywords: Predial Hydraulic System. PEX. Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Utilização do PVC.	16
Figura 2 - Instalação de água com PVC em sistema ramificado.	17
Figura 3 - Tubos em PVC.	18
Figura 4 - Tês em PVC.	18
Figura 5 - Joelhos em PVC.	18
Figura 6 - Composição das camadas da tubulação PEX multicamada.	20
Figura 7 - Ilustração que exemplifica um traçado ponto a ponto.	22
Figura 8 - Distribuidores para tubulações PEX.	22
Figura 9 - Conexões para tubulações em PEX.	23
Figura 10 - Cortador de tubos PEX.	23
Figura 11 - Sistema de prensagem para o PEX.	23
Figura 12 - Curvador para executar os trechos em curva dos tubos em PEX.	24
Figura 13 - Tubos em PEX.	24
Figura 14 - Tubo bainha para a instalação do PEX ponto a ponto.	24
Figura 15 - Ábaco que relaciona pesos relativos, vazões e diâmetros.	28
Figura 16 - Representação geométrica da rugosidade.	29
Figura 17 - Registros de água.	31
Figura 18 - Ábaco que relaciona a vazão em L/min, o diâmetro e a perda de carga unitária.	36
Figura 19 - Gráficos de funções de duas variáveis.	43
Figura 20 - Superfície espacial que é conhecida como parabolóide hiperbólico.	44
Figura 21 - Máximos e mínimos locais de uma função de duas variáveis.	44
Figura 22 - Etapas metodológicas utilizadas.	49
Figura 23 - Planta baixa esquematizando a divisão de cômodos de um apartamento tipo.	50
Figura 24 - Traçado ramificado em planta para o PVC e PEX.	54
Figura 25 - Traçado ponto a ponto para o PEX.	55
Figura 26 - Gráficos de erro médio para as tubulações.	67
Figura 27 - Gráficos de erro médio para o TÊ.	67
Figura 28 - Gráficos de erro médio para o joelho 90° de PVC e o conector fêmea PEX.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades do PVC, roscável e soldável.....	18
Tabela 2 - Principais propriedades físicas do PEX monocamada.	20
Tabela 3 - Principais propriedades físicas do PEX multicamada.....	20
Tabela 4 - Pesos relativos e vazões, em função do aparelho sanitário.	26
Tabela 5 - Rugosidade absoluta de alguns materiais.....	29
Tabela 6 - Coeficientes de perda de carga singular.	30
Tabela 7 - Comprimentos equivalentes para alguns tipos de conexões.	31
Tabela 8 - Diâmetros adotados de acordo com o número de pontos de consumo.....	34
Tabela 9 - Vazões e velocidades de acordo com os diâmetros.....	35
Tabela 10 - Comprimentos equivalentes em metros, para as principais conexões em PEX.	37
Tabela 11 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PVC.	56
Tabela 12 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o PVC.....	56
Tabela 13 - Orçamento para o dimensionamento em PVC.	57
Tabela 14 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PEX ramificado.	58
Tabela 15 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o PEX ramificado.....	59
Tabela 16 - Orçamento para o dimensionamento em PEX ramificado.	59
Tabela 17 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PEX ponto a ponto.....	60
Tabela 18 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o sistema ponto a ponto.....	60
Tabela 19 - Orçamento para o PEX em sistema ponto a ponto.....	61
Tabela 20 - Perdas de carga finais para os traçados em estudo.....	61
Tabela 21 - Gastos finais para os traçados em estudo.	62
Tabela 22 - Otimização econômica do traçado em PVC.....	68
Tabela 23 - Diâmetros adotados e custo final para o PVC.....	69
Tabela 24 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PVC.....	69
Tabela 25 - Otimização econômica do traçado em PEX ramificado.....	70
Tabela 26 - Diâmetros adotados e custo final para o PEX ramificado.....	70
Tabela 27 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PEX ramificado.....	71
Tabela 28 - Otimização econômica do traçado em PEX ponto a ponto.....	71
Tabela 29 - Diâmetros adotados e custo final para o PEX ponto a ponto.	72
Tabela 30 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PEX ponto a ponto...	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 O SISTEMA HIDRÁULICO PREDIAL DE ÁGUA.....	14
2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM SHPA.....	15
2.2.1 Materiais convencionais, o caso do PVC	15
2.2.2 Instalação do PVC em sistemas hidráulicos prediais	17
2.2.3 Materiais não convencionais, o caso do PEX	19
2.2.4 Instalação do PEX em sistemas hidráulicos prediais	21
2.3 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO PREDIAL DE ÁGUA ..	25
2.3.1 Dimensionamento hidráulico com PVC	26
2.3.2 Dimensionamento hidráulico com PEX	34
2.4 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO	38
2.4.1 Programação linear	39
2.4.2 Programação não - linear	40
2.4.3 Método PNL 2000	41
2.4.4 Método PNL 2000 modificado	41
2.4.5 Solver e algoritmo GRG2	42
2.4.6 Funções e otimização de funções	42
2.4.7 Função objetivo	45
2.4.8 LAB Fit ajuste de curvas	47
3 METODOLOGIA	49
3.1 A EDIFICAÇÃO HIPOTÉTICA.....	50
3.2 TRAÇADOS RAMIFICADO E PONTO A PONTO.....	51
3.3 DIMENSIONAMENTO	52
3.3.1 Dimensionamento e orçamento do SHPA utilizando o PVC	52
3.3.2 Dimensionamento e orçamento do SHPA utilizando o PEX	52
3.4 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DOS DIMENSIONAMENTOS	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 TRAÇADO RAMIFICADO PARA O PVC E O PEX.....	54
4.2 TRAÇADO PONTO A PONTO PARA O PEX	55
4.3 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA UTILIZANDO O PVC	56
4.3.1 Parâmetros hidráulicos	56

4.3.2 Orçamento para o PVC ramificado	57
4.4 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA PARA O PEX EM TRAÇADO RAMIFICADO	58
4.4.1 Parâmetros hidráulicos	58
4.4.2 Orçamento para o PEX ramificado	59
4.5 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA UTILIZANDO O PEX EM PONTO A PONTO	60
4.5.1 Parâmetros hidráulicos	60
4.5.2 Orçamento para o PEX ponto a ponto	61
4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO	61
4.6.1 Comparação hidráulica	61
4.6.2 Comparação econômica	62
4.7 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA.....	63
4.7.1 Gráficos e funções para os preços do PVC e do PEX	63
4.7.3 Gráficos de erro	66
4.7.4 Otimização econômica	68
<i>4.7.4.1 Resultados da otimização econômica para o traçado ramificado em PVC</i>	68
<i>4.7.4.2 Resultados da otimização econômica para o traçado ramificado em PEX</i>	70
<i>4.7.4.3 Resultados da otimização econômica para o ponto a ponto em PEX</i>	71
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS	75
ANEXO A – PLANTAS BAIXAS E PERSPECTIVA ISOMÉTRICA.....	80
ANEXO B – TABELAS DE DIMENSIONAMENTO.....	83
B1 – Cálculos e resultados do PVC ramificado	83
B2 – Cálculos e resultados do PEX ramificado	85
B3 – Cálculos e resultados do PEX ponto a ponto	87

1 INTRODUÇÃO

Um sistema hidráulico predial de água (SHPA) é constituído pela associação de válvulas, tubulações, registros e conexões que têm o objetivo de transportar a água desde os reservatórios ou distribuidores, até todos os pontos de consumo de água, equipamentos hidráulicos e sanitários. Historicamente, diversos materiais já foram empregados para o uso em tubulações de um SHPA. O cobre por exemplo era muito utilizado, pois possui elevada vida útil, porém exige cuidados específicos como a mão de obra especializada para sua instalação, além de possuir um alto coeficiente de dilatação e elevada condução térmica, o que pode prejudicar a eficiência do sistema de condução de água. Atualmente, o material mais utilizado para instalações hidráulicas de água fria é o PVC (policloreto de vinila), que pode ser aplicado para diversos fins, como tubos e conexões, sendo o termoplástico mais utilizado na construção civil, com 65% da produção destinada para o setor (Site: Aecweb, 2017)

Porém, outros materiais têm sido utilizados em instalações hidráulicas, como por exemplo o PEX (polietileno reticulado), uma tubulação leve e flexível que dispensa conexões intermediárias, utilizado tanto para instalações de água quente como para água fria (SOUSA, 2011). O PEX possui como principal componente um polímero de baixa densidade, apresentando um bom desempenho, devido à alta tecnologia de fabricação do principal polímero que o constitui, destaca-se principalmente na confiabilidade, durabilidade e segurança do material, sendo muito versátil. Este polímero é usado há cerca dez anos como material para construção civil, e sua utilização em instalações hidráulicas prediais possui diversas vantagens. Contudo, mesmo que o polietileno reticulado se mostre tão eficiente quanto ou ainda melhor que os outros tipos de tubulação, o PVC ainda apresenta uma maior utilização (BRANDÃO, 2010).

Desta forma, este trabalho tem o objetivo de analisar a viabilidade deste novo material, o PEX, comparando-o com o PVC que tem o uso mais disseminado, através da comparação hidráulica, econômica e construtiva entre os dois materiais. Para efetuar esta análise, utilizou-se um projeto de instalação hidráulica de uma edificação residencial hipotética com doze pavimentos, na qual foram adotados dois tipos de sistema de instalação de água, o ramificado e o ponto a ponto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O SISTEMA HIDRÁULICO PREDIAL DE ÁGUA

Um Sistema Hidráulico Predial de Água ou SHPA, é entendido como o conjunto de tubulações, conexões, válvulas, registros, curvas e demais acessórios que uma vez montados e associados, tem a função de transportar a água desde os distribuidores públicos ou reservatórios, até todos os pontos de utilização e equipamentos hidráulicos presentes em uma dada edificação, como por exemplo, torneiras de pias e lavatórios, chuveiros, descargas de bacias sanitárias e entradas de água de banheiras e tanques (CREDER, 2006).

A forma em que este sistema é montado depende do traçado escolhido, que corresponde ao lugar geométrico desenhado em planta e em perspectiva, determinando as posições das tubulações. O traçado é desenhado de acordo com a geometria das alvenarias e disposições construtivas da edificação, procurando atender à todos os pontos de consumo de água de forma abrangente e satisfatória, e depende de fatores como o tipo de construção, posição da alvenaria, altura do reservatório, distância do distribuidor até os equipamentos hidráulicos e a quantidade de pontos necessários de abastecimento, (HELLER E PÁDUA, 2010).

A depender da forma de distribuição final, o sistema hidráulico predial de água pode ser classificado em três tipos mais usuais, o sistema de distribuição direto, o sistema indireto sem bombeamento e o sistema indireto com bombeamento. O sistema direto é aquele em que a pressão de água que é fornecida pelo distribuidor público é suficiente para fazer com que a água alcance todos os pontos de utilização. Quando a pressão não for suficiente, pode ser utilizado o sistema indireto sem bombeamento, que consiste no tipo de traçado que adota um reservatório instalado na parte superior de uma edificação. Neste sistema, o distribuidor público abastece um reservatório, e este, redistribui a água por gravidade à todos os pontos de utilização, sendo o tipo de distribuição mais usual em casas de até dois andares (REALI, 2002).

À medida em que a altura da edificação cresce, se torna complexo levar a água somente por gravidade até os pavimentos mais altos, e para estes casos, é adotado o sistema indireto com bombeamento. Neste tipo de sistema são adotados dois reservatórios, um instalado no térreo da edificação à ser alimentado diretamente pelos distribuidores públicos, e um reservatório superior instalado na cobertura da edificação. Um sistema de bombeamento é então responsável por recalcar a água desde a reserva inferior até o reservatório superior, a partir do qual a água será redistribuída à todos os pavimentos por gravidade (CREDER, 2006).

2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM SHPA

2.2.1 Materiais convencionais, o caso do PVC

O PVC (policloreto de vinila), é um polímero obtido pela reação de polimerização de cloretos de vinila (cloroeteno), no qual a ligação dupla é rompida, permitindo a ligação simples entre as moléculas do cloreto de vinila, sendo um material produzido a partir do sal e principalmente do petróleo (NUNES, 2002).

Existem dois principais processos para obtenção do PVC, a polimerização em emulsão e a polimerização em suspensão. Cada tipo de processo deste resulta em um material com grãos de PVC de tamanhos diferentes, dependendo de suas aplicações. De um modo geral, a produção do PVC é feita misturando sal marinho ou sal gema e água. Esta mistura é então dissociada, gerando cloro, hidróxido de sódio e hidrogênio, e assim o cloro é extraído a partir da eletrólise do sal. Fazendo então a reação com o hidrocarboneto etileno, obtém-se dicloroetano. Em seguida é realizado o processo de pirólise, que consiste no aquecimento em forno a alta temperatura, fazendo com que o dicloroetano seja decomposto. Por fim, é feita a polimerização do monômero de PVC, com a obtenção do produto final (BENVIC, 2010).

A versatilidade de aplicação do PVC é dada devido a incontável gama de combinações de aditivos possíveis que podem ser incorporados à resina base polimerizada de PVC. Esta mistura da resina com plastificantes é chamada de composto de PVC ou composto vinílico, e de acordo com os tipos e quantidades das substâncias adicionadas, torna-se possível moldar diversos artigos de PVC, desde tubulações com aspecto totalmente rígido para distribuição de água nas edificações, até um tubo flexível e com aspecto borrachoso, como por exemplo a mangueira de jardim. Sendo a resina de PVC atóxica e inerte, a escolha de aditivos com estas características permite a fabricação de artigos como filmes, lacres, embalagens, brinquedos e diversos acessórios presentes no cotidiano (NUNES, 2002).

O PVC é um dos polímeros mais utilizados no mundo, sendo o PVC rígido mais aplicado para tubos e encanamentos de água e esgoto, amplamente utilizado na construção civil. A demanda de utilização de PVC para instalações hidráulicas prediais é superior à utilização de qualquer outro material, já que este produto traz facilidade de instalação e segurança (SALGADO, 2010). Este material ainda pode possuir diversas outras utilizações na construção civil, com as finalidades de revestir, proteger e decorar.

A quantidade de aplicações é enorme, como por exemplo as esquadrias e portas sanfonadas, revestimentos com decks, forros e pisos vinílicos, juntas de dilatação, papel de parede, perfil para acabamento cerâmico, rodapé, painéis de parede e perfis protetores de paredes, fechamentos com divisórias internas, persiana interna, venezianas, coberturas, instalações com pisos elevados, dutos de ventilação, mantas de impermeabilização e piscinas, redes de proteção em obras, calhas de piso e impermeabilização (RODRIGUES, 2005). A Figura 1 abaixo apresenta duas das principais aplicações do PVC.

Figura 1 - Utilização do PVC, com forro em (a) e tubulações em (b).



Fonte: <http://modoconstrucao.blogspot.com.br>; <http://eletromaxconstrucao.com.br>.

Além do preço baixo, o PVC possui algumas vantagens que são listadas a seguir:

- É leve, com um peso específico de $1,4 \text{ g/cm}^3$, o que facilita o manuseio;
- Resistente à ação de fungos, insetos, bactérias, e a reagentes químicos;
- Sólido e resistente a choques;
- Bom isolante térmico, elétrico e acústico;
- Impermeável a líquidos e gases;
- Durável, com vida útil em torno de 50 anos;
- Não propaga chamas e é auto extingüível
- Versátil, reciclável e ambientalmente correto;

Como aspectos negativos, o PVC possui baixa resistência à temperatura e a pressão, baixa estabilidade dimensional, além de ter um alto coeficiente de dilatação. No momento de sua incineração, o PVC libera ácido clorídrico (HCL), um componente tóxico. Além do ácido clorídrico, a queima libera também gás carbônico e fuligem.

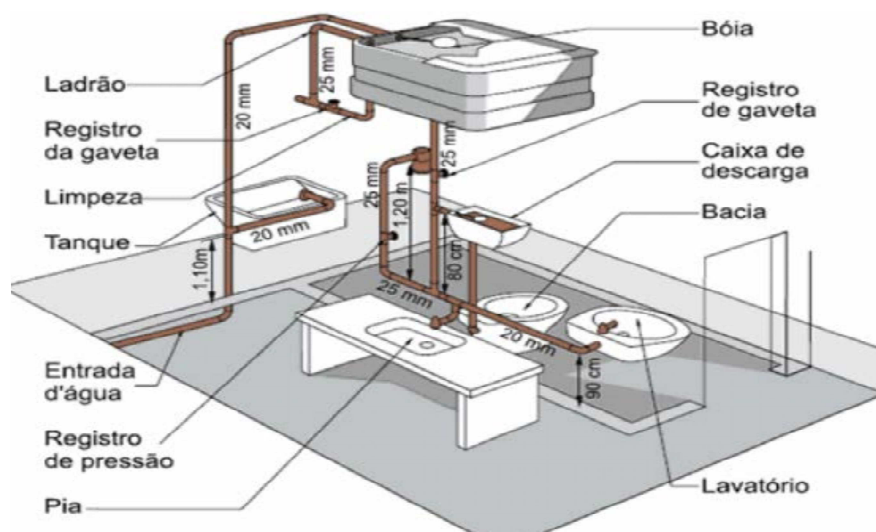
2.2.2 Instalação do PVC em sistemas hidráulicos prediais

Os tubos e conexões em PVC são fornecidos em dois tipos, os soldáveis e os roscáveis. As tubulações roscáveis geralmente tem a cor branca, possuindo paredes mais espessas, nas quais os tubos são ligados às conexões por meio de roscas, que são mais utilizadas para instalações provisórias de água, ou que necessitem de deslocamentos e mudanças de posição. Já as tubulações e conexões soldáveis são o tipo mais empregado nas instalações hidráulicas prediais, disponíveis em geral na cor marrom. Os tubos soldáveis são ligados às conexões por meio de uma cola adesiva, o que fixa o sistema e impossibilita posteriores mudanças, sendo necessário quebra ou corte do material nestes casos. As conexões são utilizadas nos pontos de mudança de direção e junção de duas ou mais tubulações, como por exemplo os tês, joelhos, cotovelos, curvas, válvulas e registros, além de outras (PORTO, 2005).

Tanto a tubulação soldável quanto a roscável são fornecidos com os diâmetros comerciais de 20, 25, 32, 40, 50, 60, 75, 85 e 110 mm, e nos comprimentos de 3 ou 6 metros.

Para a instalação de um sistema hidráulico predial de água, as tubulações em PVC em geral são inseridas dentro das alvenarias, dispoendo os tubos de maneira conveniente para atender a todos os pontos de consumo de água e a todos os equipamentos hidráulicos. Deste modo, como o PVC é rígido, em alguns pontos se faz necessário a utilização de conexões, para que as curvas e junções redistribuam a água para todos os pontos necessários, num sistema denominado de traçado ramificado, ou seja, possuindo nós em alguns locais. A Figura 2 abaixo ilustra um sistema hidráulico predial de água convencional, com o uso de PVC soldável.

Figura 2 - Instalação de água com PVC em sistema ramificado.



Fonte: <http://www.hidrofelix.com.br>.

A Tabela 1 traz algumas propriedades dos dois tipos de tubulações de PVC, a roscável e a soldável.

Tabela 1 - Principais propriedade do PVC, roscável e soldável.

Tipo de tubulação	Temperatura de serviço [°C]	Pressão de serviço [m.c.a]
PVC roscável	20	75
PVC soldável	20	75

Fonte: Catálogo Tigre (2011).

As Figuras 3, 4 e 5 abaixo ilustram as tubulações e algumas das conexões roscáveis e soldáveis.

Figura 3 - Tubos em PVC, roscável em (a) e soldável em (b).



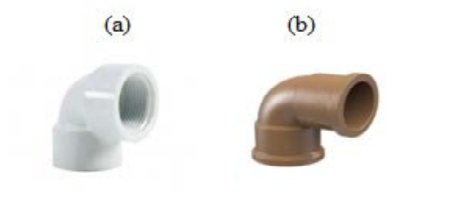
Fonte: Tigre (2017).

Figura 4 - Tês em PVC, roscável em (a) e soldável em (b).



Fonte: Tigre (2017).

Figura 5 - Joelhos em PVC, roscável em (a) e soldável em (b).



Fonte: Tigre (2017).

2.2.3 Materiais não convencionais, o caso do PEX

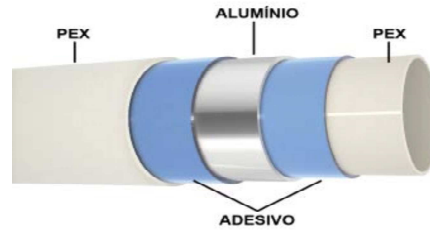
O polietileno reticulado ou simplesmente PEX, consiste em um polímero termoplástico que é formado por longas cadeias de monômero de etileno ou eteno, na qual a polimerização de eteno origina o polietileno, que possui baixa densidade. Este material pode ser produzido através de alguns tipos de polimerização, como radical, catiônica, aniônica ou de coordenação de íons (Revista Techne, 2010). Cada um desses métodos resulta em um tipo diferente de polietileno, sendo classificado em várias categorias diferentes de acordo com a sua densidade. As propriedades mecânicas do polietileno reticulado dependem de variáveis como o peso molecular, o tipo de ramificação, a extensão e a estrutura de cristalização (*site PEX do Brasil*, 2017). Os principais tipos de polietileno existentes são: Ultra polietileno de alto peso molecular (UHMWPE), polietileno de alto peso molecular (HMWPE), ultra polietileno de baixo peso molecular (ULMWPE ou PE-WAX), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno reticulado (PEX ou XLPE), polietileno de média densidade (PEMD), polietileno de alta densidade reticulado (HDXLPE), polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), e polietileno de baixa densidade (PEBD).

Para obtenção do PEX é efetuada uma reticulação em um polietileno de alta densidade (PEHD), que consiste num processo que elimina o hidrogênio do sistema fazendo com que as novas ligações espaciais sejam formadas apenas por carbono e tragam ao novo produto as características principais, como flexibilidade, alta resistência e memória térmica (HIDRO-PEX, 2011).

Na construção civil, o PEX é visto como um produto inovador, que pode dinamizar os processos, porém, sua aplicação está um tanto quanto restrita ao setor de redes sanitárias e em redes de água quente ou fria, instalações de aquecimento central e instalações de gás, recobrimentos de cabo, arame e piso radiante (TIGRE, 2010). No mercado, podem ser encontrados dois tipos de tubulação em PEX, o tubo monocamada (convencional) e o tubo multicamada. O tubo monocamada é constituído basicamente pelo material constituinte PEX, apresentando grande durabilidade, flexibilidade e leveza. Já o tubo multicamada é fabricado com uma camada de alumínio em seu interior, sendo esta camada separada com o auxílio de duas camadas de adesivo entre as partes de PEX e o alumínio, totalizando 5 camadas principais. Este tubo tem a capacidade de absorver as expansões térmicas, evitando as trincas, sendo por este motivo mais utilizado para as instalações de água quente (TIGRE, 2010).

A Figura 6 a seguir ilustra a tubulação em PEX multicamada.

Figura 6 - Composição das camadas da tubulação PEX multicamada.



Fonte: Catálogo Tigre (2011).

As Tabelas 2 e 3 a seguir trazem as principais propriedades dos tubos em PEX monocamada e multicamada, respectivamente.

Tabela 2 - Principais propriedades físicas do PEX monocamada.

Propriedade do tubo	Valor	Unidade
Coefficiente de dilatação	$1,4 \times 10^{-4}$	m/m°C
Temperatura de serviço	80	°C
Temperatura de pico	95	°C
Pressão de serviço	60	mca
Rugosidade	0,004	-
Condutividade térmica	0,35	w/m°C
Densidade	938	Kg/m ³

Fonte: Catálogo Tigre (2011).

Tabela 3 - Principais propriedades físicas do PEX multicamada.

Propriedade do tubo	Valor	Unidade
Coefficiente de dilatação	$2,3 \times 10^{-5}$	m/m°C
Temperatura de serviço	95	°C
Temperatura de pico	110	°C
Pressão de serviço	100	mca
Rugosidade	0,004	-
Condutividade térmica	0,35	w/m°C
Densidade	1470	Kg/m ³

Fonte: Catálogo Tigre (2011).

O PEX possui muitas vantagens, algumas delas são listadas à seguir:

- Grande flexibilidade, o que permite dobramento dos tubos sem danos;
- Muito leve e versátil, proporcionando pequenas perdas de material;
- Alta resistência à corrosão, à agentes químicos, à altas pressões e temperaturas;
- Baixa condutividade térmica, que permite manter a temperatura da água;
- Possibilidade de efetuar instalações de água com reduzido número de conexões;
- Baixa rugosidade, o que proporciona baixa perda de carga linear nos tubos;
- Menores perdas de material na obra, durante o processo construtivo;
- Durável, com duração superior a 50 anos;

As principais desvantagens do PEX são o elevado custo em relação aos demais materiais e a necessidade de ferramentas específicas para sua instalação, além da mão de obra especializada.

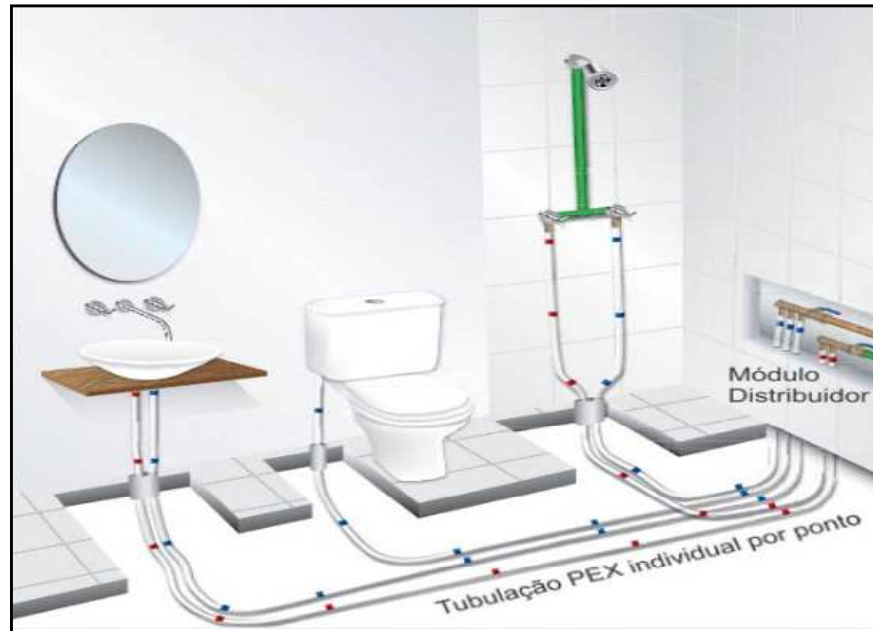
2.2.4 Instalação do PEX em sistemas hidráulicos prediais

A instalação hidráulica predial de água utilizando o PEX pode ser feita de dois modos, adotando-se o traçado ramificado convencional ou utilizando-se o traçado ponto a ponto. O traçado ramificado é feito analogamente às instalações com PVC, nas quais a tubulação é subdividida em trechos, ramais e sub-ramais que atendam a todos os pontos de consumo de água e equipamentos hidráulicos, e para tal, são utilizadas conexões convenientes nos pontos de derivação, denominados de nós.

O sistema ponto a ponto, também chamado de sistema Manifold, consiste num tipo de traçado que une diretamente cada ponto de utilização de água a um distribuidor geral ou caixa de distribuição, por meio de tubulações individuais inseridas em tubos condutores ou tubos bainha, o que permite efetuar a instalação sem a necessidade de conexões intermediárias, diminuindo consideravelmente a perda de carga distribuída. Reduzindo o número de conexões, há uma maior facilidade construtiva e ganho de rapidez na instalação, permitindo concluir uma dada obra em prazos mais curtos (ASTRA, 2010). De tal forma, é possível adotar diversas formas de traçado, o que possibilita dispor as tubulações da maneira mais conveniente possível, permitindo por exemplo a acomodação dos tubos na laje ou dentro de carenagens e forros, sem necessidade de quebra de alvenaria e corte de tubulação, diminuindo o entulho e o desperdício de material, evitando também o enfraquecimento estrutural das paredes.

Este sistema facilita trocas e manutenções, além de reduzir o risco de vazamentos. A Figura 7 ilustra esquematicamente uma instalação de água adotando um traçado ponto a ponto.

Figura 7 - Ilustração que exemplifica um traçado ponto a ponto.



Fonte: <http://pedreiro.com.br>.

Assim, a instalação é dada inicialmente com a chegada da tubulação principal na caixa de distribuição ou caixa de controle. Tal tubulação é ligada a um distribuidor ou módulo distribuidor, que fará a distribuição das tubulações PEX ponto a ponto (EMMETI, 2011).

As conexões para as instalações em PEX podem ser de dois tipos, as de rosca e as de prensar, ambas garantindo uma conexão precisa, totalmente vedada e sem soldas ou termofusões (EMMETI, 2011). Cada tipo de conexão utiliza as ferramentas adequadas e específicas para possibilitar a montagem. As Figuras (8 a 14) a seguir ilustram os principais tipos de conexões em PEX, os tubos e algumas das ferramentas de montagem do sistema.

Figura 8 - Distribuidores para tubulações PEX, duas saídas em (a) e três saídas em (b).



Fonte: Catálogo Tigre (2011).

Figura 9 - Conexões para tubulações em PEX, sendo joelho (a), luva em (b) e TÊ em (c).



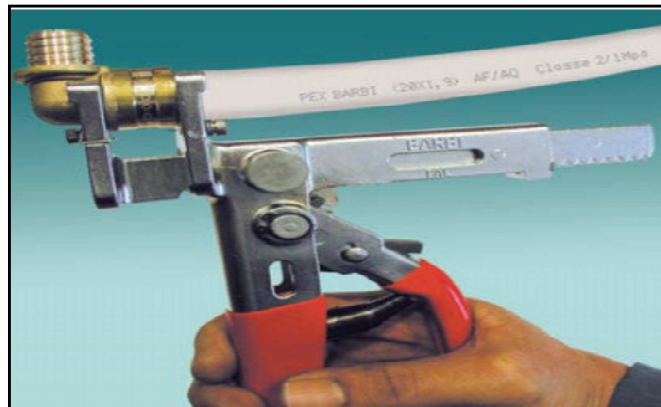
Fonte: Catálogo Tigre (2011).

Figura 10 - Cortador de tubos PEX.



Fonte: Catálogo Tigre (2011).

Figura 11 - Sistema de prensagem para o PEX



Fonte: Catálogo técnico Barbi do Brasil (2017).

Figura 12 - Curvador para executar os trechos em curva dos tubos em PEX.



Fonte: Tigre (2017).

Figura 13 - Tubos em PEX, monocamada em (a) e multicamada em (b).



Fonte: Tigre (2017).

Figura 14 - Tubo bainha para a instalação do PEX ponto a ponto.



Fonte: Tigre (2017).

2.3 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO PREDIAL DE ÁGUA

A movimentação da água nas tubulações possui parâmetros físicos importantes associados a cada seção de escoamento como pressão, velocidade, altura geométrica e vazão. Na maioria das vezes esta seção é circular para condutos forçados, e se consideramos um escoamento como permanente, estas propriedades não variam em cada seção ao longo de todo o escoamento avaliado (PORTO, 2006).

A vazão em um escoamento é definida como a quantidade de fluido que passa em uma determinada seção de área por unidade de tempo, que pode calculada em geral como vazão volumétrica, sendo dada em unidades de L/s ou m³/s. Pode ser definida também a vazão em massa, como a massa que passa em uma determinada seção por unidade de tempo. A vazão, pode ainda ser dada em função da massa específica do fluido, da velocidade e da área de seção (BRUNETTI, 2008).

Já a velocidade é entendida como a rapidez com a qual a água escoar nas tubulações, ou seja, o quanto o fluido se movimenta em um dado intervalo de tempo, medida principalmente em m/s. Ao escoar, o fluido carrega consigo uma certa energia definida como energia de escoamento ou carga, dada basicamente como soma de três parcelas principais, sendo elas a carga potencial de cota, a carga cinética e a carga de pressão. Esta energia, assim como os parâmetros básicos é associada à cada seção do escoamento do fluido. Quando o fluido se move dentro da tubulação, ele perde uma parte desta energia, e esta perda pode ser distribuída ou localizada. A perda de carga distribuída ocorre devido ao atrito na interface entre a água em escoamento e as paredes da tubulação, representando a resistência do material do tubo ao movimento. Já a perda de carga localizada se dá devido às singularidades e conexões existentes, como por exemplo tês, joelhos, registros e curvas, utilizados nos pontos de mudança de direção, encontro de tubulações e restrições, que diminuem a velocidade de escoamento. Tanto a carga quanto a perda de carga são medidas geralmente em metros para efeito de dimensionamento (NBR 5626/98).

A pressão na tubulação é um outro parâmetro importante, e pode ser compreendida como uma quantidade de força, ou distribuição de peso aplicada em uma determinada área superficial, cujas, possuindo unidades de força sobre área, em que para o dimensionamento das instalações prediais, as principais são kgf/cm², mca (metros de coluna d'água) e Pa (Pascal).

Portanto, em instalações hidráulicas, a pressão hidráulica varia conforme a altura da tomada de água que alimenta um determinado ponto, ou seja, a altura da caixa d'água, devendo obedecer à parâmetros mínimos para garantir uma instalação de água eficiente (NBR 5626/98).

2.3.1 Dimensionamento hidráulico com PVC

O dimensionamento de um sistema hidráulico consiste na determinação dos diâmetros das tubulações, de modo que sejam atendidos aos limites de velocidade, de vazão e de pressões, para que a instalação seja eficiente. Para o dimensionamento do sistema convencional em PVC, os padrões técnicos podem ser seguidos de acordo as normas ABNT NBR 7198/93 e a NBR 5626/98, para água quente e água fria, respectivamente. A norma NBR 5626 limita por exemplo o valor de velocidade de escoamento da água, que não deve ser superior a 3 m/s. Quanto à pressão nos pontos de utilização, esta não deve ser menor do que 10 KPa e nem deve ser maior do que 400 KPa, respeitando este intervalo. Assim, inicialmente devem ser estimadas as vazões para cada peça, que pode ser feita através da adoção do método da demanda mais provável, também conhecido como método dos pesos relativos, que relaciona empiricamente um peso probabilístico de utilização à uma dada vazão, para cada tipo de equipamento hidráulico. A Tabela 4 abaixo traz os principais valores empíricos para alguns aparelhos hidráulicos.

Tabela 4 - Pesos relativos e vazões, em função do aparelho sanitário.

Aparelho sanitário	Peça de utilização	Vazão de projeto (L/S)	Peso relativo
Bacia sanitária	Caixa de descarga	0,15	0,3
	Válvula de descarga	1,70	32
Banheira	Misturador	0,30	1,0
Bebedouro	Registro de pressão	0,10	0,1
Bidê	Misturador	0,10	0,1
Chuveiro ou ducha	Misturador	0,20	0,4
Chuveiro elétrico	Registro de pressão	0,10	0,1
Lavadora de louça	Registro de pressão	0,30	1,0
Lavatório	Torneira ou misturador	0,15	0,3
Mictório cerâmico	Com sifão Válvula de descarga	0,50	2,8
	Sem sifão Caixa de descarga, Válvula de descarga ou registro de pressão	0,15	0,3
Mictório tipo calha	Caixa de descarga ou registro de pressão	0,15 por metro	0,3
Pia	Torneira ou misturador	0,25	0,7
	Torneira elétrica	0,10	0,1
Tanque	Torneira	0,25	0,7
Torneira de jardim	Torneira	0,20	0,4

Fonte: ABNT NBR 5626 (1998).

Este método considera o máximo consumo provável de água, ou seja, considera a utilização de um ponto de água por vez, e assim, enquanto um ponto de uso utiliza água um outro não funciona ao mesmo tempo. De tal forma, é feita uma estimativa da probabilidade de cada aparelho ser utilizado, e essa probabilidade é contabilizada com um peso relativo, que é um dado empírico. Um outro método é o do máximo consumo possível, que considera que todos os aparelhos sejam utilizados ao mesmo tempo, ocorrendo um consumo simultâneo de água no trechos considerados, sendo utilizado por exemplo para estabelecimentos comerciais. A escolha do método a adotar depende muito da edificação a ser construída. De um modo geral, o método do máximo consumo provável é o mais utilizado, principalmente para instalações residenciais, visto que em uma residência não ocorre uso simultâneo dos aparelhos, o que traz resultados mais próximos de valores reais (CREDER, 2006).

No dimensionamento devem ser determinados inicialmente os traçados, que serão os lugares geométricos pelos quais as tubulações irão passar para proporcionar a distribuição de água à todos os pontos de utilização. Uma vez determinado o traçado, são verificados os trechos, ramais e sub-ramais de água, para os quais o dimensionamento hidráulico é efetuado, com a determinação das vazões e diâmetros. Para cada trecho, é então determinado o peso relativo de utilização para cada aparelho hidráulico conectado, sendo feito o somatório dos pesos de todos os aparelhos que pertencem ao trecho (CREDER, 2006). Uma vez feito o somatório, a vazão de água estimada de acordo com a demanda mais provável pode ser dada pela Equação (1):

$$Q = C \times \sqrt{\sum P} \quad (1)$$

Onde:

C = Coeficiente de descarga = 0,3 L/s, para todos os trechos (NBR 5626/98);

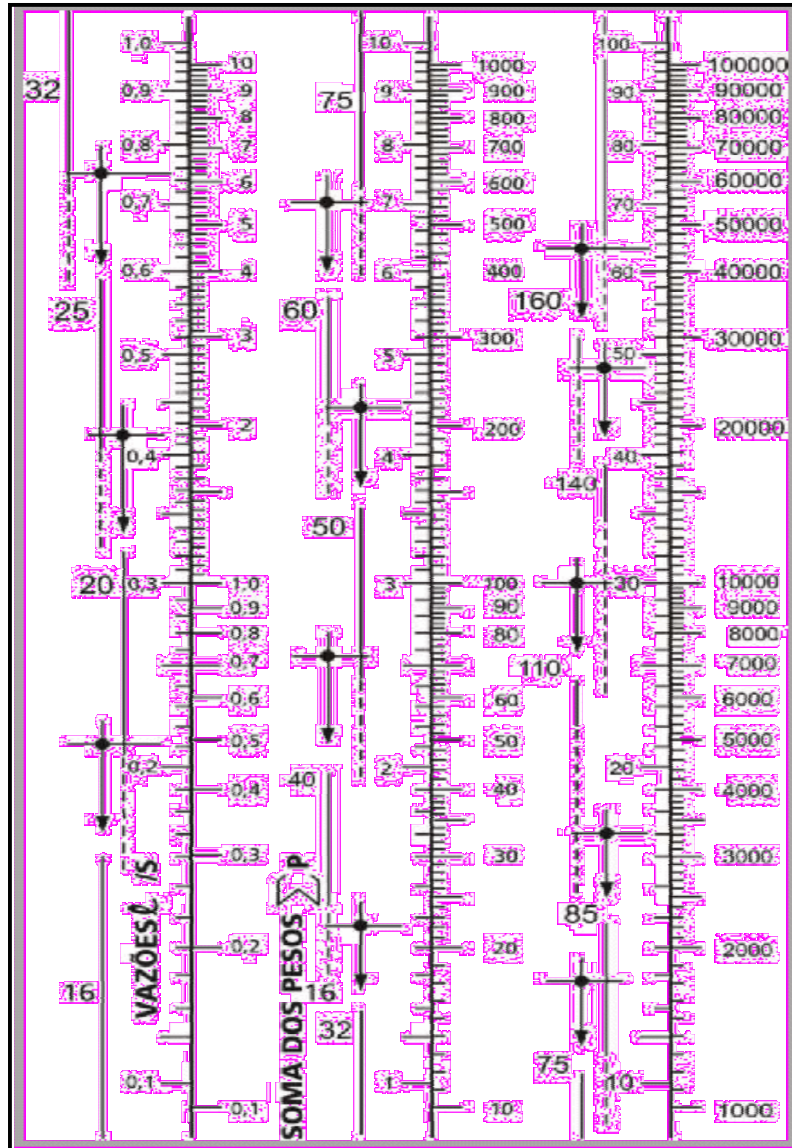
$\sum P$ = Somatório dos pesos no trecho considerado;

Q = Vazão estimada no trecho considerado em L/s;

Uma vez determinada a vazão em cada trecho, o diâmetro pode ser observado diretamente a partir de um ábaco que relaciona o diâmetro com as vazões e pesos relativos para o máximo consumo provável. Por fim, dimensionados os ramais e sub-ramais, são dimensionadas as colunas de distribuição e os barriletes, que interligam os ramais ao reservatório de água ou distribuidor. As normas técnicas citadas trazem os meios de dimensionamento.

O ábaco que relaciona as vazões e pesos ao diâmetro de um determinado trecho a ser dimensionado é mostrado na Figura 15 abaixo.

Figura 15 - Ábaco que relaciona pesos relativos, vazões e diâmetros.



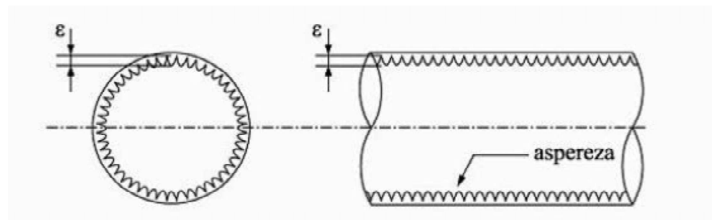
Fonte: ABNT NBR 5626 (1998).

Neste ábaco, o lado esquerdo mais externo de cada eixo traz os valores dos diâmetros em mm, de 16, 20, 25, 32, 40, 50, 60, 75, 85, 110 e 160. Para cada intervalo no qual um dado diâmetro é visto, está associado um intervalo de valores de pesos relativos e vazões, à direita e à esquerda do eixo, respectivamente. Assim, por exemplo, para uma vazão estimada de 0,2 L/s e peso correspondente de 0,45 e o diâmetro é de 16 mm, como mostra o ábaco.

2.3.1.1 Perda de carga nos trechos

A seguir para o dimensionamento, devem ser verificadas as perdas de carga que ocorrem nos trechos. Como foi visto, esta perda poderá ser contínua ou singular. A perda contínua ou distribuída é entendida como a perda por atrito entre o material das paredes da superfície interna da tubulação e a água que está escoando, e seu valor depende do material que constitui as tubulações, sendo função basicamente da rugosidade absoluta do material empregado. A rugosidade pode ser notada nas tubulações como uma pequena dimensão geométrica agregada às paredes do conduto, que tem uma certa aspereza que se contrapõe ao fluxo de água, fazendo com que a água perca energia por atrito (BRUNETTI, 2010). A Figura 16 mostra uma visualização esquemática da rugosidade ou aspereza.

Figura 16 - Representação geométrica da rugosidade.



Fonte: Brunetti (2010).

Assim, quanto maior for este valor de rugosidade, maior será a resistência que o material irá submeter ao escoamento e maior a perda de carga contínua. A Tabela 5 a seguir traz os valores de rugosidade para alguns materiais geralmente utilizados em tubulações de água.

Tabela 5 - Rugosidade absoluta de alguns materiais.

Material	Rugosidade absoluta - ϵ [mm]
Ferro fundido	0,26 a 1,0
Cobre	0,0015
PVC	0,0015
PEX	0,004

Fonte: Porto (2006), Tigre (2010).

Teoricamente, se for utilizado o mesmo traçado, o PVC tem uma perda de carga contínua igual à do cobre, visto que possuem o mesmo valor de rugosidade absoluta. Já em relação ao PEX, a perda do PVC seria menor, pois o coeficiente do PEX é um pouco maior.

O outro modo de perda de carga é a singular, que ocorre nas singularidades que são os pontos de mudança brusca de direção e velocidade, como mudança de diâmetro ou encontros de duas ou mais tubulações. Nestes pontos são utilizados os tês, joelhos, válvulas, registros, cruzetas e entre outras conexões. Cada tipo de conexão é associada a um valor adimensional chamado de coeficiente de perda de carga singular, que é utilizado para calcular as perdas localizadas. Em geral esta perda depende também da velocidade de escoamento, e pode ser determinada de maneira a partir da Equação (2):

$$\Delta H = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Onde:

K = Coeficiente de perda de carga singular;

v = Velocidade de escoamento da água;

g = Aceleração gravitacional em m^2/s ;

ΔH = Perda de carga singular;

A Tabela 6 abaixo traz os valores de alguns coeficientes de perda singular.

Tabela 6 - Coeficientes de perda de carga singular.

Acessório	Coeficiente K	Acessório	Coeficiente K
Tomada d'água	0,5	Registro de gaveta	0,15
Tê de passagem direta	0,9	Registro de pressão	10
Tê de saída lateral	2,0	Válvula de gaveta aberta	0,2
Cotovelo 90° raio longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5,0
Cotovelo 90° raio curto	0,9	Válvula de globo aberta	10
Curva 90°	0,4	Válvula de pé com crivo	10
Curva 45°	0,2	Válvula de retenção	3
Joelho 90°	0,9	Válvula bóia	6

Fonte: Porto (2006), Catálogo Tigre (2010).

Assim, para uma velocidade de escoamento, quanto maior for o coeficiente K , maior será a perda de carga localizada. Quando não for possível calcular a perda singular com o uso do coeficiente ou mesmo por preferência, pode ser utilizado o método dos comprimentos equivalentes, no qual pode ser adotado um comprimento virtual ou teórico para cada tipo de

conexão, comprimento este que produziria uma perda de carga contínua igual ou equivalente à que seria produzida pela conexão considerada (PORTO, 2006). Os valores dos comprimentos equivalentes dependem do tipo de conexão e dos diâmetros, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Comprimentos equivalentes para alguns tipos de conexões.

Diâmetro Nominal DN	Tipo de conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

Fonte: ABNT NBR 5626 (1998).

De todas as conexões e singularidades observadas, os registros em geral produzem mais perda de carga, visto que interferem diretamente no fluxo e vazão de escoamento da água, e que podem barrar totalmente a passagem da água. Porém, eles são necessários em alguns pontos na instalação, para permitir eventuais manutenções. A Figura 17 abaixo ilustra dois tipos de registro, utilizados para permitir ou não a passagem de água, de acordo com a conveniência. São classificados em alguns tipos, de acordo com o modo de funcionamento e aplicação, como por exemplo os registros de gaveta e o registro globo, que são mais utilizados na entrada da distribuição, e o registro de pressão, que é mais utilizado em chuveiros e torneiras (NBR 5626/98).

Figura 17 - Registros de água, de gaveta como em (a), e de pressão em (b).



Fonte: Catálogo Tigre (2017).

De tal forma, no dimensionamento hidráulico, a observação dos traçados adotados permite determinar o comprimento total de tubulação utilizado e o número de conexões e tipos necessários para efetuar a instalação e levar a água até todos os pontos de consumo, o que torna possível calcular a perda de carga singular de cada conexão, e a perda distribuída nos trechos adotados. Inicialmente, deve ser calculada a perda de carga unitária, que consiste na perda de energia que acontece por metro linear. Algumas equações podem ser utilizadas para o cálculo da perda unitária e a formulação empírica de Fair-Whipple-Hsiao traz o valor de vazão do trecho em função do diâmetro e da perda de carga unitária, para tubos rugosos de aço galvanizado e ferro fundido ou para tubos lisos, de cobre ou PVC, como mostrado nas Equações (3) e (4) abaixo, para tubos rugosos de aço o ferro fundido, e lisos de cobre ou PVC, respectivamente:

$$Q = 27,113 \times J^{0,632} \times D^{2,596} ; \quad (3)$$

$$Q = 55,934 \times J^{0,571} \times D^{2,714} . \quad (4)$$

Assim, por manipulação algébrica, as equações podem ser rearranjadas para determinar a perda de carga unitária em função da vazão e do diâmetro, para tubos rugosos e lisos, conforme as Equações (5) e (6), respectivamente:

$$J = 20,2 \times 10^6 \times Q^{1,88} \times D^{-4,88} ; \quad (5)$$

$$J = 8,69 \times 10^6 \times Q^{1,75} \times D^{-4,75} . \quad (6)$$

De tal modo, multiplicado o valor da perda de carga unitária pelo comprimento de um dado trecho obtêm-se a perda total do trecho considerado, como mostra a Equação (7):

$$\Delta T = J \times L . \quad (7)$$

As equações de perda unitária mostradas acima são as recomendadas pela norma NBR 5626 para instalações de água fria. A norma de referência recomenda que a perda singular seja determinada pelo método dos comprimentos equivalentes e traz também uma equação para o cálculo da perda de carga nos registros de pressão e nos hidrômetros (medidores de vazão) em função do coeficiente de perda desta conexão, da vazão e do diâmetro. As Equações (8) e (9) mostram a perda de carga para o registro de pressão e para o hidrômetro, respectivamente:

$$\Delta H = 8 \times 10^6 \times K \times Q^2 \times \pi^{-2} \times D^{-4} ; \quad (8)$$

$$\Delta H = (36 \times Q)^{-2} \times (Q_{\text{máx}})^{-2} . \quad (9)$$

Para as equações mostradas anteriormente:

Q = Vazão na seção considerada;

D = Diâmetro do tubo ou da conexão;

J = Perda de carga unitária;

K = Coeficiente de Perda de carga singular;

ΔH = Perda de carga;

ΔT = Perda total;

L = Comprimento do trecho avaliado;

$Q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima especificada para o hidrômetro;

Assim, uma vez adotado o traçado, e para este determinados os comprimentos dos trechos e as conexões utilizadas, os diâmetros são dimensionados. A seguir com os valores dos diâmetros, é possível determinar as perdas de carga distribuída e singular. Porém, deve ser verificada também a pressão disponível ou pressão de utilização que será fornecida para cada ponto de consumo (NBR 5626/98).

2.3.1.2 Pressão disponível

Cada aparelho de utilização deve fornecer uma pressão de água que seja suficiente para garantir que a água chegue à uma velocidade adequada para o uso. A pressão necessária ou disponível para sistemas indiretos de abastecimento depende da altura na qual o reservatório é instalado. Assim, este parâmetro é determinado trecho a trecho, ou seja, entre dois nós, partindo inicialmente da saída do reservatório, até o nó mais próximo. A seguir, para cada trecho subsequente vão sendo contabilizadas as pressões residuais nos pontos de utilização, que é obtida subtraindo-se da pressão do início do trecho os valores calculados da perda de carga para os tubos e conexões (NBR 5626/98).

Se a pressão residual para um ponto for negativa ou menor o que o valor mínimo especificado, como solução a altura do reservatório deve ser aumentada ou os diâmetros devem ser aumentados, para que a instalação seja satisfatória (CREDER, 2006).

2.3.2 Dimensionamento hidráulico com PEX

Para o dimensionamento hidráulico do PEX em sistema ramificado, são utilizados os mesmos critérios e parâmetros que são adotados no sistema com PVC, segundo as normas de referência, em vista da semelhança entre conexões e traçados.

No caso da instalação em PEX ponto a ponto, o dimensionamento varia em alguns aspectos, em vista do modo de instalação que interliga diretamente o distribuidor à cada ponto de utilização. O dimensionamento pode ser efetuado de acordo com os padrões dos catálogos técnicos de algumas empresas fabricantes, como a Tigre, a PEX do Brasil, Amanco, e entre outras. Estes catálogos trazem os principais diâmetros e conexões utilizadas nas instalações, fornecendo também parâmetros de dimensionamento e características técnicas do material. Assim, o dimensionamento segue o mesmo passo a passo do sistema convencional em PVC, com adoção inicial dos traçados, determinação das vazões, velocidades e pressões, e diâmetros nos trechos de utilização. Em geral, os diâmetros comerciais em instalações com o PEX são de 16, 20, 25 e 32 mm de diâmetro (PEX DO BRASIL, 2017).

Segundo a PEX do Brasil, uma vez determinados os trechos, o diâmetro de um dado trecho pode ser adotado de acordo com o número de pontos de consumo que o trecho alimenta, cujos valores são mostrados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Diâmetros adotados de acordo com o número de pontos de consumo.

Número de pontos de consumo	Diâmetro adotado [mm]
Até 2 pontos de consumo	16
Até 6 pontos de consumo	20
Mais de 6 pontos de consumo	25

Fonte: PEX do Brasil (2017).

Podem ser adotados também outros meios de dimensionamento, como o método dos pesos relativos, o que fica a critério da conveniência do projeto.

Cada fabricante adota um meio de determinação dos diâmetros dos trechos. O catálogo técnico da Tigre por exemplo traz um ábaco que relaciona o diâmetro, a vazão e a perda de carga unitária no sistema.

Uma vez determinados os diâmetros, podem ser calculadas as vazões e perdas de carga, a fim de verificar a eficiência hidráulica do sistema.

2.3.2.1 Vazão nos trechos

A vazão nos sistemas em PEX pode ser calculada à partir das equações de continuidade, ou mesmo estimada pelo método dos pesos relativos. A Tabela 9 a seguir traz alguns valores de velocidade de acordo com a vazão estimada no trecho, para os principais diâmetros comerciais.

Tabela 9 - Vazões e velocidades de acordo com os diâmetros.

Bitola	Velocidades [m/s]														
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5	2	2,5	3	
	Vazões [L/min]														
Ø 16	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	
Ø 20	1,12	2,23	3,35	4,47	5,58	6,70	7,82	8,93	10,05	11,17	16,75	22,33	27,92	33,50	
Ø 25	1,92	3,83	5,75	7,67	9,58	11,50	13,42	15,33	17,25	19,17	28,75	38,33	47,92	57,50	
Ø 32	3,17	6,33	9,50	12,67	15,83	19,00	22,17	25,33	28,50	31,67	47,50	63,33	79,17	95,00	

Fonte: Catálogo Tigre (2011).

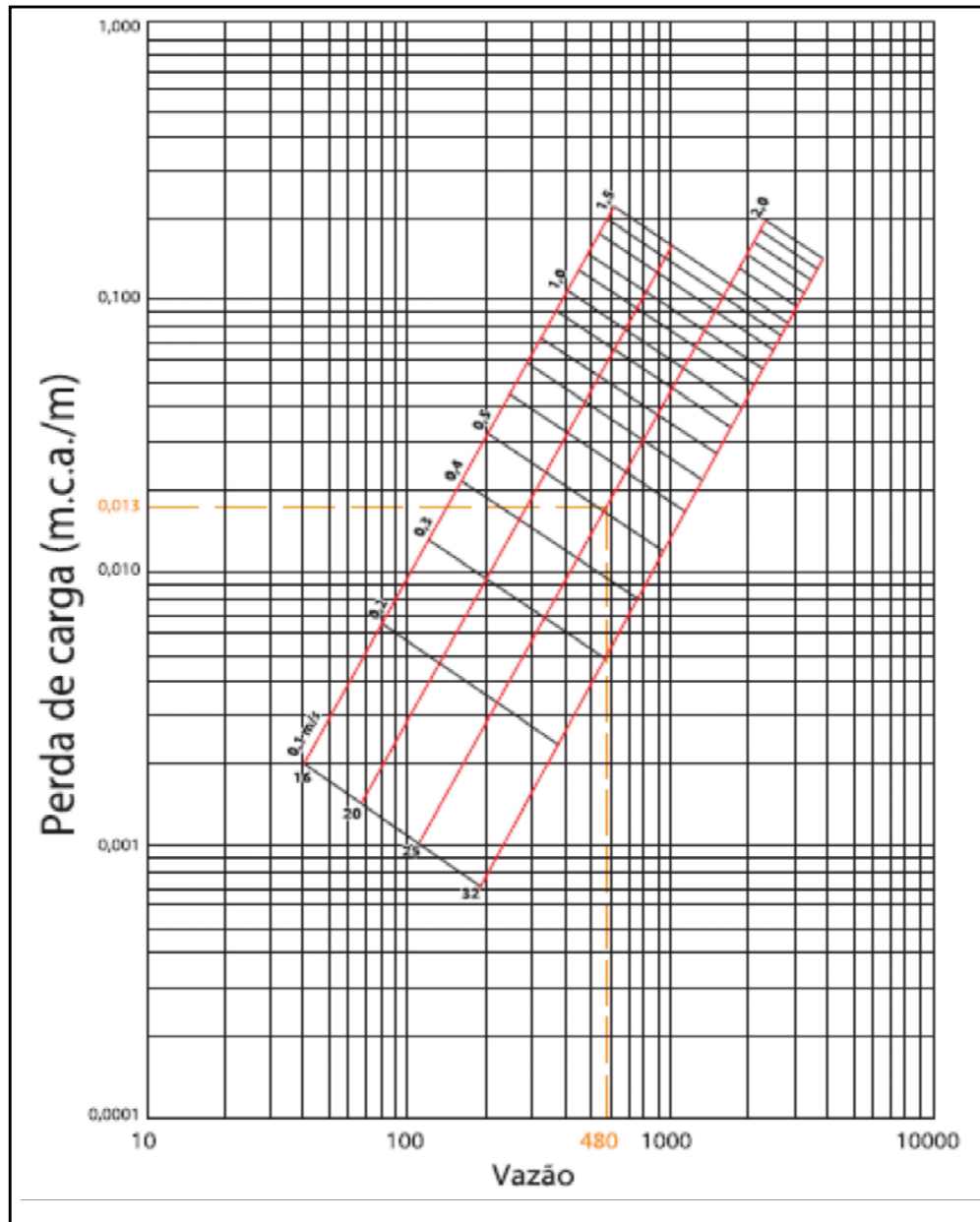
No quadro de vazão acima por exemplo, para um trecho com bitola de 20 mm de diâmetro e vazão de 1,12 L/min, a velocidade no trecho será de 0,1 metros por segundo. Já para um diâmetro de tubulação de 32 mm e vazão correspondente será de 63,33 litros por segundo, a velocidade será de 2 metros por segundo. Para valores de vazão intermediários situados entre os valores presentes na tabela, pode ser adotada a interpolação linear para o cálculo dos valores aproximados de velocidade (TIGRE, 2011).

2.3.2.2 Perda de carga nos trechos

Conforme foi visto anteriormente, a perda de carga ao longo de um trecho de tubulação será dada como soma da perda de carga distribuída mais a perda de carga singular. No sistema em PEX este cálculo não muda, no qual considera-se a perda singular nas conexões utilizadas e também a perda distribuída ao longo das tubulações dos trechos. Para o cálculo da perda de carga distribuída, pode ser adotado um ábaco fornecido no catálogo técnico da tigre, no qual, conhecido o valor de vazão de um determinado trecho, relaciona-se este com a curva correspondente de diâmetro, e no gráfico, estão presentes as curvas de 16, 20, 25 e 32 mm. Assim, a partir da curva, segue-se em linha horizontal até interceptar-se o eixo vertical do ábaco, que fornece os valores de perda de carga por metro linear de tubulação. Desta forma, este ábaco relaciona a perda de carga com a vazão e com o diâmetro.

A Figura 18 abaixo ilustra o ábaco que traz os valores de perda de carga em metros de coluna de água por metro linear de tubulação, para valores de vazão em litros por minuto e diâmetros em milímetros.

Figura 18 - Ábaco que relaciona a vazão em L/min, o diâmetro e a perda de carga unitária.








Fonte: Catálogo Tigre (2011).

No ábaco é mostrado por exemplo que para o valor de vazão de 480 L/min e diâmetro de 25 mm, tem-se uma perda de carga unitária de 0,0013 metros de coluna de água por metro. Uma vez determinada a perda de carga unitária do trecho em análise à partir deste ábaco, a multiplicação deste valor pelo comprimento do trecho fornece o valor de perda de carga distribuída para o trecho.

A perda de carga singular também deve ser considerada no cálculo, utilizando o valor do coeficiente de perda de carga singular, ou à partir do método dos comprimentos equivalentes. A Tabela 10 traz os valores dos comprimentos equivalentes em metros para os principais tipos de conexão em PEX, valores fornecidos no catálogo técnico da empresa fabricante Tigre.

Tabela 10 - Comprimentos equivalentes em metros, para as principais conexões em PEX.

Conexões	Símbolo	Ø 16	Ø 20	Ø 25	Ø 32
Joelho 90°		0,37	0,29	0,26	0,26
Redução		0,14	0,11	0,10	0,09
Derivação do Tê		0,44	0,34	0,31	0,26
Passagem do Tê		0,10	0,08	0,08	0,07
Tê com entrada de água na derivação		0,39	0,31	0,28	0,23

Fonte: Catálogo Tigre (2011).

Os demais valores de perda de carga nas singularidades ou os coeficientes necessários para determiná-las, podem ser encontrados no catálogo técnico da Tigre. Após determinar todos os valores de perda de carga linear e singular, é possível calcular a perda de carga total para o traçado adotado, para cada trecho e para o traçado completo do sistema.

2.3.2.3 Pressão disponível

Assim como no caso do PVC, a pressão disponível nos pontos de utilização de água é contabilizada à partir da cota inicial de instalação da caixa de água. Partindo desta, a pressão vai sendo observada a cada nó, nos trechos subsequentes que foram dimensionados, desde o reservatório até o ponto mais desfavorável. Vale salientar que a determinação da pressão disponível é independente do material utilizado nas tubulações, dependendo somente da cota inicial do reservatório e do valor de pressão atmosférica local. Assim, para o sistema de instalação em PEX, o cálculo da pressão residual é análogo ao caso do dimensionamento com PVC.

2.4 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO

Uma vez que o dimensionamento é efetuado, a observação dos valores finais obtidos permite analisar sob os pontos de vista hidráulico e econômico se o dimensionamento é satisfatório ou não. Basicamente, todo o processo consiste na resolução de equações, ou seja, na determinação de algumas variáveis desconhecidas que são o objetivo final do dimensionamento.

Quando uma equação associar um conjunto de valores conhecidos à um conjunto de valores desconhecidos, ela se torna a expressão matemática de uma função, que é definida como uma relação entre os dois conjuntos em que todo elemento presente no primeiro conjunto possui um único correspondente no segundo (GUIDORIZZI, 2008). Existem diversos tipos de funções de acordo com a formulação matemática, como função linear, quadrática, cúbica, funções exponenciais, constantes, logarítmicas, trigonométricas e entre outras mais complexas.

Estes valores podem ser determinados se forem conhecidos alguns parâmetros iniciais, assim, os valores desconhecidos são determinadas em função de algumas valores conhecidos ou pré-estabelecidos. No dimensionamento hidráulico por exemplo, o diâmetro é determinado em função da vazão e velocidade, a pressão hidrostática em função da altura do reservatório, a perda de carga em função dos coeficientes de rugosidade do material e coeficientes de perda, assim como outras funções presentes nos dimensionamentos em geral. Na maioria das vezes, as valores conhecidos variam ainda em função de outros parâmetros, como é o caso dos coeficientes de rugosidade. Assim, podem existir funções que possuam limites ou restrições, como por exemplos valores máximos, mínimos, intervalos e limites aos quais o valor calculado da função deve obedecer (THOMAS, 2011).

No conjunto imagem de uma função, são obtidos diversos valores, e nele podem existir valores máximos, mínimos, negativos, positivos, racionais ou inteiros, a depender da expressão que define a função e dos valores iniciais utilizados. Para algumas aplicações práticas, a otimização dos valores de uma função se torna um cálculo necessário. Esta otimização pode ser feita a partir da programação matemática, que consiste na adoção de métodos, rotinas de cálculo, planejamentos e técnicas que tem o objetivo de minimizar ou maximizar uma função. De tal forma, na programação é considerada uma função objetivo cujo valor deve ser otimizado, podendo esta função estar sujeita ou não a um conjunto de restrições (GOMES, 2006).

De acordo com o tipo de função e restrições, a programação tem algumas classificações. Quando a programação matemática é aplicada à uma função linear com restrições lineares, esta é definida como programação linear. Quando a função objetivo não for linear, a programação será não linear. Existem ainda os métodos dinâmicos, que otimizam funções dinâmicas de maior complexidade. Historicamente, a otimização de funções foi verificada inicialmente nos estudos de Cauchy, Newton, Lagrange e Leibniz, à partir das formulações diferenciais. Para a programação matemática podem ser utilizados métodos analíticos de cálculo ou métodos numéricos. Os métodos analíticos utilizam teoremas e formulações matemáticas para resolver o problema de otimização, já os métodos numéricos utilizam procedimentos iterativos inseridos em algoritmos e programas computacionais para a otimização final de uma função, com o auxílio de alguma linguagem de programação adequada, como Fortran, Python, C ++, Pascal, Java e entre outras existentes (JUNIOR, 2006).

Em geral para os problemas de engenharia, as funções que determinam e relacionam os valores e variáveis são não lineares, incluindo diversos fatores. De tal modo, à depender do tipo de problema de otimização e do tipo de função objetivo, deve ser escolhido por um método de otimização adequado, que conduza a resultados satisfatórios, coerentes com o objetivo inicial.

2.4.1 Programação linear

A programação linear consiste no planejamento matemático de atividades para que se obtenha um valor ótimo de uma determinada função linear, ou seja, para obter um resultado que alcance a melhor solução especificada, de acordo com o modelo matemático, entre todas as soluções viáveis (HILLIER, 1998).

Utilizando a programação linear para a otimização de um dimensionamento hidráulico, as vazões e comprimentos dos trechos são parâmetros conhecidos, e cada um dos trechos possui uma gama de possíveis diâmetros. Assim, cada diâmetro ocupa um comprimento de extensão desconhecida, e esse comprimento é a principal incógnita do problema, o que faz com que a função objetivo e as restrições se tornem lineares (LUCAS FILHO, 1991). Existem diversas técnicas de programação linear, e entre elas, a de maior avanço é a técnica do gradiente de programação linear, proposta por Alperovtis e Shamir em 1977, que consiste basicamente em se considerar algumas variáveis como constantes e outras como variáveis de decisão a serem dimensionadas.

Neste método, é realizada uma distribuição inicial de vazões, dividindo os trechos da rede em segmentos de diferentes diâmetros, cujos comprimentos de extensão serão determinados pelo programa linear. A partir desta distribuição inicial, os comprimentos serão calculados e avaliados de um modo iterativo, até que se obtenha um resultado final que seja convergente (JUNIOR, 2006). Uma outra técnica também muito utilizada para resolver problemas de programação linear é o método simplex, que consiste num procedimento matricial que trabalha de modo iterativo e convergente, realizando uma busca nos vértices de um poliedro convexo das restrições de um sistema de equações lineares, até encontrar uma solução aproximada (SCHNEIDER, 2013).

Assim, a programação linear é indicada quando se tem um grande número de variáveis independentes, sendo aplicada somente para a otimização de funções objetivo lineares sujeitas à restrições também lineares. Os métodos lineares são muito simples de serem implementados, trazendo resultados satisfatórios (BARBOSA, 2014). Porém, a maioria dos problemas de engenharia são descritos por funções não lineares, o que restringe o uso da programação linear.

2.4.2 Programação não - linear

A programação não linear trabalha com problemas de funções objetivo não lineares, cujas técnicas de resolução podem ser divididas em analíticas e numéricas. As técnicas analíticas otimizam as equações com apoio de derivadas, encontrando as raízes dessas equações. O método dos multiplicadores de Lagrange e o método do cálculo diferencial são exemplos de técnicas analíticas. Já os métodos numéricos ou de busca numérica são iterativos, ou seja, são feitas tentativas que aprimoram os valores das iterações até que os resultados sejam convergentes (CIRILO, 1997). O método de Newton-Rapson é um exemplo de busca numérica iterativa para solução de um sistema de equações não lineares, sendo uma extensão do método de Newton, que aproxima a função objetivo à uma função quadrática, ocorrendo assim uma convergência quadrática dos valores. Na programação não-linear destacam-se os trabalhos de pesquisa feitos por Collins et al (1978), Fujiwara et al (1990) e Cenedes et al (1994). Há ainda métodos que consistem na técnica de enumeração exaustiva das possíveis soluções de otimização, como por exemplo o método WADISO – Water Distribution System Optimization, desenvolvido pela U. S. Army Corps of Engineers, Walski et al (1990). Como outro exemplo de programação não linear tem-se o método PNL 2000, que otimiza uma função objetivo observando algumas restrições às quais a função deve obedecer.

2.4.3 Método PNL 2000

Este é um método que utiliza a programação matemática para otimização econômica de redes de abastecimento e de distribuição de água, e está baseado na programação não-linear para otimizar uma função objetivo não linear, minimizando a função de acordo com as restrições inseridas. Tem o objetivo de apresentar um dimensionamento que apresente o custo mínimo de investimento, tanto de operação quanto de implantação para um sistema de abastecimento de água, ou seja, deve efetuar um dimensionamento econômico (SALVINO, 2009).

O método PNL 2000 tradicional (GOMES, 2006) é uma adaptação do método de Hardy-Cross, no qual o diâmetro encontrado no dimensionamento inicial é associado à dois diâmetros comercialmente disponíveis, um imediatamente inferior e um imediatamente superior ao calculado, sendo escolhido o que trouxer um menor custo e atender aos critérios de dimensionamento.

2.4.4 Método PNL 2000 modificado

No método PNL 2000 modificado, o diâmetro que é calculado é diretamente ajustado para o valor comercial mais adequado disponível no mercado. Este método pode ser aplicado tanto em redes malhadas como em redes ramificadas, sem restrições de extensão e dimensão do sistema (MAIA JUNIOR, 2012). A sua metodologia de utilização está dividida em duas etapas, sendo a primeira etapa um pré-dimensionamento e a segunda etapa na qual é feito um ajuste da solução obtida na primeira etapa.

Para um projeto de um sistema hidráulico predial de água, o dimensionamento tem o objetivo principal de determinar os diâmetros das tubulações nos trechos, de modo que estes proporcionem velocidades, vazões de água e pressões adequadas ao funcionamento do sistema. Assim, a primeira etapa consiste em determinar os diâmetros iniciais, o que será o pré-dimensionamento, sendo obtidos os valores dos diâmetros com base em algumas restrições inseridas na rotina de cálculo. Na segunda etapa os valores determinados na primeira etapa são reajustados para os diâmetros comerciais mais próximos e adequados existentes no mercado.

A rotina de cálculo do método PNL 2000 modificado pode ser inserida em algoritmos computacionais ou mesmo no software Microsoft Excel, com o auxílio da ferramenta Solver, que o programa traz como suplemento para fins de otimização de funções.

2.4.5 Solver e algoritmo GRG2

A ferramenta Solver é um suplemento que está disponível no software computacional Microsoft Excel, e funciona com base no algoritmo de otimização GRG2 (Gradientes Reduzidos e Generalizados 2) que foi desenvolvido por Lasdon e Warren (1984), baseado na programação não linear, que trata da solução de problemas de otimização não lineares nos quais a função objetiva pode assumir não linearidades de qualquer forma, desde que essa função seja diferenciável, sendo ideal para resolução de problemas que apresentam muitas soluções, como os sistemas de distribuição de água por exemplo.

Este algoritmo trata de problemas gerais de otimização restrita da forma:

- Minimizar $Z(X)$
- Sujeito às restrições:

$$0 \leq g_i(X) \leq ub(i), \text{ com } i = 1, n, \quad (10)$$

$$lb(i) < X_i < ub(i), \text{ com } i = m + 1, m + n, \quad (11)$$

Assumindo-se que X é um vetor de n variáveis, e que as funções Z e g_i são funções diferenciáveis. De acordo com Lasdon e Warren (1984), o problema é resolvido minimizando uma sequência de problemas reduzidos, nos quais a função objetivo reduzida $F(x)$ possui um vetor x , que é um subconjunto de X com variáveis não básicas. O sistema realiza iterações utilizando uma pesquisa unidimensional por meio de uma variação do método de Newton.

2.4.6 Funções e otimização de funções

Uma função é definida como a relação entre dois conjuntos, em que todo elemento do primeiro conjunto possui pelo menos um correspondente no segundo conjunto (GUIDORIZZI, 2008). Essa relação é expressa em termos matemáticos, associando um conjunto de valores a outro por meio de uma equação. De um modo geral, as funções são expressas pela seguinte lei de formação, expressa na Equação (12):

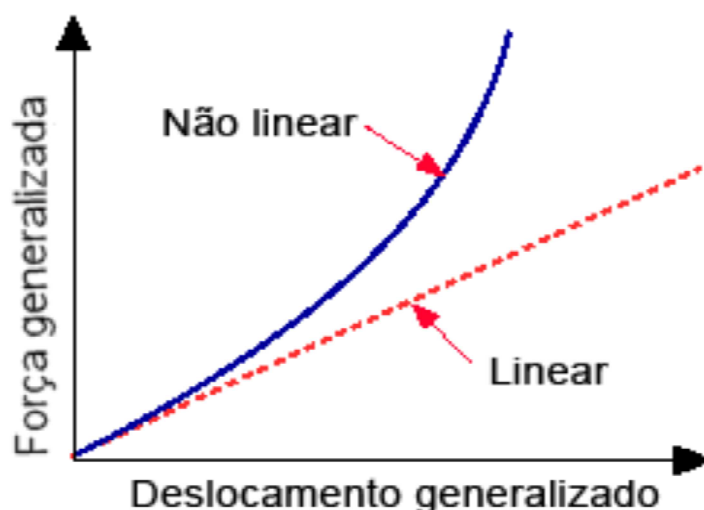
$$y = f(x) \quad (12)$$

Onde x representa um conjunto de valores que é chamado domínio da função e y expressa o conjunto imagem. Assim, x representa uma variável independente, enquanto y é dependente dos valores de x , ou seja, y é dada em função de x .

A depender da expressão que determina a lei de formação, a função pode ser classificada em alguns tipos. A função linear é a função que expressa a relação entre dois conjuntos, em que todo elemento no primeiro conjunto possui um único correspondente no segundo conjunto, sendo que a expressão que relaciona estes dois conjuntos tem um comportamento linear, ou seja, um crescimento de valores uniforme. Existem também as equações não lineares, como o caso das funções que são definidas por equações quadráticas, cúbicas, exponenciais, trigonométricas, logarítmicas, ou ainda uma associação destas. Existem também as funções de mais de uma variável independente, cuja variável dependente é expressa em termos de dois valores variáveis (GONÇALVES, 2007).

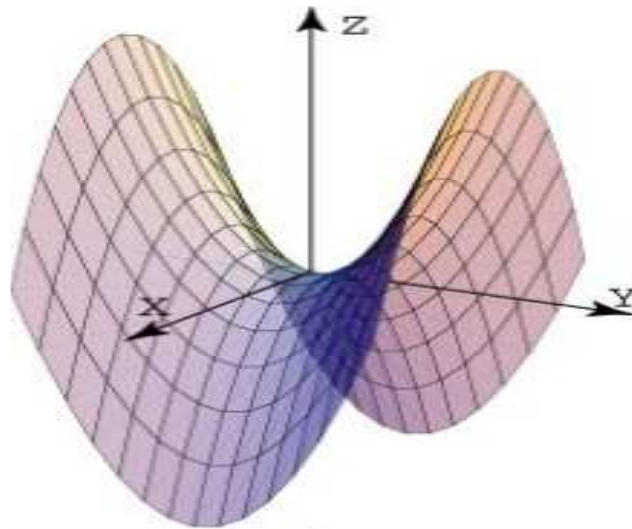
As funções podem ser representadas graficamente. No caso de funções de uma única variável, este gráfico é visualizado no plano bidimensional por meio de pares ordenados, que são expressos com auxílio de dois eixos perpendiculares entre si, o eixo X, que representa o conjunto de valores do domínio, e o eixo Y, representando o conjunto de valores da imagem. O lugar geométrico de todos os pares ordenados é chamado de curva, e para funções lineares a curva se torna uma reta. Já no caso das funções de duas variáveis, o gráfico é tridimensional, possuindo três eixos perpendiculares entre si, X, Y e Z, no qual o lugar geométrico do conjunto imagem será uma superfície no espaço (GONÇALVES, 2007). As Figuras 19 e 20 a seguir expressam alguns tipos de funções e seus respectivos gráficos.

Figura 19 - Gráfico de funções de uma variável real, de força versus deslocamento, representando as funções linear na linha vermelha tracejada e não-linear na linha azul contínua.



Fonte: <http://help.solidworks.com/2013/brazilian/solidworks/cworks/c>.

Figura 20 - Superfície espacial que é conhecida como parabolóide hiperbólico, com Z dado em função de X e Y.

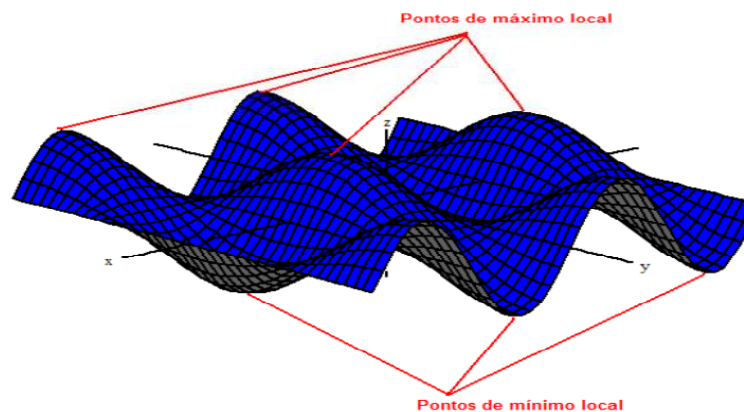


Fonte: <http://epsomat.blogspot.com.br>.

Otimizar uma função significa buscar soluções que possam minimizar ou maximizar a função, de acordo com a aplicação que seja conveniente. A otimização é feita com a escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável.

Assim, adotando-se um conjunto de restrições e uma função objetivo, é possível encontrar valores máximos ou mínimos para a função. Deste modo, minimizar uma função significa encontrar ou determinar os menores valores que a função pode assumir, enquanto que maximizar a função consiste na determinação dos seus maiores valores. Os máximos e mínimos de uma função podem ser visualizados como segue na Figura 21.

Figura 21 - Máximos e mínimos de uma função de duas variáveis.



Fonte: www.ebah.com.br.

De uma forma geral, o problema de otimização de funções é visto como:

- Minimizar ou maximizar uma função $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$
- Sujeita à restrições de igualdade e de desigualdade, com limites máximos ou mínimos;

Assim, para que a otimização seja efetuada, é necessário inicialmente determinar a função objetivo, e assim restringir a função para que ela alcance os valores desejados, sejam eles máximos, mínimos ou mesmo valores fixos.

2.4.7 Função objetivo

Inicialmente, para realizar o processo de otimização deve ser adotada uma função objetivo, ou seja, a função que deverá ser otimizada, minimizando ou maximizando os seus valores. Assim, a função pode assumir qualquer forma, como funções que definem temperatura, volume de material, função de logística, ou funções de custos. A otimização econômica é aquela que tem o objetivo de minimizar os custos, ou seja, minimizar uma função que defina o custo com materiais e serviços, de acordo com as restrições construtivas e de mercado. Para instalações hidráulicas, o orçamento é feito basicamente em relação ao gasto com tubulações e conexões, materiais e ferramentas necessárias, assim como a mão de obra. Fazer uma otimização econômica de um sistema hidráulico predial de água, significa minimizar o custo total, que em geral é expressa em termos do preço do tubo e do preço das conexões. Ao multiplicar a quantidade total de tubos gasta em comprimento pelo seu preço por comprimento, obtêm-se o custo com tubulação. Multiplicando o preço unitário de uma conexão pelo número total de conexões utilizadas, obtêm-se o custo com conexões. A soma destes custos fornece o gasto com materiais para a instalação, conforme mostrado na Equação (13) abaixo:

$$CT = (P_T \times L) + (P_C \times Q) \quad (13)$$

Onde:

CT = Custo total em unidades monetárias;

P_T = Preço do tubo por comprimento;

L = Comprimento utilizado de tubulações;

P_C = Preço unitário da conexão;

Q = Quantidade de conexões utilizadas;

Observando os preços de mercado, é possível perceber que para as instalações de água os preços são diretamente proporcionais aos diâmetros internos dos tubos e conexões, ou seja, quanto maior for o diâmetro maior será o preço. Assim, o custo total será dado em função do diâmetro utilizado, como mostra a Equação (14):

$$CT(D) = (P_T(D) \times L) + (P_C(D) \times Q) \quad (14)$$

Onde agora o preço com tubulações e o preço com conexões são funções do diâmetro, fornecendo o custo total de um determinado trecho avaliado, também em função do diâmetro.

De tal forma, otimizar o custo de um sistema de distribuição de água, significa reduzir a dimensão do diâmetro, obedecendo à algumas restrições. Para cada trecho, devem ser observados os diâmetros máximo e mínimo, assim como os limites hidráulicos.

A vazão de água em condutos pode ser expressa em termos da velocidade e da área de seção transversal, conforme a Equação (15):

$$Q = V \times A . \quad (15)$$

Onde:

Q = Vazão em m^3/s ;

V = Velocidade em m/s ;

A = Área da seção transversal em m^2 ;

A área pode ser expressa em função do diâmetro D , como visto na Equação (16):

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} . \quad (16)$$

Substituindo a equação da área na expressão da vazão, têm-se a Equação (17):

$$Q = V \times A = V \times \left(\pi \times \frac{D^2}{4} \right) . \quad (17)$$

Por manipulação algébrica, é possível expressar o diâmetro em função da velocidade e da vazão, como mostra a Equação (18):

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}} . \quad (18)$$

Por continuidade, a vazão em uma seção não varia, embora o diâmetro varie. Para uma dada vazão de escoamento, em um certo diâmetro a velocidade da água vai ter um valor, mas à medida em que o diâmetro diminui a velocidade aumenta, por outro lado a velocidade diminui com o aumento da seção (PORTO, 2006). Assim, é notável uma relação inversamente proporcional entre diâmetro e velocidade. A ABNT NBR 5626 para instalações de água, fixa que a velocidade no interior das tubulações não deve ser superior a 3 m/s, para garantir a estabilidade da instalação e para que as tubulações não sejam danificadas.

De tal forma, para cada trecho a otimização econômica é feita por tentativas de reduzir o diâmetro, considerando que para este as restrições sejam os diâmetros comercialmente disponíveis e a velocidade, que não deve ser superior a 3 m/s no interior das tubulações.

Assim, percebe-se que o custo é uma função direta do diâmetro, que por sua vez depende da vazão e da velocidade. Deste modo, a otimização é aplicada na função objetivo custo, minimizando o seu valor por redução de diâmetro, considerando que o diâmetro também não pode ser tão pequeno, já que a velocidade não deve ser tão alta e o trecho deve conseguir transportar a vazão de projeto estipulada em dimensionamento. Se então a função de custo é conhecida é possível efetuar uma otimização. Porém, em aplicações práticas de engenharia, matematicamente não é tão simples determinar a lei de formação das funções, o que impossibilita a sua otimização. Felizmente, existem ferramentas, rotinas de cálculo e softwares computacionais que permitem a obtenção das expressões matemáticas que regem o comportamento das funções, se forem conhecidos alguns valores do domínio e da imagem.

2.4.8 LAB Fit ajuste de curvas

O LAB Fit é um software computacional desenvolvido por Wilton Pereira da Silva e Cleide Pereira da Silva (2004), que trata de dados experimentais, sendo um pacote de programas envolvendo ajuste de curvas, gráficos em duas e em três dimensões, estatística básica, propagação de erros, assim como algumas ferramentas matemáticas.

Este software apresenta um menu de ajuste de curvas, no qual os principais programas deste menu utilizam regressão não-linear, com a capacidade de ajustar funções com até seis variáveis independentes, admitindo incertezas na variável dependente e também nas variáveis independentes, o que amplia a sua capacidade e precisão numérica.

O software traz em sua biblioteca mais de 200 funções com uma variável independente e quase 280 funções com duas variáveis independentes (SILVA, 2004).

Caso a função de ajuste não seja conhecida, o software traz um programa que permite encontrar as funções que melhor se adequam aos dados inseridos pelo usuário, e se for necessário, há também uma opção para que o usuário escreva sua própria função de ajuste, de acordo com a conveniência.

Uma vez determinados os parâmetros de ajuste, é possível extrapolar a função, e *plotar* os gráficos bidimensionais e tridimensionais. O LAB Fit possui também um menu para o tratamento de dados similares, não similares e determinação da propagação de erros, possuindo também um menu com diversas ferramentas como plotar uma função informada pelo usuário, ou mesmo obter gráficos à partir dos valores conhecidos das variáveis dependentes e independentes, assim como muitos outros tipos de cálculos.

Em geral, o software permite algumas operações como tratar dos dados similares e não-similares, realizar cálculos como resolver sistemas de equações, determinar raízes de função, determinação de máximos e mínimos da função, fazer ajuste de curvas e funções, assim como plotar gráficos em duas e em três dimensões.

Quanto às ferramentas matemáticas, o software resolve os sistemas de equações lineares por meio de tabelas de dados. Já o cálculo de raízes de uma função, bem como a solução de uma equação não-linear, utiliza o método da bisseção aplicado duas vezes, sendo uma para a função e outra para a sua derivada.

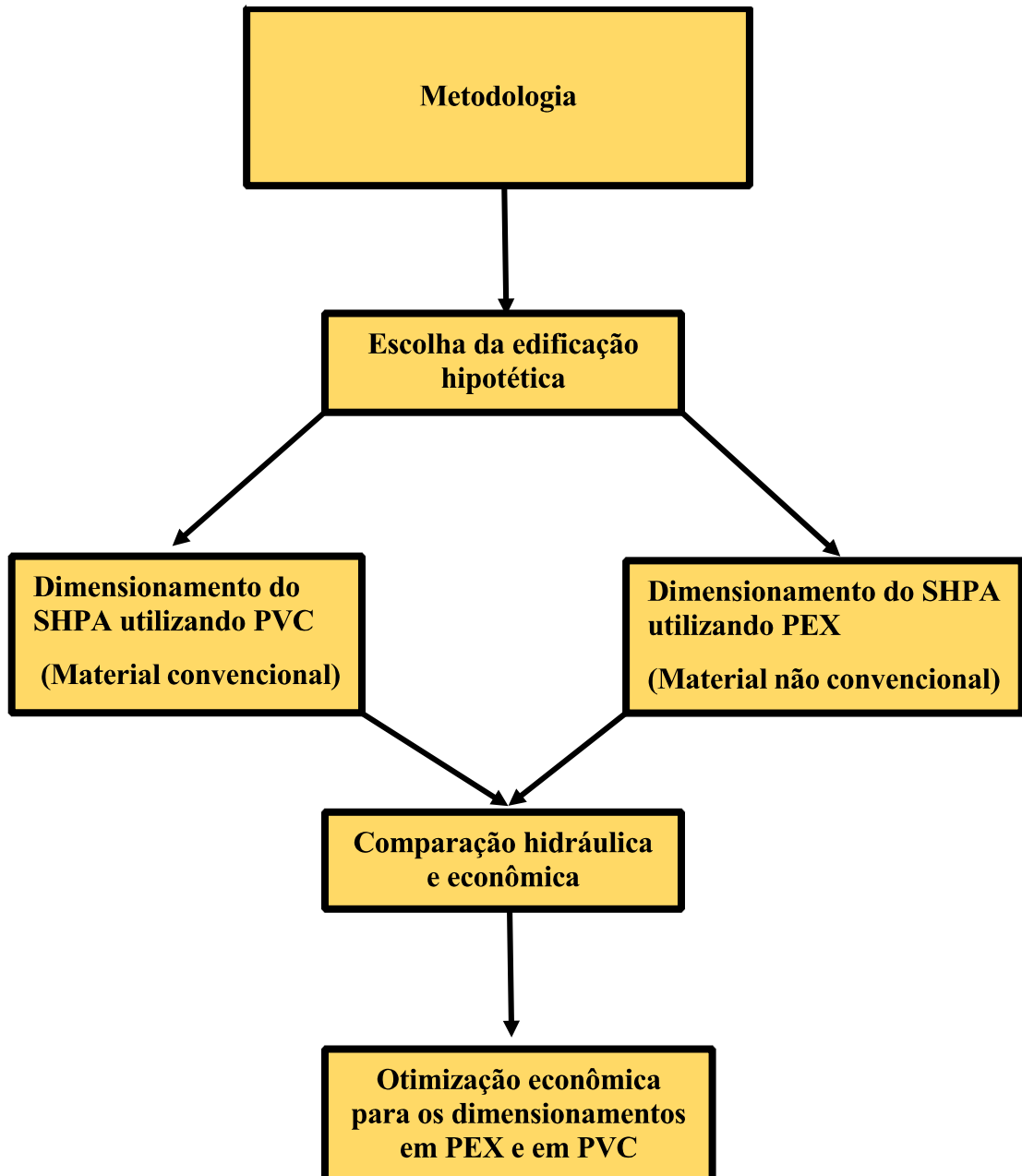
O LAB Fit, realiza os ajustes de funções através de regressão não-linear aplicada de forma iterativa, até que a convergência seja atingida. Considerando que o processo iterativo é muito instável quando inserido em meios computacionais, o algoritmo de Levenberg-Marquardt (WILLIAM, 1996), foi utilizado para contornar a maioria dos problemas de divergência que ocorrem quando os valores iniciais inseridos pelo usuário não forem muito adequados, o que torna o ajuste mais preciso (SILVA, 2004).

Para obter funções utilizando o LAB Fit, basta que o usuário insira no software alguns pares ordenados de valores de imagens com seus valores correspondente de domínio. À partir de então o programa procura em sua biblioteca de funções, as possíveis funções que mais se adequam para descrever o comportamento dos dados inseridos, baseando-se no critério do menor quiquadrado reduzido para escolher a função ajustada (SILVA, 2004).

3 METODOLOGIA

Além das pesquisas bibliográficas, os métodos utilizados neste trabalho estão dispostos na Figura 22, que ilustra um fluxograma de como o trabalho foi organizado.

Figura 22 - Etapas metodológicas utilizadas.

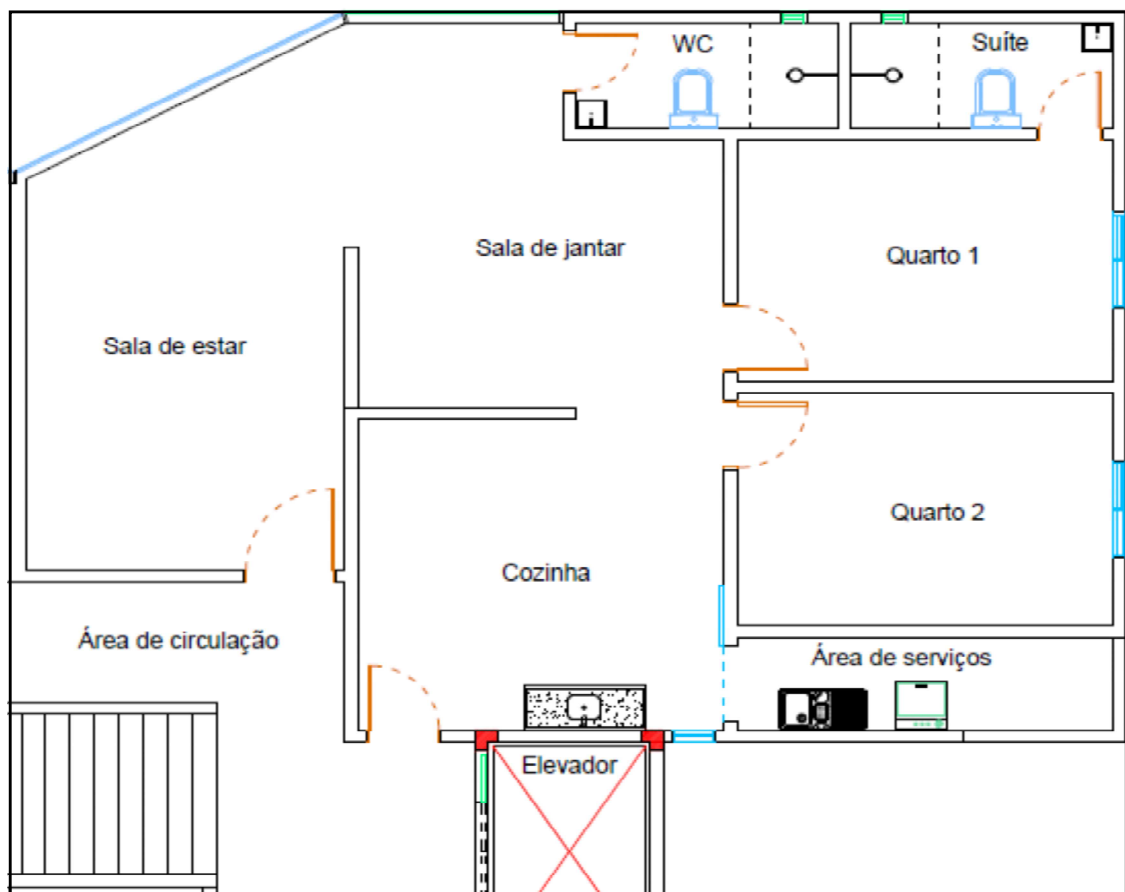


Fonte: Autor (2017).

3.1 A EDIFICAÇÃO HIPOTÉTICA

Para que o dimensionamento hidráulico seja possível, é necessário definir a edificação para a qual o lançamento do sistema hidráulico predial de água será feito. Assim, foi escolhida uma edificação residencial hipotética que é constituída por térreo com Hall de entrada e recepção, dez pavimentos tipo compostos cada um por quatro apartamentos de padrão médio, espaço de lazer, estacionamento e cobertura. O sistema de distribuição de água foi projetado de modo indireto com bombeamento, que adota um reservatório inferior construído no térreo e um reservatório superior instalado na cobertura da edificação. As plantas baixas do térreo e do pavimento tipo são mostradas no Anexo A deste trabalho. A Figura 23 abaixo ilustra a divisão de cômodos de um apartamento do pavimento tipo.

Figura 23 - Planta baixa esquematizando a divisão de cômodos de um apartamento tipo.



Fonte: Autor (2017).

3.2 TRAÇADOS RAMIFICADO E PONTO A PONTO

Para iniciar o dimensionamento, devem ser adotados traçados convenientes, que serão os locais geométricos em que a tubulação irá passar para atender à todos os pontos de consumo de água, equipamentos hidráulicos e sanitários.

Como estão sendo avaliados dois materiais, o PVC o PEX, para efeito de dimensionamento foram adotados dois tipos de traçado, sendo um convencional ramificado para o PVC e para o PEX, e um traçado ponto a ponto para o PEX, desenhado de forma mais otimizada.

A partir do reservatório instalado na cobertura da edificação, partem quatro colunas de distribuição de água fria em PVC, que são destinadas para os apartamentos e para o térreo. Na entrada de cada apartamento há um registro de gaveta e um hidrômetro, o que permite a medição de consumo individualmente para cada apartamento, e partindo da entrada do apartamento, são adotados então os traçados ramificado ou ponto a ponto.

O traçado ramificado deve ser executado de maneira convencional, seguindo a geometria das alvenarias da edificação, dividindo o traçado em trechos e em nós nos pontos que sejam necessários, num traçado também chamado de sistema por derivação. Este traçado foi adotado para simular a instalação hidráulica com PVC. O mesmo traçado foi utilizado também na simulação hidráulica do PEX, a fim de comparar hidraulicamente e economicamente os dois materiais nas mesmas condições de instalação. Em geral, a tubulação em sistema ramificado deve passar acima do forro da construção, possuindo trechos e sub-ramais verticais em queda em alguns pontos, embutidos na alvenaria de vedação para alimentar os pontos de utilização.

Foi adotado também um traçado ponto a ponto para o PEX, com o objetivo de avaliar as vantagens deste tipo de sistema, que possibilita efetuar a instalação sem a necessidade de tês ou conexões intermediárias, utilizando somente módulos distribuidores gerais, dos quais partem tubulações individuais para cada ponto de uso e conectores do tipo fêmea nas saídas de água, para possibilitar o engate das torneiras, chuveiros e entradas de equipamentos hidráulicos. Assim, o traçado ponto a ponto foi utilizado somente no interior da área do apartamento, partindo do registro geral na entrada, utilizando módulos distribuidores no pontos necessários e convenientes. A tubulação em sistema ponto a ponto é inserida no interior do tubo bainha ou tubo guia, embutido na própria laje no momento da concretagem, o que possibilita passar o traçado por baixo do piso do apartamento, até cada ponto de uso de água.

3.3 DIMENSIONAMENTO

3.3.1 Dimensionamento e orçamento do SHPA utilizando o PVC

Para o dimensionamento utilizando o material convencional, o PVC, foram utilizados os padrões técnicos da ABNT, de acordo com a norma NBR 5626/98 para instalações de água fria. De posse do projeto arquitetônico proposto e do traçado, foi possível determinar as vazões de cada trecho, utilizando o método probabilístico dos pesos relativos de Hunter, e assim por continuidade, avaliando cada trecho por vez, foram efetuados os cálculos de determinação de vazões e velocidades, determinado os diâmetros, comprimentos, perdas de carga unitárias, equivalentes e total, assim como foi elaborado também um orçamento econômico para a instalação do sistema, em função do gasto com tubulações, conexões e registros. Para a análise da eficiência hidráulica, foram verificadas as pressões estáticas e dinâmicas para os pontos mais desfavoráveis, ou seja, para os pontos mais distantes da instalação, que são o tanque de lavar roupa na área de serviços e o lavatório da suíte, avaliando cada um separadamente.

3.3.2 Dimensionamento e orçamento do SHPA utilizando o PEX

Para o PEX, o dimensionamento foi executado de acordo com as especificações de um catálogo técnico da empresa fabricante Tigre, que traz os principais parâmetros de dimensionamento para instalações com este material, assim como as suas características técnicas e construtivas. As vazões são determinadas analogamente ao caso do PVC, de acordo com os pesos relativos de utilização das peças sanitárias. Já as perdas de carga nas tubulações são determinadas por análise gráfica, conforme especifica o catálogo técnico. O dimensionamento com este material foi avaliado de dois modos. O primeiro foi para o traçado ramificado, o mesmo que foi adotado para o PVC, o que possibilitou a comparação hidráulica e econômica entre os dois materiais. O segundo sistema dimensionado foi o ponto a ponto, que embora utilize mais tubulações, fornece uma perda de carga singular menor, por necessitar de menos conexões, o que pode trazer menores perdas de carga total, fornecendo pressões dinâmicas maiores nos pontos mais desfavoráveis. Para o PEX, foram elaborados também orçamentos econômicos em função do gasto com materiais, tanto para o traçado ramificado quanto para o traçado ponto a ponto.

3.4 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DOS DIMENSIONAMENTOS

Uma vez que o dimensionamento foi efetuado, o orçamento econômico para os dois materiais revela o custo total com tubos, conexões e instalações. Como foi visto anteriormente, otimizar o dimensionamento significa reduzir o diâmetro de alguns trechos respeitando os limites de velocidade e de vazão, visto que a redução de diâmetro significa a redução de preços.

Para realizar a otimização, inicialmente devem ser conhecidas as relações de preço em função do diâmetro para cada material. Assim, a partir de pesquisas foram determinados os preços de mercado para as tubulações e conexões utilizadas, tanto para o PEX quanto para o PVC, observando os diâmetros comercialmente disponíveis. Uma vez feita a pesquisa, foi necessário obter a lei de formação das funções para cada tipo de tubo e de conexão. A inserção dos valores de preços e de diâmetros correspondentes no “LAB Fit Curve Fitting Software (2009)”, possibilitou a obtenção dos gráficos de ajuste, sendo que o software apresentou também a melhor expressão para descrever a relação do preço em função do diâmetro, para os dois materiais e para cada item presente no dimensionamento, para o qual fosse possível obter os preços em função da variação de diâmetro. No LAB Fit foram determinados também os gráficos dos erros relativos entre os valores obtidos pelas funções apresentadas pelo software e os valores dos preços de mercado, que foram inseridos no programa como dados experimentais.

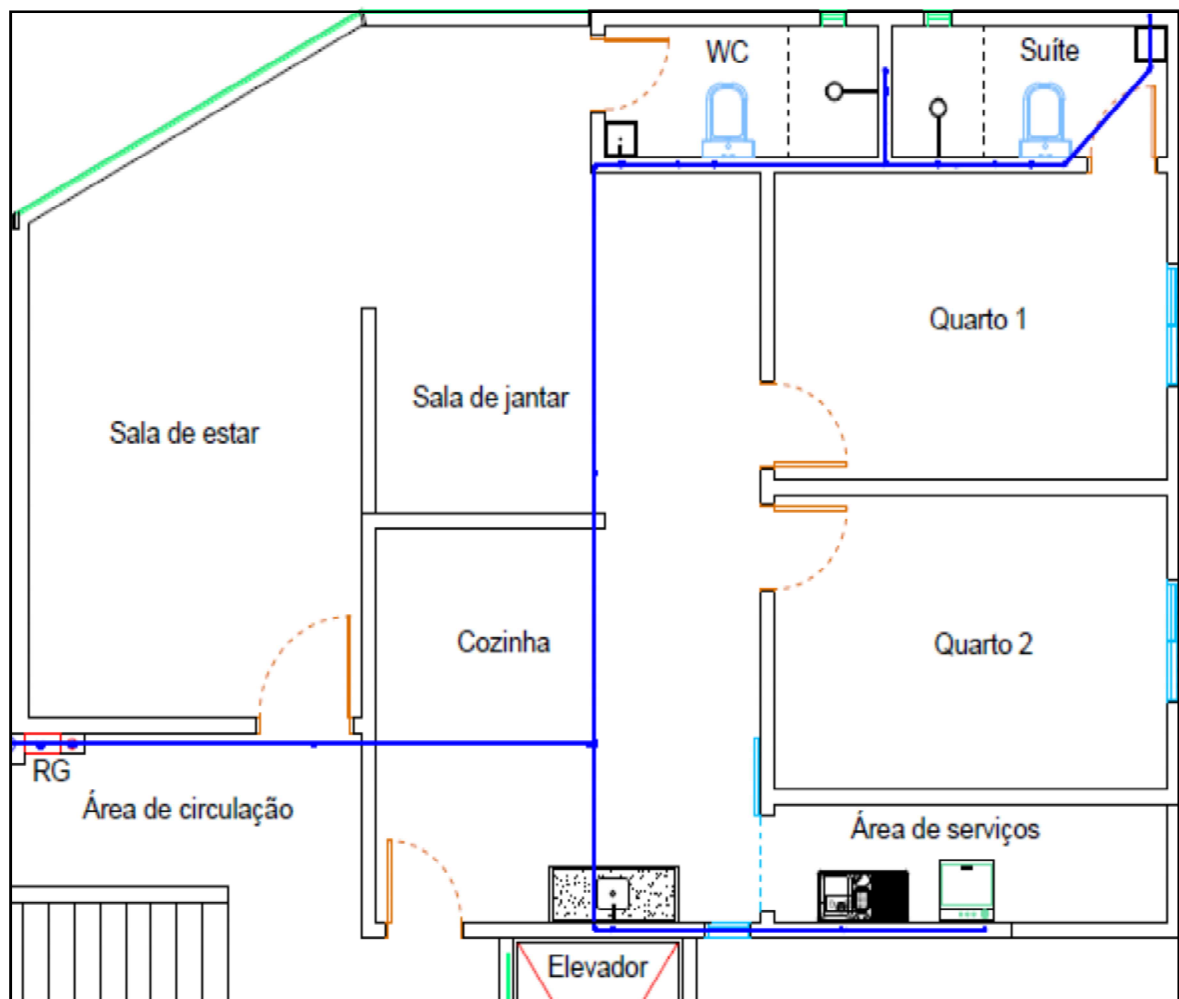
De posse das funções de preço versus diâmetro, a otimização pôde ser aplicada a cada trecho, utilizando a ferramenta computacional Solver, na qual a função de custo foi colocada como objetivo, minimizando o seu valor procurando reduzir o diâmetro, considerando os valores comercialmente disponíveis, obedecendo ao limite máximo de velocidade e limite mínimo de pressão de utilização no ponto mais desfavorável. Os valores obtidos pelo Solver são resultados do procedimento iterativo do programa, que realiza diversas tentativas até encontrar o valor mais convergente. Assim, os diâmetros apresentados na solução podem assumir valores com casas decimais, o que não é possível na vida prática. Esta solução é então ajustada, aproximando o valor obtido pelo Solver para o diâmetro comercial mais próximo que atenda aos critérios hidráulicos. Esta etapa é feita para cada trecho do dimensionamento e para cada material avaliado, e assim, alterando os diâmetros de alguns trechos, as verificações hidráulicas são reavaliadas afim de se obter um dimensionamento hidraulicamente satisfatório. Deste modo, otimizando os trechos que eram possíveis nos traçados ramificado e ponto a ponto, foi possível realizar um novo orçamento, considerando algumas reduções em alguns trechos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TRAÇADO RAMIFICADO PARA O PVC E O PEX

O traçado ramificado parte do registro na entrada do apartamento, subindo em um ramal principal acima do forro, subdividindo-se em dois sub-ramais, um para alimentar as pias da cozinha e da área de serviços e outro destinado aos banheiros do apartamento. Dos sub-ramais derivam-se os trechos verticais descendentes para cada ponto de consumo de água. A Figura 24 abaixo ilustra o traçado adotado em planta para simular a instalação hidráulica com PVC, utilizando para efeito de comparação o mesmo traçado para os tubos em PEX. A perspectiva isométrica deste traçado é mostrada no Anexo A.

Figura 24 - Traçado ramificado em planta para o PVC e PEX. Do registro geral (RG), parte o ramal principal do traçado, subdividindo-se em dois sub-ramais.

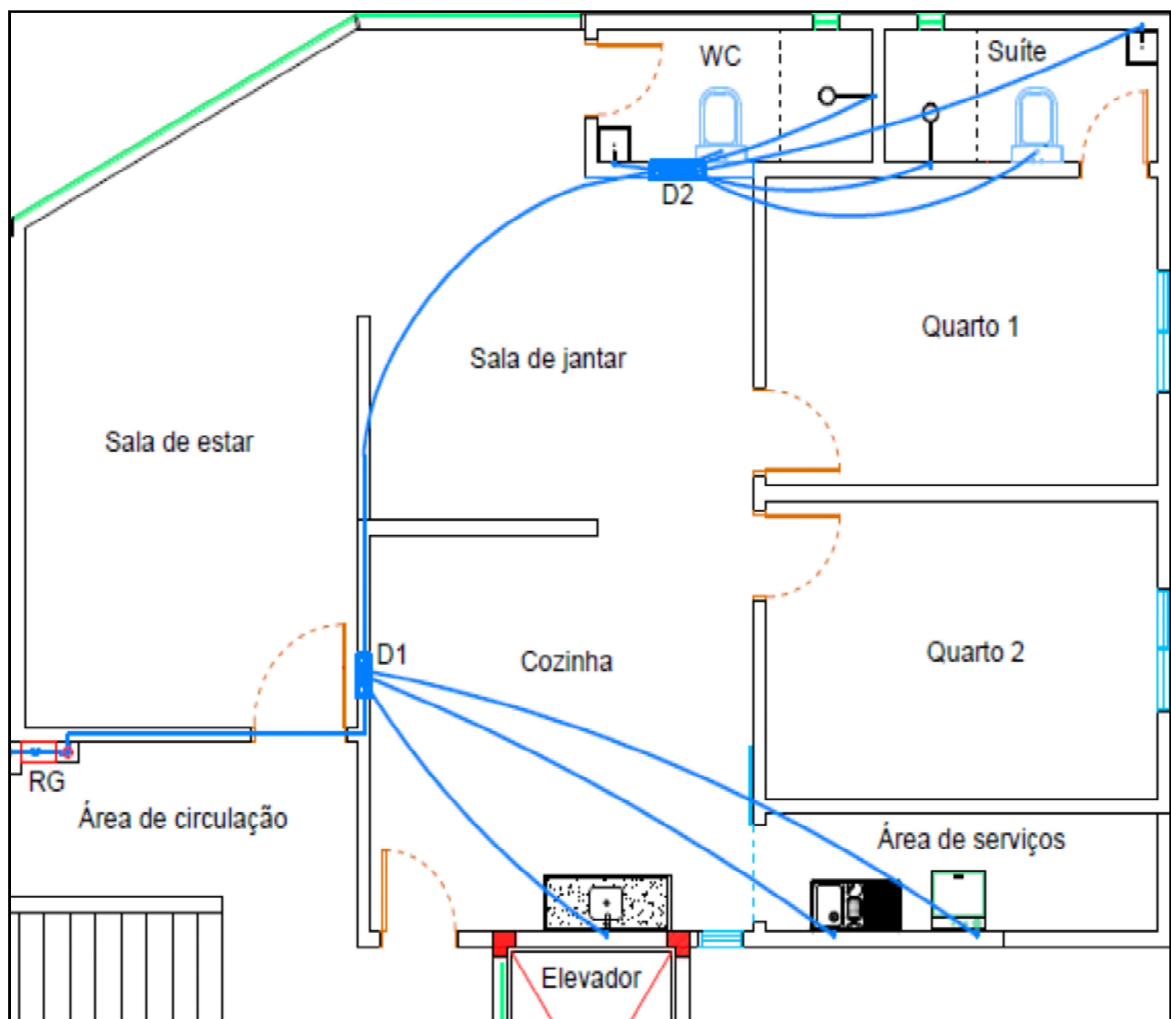


Fonte: Autor (2017).

4.2 TRAÇADO PONTO A PONTO PARA O PEX

O traçado ponto a ponto parte do registro geral localizado na entrada do apartamento, a partir do qual o ramal principal é levado até um módulo distribuidor com três saídas para as pias da cozinha, da área de serviço e do tanque da área de serviços. Prosseguindo, deste um sub-ramal é levado até um distribuidor próximo aos banheiros, numa associação de dois distribuidores, sendo um com 3 saídas e outro com 2 saídas, totalizando cinco saídas, cada uma delas destinada à um ponto de utilização de água nos banheiros. Vale lembrar que no caso do ponto a ponto, o traçado passa por baixo do piso do apartamento. A Figura 25 a seguir mostra o traçado em planta, desenhado para simular a instalação ponto a ponto para os tubos em PEX.

Figura 25 - Traçado ponto a ponto para o PEX. É possível visualizar o registro geral (RG), o distribuidor 1 (D1), seguindo o traçado para o distribuidor 2 (D2).



Fonte: Autor (2017).

4.3 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA UTILIZANDO O PVC

4.3.1 Parâmetros hidráulicos

Avaliando o traçado ramificado, nomeando os trechos e verificando as peças de utilização, foi possível determinar os pesos relativos, as vazões, os diâmetros, as velocidades e perdas de carga. A verificação de pressão estática e dinâmica foi feita para os pontos mais desfavoráveis. Considerando que o reservatório tem três metros de altura, instalado a 2,5 metros do piso da cobertura, e que a laje possua espessura média de meio metro, é possível encontrar a pressão disponível. A Tabela 11 e a Tabela 12 a seguir trazem estes resultados de dimensionamento para o PVC, dos parâmetros hidráulicos e pressões, respectivamente.

Tabela 11 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PVC.

TRECHO	Peso relativo	Vazão [L/S]	Diâmetro [mm]	Velocidade [m/s]
Entrada do apartamento - ramal principal	69,8	2,506	40	1,996
Sub-ramal 1 - cozinha	2,40	0,465	25	0,947
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	0,70	0,251	20	0,799
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	0,70	0,251	20	0,799
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	1,00	0,300	20	0,955
Sub - ramal 2 - banheiros	67,4	2,463	32	3,064
Sub - ramal 2 - lavatório 1	0,30	0,164	20	0,523
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	33,0	1,723	32	2,144
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	0,40	0,190	20	0,604
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	0,40	0,190	20	0,604
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	33,0	1,723	32	2,144
Sub - ramal 2 - lavatório 2	0,30	0,164	20	0,523

Tabela 12 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o PVC.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]			
Sub-ramal 1 - Tanque		Sub-ramal 2 – Lavatório 2	
Pressão disponível [m]	6,50	Pressão disponível [m]	6,75
Perda de carga [m]	1,03	Perda de carga [m]	3,94
Pressão residual [m]	5,47	Pressão residual [m]	2,81

Observando os resultados da Tabela 4, percebemos que o dimensionamento hidráulico é satisfatório, visto que as pressões residuais nos dois pontos mais desfavoráveis são maiores que 1 metro de coluna de água, conforme especifica a norma de referência ABNT NBR 5626.

4.3.2 Orçamento para o PVC ramificado

Para elaborar um orçamento econômico para a instalação hidráulica considerando o gasto com materiais, foi necessário efetuar uma pesquisa de preços sobre o PVC, determinando os valores das tubulações e principais conexões utilizadas. Os resultados da pesquisa econômica são mostrados no Anexo B.

De posse dos preços, foi possível efetuar um orçamento econômico para o traçado adotado. A Tabela 13 mostra os itens utilizados, o preço e a sua quantidade, assim como o gasto para cada item, totalizando então o gasto total com materiais para um apartamento do pavimento tipo.

Tabela 13 - Orçamento para o dimensionamento em PVC.

ITEM	Unidade	Quantidade	Preço uni. [R\$]	Gasto total [R\$]
Tubo 20 mm	m	18,95	1,8	34,11
Tubo 25 mm	m	4,5	2,39	10,755
Tubo 32 mm	m	16,5	5,12	84,48
Tubo 40 mm	m	7,7	7,48	57,596
Joelho 45° - 20 mm	unitário	2	0,68	1,36
Joelho 90 ° - 20 mm	unitário	14	0,44	6,16
Joelho 90 ° - 25 mm	unitário	1	0,66	0,66
Joelho 90 ° - 32 mm	unitário	5	1,71	8,55
Joelho 90 ° - 40 mm	unitário	2	4,18	8,36
Tê - 25 x 20 mm	unitário	2	2,63	5,26
Tê - 32 x 25 mm	unitário	3	5,11	15,33
Registro de gaveta	unitário	1	68,81	68,81
Registro de Pressão	unitário	2	38,13	76,26
Luva 32 mm	unitário	1	0,92	0,92
Luva 40 mm	unitário	1	2,05	2,05
Luva 32 x 25 mm	unitário	2	1,65	3,3
Luva 25 x 20 mm	unitário	5	0,68	3,4
Tê - 32 mm	unitário	3	2,75	8,25
Luva 40 x 32 mm	unitário	1	2,03	2,03
Total para um apartamento				397,641

Fonte: <http://sinapiixel.wordpress.com/2017/>.

4.4 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA PARA O PEX EM TRAÇADO RAMIFICADO

4.4.1 Parâmetros hidráulicos

O mesmo traçado que foi utilizado no dimensionamento em PVC foi adotado para uma instalação em tubulações PEX, a fim de efetuar uma comparação hidráulica e econômica entre os dois materiais. O dimensionamento foi feito de maneira inteiramente análoga, e os resultados são mostrados nas tabelas que seguem. A Tabela 14 traz os pesos, as vazões e diâmetros, assim como a velocidade para cada trecho, para o dimensionamento em PEX ramificado.

Tabela 14 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PEX ramificado.

TRECHO	Peso relativo	Vazão [L/h]	Diâmetro [mm]	Velocidade [m/s]
Entrada do apartamento - ramal principal	69,8	9023	32	3,118
Sub-ramal 1 - cozinha	2,40	1673	25	0,947
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	0,70	903,6	20	0,799
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	0,70	903,6	20	0,799
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	1,00	1080	20	0,955
Sub - ramal 2 - banheiros	67,4	8866	32	3,064
Sub - ramal 2 - lavatório 1	0,30	591,5	20	0,523
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	33,0	6204	32	2,144
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	0,40	683,1	20	0,604
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	0,40	683,1	20	0,604
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	33,0	6204	32	2,144
Sub - ramal 2 - lavatório 2	0,30	591,5	20	0,523

Observando a Tabela 14 acima, percebe-se que no trecho de entrada do apartamento-ramal principal, o dimensionamento indica que o diâmetro teoricamente deveria ser de 40 mm, visto que a velocidade observada está um pouco acima de 3 m/s. Porém, comercialmente o diâmetro de 40 mm não está disponível, adotando-se para o trecho o comercial mais próximo de 32 mm. Muito embora a velocidade esteja acima de 3 m/s, a grande flexibilidade e durabilidade do PEX permite que o material absorva as vibrações provenientes da velocidade um pouco mais alta sem que ocorram problemas de colapso na tubulação. Por sua flexibilidade, o PEX permite também cruzar alguns trechos e efetuar a instalação sem necessidade de joelhos, fato que aumentaria a perda de carga localizada e tornaria a instalação mais onerosa.

A Tabela 15 traz as pressões residuais, que também foram satisfatórias para os pontos mais desfavoráveis.

Tabela 15 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o PEX ramificado.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]					
Sub-ramal 1 - Tanque			Sub-ramal 2 – Lavatório 2		
Pressão disponível	[m]	6,50	Pressão disponível	[m]	6,75
Perda de carga	[m]	1,07	Perda de carga	[m]	3,44
Pressão residual	[m]	5,43	Pressão residual	[m]	3,31

4.4.2 Orçamento para o PEX ramificado

Analogamente ao caso do PVC, foi realizada uma pesquisa econômica sobre os preços do PEX, para as tubulações e conexões utilizadas, cujos valores são mostrados no Anexo B. Assim, de posse dos preços, é possível montar um orçamento para a instalação em PEX ramificado, conforme mostra a Tabela 16 abaixo.

Tabela 16 - Orçamento para o dimensionamento em PEX ramificado.

ITEM	Unidade	Quantidade	Preço uni. [R\$]	Gasto total [R\$]
Tubo 20 mm	m	18,95	10,68	202,386
Tubo 25 mm	m	4,5	16,49	74,205
Tubo 32 mm	m	24,2	26,46	640,332
Conector - 32 mm	unitário	7	21,14	147,98
Conector - 32 mm	unitário	4	30,21	120,84
TÊ - 32 mm	unitário	3	90,41	271,23
Tê - 25x20x25 mm	unitário	1	67,34	67,34
Tê - 25x20x20 mm	unitário	1	63,46	63,46
Tê - 32x20x32 mm	unitário	3	82,42	247,26
Luva 32 x 25 mm	unitário	1	45,32	45,32
Luva 32 x 20 mm	unitário	1	40,5	40,5
Registro de gaveta	unitário	1	49,49	49,49
Registro de Pressão	unitário	2	38,13	76,26
Total para um apartamento				2046,603

Fonte: <http://www.lojamerccom.br/>.

4.5 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHPA UTILIZANDO O PEX EM PONTO A PONTO

4.5.1 Parâmetros hidráulicos

O sistema ponto a ponto para o PEX foi traçado de forma otimizada, ou seja, com um menor gasto teórico em comprimento de tubulação, a fim de obter-se menores gastos com tubulação, dispensando a utilização de joelhos e tês intermediários. A Tabela 17 traz a denominação dos trechos, pesos, vazões, velocidades e diâmetros.

Tabela 17 - Trechos e parâmetros hidráulicos para o traçado em PEX ponto a ponto.

TRECHO	Peso relativo	Vazão [L/h]	Diâmetro [mm]	Velocidade [m/s]
Entrada do Apartamento - Distribuidor 1	69,8	9023	32	3,118
Distribuidor 1 - pia da cozinha	0,70	903,6	20	0,799
Distribuidor 1 - pia da área de serviços	0,70	903,6	20	0,799
Distribuidor 1-tanque da área de serviços	1,00	1080	20	0,955
Distribuidor 1 - Distribuidor 2	67,4	8866	32	3,064
Distribuidor 2 - lavatório 1	0,30	591,5	20	0,523
Distribuidor 2 - vaso 1 e duchinha 1	33,0	6204	32	2,144
Distribuidor 2 - chuveiro 1	0,40	683,1	20	0,604
Distribuidor 2 - chuveiro 2	0,40	683,1	20	0,604
Distribuidor 2 - vaso 2 e duchinha 2	33,0	6204	32	2,144
Distribuidor 2 - lavatório 2	0,30	591,5	20	0,523

Analogamente aos casos anteriores, a pressão residual foi verificada para os pontos mais desfavoráveis. A Tabela 18 mostra os valores obtidos.

Tabela 18 - Pressões disponíveis e pressões residuais para o sistema ponto a ponto.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]			
Sub-ramal 1 - Tanque		Sub-ramal 2 – Lavatório 2	
Pressão disponível [m]	6,50	Pressão disponível [m]	6,75
Perda de carga [m]	3,89	Perda de carga [m]	2,81
Pressão residual [m]	2,60	Pressão residual [m]	3,94

Em que novamente percebemos que as pressões residuais são satisfatórias, visto que estão acima do valor mínimo especificado em norma.

4.5.2 Orçamento para o PEX ponto a ponto

Uma vez que a pesquisa de preços já foi efetuada, de posse dos valores é possível determinar um orçamento para o PEX ponto a ponto, levando em conta somente o gasto com materiais. Vale lembrar que no caso do ponto a ponto é necessário utilizar módulos distribuidores que possuem preços relativamente altos, assim como tubo bainha. A Tabela 19 traz o orçamento para o sistema ponto a ponto.

Tabela 19 - Orçamento para o PEX em sistema ponto a ponto.

ITEM	Unidade	Quantidade	Preço uni. [R\$]	Gasto total [R\$]
Tubo 20 mm	m	39,22	10,68	418,87
Tubo 32 mm	m	20	26,46	529,20
Conector - 20 mm	unitário	7	21,14	147,98
Conector - 32 mm	unitário	4	30,21	120,84
Luva 32 x 20 mm	unitário	1	40,50	40,50
Distribuidor 3 saidas	unitário	2	181,01	362,02
Distribuidor 2 saidas	unitário	1	150,98	150,98
Registro de gaveta	unitário	1	49,49	49,49
Registro de Pressão	unitário	2	38,13	76,26
Tê 32 mm	unitário	2	90,41	180,82
Tubo bainha 20 mm	m	39,22	3,72	145,89
Tubo bainha 32 mm	m	20	4,00	80,00
Total para um apartamento				2302,858

Fonte: <http://www.lojamer.com.br/>.

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO

4.6.1 Comparação hidráulica

A Tabela 20 abaixo resume a comparação hidráulica entre os dois traçados, em relação às perdas de carga total para efetuar a instalação de água do apartamento, com cálculos para a perda de carga total presentes no Anexo B.

Tabela 20 - Perdas de carga finais para os traçados em estudo.

	PVC ramificado	PEX Ramificado	PEX Ponto a ponto
Perda de Carga total [m]	13,528	11,087	11,424

Ao avaliar os resultados, percebemos que hidraulicamente o PEX foi mais vantajoso em relação ao PVC, tanto no traçado ramificado quanto no traçado ponto a ponto.

Muito embora as tubulações em PEX sejam um pouco mais rugosas que o PVC, com a rugosidade absoluta do PEX de 0,004 mm, enquanto que a do PVC é de aproximadamente 0,0015 mm, a perda singular no PEX é muito menor, em vista dos menores comprimentos equivalentes para as conexões deste material (TIGRE, 2010).

Assim, para o traçado ramificado, mesmo que a perda distribuída para um mesmo comprimento seja maior no PEX, a sua perda singular é muito reduzida, o que gera uma perda total menor, tornando o sistema ramificado em PEX vantajoso em relação ao PVC. O caso é análogo no sistema ponto a ponto, em que a perda de carga total também foi menor quando comparada ao PVC, resultando em uma pressão maior nos pontos de utilização, conforme foi verificado nas análises dos pontos mais desfavoráveis.

4.6.2 Comparação econômica

A Tabela 21 abaixo resume a comparação econômica entre os dois materiais, para efetuar a instalação hidráulica de um apartamento tipo.

Tabela 21 - Gastos finais para os traçados em estudo.

	PVC ramificado	PEX Ramificado	PEX Ponto a ponto
Gasto total [R\$]	397,64	2046,60	2302,86

Observando os valores finais, o PEX é mais oneroso que o PVC, para os dois traçados avaliados.

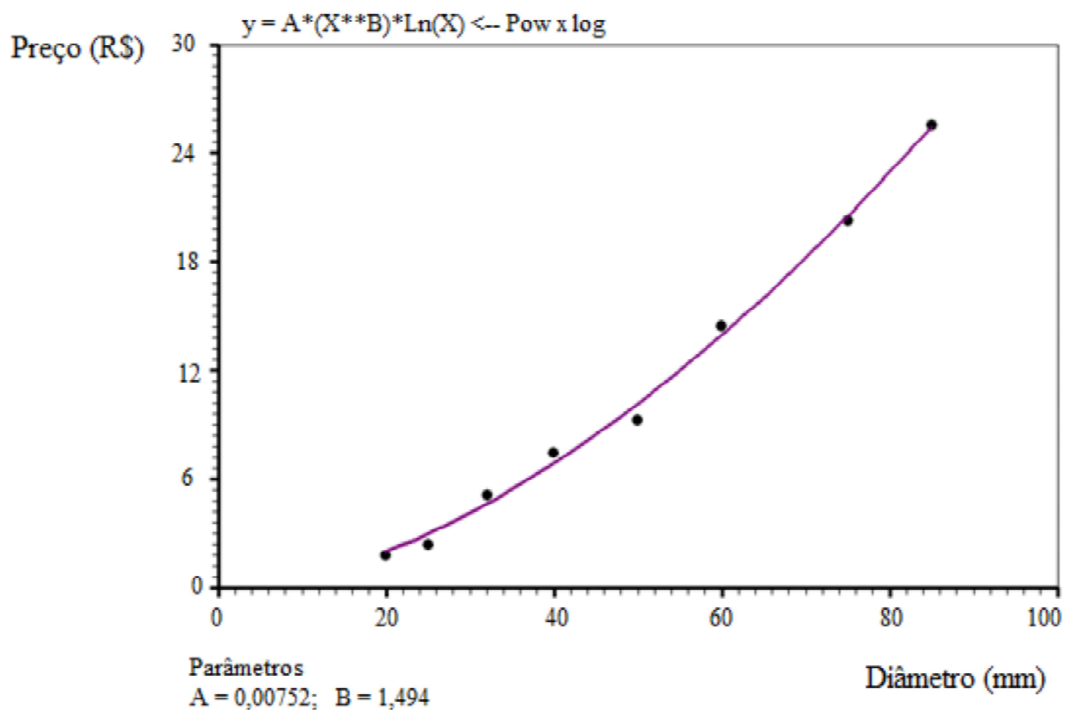
No sistema ramificado, o PEX onera aproximadamente 5 vezes mais que o PVC, embora adote o mesmo traçado. Para o ponto a ponto o gasto é de aproximadamente 6 vezes o gasto com PVC. Este fato é esperado em vista dos altos valores comerciais do PEX, que ainda está se difundindo no mercado.

4.7 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA

A seguir são mostradas as curvas geradas a partir do Software LAB Fit (2009), que descrevem as funções de preços em função do diâmetro, para tubulações e acessórios, para o material convencional PVC, (Gráficos 1 a 3) em seguida para o PEX (Gráficos de 4 a 6).

4.7.1 Gráficos e funções para os preços do PVC e do PEX

GRÁFICO 1 - Curva que descreve a função de preços das tubulações de PVC em função do diâmetro.

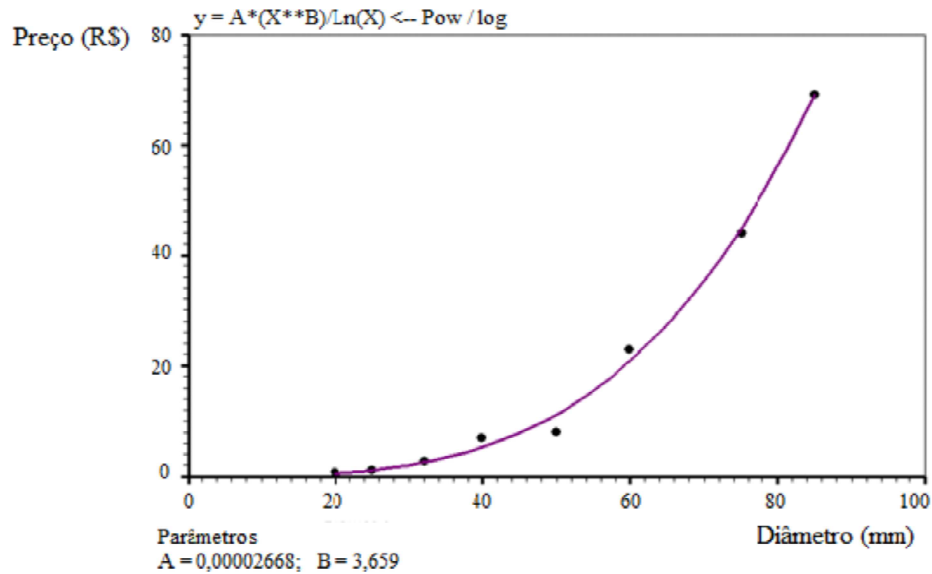


Fonte: Autor (2017).

Para este gráfico, a relação de preço em função do diâmetro será dada por:

$$(P(D)) = y = (0,007522) \times D^{1,494} \times \ln(D) . \quad (19)$$

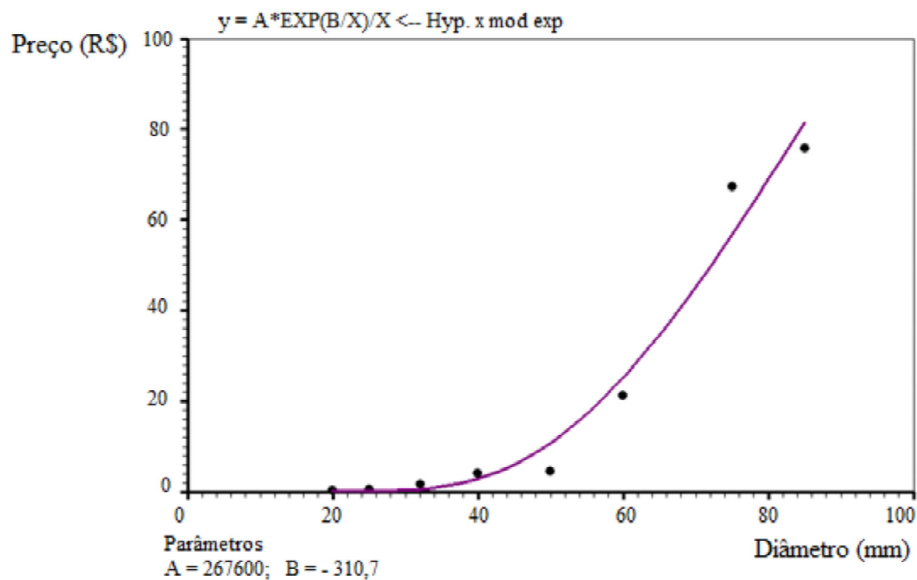
GRÁFICO 2 - Curva que descreve a função de preços do Tê de PVC em função do diâmetro.



Fonte: Autor (2017).

Para o qual a função será: $(P(D)) = 0,00002668) \times \left(\frac{D^{3,659}}{\text{Ln}(D)}\right)$. (20)

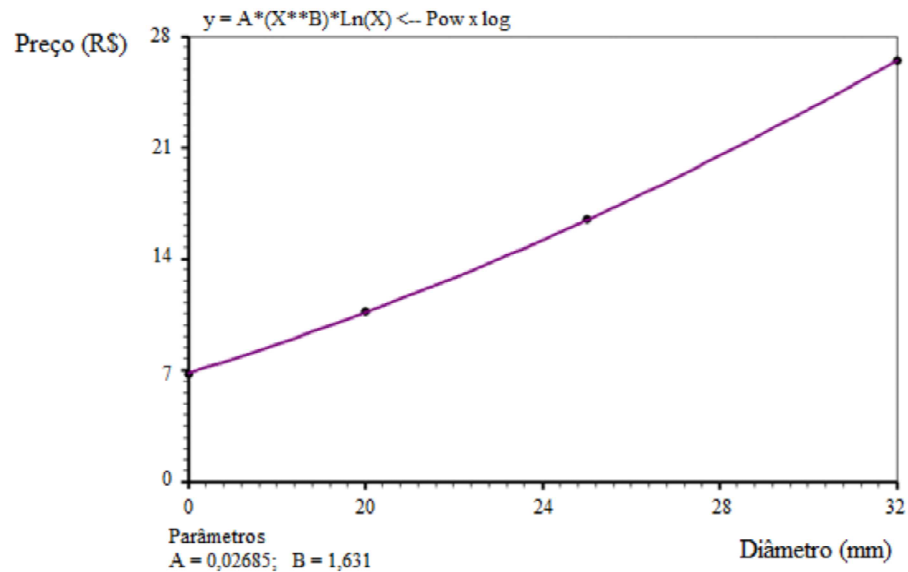
GRÁFICO 3 - Curva que descreve a função de preços do joelho de PVC em função do diâmetro.



Fonte: Autor (2017).

E sua correspondente função: $(P(D)) = (267600) \times \left(e^{\left(\frac{-310,7}{D}\right)}\right) \times \left(\frac{1}{D}\right)$. (21)

GRÁFICO 4 - Curva que descreve a função de preços das tubulações de PEX em função do diâmetro.

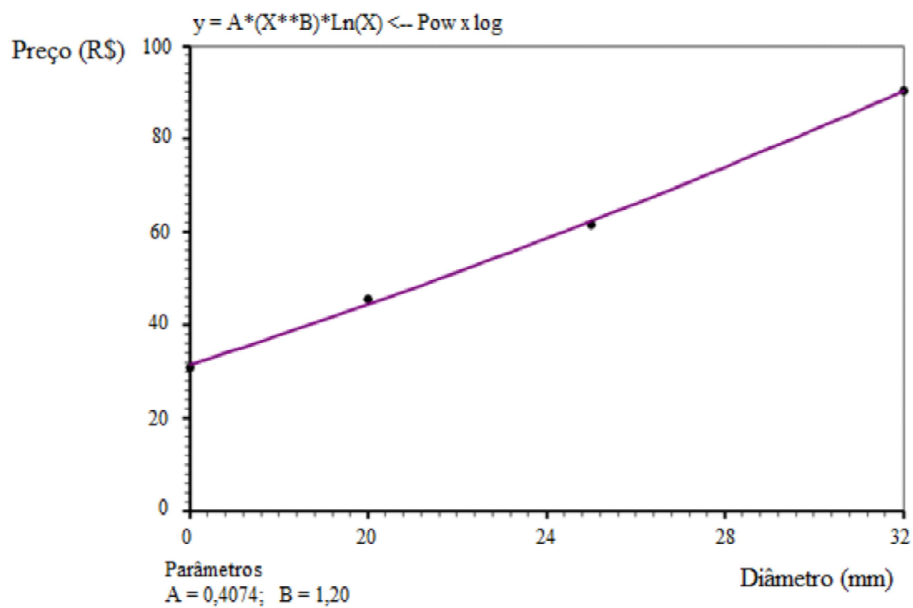


Fonte: Autor (2017).

Cuja relação de preço em função do diâmetro é dada como:

$$(P(D)) = y = (0,02685) \times D^{1,631} \times \ln(D) . \quad (22)$$

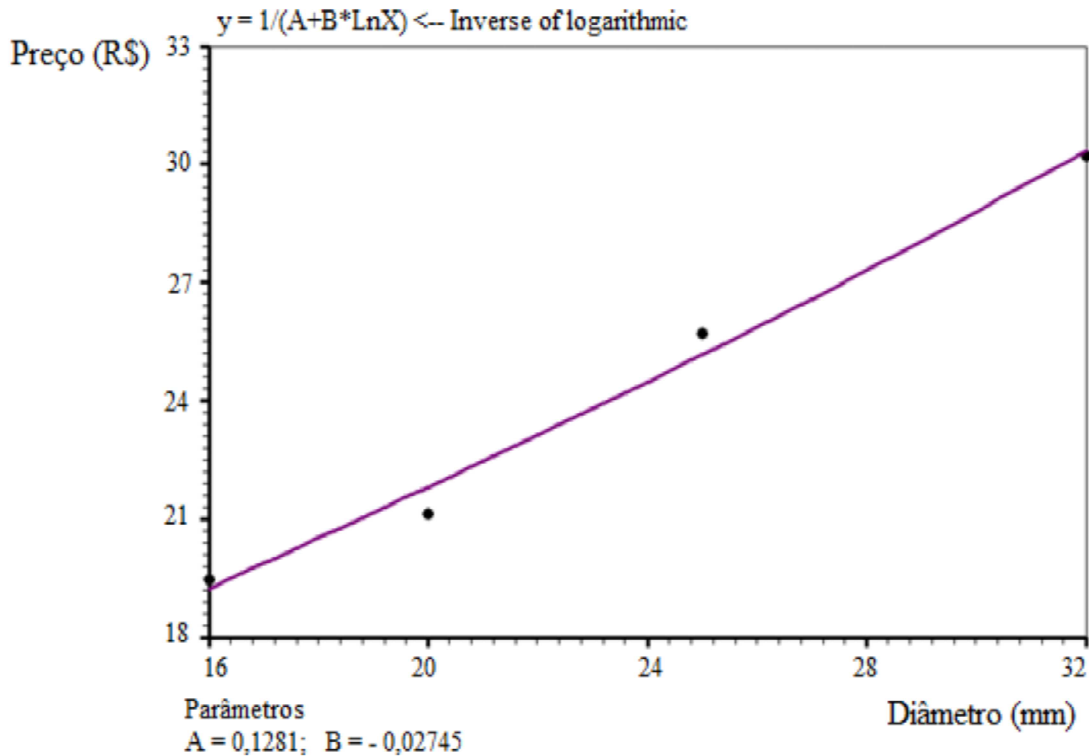
GRÁFICO 5 - Curva que descreve a função de preços do Tê de PEX em função do diâmetro.



Fonte: Autor (2017).

E sua respectiva função: $(P(D)) = (0,4074) \times (D^{1,20}) \times \ln(D) . \quad (23)$

GRÁFICO 6 - Curva que descreve a função de preços do conector fêmea de PEX em função do diâmetro.



Fonte: Autor (2017).

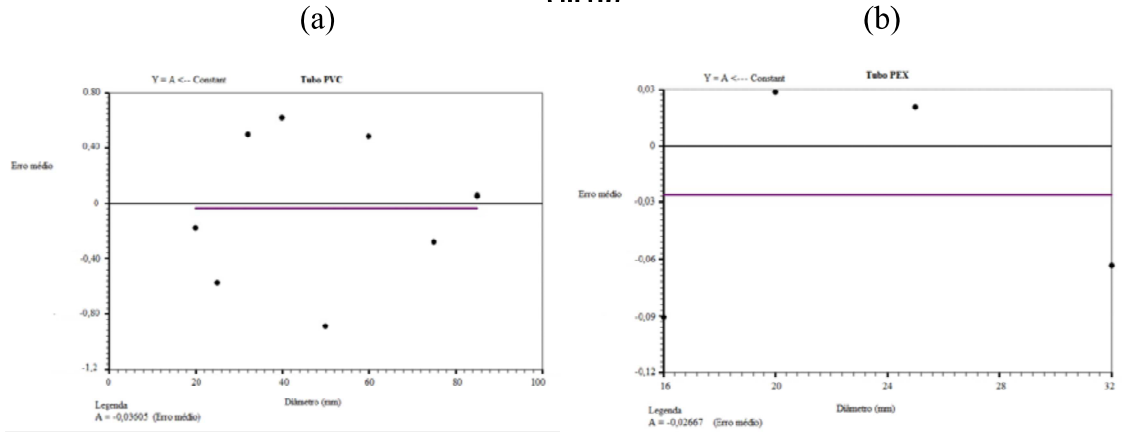
E a sua respectiva função, definida como:

$$(P(D)) = \frac{1}{(0,1281 - 0,02745 \times \ln D)} \quad (24)$$

4.7.3 Gráficos de erro

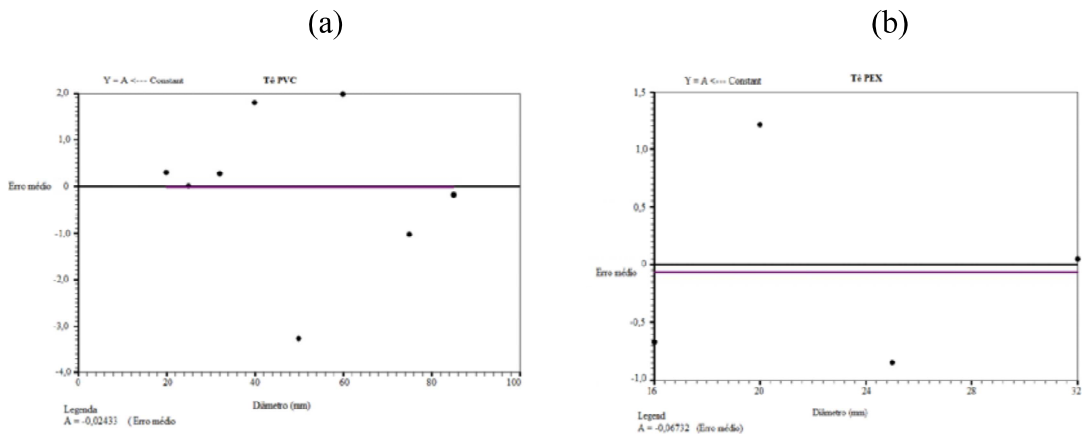
Uma vez que as funções de custo foram obtidas, é possível calcular os preços para qualquer diâmetro, substituindo os valores nas expressões que o definem. Assim, para cada item, os valores de mercado podem ser comparados aos valores obtidos pelas funções, o que permite avaliar se as funções geradas são precisas. Esta análise é feita por meio do erro médio, que corresponde a diferença entre os valores de mercado e os valores obtidos pelas funções. Estes gráficos foram gerados no software LAB Fit, e estão mostrados nas Figuras 26, 27 e 28 com os respectivos erros médios, para cada uma das funções determinadas anteriormente, nas quais é possível perceber que os erros médios foram muito pequenos, indicando funções muito precisas.

Figura 26 - Gráficos de erro médio para as tubulações, para o tubo PVC em (a) e para o tubo PEX em (b)



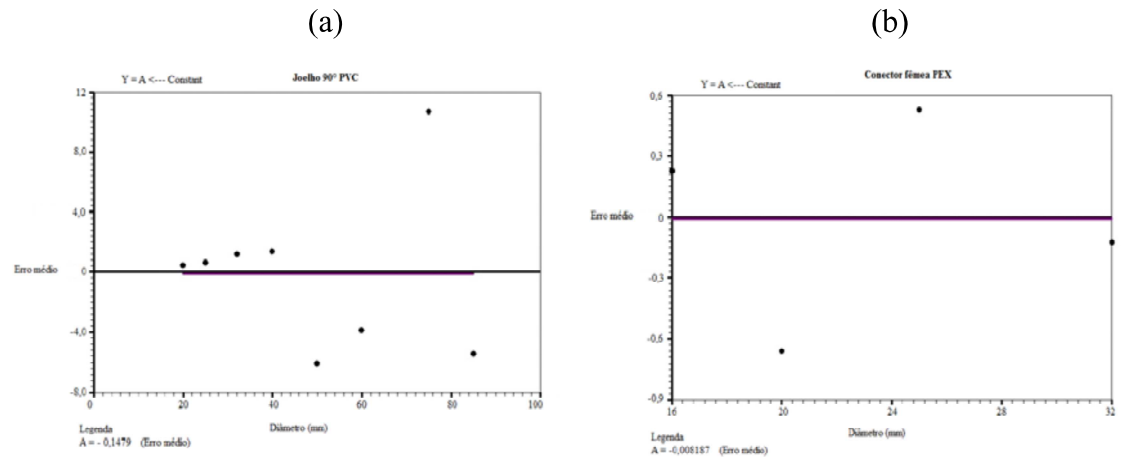
Fonte: Autor (2017).

Figura 27 - Gráficos de erro médio para o tê, para o tê PVC em (a), e para o tê PEX em (b)



Fonte: Autor (2017).

Figura 28 - Gráficos de erro médio para o joelho PVC 90° em (a), e para o conector fêmea PEX em (b).



Fonte: Autor (2017).

4.7.4 Otimização econômica

Uma vez que as funções foram obtidas, elas podem ser aplicadas a qualquer diâmetro, fornecendo um valor aproximado de preço. De tal forma, foi feita a otimização econômica para cada trecho possível, tanto para o PVC quanto para o PEX, nos traçados ramificado e ponto a ponto. Os resultados são mostrados a seguir.

4.7.4.1 Resultados da otimização econômica para o traçado ramificado em PVC

Para cada trecho do traçado, as funções obtidas foram aplicadas, somando-se convenientemente os seus valores para os diâmetros estabelecidos, considerando também alguns itens de preço fixo, como registros por exemplo. Assim é possível estimar o custo por trecho, em que a soma dos custos de cada trecho determina o gasto total. Aplicando então a otimização nas funções, os diâmetros são reduzidos para minimizar o custo. A Tabela 22 abaixo traz o custo com cada trecho, assim como o custo total, tanto para os diâmetros iniciais, quanto após a otimização.

Tabela 22 - Otimização econômica do traçado em PVC.

TRECHO	Diâmetro inicial [mm]	Custo inicial [R\$]	Diâmetro reduzido [mm]	Custo otimizado [R\$]
Entrada do apartamento - ramal principal	40	129,37	32,62	108,87
Sub-ramal 1 - cozinha	25	16,14	20	11,08
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	20	7,27	20	7,27
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	20	7,27	20	7,27
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	20	10,44	20	10,44
Sub - ramal 2 - banheiros	32	49,04	32	49,04
Sub - ramal 2 - lavatório 1	20	10,25	20	10,25
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	19,87	27,05	13,30
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	20	49,27	20	49,27
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	20	47,89	20	47,89
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	19,87	27,05	13,30
Sub - ramal 2 - lavatório 2	20	11,06	20	11,06
Total		377,74		339,04

Observando o gasto total obtido para o custo inicial de instalação, e comparando-o ao valor final do orçamento feito anteriormente para este traçado que é mostrado na Tabela 13,

percebemos que os valores estão muito próximos, o que nos diz que as funções obtidas pelo LAB Fit têm boa aproximação e precisão. Com a otimização do custo, os valores obtidos para os diâmetros são decimais, e assim, devem ser arredondados para o diâmetro comercial mais próximo, o que permite obter os valores finais da otimização, conforme mostra a Tabela 23.

Tabela 23 - Diâmetros adotados e custo final para o PVC.

TRECHO	Diâmetro adotado [mm]	Custo final [R\$]	Velocidade [m/s]
Entrada do apartamento - ramal principal	40	129,37	1,996
Sub-ramal 1 - cozinha	20	11,08	1,480
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	20	7,27	0,799
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	20	7,27	0,799
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	20	10,44	0,955
Sub - ramal 2 - banheiros	32	49,04	3,064
Sub - ramal 2 - lavatório 1	20	10,25	0,523
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	19,87	2,144
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	20	49,27	0,604
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	20	47,89	0,604
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	19,87	2,144
Sub - ramal 2 - lavatório 2	20	11,06	0,523
Total		372,68	

Percebemos que a redução no custo final foi de aproximadamente R\$ 5, que é relativamente pequena, visto que somente o trecho sub-ramal 1 - cozinha teve seu diâmetro reduzido de 25 para 20 mm. Observando as velocidades, estas atendem ao requisito mínimo da NBR 5626, que limita a velocidade em cada trecho em 3 m/s no máximo. A última verificação está na pressão residual dos pontos mais desfavoráveis da instalação, visto que a redução de diâmetro aumenta a perda de carga contínua e singular em um dado trecho (PORTO, 2006). A Tabela 24 mostra os valores de pressão nos pontos mais desfavoráveis, no qual as pressões residuais continuam satisfatórias.

Tabela 24 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PVC.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]			
Sub-ramal 1 - Tanque		Sub-ramal 2 - Lavatório 2	
Pressão disponível [m]	6,50	Pressão disponível [m]	6,75
Perda de carga [m]	2,08	Perda de carga [m]	4,03
Pressão residual [m]	4,42	Pressão residual [m]	2,72

4.7.4.2 Resultados da otimização econômica para o traçado ramificado em PEX

O raciocínio é análogo ao caso do PVC, porém agora considerando as funções do PEX para tubulações e conexões. A Tabela 25 mostra a otimização feita.

Tabela 25 - Otimização econômica do traçado em PEX ramificado.

TRECHO	Diâmetro inicial [mm]	Custo inicial [R\$]	Diâmetro reduzido [mm]	Custo otimizado [R\$]
Entrada do apartamento - ramal principal	32	344,09	32,62	354,42
Sub-ramal 1 - cozinha	25	119,43	16	76,15
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	20	110,44	16	100,28
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	20	106,56	16	96,40
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	20	60,15	16	43,90
Sub - ramal 2 - banheiros	32	278,50	32,34	284,20
Sub - ramal 2 - lavatório 1	20	128,19	16	117,07
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	230,60	27,05	181,08
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	20	171,11	16	158,28
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	20	163,65	16	153,48
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	230,60	27,05	181,08
Sub - ramal 2 - lavatório 2	20	109,17	16	89,88
Total		2052,52		1836,21

E novamente os diâmetros são ajustados, para obter o custo final, na Tabela 26.

Tabela 26 - Diâmetros adotados e custo final para o PEX ramificado.

TRECHO	Diâmetro adotado [mm]	Custo final [R\$]	Velocidade [m/s]
Entrada do apartamento - ramal principal	32	344,09	3,118
Sub-ramal 1 - cozinha	16	92,38	2,313
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	16	64,40	1,249
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	16	64,40	1,249
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	16	43,90	1,499
Sub - ramal 2 - banheiros	32	278,50	3,064
Sub - ramal 2 - lavatório 1	16	114,15	0,818
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	230,61	2,144
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	16	154,12	0,944
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	16	149,32	0,944
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	230,61	2,144
Sub - ramal 2 - lavatório 2	16	110,93	0,817
Total		1877,41	

Observando os resultados, a velocidade do trecho de entrada do apartamento está um pouco acima do valor permitido por norma. Porém, o maior diâmetro de PEX comercialmente disponível é o de 32 mm, que foi adotado para o trecho, e como o material é flexível, ele absorve as vibrações sem sofrer danos que resultem em ruptura. As demais velocidades estão de acordo com a norma. Na maioria dos trechos, o diâmetro pôde ser reduzido para 16 mm, que é comercialmente disponível para o PEX, o que possibilitou uma boa economia, de aproximadamente R\$ 175 em relação ao dimensionamento inicial. Sob o ponto de vista das pressões residuais, a Tabela 27 mostra os valores, que também são satisfatórios.

Tabela 27 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PEX ramificado.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]			
Sub-ramal 1 - Tanque		Sub-ramal 2 – Lavatório 2	
Pressão disponível [m]	6,50	Pressão disponível [m]	6,75
Perda de carga [m]	4,08	Perda de carga [m]	4,21
Pressão residual [m]	2,42	Pressão residual [m]	2,54

4.7.4.3 Resultados da otimização econômica para o ponto a ponto em PEX

A otimização também foi aplicada ao traçado ponto a ponto, como ilustrado na Tabela 18.

Tabela 28 - Otimização econômica do traçado em PEX ponto a ponto.

TRECHO	Diâmetro inicial [mm]	Custo inicial [R\$]	Diâmetro reduzido [mm]	Custo otimizado [R\$]
Entrada do apartamento - Distribuidor 1	32	456,38	32,62	461,88
Distribuidor 1 - pia da cozinha	20	221,39	16	179,66
Distribuidor 1 - pia da área de serviços	20	97,96	16	68,22
Distribuidor 1-tanque da área de serviços	20	113,51	16	78,22
Distribuidor 1 - Distribuidor 2	32	544,18	16	548,52
Distribuidor 2 - lavatório 1	20	39,38	32,34	30,54
Distribuidor 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	236,62	16	196,63
Distribuidor 2 - chuveiro 1	20	111,59	27,05	90,59
Distribuidor 2 - chuveiro 2	20	118,73	16	95,18
Distribuidor 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	278,35	16	215,62
Distribuidor 2 - lavatório 2	20	89,97	27,05	63,08
Total		2308,08		2028,14

Ajustando os diâmetros para os comerciais, temos o custo final da otimização, como mostrado na Tabela 29.

Tabela 29 - Diâmetros adotados e custo final para o PEX ponto a ponto.

TRECHO	Diâmetro adotado [mm]	Custo final [R\$]	Velocidade [m/s]
Entrada do apartamento - Distribuidor 1	32	435,42	3,118
Distribuidor 1 - pia da cozinha	16	179,66	1,249
Distribuidor 1 - pia da área de serviços	16	68,22	1,249
Distribuidor 1-tanque da área de serviços	16	78,22	1,493
Distribuidor 1 - Distribuidor 2	32	510,09	3,064
Distribuidor 2 - lavatório 1	16	30,54	0,818
Distribuidor 2 - vaso 1 e duchinha 1	32	257,67	2,144
Distribuidor 2 - chuveiro 1	16	89,35	0,944
Distribuidor 2 - chuveiro 2	16	93,94	0,944
Distribuidor 2 - vaso 2 e duchinha 2	32	278,35	2,144
Distribuidor 2 - lavatório 2	16	63,08	0,818
Total		2084,54	

Para o traçado ponto a ponto, a otimização alcançou uma grande economia, de aproximadamente R\$ 225 em relação ao dimensionamento inicial. Para todos os trechos as velocidades estão abaixo do valor máximo, exceto no trecho de entrada, que é um pouco maior, porém não oferece risco à instalação. Por fim, a verificação da pressão residual para os pontos mais desfavoráveis é mostrada na Tabela 30.

Tabela 30 - Pressões disponíveis e residuais após a otimização para o PEX ponto a ponto.

Pressão residual no ponto mais desfavorável [mca]					
Sub-ramal 1 - Tanque			Sub-ramal 2 – Lavatório 2		
Pressão disponível	[m]	6,50	Pressão disponível	[m]	6,75
Perda de carga	[m]	6,41	Perda de carga	[m]	6,48
Pressão residual	[m]	1,99	Pressão residual	[m]	1,77

Com a redução drástica do diâmetro de alguns trechos, há um aumento significativo nas perdas de carga. Porém, mesmo que as pressões residuais tenham se reduzido muito para a otimização do traçado ponto a ponto, ainda continuam acima do valor mínimo de 1 mca especificado em norma, o que nos diz que hidráulicamente a otimização foi satisfatória.

5 CONCLUSÕES

De acordo com o dimensionamento inicial, sob o ponto de vista hidráulico o PEX obteve menores perdas de carga em relação ao PVC, tanto no traçado ramificado quanto no traçado ponto a ponto, o que é muito vantajoso, já que menores perdas resultam em uma maior pressão de utilização nos pontos de consumo analisados, e portanto em uma maior eficiência hidráulica e melhor continuidade de distribuição. Entretanto, o orçamento econômico deste material mostrou que ele é muito mais oneroso que o PVC, tanto em tubulações quanto em conexões. Para tentar contornar este problema, pode ser adotada uma otimização.

Para uma otimização efetiva, foram obtidas funções no software LAB Fit, que descreveram como os preços das tubulações se comportavam com a variação do diâmetro. Ao obter as funções, a comparação do valor calculado pela função com o valor de preço de mercado pesquisado, permitiu avaliar o erro relativo entre os valores, dado pela diferença entre o valor da função e o valor de mercado. O erro médio observado foi muito próximo a zero, tanto para as funções do PVC quanto para as do PEX, o que leva à conclusão de que as funções geradas a partir dos dados iniciais de pesquisa foram muito precisas. Vale salientar que no caso do PVC, as funções obtidas mostram que à medida em que o diâmetro aumenta há uma variação muito grande nos intervalos de preços entre dois diâmetros subsequentes, demonstrando um comportamento desregular no crescimento dos preços, sendo um aspecto negativo para usuários que necessitem de tubos e conexões de maiores diâmetros. O mesmo não acontece no PEX, cujas funções demonstraram que o crescimento dos preços com o aumento dos diâmetros segue uma uniformidade bem definida e com variações regulares dos preços, facilitando a análise quantitativa.

Utilizando então as funções pertinentes a cada trecho, a otimização foi realizada com o auxílio do software Solver, que reduziu o diâmetro de alguns trechos e permitiu obter um novo orçamento para os mesmos traçados antes avaliados, tornando a mesma instalação menos onerosa. Foi observada uma economia em torno de 10 % para um apartamento tipo, tanto no traçado ponto a ponto quanto no ramificado e para os dois materiais, o que é vantajoso quando se considera todos os pavimentos do edifício. De qualquer modo, o PEX é mais oneroso que o PVC, mesmo que uma otimização seja considerada.

Muito embora os custos do PEX sejam elevados em relação ao PVC, este material traz diversas vantagens como a longa durabilidade, excelente resistência à ruptura e à corrosão, assim como o gasto quase nulo com manutenções posteriores, o que não acontece com a utilização do PVC.

De tal forma, mesmo que o investimento inicial seja alto, o PEX traz muitas vantagens à longo prazo, por não necessitar de manutenção, e mesmo que seja necessária, pode ser feita sem a necessidade de quebrar alvenaria, evitando assim a perda de material.

Após a otimização, as verificações hidráulicas de pressão nos pontos mais desfavoráveis demonstraram que a pressão foi menor do que o dimensionamento inicial, para os traçados avaliados. Este fato é esperado, visto que a redução do diâmetro significa um aumento da perda de carga, singular e distribuída. Porém, como as pressões finais foram superiores ao valor mínimo especificado em norma, a otimização econômica também foi satisfatória hidráulicamente, para os dois materiais avaliados, PEX e PVC.

De qualquer modo, o PVC já é muito disseminado no mercado, com eficiência já comprovada ao longo dos anos, sendo ainda o material mais adotado para instalações de água em casas e edifícios. Porém, como foi visto, o PEX traz uma série de vantagens a longo prazo, que compensam o alto investimento inicial deste material, mostrando que para obras de grande porte, este material é muito vantajoso.

De tal forma, para cada caso devem ser avaliadas todas as possibilidades, materiais, vantagens e desvantagens, para assim construir um sistema de distribuição de água mais econômico, eficiente e seguro, garantindo a correta distribuição de água, trazendo um melhor conforto aos usuários das edificações.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7198: **Instalação predial de água quente**. Rio de Janeiro, 1993.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5626: **Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASTRA. Linha Hidráulica. **Tubulações PEX**. Visto em: <<http://www.astrasa.com.br/criativos>>. Acesso em: 29 set. 2017.
- NUNES, L. R.; RODOLFO, A. Jr.; ORMANJI, W., Tecnologia do PVC. São Paulo: ProEditores / Braskem, 2002.
- ALPEROVITS, E. and SAMIR, U. **Design of optimal water distribution systems**, *Water Resources Research*. v.13, n. 6, 1997, p. 885 – 900.
- BRANDÃO, R. G. **Estudo da viabilidade da utilização de PVC, PEX e PPR em empreendimentos multifamiliares**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2 ed, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BARBI DO BRASIL, Produtos, catálogo técnico, 2017.
- BARBOSA, G. M. **Utilização da programação linear na otimização de resultados de produção na empresa**. Artigo técnico, 2014.
- CREDER, H. **Instalações hidráulicas e sanitárias**. 6.ed. - Rio de Janeiro, LTC 2006, cap. 1, p. 1 – 107.
- CIRILO, J. A. **Programação Não linear Aplicada a Recursos Hídricos-Técnicas quantitativas para o gerenciamento dos recursos hídricos**. Editora Universidade – UFRGS – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre – RS, 1997.
- COLLINS, M. et al. **Solving the pipe network analysis problem using optimization techniques**. *Management Science*, v. 24, n. 7, 1978.
- CENEDESE, A.; GALLERANO, F.; MISITI, A. **Multiobjective analysis in optimal solution of hydraulic networks**. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 113, n. 9, 1978.

Disponível em: < <http://revistas.unama.br/index.php/revistatracos/article/view/499/183>>.
Acesso em: 10 out. 2017.

Disponível em: <<http://www.celiomoliterno.eng.br/Arquivos/Pesop/Metodo%20Simplex.pdf>>.
>. Acesso em: 10 out. 2017.

DACARTO BENVIC. **Artigos Técnicos** Em:< http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/index_p.htm>.
>. Acesso em: 10 nov. 2017. O que é PVC. 2 p.

EMMETI. **Catálogo técnico**. Disponível em: < <http://www.emmeti.com.br/catalogos.asp> >.
Acessado em: Acessado em: 29 set. 2017.

FUJIWARA, O.; JENCHAIMAHAKOON, B.; EDIRISINGHE, N. C. P. A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution network. *Water Resources Research*, v. 23, n. 6, 1987.

GUIDIRIZZI, H. L. **Um curso de cálculo**. vol. 1 – 5.ed. Rio de janeiro: LTC, 2002.

GONÇALVES, M. B.; FLEMMING, D. M. **Cálculo B: Funções de várias variáveis, Integrais múltiplas, Integrais curvilíneas e de superfície**. 2º ed, São Paulo, 2007.

GOMES, H. P. **Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água**. 2006.

GRANADOS, A. G. **Infraestructura de Regadios – Redes Colectivas de Riego a Pression**. Servicio de publicacion de E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1990.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2 ed, Vol, Belo Horizonte, 2010.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à Pesquisa operacional**. Editora Campus, Rio de Janeiro – RJ/ Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1998.

HYDRO-PEX. **Tubulação flexível em polietileno de alta densidade reticulado**, 2011.

Informação disponível em: < <http://www.aecweb.com.br> >. Acesso em: 25 mai. 2017.

Informação disponível em: < m.mundoeducacao.bol.com.br/química/polímero-pvcpoliuretano-vinila.htm >. Acesso em: 25 ago. 2017.

Informação disponível em: < <http://www.ecivilnet.com/software/> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

Informação disponível em: < <http://www.epa.gov/water-research/epanet> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

Informação disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeh2UAF/estudo-sobre-instalação-pex?part=2> >. Acesso em: 10 jul. 2017.

Imagem disponível em: < <http://modoconstrucao.blogspot.com.br> >. Acesso em: 01 dez. 2017.

Imagem disponível em: < <http://eletromaxconstrucao.com.br> >. Acesso em: 05 dez. 2017.

Imagem disponível em: < Fonte: <http://www.hidrofelix.com.br> >. Acesso em: 06 dez 2017.

Imagem disponível em: < Fonte: <http://pedreiro.com.br> >. Acesso em: 07 dez 2017.

Imagem disponível em: < Fonte: <http://help.solidworks.com/2013/brazilian/> >. Acesso em: 10 dez 2017.

Imagem disponível em: < Fonte: <http://epsomat.blogspot.com.br> >. Acesso em: 10 dez 2017.

Imagem disponível em: < Fonte: www.ebah.com.br >. Acesso em: 10 dez 2017.

JUNIOR, M. B. **Otimização de um sistema predial de água fria estudo de caso**. Trabalho de dissertação de pós graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

LASDON, L. S.; WAREN, A. D.; JAIN, A.; RATNER, M. **Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming**. ACM Transactions on Mathematical Software, New York, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

LUCAS FILHO, M. **Metodologias de redes colectivas ramificadas de riego a pression que considerem el timbragem como variable intriseca del processo.** Tesis Doctoral – E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1991.

MAIA JUNIOR, J. V. F. **Comparação de métodos de dimensionamento em redes de distribuição de água.** 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 4º Ed. - São Carlos, EESC-USP, 2006.

TIGRE, **Predial PEX Tigre**, catálogo técnico, 2010.

PEX DO BRASIL. Produtos – Sistema hidráulico, 2017. Disponível em: <http://www.pexdobrasil.com.br/>. Acesso em: 12 Novembro 2017.

Preços disponíveis em: < <http://www.lojamercc.com.br/> >. Acesso em 02 out. 2017.

PLASTIC PIPE AND FITTINGS ASSOCIATION. **Design Guide** - Residencial PEX Water Supply Plumbing Systems, 2006.

REALI, M. A. P.; et al. **Instalações prediais de água fria.** Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos, 2012.

ROSAL, M. C. F. **Programação não-linear aplicada a otimização de redes pressurizadas de distribuição de água.** Trabalho de dissertação de pós graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SOUSA, C. C. **Aspectos econômicos e hidráulicos da utilização do PEX como alternativa em projetos de instalações hidráulicas prediais.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SALGADO, Júlio. **Instalação Hidráulica Residencial: A Prática do dia a dia.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2010.

SALVINO, M. M. **Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água.** Trabalho de dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P. **LAB Fit Ajuste de curvas: Para tratamento de dados experimentais**. 2a ed. Editora Universitária da UFPB, João Pessoa, 1998.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P. **LAB Fit Ajuste de curvas: Um software português para tratamento de dados experimentais**. Revista brasileira de ensino de física, v. 26, n. 4, p. 419 – 427, 2004.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LAB Fit Curve Fitting Software**. V.7.2.46 (2009a); disponível em: www.labfit.net, data de acesso: 25 Nov. 2017.

SCHNEIDER, R. M. **Método simplex para programação linear**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

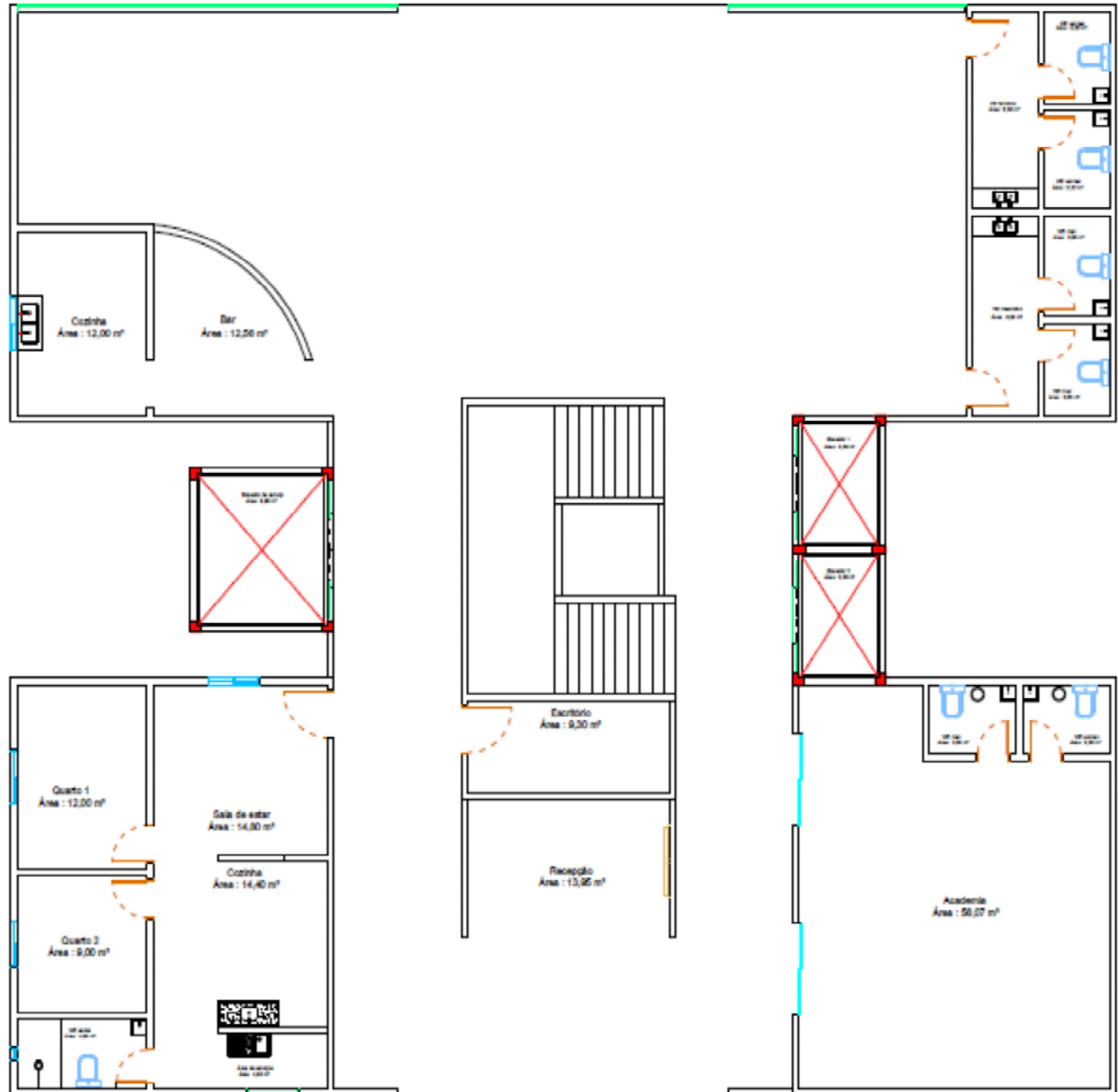
Tabelas SINAP EXEL. Disponível em: < <http://sinapiexel.wordpress.com/2017/> >. Acesso em 01 set. 2017.

THOMAS, G. B. **Cálculo**. Vol. I. São Paulo, 2011.

WILLIAM, H. Press, et al., **Numerical Recipes in Fortran 77, in The Art of Scientific Computing**. (Cambridge University Press, 1996), p. 678-680.

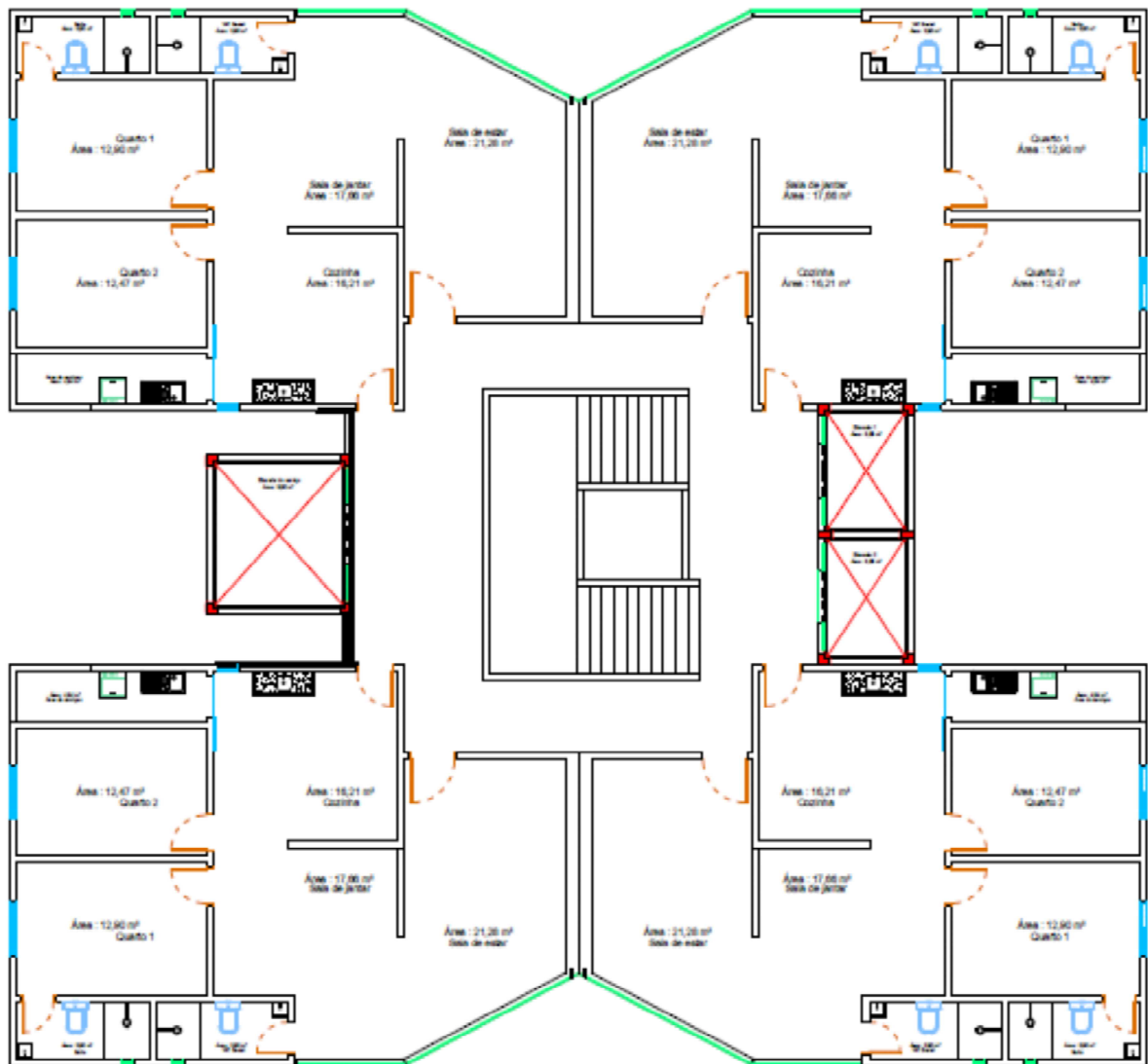
ANEXO A – PLANTAS BAIXAS E PERSPECTIVA ISOMÉTRICA

Figura A1 - Planta baixa do pavimento térreo.



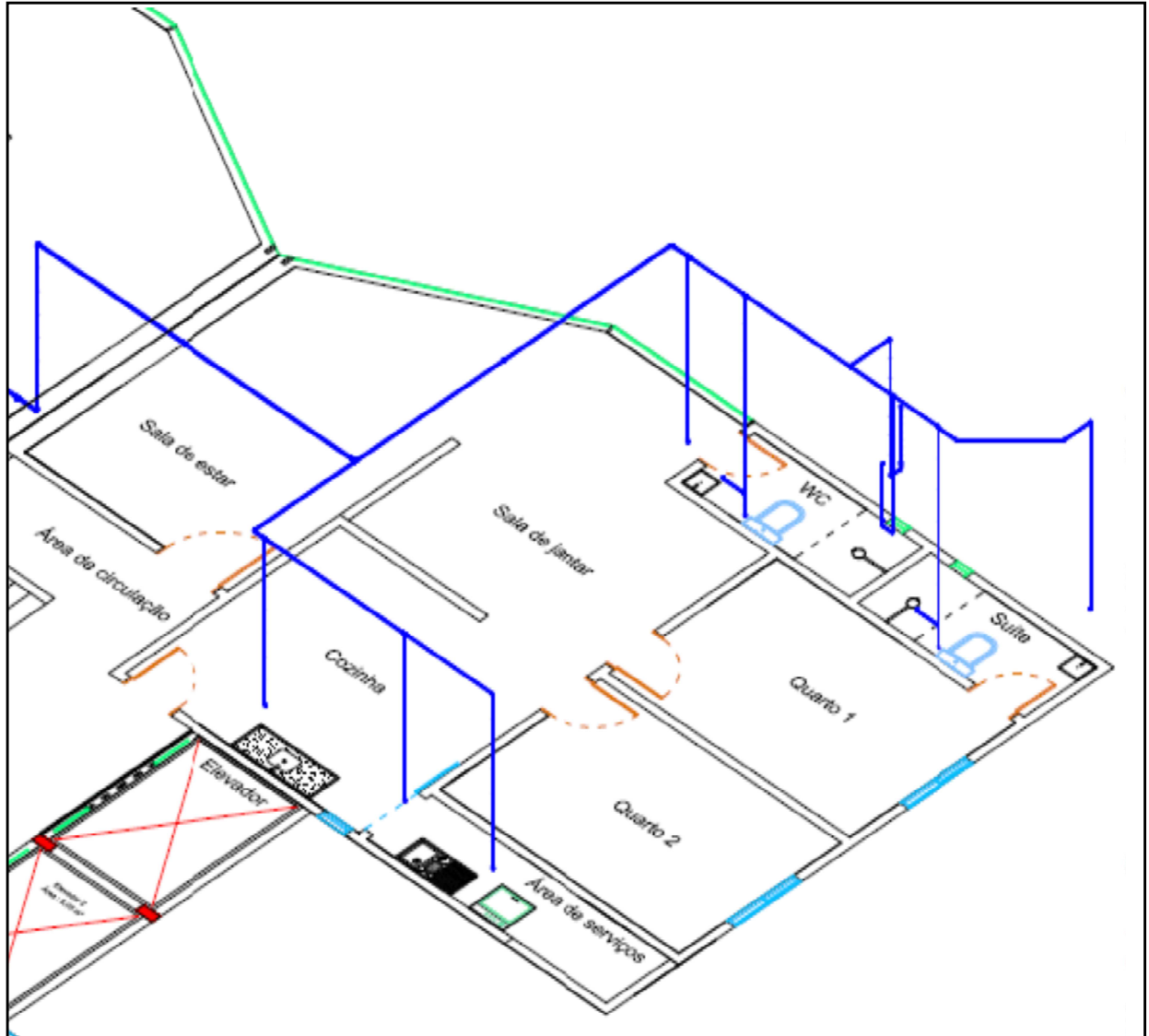
Fonte: Autor (2017).

Figura A2 - Planta baixa do pavimento tipo.



Fonte: Autor (2017).

Figura A3 – Perspectiva isométrica do traçado ramificado para PVC e PEX, em um apartamento tipo.



Fonte: Autor (2017).

ANEXO B – TABELAS DE DIMENSIONAMENTO

B1 – Cálculos e resultados do PVC ramificado

Tabela B1 - Identificação dos trechos e suas singularidades para o traçado ramificado em PVC.

TRECHO	Singularidades
Entrada do apartamento - ramal principal	Registro de gaveta + 2 joelhos 90° + redução
Sub-ramal 1 - cozinha	Tê lateral + redução + 1 joelho de 90°
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	Tê lateral + redução + joelho de 90°
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	Tê lateral + redução + joelho de 90°
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	Redução + 2 joelhos de 90°
Sub - ramal 2 - banheiros	1 joelho 90°
Sub - ramal 2 - lavatório 1	Tê lateral + redução + joelho de 90°
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	2 Tês laterais + 2 de joelhos 90°
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	Tê lateral + redução + 4 de joelhos 90° + 1 registro
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	Tê lateral + redução + 3 joelhos de 90° + 1 registro
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	2 Tês laterais + 2 de joelhos 90°
Sub - ramal 2 - lavatório 2	Redução + 2 joelhos de 45° + 2 joelhos de 90°

Tabela B2 - Comprimentos equivalentes, real, total e perdas de carga para todos os trechos do traçado em PVC ramificado.

Comprimento equivalente [m]	Compr. Real [m]	Compr. Total [m]	Perda unitária [m/m]	Perda de carga [m]
7,30	7,70	15,0	0,1068	1,6024
6,60	4,50	11,1	0,0523	0,5788
4,80	2,00	6,80	0,0512	0,3482
4,80	2,00	6,80	0,0512	0,3482
2,90	3,60	6,50	0,0699	0,4548
2,00	10,5	12,5	0,2992	3,7404
6,30	2,25	8,55	0,0244	0,2085
13,2	3,00	16,2	0,1601	2,5938
11,9	2,70	14,6	0,0314	0,4579
10,7	2,00	12,7	0,0314	0,3984
13,2	3,00	16,2	0,1601	2,5938
3,90	4,40	8,30	0,0244	0,2024
Perda de carga total para um apartamento				13,528

Tabela B3 - Preços unitários para os tubos, joelhos e Tês em PVC. Fonte: SINAPI EXEL (2017).

ITEM	Diâmetro [mm]	Unidade	Preço [R\$]
Tubo	20	m	1,80
Tubo	25	m	2,39
Tubo	32	m	5,12
Tubo	40	m	7,48
Tubo	50	m	9,27
Tubo	60	m	14,45
Tubo	75	m	20,27
Tubo	85	m	25,55
Joelho 90 °	20	unitário	0,44
Joelho 90 °	25	unitário	0,66
Joelho 90 °	32	unitário	1,71
Joelho 90 °	40	unitário	4,18
Joelho 90 °	50	unitário	4,65
Joelho 90 °	60	unitário	21,26
Joelho 90 °	75	unitário	67,32
Joelho 90 °	85	unitário	75,89
Joelho 45 °	20	unitário	0,68
Joelho 45 °	25	unitário	1,18
Joelho 45 °	32	unitário	3,14
Joelho 45 °	40	unitário	4,58
Joelho 45 °	50	unitário	5,70
Joelho 45 °	60	unitário	20,5
Joelho 45 °	75	unitário	49,9
Joelho 45 °	85	unitário	56,28
TÊ	20	unitário	0,80
TÊ	25	unitário	1,10
TÊ	32	unitário	2,75
TÊ	40	unitário	7,10
TÊ	50	unitário	8,03
TÊ	60	unitário	23,03
TÊ	75	unitário	44,15
TÊ	85	unitário	69,24
TÊ redução	25 x 20	unitário	2,63
TÊ redução	32 x 25	unitário	5,11
Luva redução	32 x 25	unitário	1,65
Luva redução	25 x 20	unitário	0,68
Registro de pressão	16	unitário	36,89
Registro de pressão	20	unitário	38,13
Registro de gaveta	32	unitário	49,49
Registro de gaveta	40	unitário	68,81
Luva redução	40 x 32	unitário	2,03

B2 – Cálculos e resultados do PEX ramificado

Tabela B4 - Identificação dos trechos e suas singularidades para o traçado ramificado em PEX.

TRECHO	Singularidades
Entrada do apartamento - ramal principal	Registro de gaveta
Sub-ramal 1 - cozinha	1 Tê lateral + redução
Sub - ramal 1 - pia da cozinha	Tê lateral + redução + conector fêmea de 90°
Sub - ramal 1 - pia da área de serviços	Tê lateral + redução + conector fêmea de 90°
Sub - ramal 1 - tanque da área de serviços	redução + 1 conector fêmea de 90°
Sub - ramal 2 - banheiros	-
Sub - ramal 2 - lavatório 1	Tê lateral + redução + conector fêmea de 90°
Sub - ramal 2 - vaso 1 e duchinha 1	2 Tês laterais + 2 conectores fêmea de 90°
Sub - ramal 2 - chuveiro 1	Tê lateral + redução + 1 conector de 90° + 1 registro
Sub - ramal 2 - chuveiro 2	Tê lateral + redução + 1 conector de 90° + 1 registro
Sub - ramal 2 - vaso 2 e duchinha 2	2 Tês laterais + 2 conectores fêmea de 90°
Sub - ramal 2 - lavatório 2	redução + 1 conector fêmea de 90°

Tabela B5 - Comprimentos equivalentes, real, total e perdas de carga para todos os trechos do traçado ramificado para o PEX.

Comprimento equivalente [m]	Compr. Real [m]	Compr. Total [m]	Perda unitária [m/m]	Perda de carga [m]
0,40	7,70	8,10	0,400	3,240
0,33	4,50	4,83	0,080	0,386
0,68	2,00	2,68	0,125	0,335
0,68	2,00	2,68	0,125	0,335
0,40	3,60	4,00	0,170	0,680
0,00	10,5	10,5	0,300	3,150
0,66	2,25	2,91	0,060	0,175
1,04	3,00	4,04	0,210	0,848
2,66	2,70	5,36	0,080	0,429
2,66	2,00	4,66	0,080	0,373
1,04	3,00	4,04	0,210	0,849
0,40	4,40	4,80	0,060	0,288
Perda de carga total para um apartamento				11,087

Tabela B6 - Preços unitários para os tubos, Tês e conexões necessárias para as instalações em PEX.

ITEM	Diâmetro [mm]	Unidade	Preço [R\$]
Tubo	16	m	6,76
Tubo	20	m	10,68
Tubo	25	m	16,49
Tubo	32	m	26,46
Conector fêmea	16	unitário	19,46
Conector fêmea	20	unitário	21,14
Conector fêmea	25	unitário	25,69
Conector fêmea	32	unitário	30,21
TÊ	16	unitário	30,79
TÊ	20	unitário	45,65
TÊ	25	unitário	61,56
TÊ	32	unitário	90,41
TÊ redução	25 x 20 x 25	unitário	67,34
TÊ redução	25 x 20 x 20	unitário	63,46
TÊ redução	25 x 16 x 25	unitário	76,77
TÊ redução	20 x 16 x 20	unitário	54,92
TÊ redução	32 x 20 x 32	unitário	82,42
TÊ redução	32 x 16 x 32	unitário	79,5
Luva redução	32 x 25	unitário	45,32
Luva redução	32 x 20	unitário	40,50
Luva redução	20 x 16	unitário	21,05
Distribuidor 3 saídas	32 x 20 x 20 x 20	unitário	181,01
Distribuidor 3 saídas	32 x 16 x 16 x 16	unitário	160,05
Distribuidor 2 saídas	32 x 20 x 20	unitário	150,98
Distribuidor 2 saídas	32 x 16 x 16	unitário	137,85
Tubo bainha	16	m	3,21
Tubo bainha	20	m	3,72
Tubo bainha	32	m	4,00

Fonte: <http://www.lojamerccom.br/>.

B3 – Cálculos e resultados do PEX ponto a ponto

Tabela B7 - Identificação dos trechos e suas singularidades para o traçado ponto a ponto em PEX.

TRECHO	Singularidades
Entrada do Apartamento - Distribuidor 1	Registro de gaveta
Distribuidor 1 - pia da cozinha	saída do distribuidor + conector 90°
Distribuidor 1 - pia da área de serviços	saída do distribuidor + conector 90°
Distribuidor 1-tanque da área de serviços	saída do distribuidor + conector 90°
Distribuidor 1 - Distribuidor 2	-
Distribuidor 2 - lavatório 1	saída do distribuidor + conector 90°
Distribuidor 2 - vaso 1 e duchinha 1	distribuidor + redução + tê lateral + 2 conectores 90°
Distribuidor 2 - chuveiro 1	saída do distribuidor + 1 registro + conector 90°
Distribuidor 2 - chuveiro 2	saída do distribuidor + 1 registro + conector 90°
Distribuidor 2 - vaso 2 e duchinha 2	distribuidor + tê lateral + 2 conectores 90°
Distribuidor 2 - lavatório 2	saída do distribuidor + conector 90°

Tabela B8 - Comprimentos equivalentes, real, total e perdas de carga para todos os trechos do traçado ponto a ponto para o PEX.

Comprimento equivalente [m]	Compr. Real [m]	Compr. Total [m]	Perda unitária [m/m]	Perda de carga [m]
0,40	5,50	5,90	0,400	2,360
0,40	5,04	5,44	0,125	0,680
0,40	7,15	7,55	0,125	0,944
0,40	8,61	9,01	0,170	1,532
0,00	8,00	8,00	0,300	2,400
0,40	1,65	2,05	0,060	0,123
1,01	1,70	2,71	0,210	0,569
2,44	4,85	7,29	0,080	0,583
2,44	5,52	7,96	0,080	0,637
0,86	4,80	5,66	0,210	1,189
0,40	6,40	6,80	0,060	0,408
Perda de carga total para um apartamento				11,424