



Tamires da Costa Lucas

**Estudo da viabilidade do uso de tubulações poliolefínicas na
indústria química**

**Study of the feasibility of polyolefinic pipes usage in the
chemical industry**

Trabalho de Graduação

Orientador: Marcos Venícius S. Pereira

Co-orientador: Ivan Cerqueira dos Santos

Rio de Janeiro

Dezembro de 2015



Tamires da Costa Lucas

**Estudo da viabilidade do uso de tubulações poliolefinicas na
indústria química**

**Study the feasibility of polyolefinic pipes usage in the chemical
industry**

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Prof. Marcos Venícius S. Pereira

Orientador

Eng^o Ivan Cerqueira dos Santos

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC - Rio

Prof. Marcelo de Andrade Dreux

Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 03 de Dezembro de 2015

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por ter me dado a melhor família deste mundo e por ter colocado pessoas maravilhosas ao longo da minha trajetória. Agradeço também cada dificuldade passada e cada momento de muita alegria, e por todas as vezes que pensei em desistir, mas que no fundo da minha alma conseguia ouvir uma voz que dizia “não desista, falta pouco minha filha”.

Agradeço aos meus pais, Silvana e Cesar, por todo carinho e apoio ao longo destes 24 anos, obrigada pelo colo, pelo amor dedicado a mim, pela compreensão, enfim por tudo, que não conseguiria resumir nem nestas linhas, nem em uma vida inteira.

Agradeço ao meu irmão, Natan, por toda a conversa e pelo carinho que tinha comigo todas as vezes que chegava arrasada em casa por causa de alguma prova. Ao meu namorado, Peterson, pela compreensão ao longo destes árduos seis anos de faculdade e de namoro, desculpa todas as vezes que deixei você sentado no sofá enquanto estudava para as minhas provas.

Agradeço a todos os meus familiares pela torcida e pela oração. Agradeço também aos meus amigos queridos, em especial Cecília Mattos pelas conversas e vibrações positivas quando estava quase desistindo de tudo, obrigada por ter mantido minha sanidade mental. Agradeço também aos meus amigos, Mariana Osborne, Rodrigo Neumann, Letícia Nicolino, Lucas Luz, Fellipe Chagas, Gabriela Paiva, Rulliane Gonçalves, André Feiferis, Mayara Marzano, e a todos os outros amigos que não consegui aqui mencionar, mas que guardo com muito carinho no meu coração, obrigada por terem feito esta etapa da minha vida mais feliz. Agradeço também aos meus amigos, Martha, Eduardo, Wanderléa, Críscilla, Isis e Jessica pela torcida e carinho.

Agradeço ao Ivan Santos, meu chefe, co-orientador, amigo, enfim um anjo que Deus colocou na minha vida para tornar minha dura rotina de estudar na PUC, morar em Niterói e

trabalhar em Belford Roxo, algo suportável. Além de agradecer por todo suporte e apoio para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço meu Orientador Marcos Venícius por todo apoio na elaboração deste trabalho final, e por todas as vezes que cedeu o seu tempo para tirar minhas dúvidas.

Agradeço toda equipe BTS pelo apoio e aprendizado nesses dois anos de estágio, em especial aos meus amigos, Luis Soares e Camila Souza, guardarei com muito carinho esta equipe em meu coração.

Resumo

Este trabalho consiste em um estudo sobre a viabilidade da utilização de tubulações poliolefínicas na indústria química. Sendo feita uma análise das tubulações industriais aéreas, instaladas em *pipe rack* e sujeitas às intempéries, que transportam água de processo.

O primeiro capítulo é destinado à Introdução que apresenta o trabalho, neste encontra-se o objetivo, a justificativa e a metodologia aplicada na composição do mesmo.

O segundo capítulo consiste na Revisão Bibliográfica, onde se apresenta de forma sucinta o histórico das tubulações industriais, além de uma breve descrição sobre o aço carbono, Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Polipropileno (PP), sendo dado um maior enfoque ao aço carbono e ao PEAD, visto que estes são objetos de comparação feita no capítulo três. Ainda neste capítulo são apresentadas as principais normas técnicas aplicáveis aos mesmos.

O terceiro capítulo é dedicado ao Estudo de Caso entre um projeto de engenharia utilizando o aço carbono e o PEAD. Analisando a espessura da tubulação, a potência de bombeamento, o vão máximo entre os suportes e os esforços sobre os suportes.

O quarto capítulo apresenta Outros parâmetros a serem considerados, tais como, soldagem, sustentabilidade e custo de material e montagem. O quinto capítulo apresenta as Considerações finais obtidas deste estudo. E o sexto capítulo, está reservado a Sugestões para futuros trabalhos.

Palavras chave: Tubulações, poliolefínicas, aço carbono, PEAD.

Abstract

This work consists in the study of the feasibility of polyolefinic pipes usage in the chemical industry. And an analysis of air industrial piping installed in pipe rack and subject to the weather, which carry process water.

The first chapter is aimed at Introduction that presents the work, this is the goal, the justification and the methodology used in the composition of it.

The second chapter is the Literature Review, which presents briefly the history of industrial pipes, plus a brief description of the carbon steel, High Density Polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP), being given an increased focus on carbon steel and HDPE, because these are objects of comparison made in chapter three. In this chapter we present the main technical standards applicable thereto.

The third chapter is devoted to the Case Study of an engineering project using carbon steel and HDPE. Analyzing the thickness of the pipe, the pumping power, the maximum gap between supports and the stress on the supports.

The fourth chapter is presented Other parameters to be considered, such as, welding, sustainability and material cost and assembly. The fifth chapter presents the findings from this study. And the sixth chapter is reserved for Suggestions for future work.

Keywords: Pipes, polyolefinic, carbon steel, HDPE.

Sumário

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Sumário	vi
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	viii
1 Introdução	10
2 Revisão Bibliográfica.....	14
3 Estudo de caso.....	29
4 Outros parâmetros a serem considerados.....	56
5 Considerações finais	67
6 Sugestões para futuros trabalhos.....	68
Referências bibliográficas	69
Referências eletrônicas.....	72
Anexo 1: Seleção de tubulação	74
Anexo 2: Planimétrico.....	75

Índice de Figuras

Figura 1: Perspectiva da molécula de Polietileno, indicando a estrutura em ziguezague na cadeia principal (Fonte: Callister , 2012)	20
Figura 2: Esquema de bombeamento de água de processo	37
Figura 3: Gráfico de Moody (Fonte: Fox et. al., 2013).....	39
Figura 4: Dilatação térmica da tubulação (Fonte: Danieletto, 2014)	47
Figura 5: Espaçamento entre suportes.....	54

Índice de Tabelas

Tabela 1: Tubos metálicos (Fonte: Telles, 2001)	16
Tabela 2: Tubos não metálicos (Fonte: Telles, 2001)	16
Tabela 3: Fatores para a escolha do tipo de tubulação (Fonte: Brandão, 2010)	18
Tabela 4: Classificação e aplicações do aço carbono (Fonte: Brandão, 2010)	27
Tabela 5: Tensões de dimensionamento (Fonte: ABNT NBR 15561).....	31
Tabela 6: Valores das espessuras das tubulações.	32
Tabela 7: Valores das espessuras encontrados no mercado (Fonte: ABNT NBR 15561).	32
Tabela 8: Fatores de redução de pressão para temperaturas entre 27,5 °C e 50 °C. (Fonte: ABNT NBR 15561)	33
Tabela 9: Valores da espessura para o aço carbono	35
Tabela 10: Espessuras do tubo (Fonte: ASME ANSI B-36.10)	35
Tabela 11: Dados dos cálculos	40
Tabela 12: Potência consumida pela bomba em (W) para o PEAD.....	41
Tabela 13: Potência consumida pela bomba em (W) para o aço carbono.....	42
Tabela 14: Cálculo do vão máximo da tubulação de PEAD.	44
Tabela 15: Dados utilizados para o cálculo do vão máximo da tubulação de aço carbono.	46
Tabela 16: Esforços nos suportes devido à dilatação térmica para o PEAD.....	49
Tabela 17: Cálculo dos esforços nos suportes devido à dilatação térmica para o aço carbono. ...	50
Tabela 18: Cálculo dos esforços nos suportes devido à pressão interna para o PEAD.....	52
Tabela 19: Esforços nos suportes devido à pressão interna para o aço carbono	53
Tabela 20: Valores da carga q para projeto de suportes devido à flexão	54
Tabela 21: Custo de projeto utilizando tubulação de PEAD.....	64

Tabela 22: Custo de projeto utilizando tubulação de Aço carbono..... 65

Tabela 23: Comparativo do custo de projeto utilizando tubulação de PEAD versus Aço carbono
..... 66

1 Introdução

É perceptível a busca crescente por materiais e processos cada vez mais eficazes e eficientes na indústria de um modo geral, principalmente na indústria química. A fim de atender esta demanda, a cada dia, aumenta a necessidade de investimentos em inovações tecnológicas com o intuito de melhorar os mecanismos de produção, bem como diminuir prazos e custos. Outro aspecto relevante envolve as questões de saúde, segurança, meio ambiente e qualidade (Health, Safety, Enviroment, Quality – HSEQ) no que diz respeito às relações sociais e ambientais, cabendo ressaltar que a questão ambiental ganhou um grande destaque no âmbito industrial. Além de todos os pontos mencionados ainda existe a preocupação com a sustentabilidade.

A indústria química passa continuamente por processos de modernização, gerando com isso instalações com novas tecnologias, o que inclui novos materiais. Por isso, cresce o número de empresas interessados em investir em pesquisas e melhorias dos mesmos, principalmente os que são ditos como não convencionais.

Os principais materiais convencionais utilizados na confecção de tubulações nas indústrias químicas são os aços carbono e inoxidável, e, apesar de serem largamente difundidos, apresentam alguns problemas.

O aço carbono, por exemplo, possui baixa resistência à corrosão, necessitando de uma sobre espessura para suportar os efeitos da corrosão. Há ainda a possibilidade de acúmulo de resíduos na parte interna da tubulação (esclerose) devido à deposição de produtos de corrosão, gerando um aumento da perda de carga, e com isto a redução da eficiência da tubulação (Carvalho, 2014).

Os aços inoxidáveis são classificados em três tipos: Martensíticos, ferríticos e austeníticos, sendo que os austeníticos e ferríticos são os mais empregados em tubulações. Os austeníticos não estabilizados estão sujeitos à sensitização, e em presença de cloretos podem desenvolver severa corrosão por pite e sobtensão. Já os ferríticos são mais baratos que os austeníticos, menos sujeitos à corrosão por pite e sobtensão, porém são mais difíceis de soldar e não são recomendados para baixas temperaturas. Os aços inoxidáveis possuem melhor resistência a corrosão quando comparados ao aço carbono. Devido a estes problemas dos aços, os polímeros, de uma maneira geral vêm ganhando um espaço considerável nas indústrias como alternativa para construção de tubulações (Carvalho, 2014 e Telles, 2003).

Os polímeros podem ser divididos em duas grandes classes, os termoplásticos, que quando aquecidos amolecem e se comportam como líquidos viscosos antes de fundir totalmente, e os termofixos que se decompõem ou queimam em vez de fundir quando aquecidos. Como exemplo de materiais termoplásticos tem o Polietileno (PE), Polipropileno (PP) e o Cloreto de Polivinil (PVC) (Castro e Meggiolaro, 2009).

Dentre os principais materiais plásticos utilizados em tubulações está o PEAD, este tem excelente resistência aos ácidos minerais, aos álcalis e aos sais, elevada resistência ao impacto, imune à corrosão galvânica e química, impermeável e atóxico (Carvalho, 2014 e Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos – Apresentação de José Danieletto, 2014).

Vale ressaltar que dentre os materiais plásticos apenas o PEAD e PP são considerados materiais poliolefinicos, visto que só há hidrogênio e carbono em suas moléculas. Portanto, neste trabalho será dado um enfoque maior aos materiais aço carbono e ao polietileno de alta densidade com adição de negro de fumo, para utilização na análise do estudo de caso, sendo comparados em relação à espessura da tubulação, da potência de bombeamento, do vão máximo entre os suportes, dos esforços sobre os suportes, soldagem, sustentabilidade e custo de material

e montagem, qual material melhor se adéqua para o transporte de água de processo quando utilizados em *pipe rack*.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do uso de tubulações poliolefínicas, ou seja, de polietileno de alta densidade na indústria química.

Este trabalho analisará tubulações industriais aéreas, instaladas em *pipe rack*, sujeitas as intempéries, que transportam água de processo.

No desenvolvimento, estes materiais serão avaliados / comparados com o aço carbono, desde a especificação, até o seu descomissionamento, passando pelo cálculo da espessura da tubulação, da potência de bombeamento, do vão máximo entre os suportes, dos esforços sobre os suportes, soldagem, sustentabilidade, além do custo de material e montagem.

1.2 Justificativa

O tema abordado foi escolhido por se apresentar como uma boa oportunidade de mudança no paradigma do mercado consumidor em relação à utilização do aço carbono, onde se observa a busca incessante pela diminuição de prazos e o corte de custos. Os materiais poliolefínicos, tais como, o PEAD e o PP, já estão sendo utilizados por algumas das grandes empresas do Brasil e com possibilidade de conquistar um espaço muito maior no mercado nos próximos anos.

1.3 Metodologia

Como o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo da viabilidade sobre a utilização de tubulações poliolefínicas versus aços carbono nas indústrias químicas, este estudo restringe aos materiais aço carbono e PEAD.

A metodologia aplicada a este estudo se baseia em fazer uma revisão bibliográfica sobre o tema e suas vertentes, onde serão mostrados e organizados todos os itens pesquisados em livros, trabalhos acadêmicos, normas internacionais e nacionais, *papers*, arquivos eletrônicos, monografias, catálogos, padrões operacionais e normas vigentes sobre tubulações industriais, assim como, consulta a fabricantes.

Posteriormente, através de um estudo comparativo entre um projeto utilizando tubulações com aço carbono e outro PEAD, será avaliado qual material se mostra mais viável sob o ponto de vista da espessura da tubulação, da potência de bombeamento, do vão máximo entre os suportes, dos esforços sobre os suportes, soldagem, sustentabilidade, bem como o custo de material e montagem. As considerações finais serão expostas no capítulo cinco com base nas informações mencionadas nos capítulos anteriores.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico

O termo “tubulação industrial” se refere a um conjunto de tubos e de seus diversos acessórios. A importância das tubulações deve-se ao fato do ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos estarem, em geral, distante do seu ponto de utilização, sendo estas o meio de ligação entre estes dois pontos (Telles, 2001).

O emprego de tubulações pelo homem antecede provavelmente a história escrita. Foram descobertos vestígios ou redes completas de tubulações em vários lugares do mundo. No vale do rio Indus, na Índia, por exemplo, foram encontradas as ruínas de um sistema de instalações existente de 3000 a 6000 anos atrás. No Egito foram descobertos tubos de cobre enterrados para a condução e retirada da água de banheiros no palácio do Faraó. Na Babilônia por sua vez era dotada de uma rede de dutos para escoamento de esgotos, onde possuía inclusive poços de inspeção (Telles, 2001 e Landi, 1993).

Desde a antiguidade usavam-se o chumbo e o cobre como material para condutos forçados. A ductilidade desses materiais os tornava trabalháveis, tendo em vista a tecnologia vigente. Empregavam-se também tubos de chumbo com revestimento interno de estanho, não só para melhorar a resistência à corrosão, como também porque já se conheciam os efeitos danosos à saúde dos sais de chumbo (Landi, 1993).

Os tubos de aço, que hoje dominam quase todos os campos de aplicação industrial, são de desenvolvimento relativamente recente, datando de 1825 o primeiro tubo de aço, fabricado na

Inglaterra. Só em 1886, com a primeira patente dos irmãos Mannesmann, do “laminador oblíquo”, foi possível produzir economicamente tubos de aço sem costura. Por essa época os tubos de aço eram necessários, principalmente, para resistir às pressões cada vez mais altas das tubulações de vapor (Telles, 2001).

O aparecimento dos materiais plásticos, em geral, é um fenômeno mais recente ainda. Os primeiros materiais plásticos surgiram em caráter comercial no início do século passado, com a produção do PVC em 1927, do Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) em 1939 e do PEAD em 1955. Em 1959 seria a vez do PP. Com a evolução do processo produtivo, o início dos anos 80 foi marcado pelo aparecimento do Polietileno MRS 80, também conhecido como PE 80. Sendo desenvolvido no início dos anos 90 o Polietileno MRS 100, também chamado de PE 100 (Danieletto, 2014 e Portal metálica – Construção civil).

2.2 Geral

Há uma grande variedade de materiais, disponíveis no mercado utilizados para a fabricação de tubos e seus acessórios. Só a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) especifica mais de quinhentos tipos diferentes de materiais. Esta gama de materiais por sua vez proporciona uma vasta quantidade de aplicações na indústria de processo (Brandão, 2010).

Não obstante, cresce o número de pesquisas para o desenvolvimento do uso de um determinado material com o intuito de utilizá-lo sob as mais variadas formas possíveis. Dentre as principais razões para este fato pode-se citar a preocupação no que diz respeito ao impacto ambiental, seja da extração da matéria prima até o seu descarte, além da otimização do tempo de execução de um projeto, entre outros.

As tubulações industriais podem ser classificadas quanto ao emprego, ou seja, tubulações dentro de instalações industriais e tubulações fora das instalações industriais, e quanto ao fluido conduzido. Em relação ao fluido conduzido, neste caso podem ser classificados como tubulações para água, vapor, óleos, ar, gases, esgotos e drenagem, além de fluidos diversos (Telles, 2001).

Por consequência, é preciso ter alguns cuidados no momento da escolha do material, de modo a analisar qual é o melhor material que se adapta a cada caso específico. A fim de facilitar a visualização foram dispostas em tabelas algumas informações sobre os mesmos. A Tabela 1 e 2 apresentam de forma resumida a classificação de tubos metálicos e não-metálicos, respectivamente.

Tabela 1: Tubos metálicos (Fonte: Telles, 2001)

Tubos metálicos	
Ferrosos	Não ferrosos
Aços carbonos	Cobre
Aços-liga	Latões
Ferro fundido	Cobre-níquel
Ferro forjado	Alumínio
Ferros ligados	Níquel e ligas
Ferro nodular	Metal Monel
	Chumbo
	Titânio, Zircônio

Tabela 2: Tubos não metálicos (Fonte: Telles, 2001)

Tubos não metálicos	
Materiais Plásticos	Outros
Polietileno	Cimento - amianto
Polipropileno	Concreto armado
Cloreto de polivinil (PVC)	Barro vidrado
Acrílicos	Elastômeros
Acetato de celulose	Vidro
Epóxi	Cerâmica, porcelana, etc
Poliésteres	
Fenólicos, etc.	

Com o intuito de facilitar a escolha dos materiais a ser empregada nas tubulações industriais, a Tabela 3 apresenta os principais fatores na escolha do tipo de material de uma tubulação.

2.3 Polipropileno

2.3.1 Caracterização do material

O Polipropileno é obtido pela polimerização na presença de catalisadores e sob determinadas condições de temperatura e pressão, do gás propeno (propileno $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$). Este é um hidrocarboneto olefínico, adquirido através do *cracking* da nafta do petróleo. Por advir de hidrocarboneto olefínico o PP é chamado de resina poliolefínica (PO – possui apenas hidrogênio e carbono na sua molécula). As macromoléculas possuem estrutura linear, porém somente o polipropileno isotático (no qual mais de 95% de todos os grupos de CH_3 situam-se do mesmo lado da cadeia linear) se adéqua à fabricação de tubos e artigos em geral. Sua cristalização é da ordem de 60 a 70%, sendo, no entanto, mais rígido que o PEAD e mais resistente a temperaturas elevadas (Danieletto 2014).

Tabela 3: Fatores para a escolha do tipo de tubulação (Fonte: Brandão, 2010)

Fatores	Caracterização
Fluido transportado	Características no geral do fluido, como natureza e concentração, velocidade, condições de escoamento, impurezas ou agentes contaminadores, possibilidade de contaminação, pH, toxidez, resistência à corrosão e à ação de substâncias agressivas.
Nível de tensões	O material deve ter resistência mecânica equivalente a ordem de grandeza dos esforços presentes (pressão do fluido, pesos, ação do vento, reações de dilatações térmicas, sobrecargas, esforços de montagem, etc.
Esforços mecânicos	Esforços estáticos ou dinâmicos, tração, compressão, flexão, vibrações, choques, esforços cíclicos, etc.
Condições locais	Temperatura e pressão de trabalho, no qual devem ser consideradas as condições extremas, mesmo que sejam condições eventuais ou transitórias.
Sistema de ligações	Deve ser adequado ao tipo de materiais e ao tipo de montagem e demonstrar condições de impermeabilidade e juntas adequadas.
Fabricação, transporte e montagem	Verificar a facilidade destes itens. Pode-se ter como limitações: soldabilidade, usinabilidade, facilidade de conformação, dificuldade de assentamento e instalação de equipamentos e acessórios, etc. O ideal é analisar se essas limitações estão de acordo com os demais itens ou dificultam o processo.
Disponibilidade	Verificar se há fornecedores com estoque do material e diâmetros pretendidos na localidade.
Tempo de vida útil	Este tempo previsto depende da natureza e importância da tubulação, considerando também o tempo de amortização do investimento.
Custo	Esse fator normalmente é decisivo. Devem ser considerados os custos diretos, como material e mão-de-obra, de assentamento e transporte, e também os custos indiretos, representados pelo tempo de vida do material, os consequentes custos de reposição e de paralisação do sistema, o tempo de execução do serviço, o retrabalho que o serviço pode gerar e suas consequências envolvendo outros serviços.

Os materiais poliméricos do tipo Polipropileno são plásticos de pouco peso molecular e baixo custo, com excelente resistência à flexão e boa resistência ao impacto. A temperatura limite de uso é de 70 °C. Resistem a ácidos minerais, sais, bases e a muitos dos compostos orgânicos. E, em temperatura ambiente são insolúveis em qualquer solvente. Não resistem aos

halogênios, hidrocarbonetos, clorados e aromáticos, assim como aos oxidantes fortes. Os polipropilenos são, também, atacados pelos raios ultravioletas (Telles, 2003).

Normalmente na utilização destes tubos, devem evitar-se temperaturas da água superiores a 80 °C, contudo podem estar dimensionados para suportar temperaturas até 100 °C em condições de funcionamento por picos, cuja duração total não exceda a 100 horas (Pereira, 2011).

Dentre as principais vantagens dos tubos em polipropileno estão à boa durabilidade, baixa condutividade térmica, boa resistência eletroquímica, resistência à corrosão, reciclável, baixos custos de manutenção, atóxico, maior resistência ao impacto, mais flexível, além de maior resistência a transientes hidráulicos. Entretanto, as desvantagens são: elevadas espessuras de parede, menores pressões de serviço quando sujeitas temperaturas mais elevadas, não colável, não aceita pintura, e possui baixa resistência aos raios ultravioletas (UV). Esta última desvantagem é um dos fatores pelo qual não utilizaremos este produto no estudo de caso, visto que as tubulações aqui estudadas são aéreas (Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos - Apresentação José Danieletto, 2014 e Pereira, 2011).

A fim de tornar as instalações mais seguras é preciso se pautar em algumas normas nacionais e internacionais. Para isto pode-se citar a: DIN 8077:2008 - Dimensões dos tubos de polipropileno (PP) PP-H 110, PP-B 80, PP-R 80. DIN 8078:2008 - Requisitos Gerais de Qualidade e Ensaio (Tubos de polipropileno (PP) PP-H 110, PP-B 80, PP-R 80). *ISO 15874-1:2003 - Plastics piping systems for hot and cold water installations - Polypropylene (PP) - Part 1: General. ISO 15874-2:2003 - Plastics piping systems for hot and cold water installations - Polypropylene (PP) - Part 2: Pipes. ISO 15874-3:2003 - piping systems for hot and cold water installations - Polypropylene (PP) - Part 3: Fittings.*

2.4 Polietileno de alta densidade

2.4.1 Caracterização do material

O hidrocarboneto etileno (C_2H_4) é um gás à temperatura e pressão ambientes. O gás etileno ao reagir sob condições apropriadas, se transformará em polietileno, o qual é um material polimérico sólido. Esse processo se inicia quando um centro ativo é formado pela reação entre um iniciador ou catalisador e o monômero etileno. Com isso, a cadeia do polímero se forma pela adição sequencial de unidades monoméricas a esse centro ativo, para o crescimento da cadeia. O resultado final, portanto, após a adição de muitas unidades monoméricas de etileno, é a molécula de polietileno. A Figura 1 mostra uma perspectiva da molécula, indicando a estrutura em ziguezague da cadeia principal do polietileno (Callister, 2012).

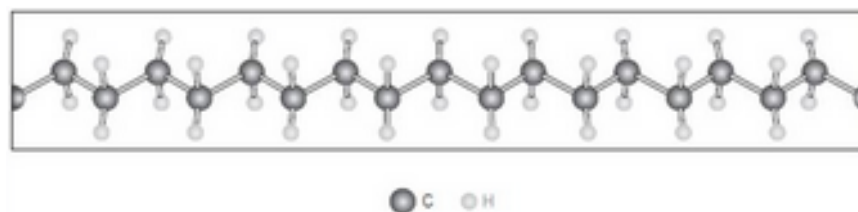


Figura 1: Perspectiva da molécula de Polietileno, indicando a estrutura em ziguezague na cadeia principal
(Fonte: Callister , 2012)

Vale ressaltar que a maioria dos polímeros é de origem orgânica, e muitos materiais orgânicos são hidrocarbonetos, ou seja, são compostos somente de hidrogênio e carbono. O hidrocarboneto etileno é também denominado como hidrocarboneto olefínico, obtidos através do *cracking* da nafta do petróleo. Por advir de hidrocarboneto olefínico o PE é chamado de resina poliolefínica (Callister, 2012 e Danieletto, 2014).

O Polietileno de alta massa específica, conhecido como Polietileno de alta densidade é primariamente um polímero linear. Visto que polímeros lineares são aqueles nos quais as unidades repetidas estão unidas entre si pelas suas extremidades em uma única cadeia. Contudo, nos polímeros lineares podem existir grandes quantidades de ligações de Van der Waals e de hidrogênio entre as cadeias (Callister, 2012).

A resposta de um polímero à aplicação de forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante. Na verdade, um esquema de classificação para esses materiais é feito de acordo com o seu comportamento frente à elevação da temperatura. Conforme já mencionado os polímeros podem ser classificados em dois grupos, os termoplásticos e os termofixos (Callister, 2012).

Os termoplásticos amolecem, e eventualmente se liquefazem, quando são aquecidos e endurecem quando resfriados. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos. São exemplos de polímeros termoplásticos o Polietileno, Polipropileno e o Cloreto de Polivinila. Já os termofixos são polímeros em rede, eles se tornam permanentemente duros durante a sua formação e não amolecem com um aquecimento subsequente. Todavia, os polímeros termofixos são, em geral, mais duros e resistentes do que os termoplásticos e possuem melhor estabilidade dimensional (Callister, 2012).

Pode-se definir a cristalinidade dos polímeros como sendo o empacotamento de cadeias moleculares para produzir um arranjo atômico ordenado. O grau de cristalinidade de um polímero depende da taxa de resfriamento durante a solidificação, assim como da configuração da cadeia. A composição química das moléculas, bem como a configuração da cadeia, também influencia a habilidade de um polímero se cristalizar. Para o polietileno, por exemplo, que é um polímero quimicamente simples, a cristalização não é prevenida com facilidade mesmo para taxas de resfriamento muito rápidas. Portanto, para os polímeros lineares a cristalização é obtida

com facilidade, pois existem poucas restrições para prevenir o alinhamento das cadeias (Callister, 2012).

A orientação das cadeias poliméricas exerce um forte efeito sobre as propriedades mecânicas do polímero. Materiais fabricados com PEAD altamente orientado são aproximadamente dez vezes mais resistentes do que os fabricados a partir do polímero não orientado, pois a orientação aumenta o empacotamento das cadeias e conseqüentemente aumenta a rigidez do polímero (Coutinho et al., 2003).

Em relação às características, o PE é um material muito leve, capaz de flutuar na água, e de baixa resistência mecânica, tendo, no entanto, boa resistência ao impacto. Distinguem-se três graus desse material, de acordo com a densidade, classifica-se como polietileno de baixa densidade, polietileno de média densidade e polietileno de alta densidade. Sendo que os de maior densidade têm melhor resistência mecânica e maior rigidez (Telles, 2003).

O PEAD possui macromoléculas com estrutura linear com poucas ramificações curtas, grau de cristalização de 60 a 80%. Densidade de 0.941 a 0.965 g/cm³ (Polietileno de Alto Peso Molecular), que apresenta alta resistência à abrasão e baixíssimo coeficiente de atrito. Os graus de polietileno de maior densidade são mais rijos e com limites mais altos de temperatura de serviço, entretanto, a temperatura mínima é de -50 °C, e o coeficiente de atrito é muito baixo (Telles, 2003).

Os Polietilenos têm ampla faixa de resistência química, sendo praticamente inertes ao contato com a atmosfera, águas e solo de quaisquer naturezas e, também, com muitos meios altamente corrosivos, tais como sais minerais diluídos (exceto sais oxidantes), bases fortes, soluções salinas, dentre outros. São atacados por solventes e outros produtos orgânicos, bem como pelos raios ultravioletas da luz solar, por este motivo é que se adiciona negro de fumo na

composição do polietileno, a fim de que melhore suas propriedades quando o mesmo trabalha exposto aos raios UV (Telles, 2003).

A matéria-prima do Polietileno é fundida a uma temperatura na ordem de 220 °C, sendo conduzida através de uma linha de produção que controla a espessura, arrefece e marca o tubo, de forma a conseguir-se o comprimento pretendido. A identificação e designação dos tubos de PE é normalmente com uma marcação indelével por um processo denominado *hot-stamping*. Esta marcação precisa conter o nome ou marca de identificação do fabricante, identificação comercial do composto utilizado na fabricação, classificação do composto, fluido, diâmetro externo nominal, pressão nominal (PN), *Standard Dimensional Ratio* (SDR), código que permita rastrear a produção, com identificador relativo ao mês e ano da fabricação, assim como o número da norma ABNT, ou alguma norma internacional, que o rege (Pereira, 2011).

Os tubos são fabricados nas cores determinadas em função da sua aplicação. No entanto, a cor das tubulações é habitualmente o preto ou o preto com listras longitudinais. Para as tubulações de redes de distribuição e/ou adutoras de água são utilizadas a cor preta, cor azul ou cor preta com listas azuis. Já para as tubulações de transporte de esgoto sanitário sob pressão é recomendado à cor preta com listras ocre (ABNT NBR 15561).

Conforme já mencionado, com o intuito de melhorar a resistência aos raios UV das tubulações de PEAD é adicionado negro de fumo na composição das mesmas. O tubo na cor preta ou preta com listras deve ser submetido ao ensaio de determinação do teor de negro de fumo, para comprovar a quantidade deste em sua massa. Para estar de acordo com a norma mencionada, o conteúdo na massa do composto deve ser de $(2,5 \pm 5) \%$ e o tamanho médio das partículas deve ser menor ou igual a 25 (nm) (ABNT NBR 9058).

A fim de tornar as instalações mais seguras é preciso se pautar em algumas normas nacionais e internacionais. Para isto pode-se citar a: ABNT NBR 15561:2007, Sistemas para

distribuição e adução de água e transporte de esgoto sanitário sob pressão – Requisitos para tubos de polietileno PE 80 e PE 100. ABNT NBR 9058:1999, Sistemas de ramais prediais de água – Tubos de polietileno PE – determinação do teor de negro de fumo. *ASTM D-1238:2004, Test Method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. ASTM D-4703:2007, Standard practice for compression molding thermoplastic materials into test specimens, plaques, or sheets.* DVS 2203:2003, Soldagem de Materiais Termoplásticos-Ensaio.

2.5 Aço carbono

2.5.1 Caracterização do material

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa, sendo sua definição algo não trivial, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias (Ferro – Carbono), apesar de estes serem seus principais elementos de liga. Portanto, os aços contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação (Chiaverini, 1977).

Define-se metalurgicamente “aço carbono” como sendo uma liga de ferro e carbono contendo, teoricamente, entre 0,05 e 2% de carbono. Entretanto, nos aços usuais, na prática, a quantidade de carbono nunca é superior a 1,5%. Conforme dito, além do ferro e do carbono, esses aços contêm sempre outros elementos secundários, como por exemplo, alguma quantidade de manganês, enxofre e fósforo. Alguns aços poderão apresentar, ainda, pequena adição de silício, alumínio e cobre (Chiaverini, 1977 e Telles, 2003).

O fósforo por muito tempo foi considerado um elemento exclusivamente nocivo, devido à “fragilidade a frio” que confere aos aços, sobretudo nos aços com alto teor de carbono e quando seu teor ultrapassa certos limites. Este problema é representado por baixa resistência ao choque e baixa tenacidade, sendo mais séria essa influência quanto maior for o teor de carbono

no aço. Dentre os aspectos favoráveis pode-se destacar o aumento da resistência à tração e a dureza dos aços (Chiaverini, 1977).

O enxofre é considerado um elemento mais prejudicial do que útil, pois se combina com o manganês e com o ferro, formando os sulfuretos. Entretanto, deve-se procurar evitar a combinação do enxofre com o ferro ou, em outras palavras, a quantidade de manganês presente no aço deve ser tal que todo o enxofre existente se combine com ele para formar o Sulfeto de Manganês (MnS) em lugar do Sulfeto de Ferro (FeS). Isto ocorre, pois o FeS ocasiona o fenômeno chamado de “fragilidade a quente“. Vale ressaltar que as propriedades mais afetadas são a resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade (Chiaverini, 1977).

O manganês atua não só como agente dessulfurante, como também atua como elemento desoxidante. De fato, o manganês, ao reagir com oxigênio, forma o composto sólido Óxido de Manganês (MnO), de preferência ao Monóxido de Carbono (CO) ou Dióxido de Carbono (CO_2), evitando assim o desprendimento de bolhas. O manganês que não se combinou com o enxofre ou com o oxigênio pode atuar de duas maneiras. A primeira é quando o teor de carbono é baixo, ele dissolve na ferrita, aumentando a dureza e resistência, a segunda ocorre quando o teor de carbono é mais elevado, admite-se que se forme o composto Carboneto de Manganês (Mn_3C) que se associaria com o Carboneto de Ferro (Fe_3C), aumentando ainda mais a dureza e resistência do aço (Chiaverini, 1977). [9]

O silício dissolve-se na ferrita do mesmo modo que o fósforo, sem, entretanto, afetar apreciavelmente a sua ductilidade, embora aumente ligeiramente a sua dureza e a sua resistência mecânica. A função principal do silício é a de agente desoxidante, ou seja, ele combina-se com o oxigênio, evitando a combinação oxigênio-carbono, o que provocaria o desprendimento de CO ou CO_2 , ocasionado assim a formação de bolhas (Chiaverini, 1977).

O alumínio, adicionado em princípio como desoxidante, age nesse sentido mais eficientemente que o silício e o manganês, formando com o oxigênio, inclusões em partículas muito finas do Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Além disso, atua como controlador do crescimento de grãos dos aços (Chiaverini, 1977).

As propriedades do aço carbono são muito influenciadas pela composição química, microestrutura e pela temperatura. Um aumento do percentual de carbono no aço pode acarretar num aumento dos limites de resistência e de escoamento e conseqüentemente a redução da ductilidade, aumento da dureza, aumento da temperabilidade e redução a soldabilidade (Carvalho, 2014 e Chiaverini, 1977).

O limite de resistência dos aços carbono, em temperatura ambiente, geralmente, vai de 310 a 650 MPa, o limite de escoamento de 170 a 275 MPa, e o alongamento de 18 a 35%. Esses valores poderão ser consideravelmente aumentados por meio de tratamentos térmicos ou de trabalhos de deformação a frio no material (martelamento, prensagem, trefilação, estampagem, etc.) que, no entanto causam uma redução na ductilidade do aço (Telles, 2003).

Quando comparado com outros materiais, o aço carbono apresenta alguns pontos fortes e outros fracos. Dentre os pontos fortes está a melhor relação custo versus resistência mecânica, facilidade de usinagem, conformação e soldagem. Ampla faixa de utilização, com temperaturas variando de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Empregado em mais de 90 % das tubulações numa planta de processo. Fácil de ser encontrado no comércio. Já em relação aos pontos fracos destacam-se a fluência a partir de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, resistência mecânica cai consideravelmente. Para temperaturas maiores que $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre oxidação superficial e conseqüentemente formação de carepa. Baixa resistência à corrosão, sendo necessária uma sobre espessura de corrosão. Ao ter contato com o solo, pode ocorrer corrosão por pite. A exposição prolongada a temperaturas superiores a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

pode acarretar a grafitação (precipitação do carbono), além de deixar o material quebradiço (Carvalho, 2014).

A Tabela 4 apresenta a classificação e aplicações do aço carbono.

Tabela 4: Classificação e aplicações do aço carbono (Fonte: Brandão, 2010)

Classificação	Aplicações
Aços de baixo carbono (Máximo de 0,30% de C)	Chapas automobilísticas, perfis estruturais e placas utilizadas na fabricação de tubos, construção civil, pontes e latas de folhas de flandres. Construção
Aços de médio carbono (De 0,30 a 0,60 % de C)	Rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas.
Aços de alto carbono (De 0,60 a 1,00 % de C)	Talhadeiras, folhas de serrote, martelos e facas.

A designação do grau, tipo e classe utiliza uma letra, número, símbolo ou nome. Há diversos sistemas de designação para os aços, tais como o *SAE (Society of Automotive Engineers)*, *AISI (American Iron and Steel Institute)*, *ASTM (American Society for Testing and Materials)*, *ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)*, *DIN (Deutsches Institut für Normung)*, *BS (British Standard)* e *API (American Petroleum Institut)*. A normalização unificada vem sendo utilizada cada vez mais, e é designada pela sigla *UNS (Unified Numbering System)* (Brandão, 2010).

Dentre tantas normas que regulamentam a utilização dos aços, as mais utilizadas são: ABNT NBR 5580, Tubos de aço carbono para condução de fluidos. DIN 1615, Tubos de aço carbono, sem requisitos especiais de qualidade. DIN 1626, Tubos de aço carbono, com requisitos especiais de qualidade. DIN 1628, Tubos de aço carbono, com requisitos de alta performance. DIN 2440 e DIN 2441, Tubos de aço carbono, para condução de fluidos. ASTM A-53, Tubos de aço carbono com requisitos de qualidade para condução de fluidos. ASTM A-135, Tubos de aço carbono soldados por existência elétrica, condução de fluidos. *ASTM A 106, Standard*

Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service. API-5L, Tubos de aço para oleodutos. BS-1387, Tubos de aço soldados por resistência elétrica para condução de fluidos (Brandão, 2010).

3 Estudo de caso

O estudo de caso está relacionado a um projeto de substituição das tubulações de água de processo que atualmente são de aço carbono por tubulações de PEAD. A motivação do mesmo se deu pelo fato das tubulações hoje existentes estarem deterioradas. Este projeto será implementado em uma indústria química situada na Baixada Fluminense, no estado do Rio de Janeiro.

Esta empresa, que tem atuação global, é uma das líderes nos setores de produtos para a área farmacêutica e agronegócios. Foi fundada por volta de 1860 na Alemanha, passando a atuar só no final de 1800 e início de 1900 como uma empresa química com operações internacionais. No Brasil sua história é conhecida há mais de 100 anos, tendo inaugurado, no final da década de 50 uma unidade industrial em uma cidade da Baixada Fluminense.

Este estudo tem como base a seleção de tubulação e o planimétrico que se encontram nos Anexos 1 e 2, respectivamente. Estes documentos contêm informações relevantes ao projeto, tais como o código do produto, especificação de tubulações (10AC01), diâmetros das tubulações, tipos de válvulas, dentre outros. Com o intuito de definir as condições de projeto, primeiramente deverá ser considerado o código de produto, neste estudo será o XYZ. Com este código de produto encontra-se na seleção de tubulação a classe de pressão (Pressão de projeto) e temperatura de projeto na qual o fluido escolhido deverá trabalhar. Neste estudo o fluido a ser considerado é a água de processo.

A seleção de tubulação do fluido XYZ define as seguintes condições de projeto.

- Pressão de projeto: 10 bar (1 MPa);
- Temperatura de projeto: 50 °C;

Para a elaboração dos cálculos serão considerados três diâmetros nominais para os tubos, tanto de aço carbono como de PEAD. São eles:

- DN 50;
- DN 80;
- DN 100;

O material da linha existente é o aço carbono ASTM A 106 Gr.B. Será escolhido neste estudo, para efeito de comparação o PEAD PE 100 com PN 10 e SDR igual a 17, conforme norma ABNT NBR 15561. Este material plástico foi escolhido por ser mais rígido e melhor recomendado para redes e adutoras, além de possuir menor espessura e consequentemente maior vazão e maior diâmetro interno.

3.1 Cálculo da espessura

Um dos principais parâmetros a serem analisados em um projeto de engenharia é a espessura do tubo. Para os cálculos da espessura são considerados os diâmetros nominais fornecidos no estudo de caso.

3.1.1 PEAD

Na literatura a espessura da tubulação é calculada segundo a Equação (1), que relaciona a tensão circunferencial do tubo, a pressão nominal, o diâmetro externo e a espessura (Danieletto, 2014).

$$\sigma = \frac{P(DE - e)}{2 * e} \quad (1)$$

Onde,

$\sigma \rightarrow$ tensão circunferencial em (MPa);

$P \rightarrow$ pressão interna em (MPa);

DE → diâmetro externo do tubo em (mm);

e → espessura mínima do tubo em (mm);

A boa prática de engenharia, no entanto, recomenda que para o cálculo da espessura do tubo sejam utilizadas as equações existentes nas normas vigentes. A norma ABNT NBR 15561 determina que a espessura seja calculada pela Equação (2).

$$e = \frac{PN * DE}{(2 * \sigma_d) + PN} \quad (2)$$

Onde,

σ_d → tensão que corresponde ao valor da Tensão Mínima Requerida (MRS) dividido pelo fator de segurança (FS) maior do que 1 em (MPa);

PN → pressão nominal em (MPa);

DE → diâmetro externo do tubo em (mm);

e → espessura mínima do tubo em (mm);

Para a realização dos cálculos utiliza-se a Equação (2), entretanto, para os cálculos deste item está sendo considerado o valor do DN ao invés do DE.

A Tabela 5 determina que a tensão de dimensionamento (σ_d) dos tubos para a vida útil de 50 anos e temperatura de trabalho de até 25 °C, deve ser obtida aplicando-se o fator de segurança (FS) de 1,25 sobre a MRS.

Tabela 5: Tensões de dimensionamento (Fonte: ABNT NBR 15561)

Composto	MRS para 50 anos, a 20 °C, conforme ISO 9080 MPa	Fator de segurança FS	Tensão de dimensionamento máxima MPa
PE 80	8	1,25	6,3
PE 100	10	1,25	8

A Tabela 6 apresenta de forma resumida os valores das espessuras encontradas para cada DN mencionado. E, estes valores são calculados pela Equação (2).

Tabela 6: Valores das espessuras das tubulações

DN (mm)	Pressão Nominal / Projeto (MPa)	Tensão de dimensionamento (MPa)	Espessura (mm)
50	1	8	2,94
80	1	8	4,71
100	1	8	5,88

Vale mencionar que os valores encontrados para as espessuras são valores aproximados, visto que, as tubulações de PEAD comercializadas no mercado são vendidas pelo seu diâmetro externo, e consideram o SDR da tubulação. Além das tubulações de PE 100 serem vendidas a partir do DE 63. Portanto os cálculos acima apresentam uma boa aproximação da espessura do tubo. No entanto, ao se comprar o mesmo no mercado deve-se atentar para os fatos mencionados. A Tabela 7 mostra as relações entre o DE e a espessura encontrada no mercado.

Tabela 7: Valores das espessuras encontrados no mercado (Fonte: ABNT NBR 15561)

DE (mm)	SDR 17 (PN 10)	SDR 13,6 (PN 12,5)
	e (mm)	e (mm)
63		4,7
75	4,5	
110	6,6	

Vale mencionar que pela norma ABNT NBR 15561 o tubo deve ser projetado pela Máxima Pressão de Operação (MPO), esta pressão relaciona o PN do tubo com a temperatura de projeto do mesmo, por um fator de redução de pressão denominado F_t . A Equação (3) mostra esta relação, e a Tabela 8 mostra de forma resumida os fatores de redução de pressão pela temperatura em °C.

$$MPO = PN * F_t \quad (3)$$

Tabela 8: Fatores de redução de pressão para temperaturas entre 27,5 °C e 50 °C (Fonte: ABNT NBR 15561)

Temp. °C	25	27,5	30	35	40	45 ^a	50 ^a
Ft	1,00	0,86	0,81	0,72	0,62	0,52	0,43
^a Aplicação limitada à vida útil máxima de 15 anos							

Com isso, na prática, o projeto de tubulação deve considerar o MPO ao invés do PN do tubo. Este fato faz com que, em um projeto cuja tubulação deva trabalhar a uma temperatura de projeto de 50 °C, e que deva suportar uma pressão de projeto de 10 bar, por exemplo, tenha que ser projetado para trabalhar com um PN maior do que 10 bar.

A fim de tornar os cálculos deste trabalho o mais próximo possível da realidade do mercado, para os cálculos dos próximos capítulos que relacionem a espessura do tubo, bem como o diâmetro externo, será utilizado às espessuras e o DE mencionados na Tabela 7, visto que estes valores são os determinados pela norma ABNT NBR 15561.

3.1.2 Aço carbono

Na literatura os cálculos das espessuras relacionam-se com suas respectivas tensões. A Equação (4) mostra o cálculo da espessura considerando a tensão circunferencial (σ_1) que age na parede do tubo, cuja espessura da parede é t , a pressão interna atuante é P e o raio interno do cilindro é r . A Equação (5) referencia a tensão longitudinal (σ_2) com a espessura t . A Equação (6), por sua vez, mostra a tensão de cisalhamento máxima no plano que ocorrem em planos que estejam rotacionados a 45° ao redor do eixo z . Já as Equações (7) e (8) mostram a tensão de cisalhamento máxima fora do plano e são obtidas através de uma rotação de 45° ao redor dos eixos x e y , respectivamente (Gere et.al., 2010).

$$\sigma_1 = \frac{P * r}{t} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{P * r}{2 * t} \quad (5)$$

$$(\tau_{max})_z = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1}{4} = \frac{P * r}{4 * t} \quad (6)$$

$$(\tau_{max})_x = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{P * r}{2 * t} \quad (7)$$

$$(\tau_{max})_y = \frac{\sigma_2}{2} = \frac{P * r}{4 * t} \quad (8)$$

Conforme mencionado para o PEAD, no entanto, a boa prática de engenharia recomenda utilizar as equações encontradas nas normas vigentes para os cálculos das espessuras dos tubos. A norma ASME ANSI B.31.3 estabelece as seguintes equações, equivalentes entre si, para o cálculo da espessura mínima dos tubos sujeitos à pressão interna. A Equação (9) mostra essas fórmulas, e é pela Equação (9) que será determinada as espessuras, para os tubos de aço carbono, deste estudo de caso.

$$t = \frac{P * DE}{2 * (S_h * E + P * Y)} + C \quad ou \quad t = \frac{P * d}{2 * (S_h * E + P * Y - P)} \quad (9)$$

Onde,

P → pressão interna de projeto (MPa);

DE → diâmetro externo do tubo (mm);

d → diâmetro interno do tubo (mm);

S_h → tensão admissível do material na temperatura de projeto (MPa);

E → Coeficiente de eficiência de solda, válido para o caso dos tubos com costura. Para tubo sem costura E=1,0.

$Y \rightarrow$ coeficiente de redução de acordo com o material e a temperatura do tubo;

$C \rightarrow$ soma das margens para corrosão, erosão e abertura de roscas e de chanfros em (mm);

No caso de tubos de aço carbono e temperaturas de até 485 °C, a norma ASME ANSI B31.3 adota $Y=0,4$ e $S_h = 86724,4$ kPa, e $C=1,3$ mm. Para a resolução dos cálculos deste estudo será considerado $P = 10$ bar ou 1 MPa e o diâmetro considerado é o diâmetro nominal.

Tabela 9: Valores da espessura para o aço carbono

DN (mm)	Pressão de Projeto (MPa)	S_h (MPa)	E	C (mm)	Y	Espessura (mm)
50	1	86,724	1	1,3	0,4	1,59
80	1	86,724	1	1,3	0,4	1,76
100	1	86,724	1	1,3	0,4	1,87

Vale mencionar que as normas de tubulações de aço carbono referenciam a espessura dos tubos segundo a “espessura” Schedule (SCH) do material. Neste estudo será considerado que a tubulação de aço carbono possui SCH 40.

A norma ASME ANSI B-36.10, relaciona os DN, com os diâmetros externos e espessuras dos tubos, a Tabela 10 mostra esta relação para o tubo de aço carbono com SCH 40 .

Tabela 10: Espessuras do tubo (Fonte: ASME ANSI B-36.10, 2000)

DN (mm)	50	80	100
DE (mm)	60,3	88,9	114,3
SCH 40 (mm)	3,9	5,5	6

A fim de tornar os cálculos deste trabalho o mais próximo possível da realidade do mercado, para os cálculos dos próximos capítulos que relacionem a espessura do tubo, bem como o diâmetro externo, será utilizado às espessuras e o DE mencionados na Tabela 10, visto que estes valores são os determinados pela norma ASME ANSI B-36.10.

3.1.3 Comparação entre o PEAD x Aço carbono

Comparando os valores de espessura encontrados para o PEAD e para o aço carbono, tanto os valores calculados quanto os estabelecidos por normas, pode-se concluir que para resistir às mesmas condições de projeto o PEAD precisa de uma espessura superior quando comparada ao aço carbono.

Além disso, conforme mencionado no capítulo 3.1.1, para resistir a uma pressão de projeto de 10 bar, para a temperatura de projeto de 50 °C, a tubulação de PEAD precisaria ser dimensionada segundo a sua MPO o que acarretaria em um PN maior que o PN 10, proposto inicialmente para o projeto. Enquanto, que para a tubulação de aço carbono isso não se faz necessário, visto que uma temperatura de 50 °C não acarretaria diminuição da sua pressão nominal, isto porque segundo a norma ASME ANSI B-36. 10 só ocorre uma diminuição do PN do tubo a partir da temperatura de 200 °C.

3.2 Cálculo da potência de bombeamento

Para fazer a comparação entre a potência de bombeamento utilizando uma tubulação de aço carbono e outra de PEAD, será considerado um sistema com dois tanques à pressão atmosférica, uma bomba, 2 válvulas gaveta na sucção e 1 válvula gaveta na descarga, além de 4 curvas de 90° na sucção e 2 curvas de 90° na descarga. As fórmulas são as mesmas para ambas as tubulações. A Figura 2 representa o esquema a ser analisado. São utilizadas as mesmas equações para o cálculo da potência da bomba.

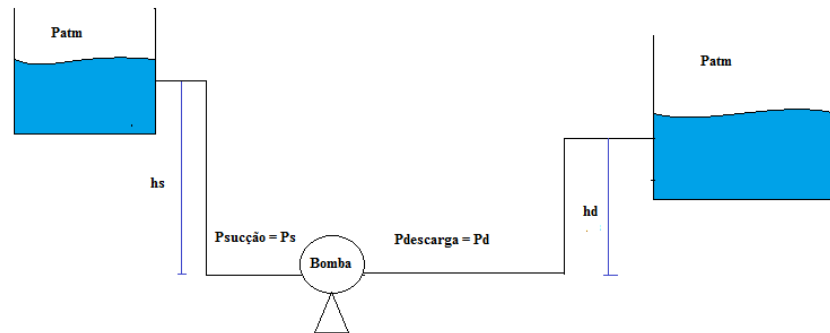


Figura 2: Esquema de bombeamento de água de processo

Vale ressaltar que as válvulas gavetas e as curvas de 90° foram considerados neste capítulo, apenas para tornar os cálculos os mais próximos possíveis da realidade de um projeto de engenharia.

A Equação (10) é utilizada para o cálculo da potência de uma bomba centrífuga.

$$P = \frac{Q * \gamma * H_B}{\eta_B} \quad (W \text{ ou } cv) \quad (10)$$

Onde,

$Q \rightarrow$ vazão em (m³/s) ;

$\gamma \rightarrow$ peso específico em (N/m³);

$H_B \rightarrow$ altura manométrica total da bomba em (mca);

$\eta_B \rightarrow$ eficiência da bomba, neste estudo é considerada 75 %;

A altura manométrica total da bomba é calculada pela diferença entre a pressão de descarga e a pressão sucção. A Equação (11) exemplifica a altura manométrica.

$$H_B = P_d - P_s \quad (11)$$

A pressão de sucção (P_s) é calculada pela Equação (12).

$$P_s = (\rho * g * h_s) - h_{IT} + P_{atm} \quad (12)$$

Sendo,

$$h_{IT} = h_l + h_{lm} \quad (13)$$

$$h_l = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2} \quad (14)$$

$$h_{lm} = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2} \quad (15)$$

O fator de atrito f pode ser encontrado de diversas maneiras, uma delas é pelo diagrama de Moody. Para encontrar o valor de f por este método é necessário ter o valor de Reynolds (R_e) e a rugosidade do material. O número de Reynolds pode ser encontrado pela Equação (16).

$$R_e = \frac{\rho_{H_2O} * V * d}{\mu_{H_2O}} \quad (16)$$

Sendo,

$V \rightarrow$ velocidade do fluido em (m/s);

$d \rightarrow$ diâmetro interno da tubulação em (mm);

A Figura 3 representa o gráfico de Moody.

Para tubulações transportando água costuma-se adotar valores de velocidade de 1 a 3 (m/s), para este estudo é adotado a velocidade como 2 (m/s). Segundo a literatura a rugosidade (ϵ) do aço comercial é de 0,046 mm e a do Polietileno é de 0,001 (mm).

A pressão de descarga (P_d) é calculada pela Equação (17).

$$P_d = (\rho * g * h_d) - h_{IT} + P_{atm} \quad (17)$$

È sabido que a vazão pode ser calculada pela Equação (18).

$$Q = V * A [m^3/s] \quad (18)$$

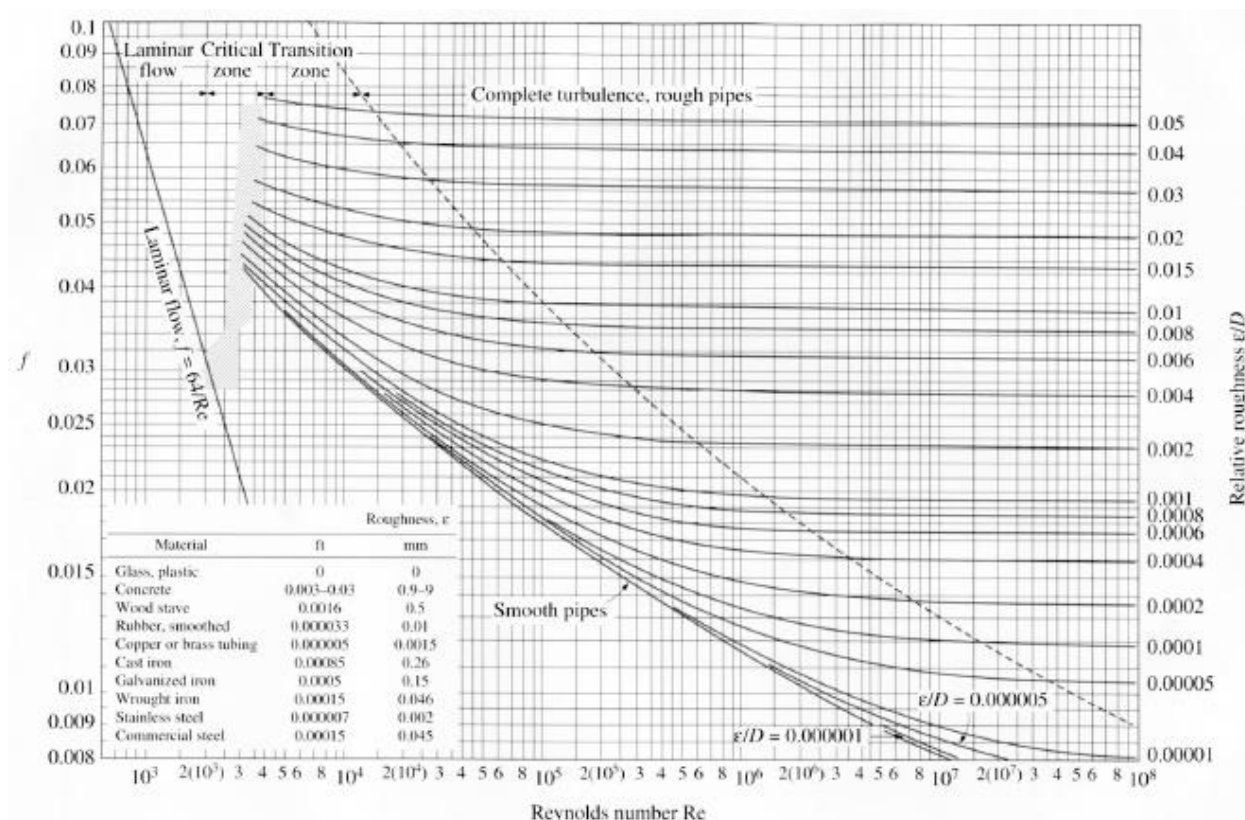


FIGURE A-27
The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Figura 3: Gráfico de Moody (Fonte: Fox et. al., 2013)

Sendo a área calculada pela Equação (19).

$$A = \frac{\pi * (DE^2 - d^2)}{4} \quad (19)$$

Sendo,

DE → diâmetro externo em (mm);

d → diâmetro interno (DE – 2*espessura (e)) em (mm);

A Tabela 11 mostra os dados utilizados na elaboração dos cálculos. Para cada DN (50, 80 e 100) são respeitados os diâmetros externos e espessuras mencionados nas Tabelas 7 e 10, do PEAD e aço carbono, respectivamente, visto que estes são valores determinados por normas. São considerados para efeitos de cálculo um comprimento de tubulação para a sucção de 15 (m) e um

comprimento de tubo para a descarga de 10 (m). Vale mencionar que os valores utilizados para L_e/D , são valores geralmente utilizados nos cálculos reais.

Tabela 11: Dados dos cálculos

Parâmetros	Simbologia	Valores	Unidades
Densidade da água	ρ	1000	kg/m ³
Viscosidade da água a 20 °C	μ	0,001003	Pa.s
Velocidade da água	V	2	m/s
Gravidade	g	9,81	m/s ²
L_e/D da válvula gaveta		8	
L_e/D de curvas de 90°		30	
Comprimento do tubo da sucção	L	15	m
Comprimento do tubo da descarga	L	10	m
Rendimento da Bomba	η	75	%
Altura da sucção	hs	2	m
Altura da descarga	hd	4	m
Rugosidade do PE	ϵ	0,001	mm
Rugosidade do aço carbono	ϵ	0,046	mm

3.2.1 PEAD

A fim de facilitar a análise dos cálculos da potência da bomba é elaborado a Tabela 12 que resume o valor de potência encontrado para cada DN.

Tabela 12: Potência consumida pela bomba em (W) para o PEAD

Parâmetros	DN 50		DN 80		DN 100	
	Sucção	Descarga	Sucção	Descarga	Sucção	Descarga
DE (m)	0,063		0,075		0,11	
e (m)	0,0047		0,0045		0,0066	
d (m)	0,0536		0,066		0,0968	
Nº de Reynolds (Re)	106879,36		131605,18		193020,94	
ε/d	0,019		0,015		0,010	
fator de atrito	0,048		0,0465		0,041	
Leq/D	136	68	136	68	136	68
L/d	279,85	186,57	227,27	151,52	154,96	103,31
hlT (mca)	4,07	2,49	3,44	2,08	2,43	1,43
ρgh (mca)	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	4,00
Patm (mca)	10,34	10,34	10,34	10,34	10,34	10,34
Pressão (mca)	8,27	11,85	8,90	12,26	9,91	12,91
HB (mca)	3,58		3,36		3,00	
Área (m ²)	0,00086		0,00100		0,00214	
Vazão [m ³ /s]	0,00172		0,00199		0,00429	
Peso específico [kg/m ² *s ²]	9810		9810		9810	
Potência [W]	81		88		168	

3.2.2 Aço carbono

A fim de facilitar a análise dos cálculos de potência da bomba é elaborado a Tabela 13 que resume os valores de potência encontrados para cada DN.

Tabela 13: Potência consumida pela bomba em (W) para o aço carbono

Parâmetros	DN 50		DN 80		DN 100	
	Sucção	Descarga	Sucção	Descarga	Sucção	Descarga
DE (m)	0,0603		0,0889		0,1143	
e (m)	0,0039		0,0055		0,006	
d (m)	0,0525		0,0779		0,1023	
N° de Reynolds (Re)	104685,94		155334,00		203988,04	
ε/d	0,8762		0,5905		0,4497	
fator de atrito	0,1		0,1		0,1	
Leq/D	136	68	136	68	136	68
L/d	285,71	190,48	192,55	128,37	146,63	97,75
h _{IT} (mca)	8,60	5,27	6,70	4,00	5,76	3,38
ρgh (mca)	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	4,00
Patm (mca)	10,34	10,34	10,34	10,34	10,34	10,34
Pressão (mca)	3,74	9,07	5,64	10,34	6,58	10,96
HB (mca)	5,33		4,70		4,38	
Área (m ²)	0,0007		0,0014		0,0020	
Vazão [m ³ /s]	0,0014		0,0029		0,0041	
Peso específico [kg/m ³]	9810		9810		9810	
Potência [W]	96		177		234	

3.2.3 Comparação entre PEAD x Aço carbono

Comparando as potências requeridas no caso de tubulações de aço carbono e PEAD, para cada DN, avalia-se que a potência requerida de bombeamento para uma tubulação de aço carbono é superior àquela de PEAD. Esta conclusão era esperada, pois a rugosidade da tubulação de aço carbono é 46 vezes maior quando comparado com a de PEAD. O valor da rugosidade do material impacta no coeficiente de atrito que será conseqüentemente maior no aço carbono. Devido ao fato da rugosidade do PEAD ser bem menor do que a do aço, implica em uma maior vida útil da tubulação, pois, esta tem uma menor degradação, em função da esclerose, do tubo ao longo dos anos.

3.3 Cálculo do vão máximo entre os suportes

3.3.1 PEAD

O vão máximo entre suportes de uma tubulação de PEAD é dado pela Equação (20) simplificada (Danieletto, 2014).

$$l = (0,4 \text{ a } 0,5) \sqrt[3]{\frac{E * (DE^4 - d^4)}{q}} \quad (20)$$

Sendo,

$DE \rightarrow$ diâmetro externo do tubo em (m);

$d \rightarrow$ diâmetro interno do tubo em (m);

$l \rightarrow$ espaçamento entre apoios em (m);

$E \rightarrow$ módulo de elasticidade em (MPa);

$q \rightarrow$ carga distribuída (N/m) ;

Para o cálculo de l será utilizado o valor de 0,5.

O módulo de elasticidade de longa duração para o PE 100 a 50 °C é 118 MPa (Danieletto, 2014).

Para cada DN (50, 80 e 100) são respeitados os diâmetros externos e espessuras mencionados na Tabelas 7, visto que estes são valores determinados pela norma ABNT NBR 15561.

A Equação (21) mostra o cálculo da carga distribuída q .

$$q = q_T + q_f \quad (21)$$

Sendo,

$q_T \rightarrow$ carga devido ao tubo em (N/m);

$q_f \rightarrow$ carga devido ao fluido em (N/m) ;

A carga devido ao tubo pode ser expressa pela Equação (22).

$$q_T = \frac{\pi * (DE^2 - d^2)}{4} \gamma_T \quad (22)$$

Sendo,

$\gamma_T \rightarrow$ peso específico do tubo (N/m³);

Para o PEAD $\rightarrow \rho_T = 9414,38$ (N/m³) ;

A carga devido ao fluido pode ser expressa pela Equação (23).

$$q_f = \frac{\pi * d^2}{4} \gamma_f \quad (23)$$

Onde,

γ_ϕ = peso específico do fluido \rightarrow para água é $\rho_{H_2O} = 9806,65$ (N/m³) ;

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 14.

Tabela 14: Cálculo do vão máximo da tubulação de PEAD

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE (m)	0,063	0,075	0,110
e (m)	0,0047	0,0045	0,0066
d (m)	0,0536	0,066	0,0968
E (MPa)	118	118	118
Peso específico tubo (N/m ³)	9414,38	9414,38	9414,38
Peso específico água (N/m ³)	9806,65	9806,65	9806,65
qt [N/m]	8,10	9,38	20,18
qf [N/m]	22,13	33,55	72,17
q [N/m]	30,23	42,93	92,35
<i>l</i> [m]	1,5	1,6	2,1

3.3.2 Aço carbono

O cálculo do vão máximo é regido pela Equação (24) (Fraga, 2010).

$$L_s = \sqrt[4]{\frac{\delta * E * I}{600 * q}} \quad (24)$$

Onde,

$\delta \rightarrow$ flecha máxima em (mm);

$L_s \rightarrow$ distância máxima entre apoios (m);

$E \rightarrow$ módulo de elasticidade do material (MPa);

$I \rightarrow$ momento de inércia da secção transversal do tubo (cm⁴);

$q \rightarrow$ carregamento a que a tubulação está solicitada;

As equações utilizadas para o cálculo do carregamento q do PEAD será usada para o aço carbono. O módulo de elasticidade E do aço carbono será considerado de 200 GPa, e a flecha máxima δ admitida é de 10 (mm) para tubulações de 4” ou maiores (Fraga, 2010). O momento de inércia I do tubo é calculado pela Equação (25).

$$I = \frac{\pi * (DE^4 - d^4)}{64} \quad (25)$$

Considerando o peso específico do aço como sendo:

Aço carbono $\rightarrow \rho_T = 78500 \text{ (N/m}^3\text{)} ;$

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 15.

Tabela 15: Dados utilizados para o cálculo do vão máximo da tubulação de aço carbono

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE (m)	0,0603	0,0889	0,1143
e (m)	0,0039	0,0055	0,006
d (m)	0,0525	0,0779	0,1023
E (MPa)	200000	200000	200000
Peso específico tubo (N/m ³)	78500	78500	78500
Peso específico água (N/m ³)	9806,65	9806,65	9806,65
qt [N/m]	54,24	113,12	160,25
qf [N/m]	21,23	46,74	80,60
q [N/m]	75,47	159,86	240,85
δ [m]	0,01	0,01	0,01
I [m ⁴]	0,00000027607	0,0000012583	0,0000030020
<i>Ls [m]</i>	5,9	7,2	8,0

3.3.3 Comparação do PEAD x Aço carbono

Pode-se observar que os valores encontrados para o vão máximo do PEAD são menores que o Aço carbono, o que significa um maior número de suportes para manter a integridade da linha. O fato do vão máximo da tubulação de aço ser maior do que aquele do tubo PEAD, deve-se basicamente a diferença de rigidez (módulo de elasticidade) dos materiais, visto que o módulo de elasticidade da liga ferrosa é aproximadamente 1000 vezes maior do que o do material polimérico.

. Com isso, ao se comparar os vão máximos entre apoios, o projeto utilizando uma tubulação de PEAD se tornaria mais dispendioso do que a de aço carbono visto a maior necessidade de suportes de tubulação.

Vale ressaltar que o vão máximo, para ambos os materiais, cresce com o aumento do diâmetro, devido ao aumento do momento de inércia do próprio componente.

3.4 Cálculo dos esforços nos suportes

Tanto para o PEAD quanto para o aço carbono os esforços sobre a tubulação e seus suportes de fixação são decorrentes de: dilatação térmica da tubulação, pressão interna da tubulação e flexão da tubulação. Portanto, os esforços devem ser analisados para o adequado dimensionamento dos suportes, bem como para determinar a máxima e mínima distância entre os suportes, afim de que os esforços sejam minimizados e assim mantendo-os dentro dos limites aceitáveis para a tubulação.

3.4.1 Dilatação térmica e os esforços nos suportes

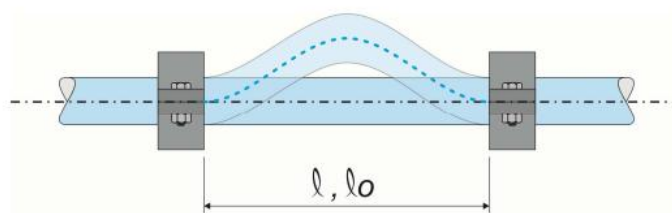


Figura 4: Dilatação térmica da tubulação (Fonte: Danieleto, 2014)

Para o cálculo da dilatação térmica são utilizadas as mesmas equações para o PEAD e aço carbono. Levando apenas em consideração os dados pertinentes a cada material.

Na tubulação a dilatação térmica pode ser expressa pela Equação (26):

$$\Delta l = l_0 * \alpha * \Delta T \quad (26)$$

Onde,

$l_0 \rightarrow$ comprimento inicial da tubulação (m);

$\Delta l = l - l_0$ (sendo l comprimento final após dilatação);

$\Delta T = 0,9 * T_{\text{operação}} - T_{\text{instalação}}$;

$\alpha \rightarrow$ coeficiente de dilatação linear;

A Equação (27) expressa a deformação relativa (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha * \Delta T \quad (27)$$

Contudo, se a tubulação for impedida de dilatar ou contrair aparecerá uma tensão axial de contração ou expansão, respectivamente. A Equação (28) demonstra esta relação:

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (28)$$

Por consequência a ação de uma força sobre os suportes e apoios da tubulação, pode ser expressa pela Equação (29):

$$F = \sigma * A \quad (29)$$

Onde,

A = Área da secção transversal do tubo (m^2);

A área A é calculada pela Equação (19).

3.4.1.1 PEAD

Para calcular a variação de temperatura ΔT , será considerado uma $T_{\text{operação}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ e a $T_{\text{instalação}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. O Coeficiente de dilatação linear de $\alpha = 2,0 * 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e módulo de elasticidade E de curta duração para PE 100 a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ de aproximadamente 490 MPa (Danieletto, 2014).

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 16.

Tabela 16: Esforços nos suportes devido à dilatação térmica para o PEAD

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE (m)	0,063	0,075	0,110
e (m)	0,0047	0,0045	0,0066
d (m)	0,054	0,066	0,097
T _{operação} (°C)	50	50	50
T _{instalação} (°C)	20	20	20
ΔT (°C)	25	25	25
E (MPa)	490	490	490
Coefficiente de dil. Térmica (1/°C)	0,0002	0,0002	0,0002
ϵ	0,01	0,01	0,01
Área (m ²)	0,00086	0,0010	0,00214
Tensão axial (MPa)	2,45	2,45	2,45
Força total do suporte (N)	2108,97	2441,77	5252,52
Força em cada suporte (N)	1054	1221	2626

Vale mencionar que a força em cada suporte é a metade da força total do suporte.

3.4.1.2 Aço carbono

Para calcular a variação de temperatura ΔT , será considerado uma $T_{operação} = 50\text{ °C}$ e a $T_{instalação} = 20\text{ °C}$. O Coeficiente de dilatação linear do aço $\alpha = 1,2 * 10^{-5}\text{ °C}^{-1}$, e módulo de elasticidade E do aço de 200 GPa.

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 17.

Tabela 17: Cálculo dos esforços nos suportes devido à dilatação térmica para o aço carbono

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE (m)	0,0603	0,0889	0,1143
e (m)	0,0039	0,0055	0,0060
d (m)	0,0525	0,0779	0,1023
Toperação (°C)	50	50	50
Tinstalação (°C)	20	20	20
ΔT (°C)	25	25	25
E (MPa)	200000	200000	200000
Coeficiente de dil. Térmica (1/°C)	0,000012	0,000012	0,000012
ε	0,00030	0,00030	0,00030
Área (m ²)	0,00069	0,0014	0,0020
Tensão axial (MPa)	60,00	60,00	60,00
Força total do suporte (N)	41460,26	86460,36	122480,80
Força em cada suporte (N)	20730	43230	61240

Vale mencionar que a força em cada suporte é a metade da força total do suporte

3.4.1.3 Comparação entre o PEAD x Aço carbono

Pode-se concluir pelos valores calculados dos esforços provenientes da dilatação que a tubulação de PEAD provoca um menor esforço embora apresente uma maior dilatação térmica. Isto se deve a diferença do módulo de elasticidade dos materiais, constante essa que é adotada no cálculo dos esforços de dilatação. Isto significa que embora a razão entre os coeficientes de dilatação do PEAD e do aço seja em torno de 17, a razão entre o módulo de elasticidade do PEAD e do aço carbono é da ordem de $2,45 \times 10^{-3}$.

3.4.2 Esforços de tração em suportes devido à pressão interna

Assim como a dilatação térmica, a pressão interna positiva ou negativa provoca expansão ou contração na tubulação que resulta em esforços de tração ou compressão, respectivamente, sobre os suportes, e à própria tubulação (Danieletto, 2014).

Com isso, quando um tubo é submetido à pressão interna, ao mesmo tempo em que se origina uma expansão diametral, o tubo sofre uma contração longitudinal de magnitude proporcional à primeira, relacionado pelo fator de Poisson (ν) (Danieletto, 2014).

Assim, se esta contração longitudinal for impedida, através de suportes, por exemplo, o tubo é submetido a uma tensão longitudinal proporcional à tensão circunferencial, imposta pela pressão interna.

Este fenômeno é particularmente importante para o dimensionamento de suportes, além de atuar diretamente sobre as soldas.

A Equação (30) e (31) é utilizado tanto para o PEAD quanto para o aço carbono, e a área é calculada pela Equação (19).

$$\sigma_a = \nu * \sigma_o \quad (30)$$

Sendo,

$\sigma_a \rightarrow$ tensão longitudinal ou axial em (MPa);

$\sigma_o \rightarrow$ tensão circunferencial em (MPa);

$\nu \rightarrow$ coeficiente de Poisson;

Para o PEAD $\rightarrow \nu = 0,5$;

Para o aço carbono $\rightarrow \nu = 0,3$;

A força de tração pode ser calculada por (Danieletto, 2014):

$$F = \sigma_a * A \quad [N] \quad (31)$$

3.4.2.1 PEAD

Considerando-se o tubo é PEAD PE 100, com diâmetros nominais DN 50, DN 80 e DN 100, Diâmetro Externo segundo a Tabela 7, SDR 17 e PN 10 (10 bar), e considerando que o teste hidrostático (TH) da linha com pressão de 1,5*PN, tem-se a tensão circunferencial dada pela Equação (32):

$$\sigma_o = \frac{P * (SDR - 1)}{2} \quad [MPa] \quad (32)$$

Onde P é a pressão de teste hidrostático e é calculada por, $P = 1,5 * PN$ (MPa).

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 18.

Tabela 18: Cálculo dos esforços nos suportes devido à pressão interna para o PEAD.

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE (m)	0,0630	0,0750	0,1100
e (m)	0,0047	0,0045	0,0066
d (m)	0,05	0,07	0,10
Coeficiente de Poisson	0,5	0,5	0,5
Pressão TH - P (MPa)	1,5	1,5	1,5
SDR	17	17	17
σ_o (MPa)	12	12	12
σ_a (MPa)	6	6	6
Área (m ²)	0,000861	0,000997	0,002144
Força total do suporte (N)	5164,81	5979,85	12863,31
Força em cada suporte (N)	2582	2990	6432

3.4.2.2 Aço carbono

A tensão circunferencial para o aço carbono é calculado segundo a Equação (4), considerando a pressão P como sendo a pressão de projeto de 10 bar, no entanto, para considerar a mesma pressão P que o utilizado para o PEAD, foi considerado que a pressão de Teste Hidrostático (TH) é $1,5 \cdot P_N$, ou seja, $P = 1,5 \cdot P_N$. O raio r considerando a metade do diâmetro interno de cada tubo e a espessura t sendo a espessura da Tabela 10. A tensão longitudinal é calculada conforme a Equação (30), e a força dos suportes devido à pressão interna pela Equação (31). A fim de facilitar a visualização dos dados e cálculos utilizados foi feita a Tabela 19.

Tabela 19: Esforços nos suportes devido à pressão interna para o aço carbono

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
DE	0,0603	0,0889	0,1143
Espessura - t (m)	0,0039	0,0055	0,0060
d (m)	0,053	0,078	0,102
Raio - r (mm)	0,026	0,04	0,05
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3
Pressão de TH- P (MPa)	1,5	1,5	1,5
σ_o (MPa)	10,10	10,62	12,79
σ_a (MPa)	3,03	3,19	3,84
Área (m^2)	0,00069	0,00144	0,00204
Força total do suporte (N)	2092,95	4592,22	7831,12
Força em cada do suporte (N)	1046	2296	3916

3.4.2.3 Comparação entre o PEAD x Aço carbono

Pode-se concluir que os suportes de tubulação do aço carbono são menos solicitados devido à pressão interna do que os tubos de PEAD. Nas tubulações de PEAD os esforços nos suportes devido à pressão interna têm maior influência do que os esforços devido à dilatação térmica, enquanto, nas tubulações de aço carbono os esforços nos suportes decorrentes da dilatação térmica são quase 20 vezes maiores do que os esforços devido à pressão interna.

3.4.3 Esforços entre suportes devido à flexão

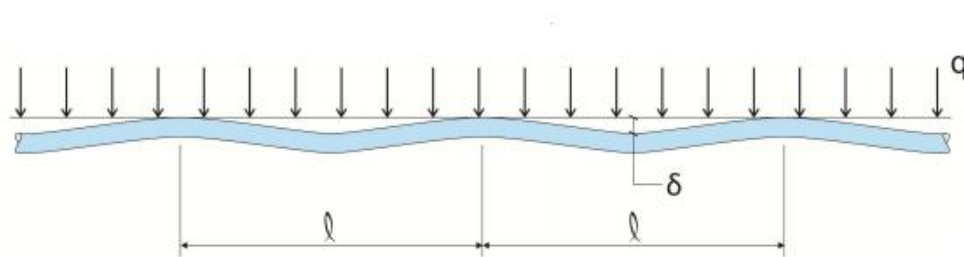


Figura 5: Espaçamento entre suportes

Vale ressaltar que os esforços de flexão entre suportes são mais comuns em instalações aéreas, no entanto, também podem decorrer de dilatações térmicas ou mesmo devido à ação de correntes aquáticas e ondas. Portanto, faz-se então necessário verificar que as tensões de flexão não ultrapassem os limites admissíveis, o que levaria o tubo ao colapso (Danieletto, 2014).

Se considerar os esforços de flexão causados pelo peso próprio do tubo somado ao peso do fluido, como ocorre em instalações aéreas e tubos ancorados, tem que projetar o tubo para suportar a carga q apresentada no Capítulo 3.3.1 e 3.3.2 (Danieletto, 2014).

Com isso, para projetar devido à flexão os suportes devem atender a demanda de carga q , encontradas no Capítulo 3.3.1 e 3.3.2, para o PEAD e aço carbono, respectivamente. A fim de melhor visualizar os dados foi feita a Tabela 20 com os valores de q do PEAD e aço carbono.

Tabela 20: Valores da carga q para projeto de suportes devido à flexão

Parâmetros	DN 50	DN 80	DN 100
PEAD			
q [N/m]	30,23	42,93	92,35
AÇO			
q [N/m]	75,47	159,86	240,85

Pode-se concluir pelos valores da carga q encontrados na Tabela 20, que os suportes da tubulação de aço carbono devem ser projetados quanto à flexão para resistir a um valor de carga superior ao solicitado por uma tubulação de PEAD. Isto se deve ao fato de que uma tubulação de PEAD é mais “leve”, ou seja, possui uma menor densidade quando comparado ao aço carbono.

4 Outros parâmetros a serem considerados

4.1 Soldagem

4.1.1 PEAD

Dentre os métodos de ligação entre tubos de PEAD destacam-se os unidos através de soldagem e de juntas mecânicas. O método de soldagem pode ser dividido em três, são eles: termofusão, eletrofusão e por aporte (Danieletto, 2014). No entanto, os dois primeiros são os mais utilizados na indústria.

Na soldagem por termofusão os materiais são submetidos à determinada temperatura e por tempo tal que os materiais entrem em fusão. Depois, unem as superfícies fundidas sob certa pressão, acarretando a interação das massas fundidas, para que, assim sejam resfriadas, resultando em um corpo único que mantém as mesmas propriedades e características dos materiais originais (Danieletto, 2014).

O procedimento de solda de topo por termofusão é definido em diversas normas técnicas, tais como DVS 2207, NBR 14464, BGC ERS C 131, ISSO 21307, ASTM D2657, PPI-TR33, dentre outras. Embora a DVS 2207 seja mais utilizada e aceita (Danieletto, 2014).

A soldagem por eletrofusão é especificado pelas normas DVS 2207, ISO 11413, ABNT NBR 14465 entre outras. O procedimento de soldagem por eletrofusão consiste na aplicação de uma tensão elétrica nos terminais (conectores) da conexão, fazendo com que passe uma corrente elétrica na resistência inserida no corpo, gerando calor, por efeito Joule, o que leva à fusão a superfície interna e externa do tubo. Quando a corrente elétrica cessa, os materiais começam a resfriar lentamente, até a temperatura ambiente, formando novos cristalitos com a mistura dos dois materiais, soldando-se, tal qual ocorre na solda por termofusão (Danieletto, 2014).

O soldador de tubulações poliolefínicas deve ser qualificado e certificado por organismos ou entidades reconhecidas. Para estar apto a soldagem o soldador deve atender as seguintes premissas: Ter feito curso teórico e prático na modalidade da solda, ser submetido a teste teórico e prático, demonstrando habilidade e domínio dos procedimentos e conhecimentos de tubos e conexões, o mesmo deve saber avaliar espessuras, diâmetros, classes de pressão, parâmetros de soldagem e conhecimento de escalas de pressão, temperatura, dimensionais e conversão de escalas, assim como saber fazer uma avaliação visual e dimensional da qualidade das soldas (Danieletto, 2014).

A validade da qualificação é de 2 anos, desde que não fique mais de 6 meses sem executar soldagens. Dentre as normas utilizadas como referência para a qualificação de soldadores estão a ABNT NBR 14.472, DVS 2212 e a italiana UNI 9737.

4.1.2 Aço carbono

Dentre os principais meios de ligação de tubos, estão as ligações rosqueadas, ligações soldadas, ligações flangeadas, ligações de ponta e bolsa, bem como outros sistemas de ligação, tais como, ligações de compressão e ligações patenteadas. No entanto, a maior parte das ligações em tubulações industriais é soldada, com solda por fusão com adição de eletrodo, de dois tipos, o de solda de topo e solda de encaixe (Telles, 2001).

Dentre as vantagens dessas ligações pode ser citado: Boa resistência mecânica (quase sempre equivalente à do tubo inteiro). Estanqueidade perfeita e permanente. Boa aparência. Facilidade na aplicação de isolamento térmico e de pintura. Pouca necessidade de manutenção (Telles, 2001).

Dentre as desvantagens estão à dificuldade de desmontagem da tubulação, necessidade de mão de obra especializada para sua execução, além do fato da operação de soldagem ser um

“trabalho a quente”, o que requer cuidados especiais de segurança em ambientes com combustíveis, inflamáveis ou explosivos (Telles, 2001).

Dentre as normas que regulamentam a utilização de tubulações de processo pode-se citar a norma ASME B31.3. Esta norma fornece orientação e limitações sobre a seleção e aplicação de materiais e componentes, bem como requisitos para a fabricação e montagem da tubulação, além dos requisitos no que se refere a verificação, inspeção e teste da tubulação (Modenesi, 2005).

Dentre os códigos e especificações importantes relacionados à soldagem estão: *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (vasos de pressão). *API STD 1104, Standard for Welding Pipelines and Related Facilities* (tubulações e dutos na área do petróleo). Especificações diferentes de associações como *International Organization for Standardization (ISO)*, *American Welding Society (AWS)*, *British Standard Society (BS)*, *Deustches Institute fur Normung (DIN)*, *Association Francaise de Normalisation (AFN)* e a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), dentre outras (Modenesi, 2005).

Os códigos e especificações mencionados podem englobar as mais diferentes etapas de soldagem incluindo, por exemplo, a especificação de material, projeto e preparação de junta, fabricação de estruturas e equipamentos, qualificações de procedimento e de operador, procedimentos de inspeção, além de avaliação de descontinuidades. Vale mencionar que a norma brasileira que regulamenta a certificação de mão-de-obra para a soldagem é a ABNT NBR 14842:2015 – Soldagem – Critérios para qualificação e certificação de inspetores para o setor de petróleo e gás, assim como o petroquímico (Modenesi, 2005).

Para a soldagem na indústria do Estudo de caso do Capítulo3, os soldadores devem ser qualificados de acordo com a norma ASME BPVC - Section IX. Estão liberados da exigência de qualificação prévia os soldadores que possuem registro de qualificação com data de emissão não

anterior a 3 meses e/ou estiverem realizando soldas com acompanhamento radiográfico ou ultrassônico comprovado neste período (NBB 50.008).

Durante os serviços de soldagem, a empresa responsável deve executar o controle de desempenho de soldadores, através do qual será aferida continuamente a qualificação dos mesmos. Tal controle deve ser semanal e informar, para cada soldador contido na RSQ (Relação de soldadores qualificados), o número de juntas radiografadas ou ultrasonadas e o de reprovadas (NBB 50.008).

Os inspetores de soldagem devem ser qualificados e certificados de acordo com o SNQC – IS (Sistema Nacional de Qualificação e Certificação em Inspetores de Soldagem), conforme ABNT NBR 14842 (NBB 50.008).

Os supervisores e encarregados de soldagem devem ter os seguintes conhecimentos mínimos: Materiais e soldabilidade, Parâmetros de soldagem da EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) e RQPS (Relatório de Qualificação de Procedimento de Soldagem), sistemática de controle da qualidade, armazenamento e secagem de consumíveis especificados no procedimento da empresa contratada, conhecer os limites de qualificação dos soldadores, cuidados necessários para o preaquecimento (homogeneização e medição de temperatura), controle de temperatura interpasse e pós-aquecimento (NBB 50.008).

4.1.3 Comparação entre PEAD x Aço carbono

Em uma abordagem qualitativa, comparando os requisitos mencionados para cada material, pode-se observar que a soldagem do aço é mais dispendiosa que a soldagem do PEAD. Dentre os motivos estão que as normas para soldagem de materiais metálicos exigem mais qualificações dos seus soldadores do que as de PEAD, além disso, um soldador de PEAD pode ficar até 6 meses sem realizar o procedimento de soldagem, enquanto, o do aço carbono pode ficar no máximo até 3 meses.

Com isso, ao se comparar o custo de soldagem, o aço carbono seria mais dispendioso em um projeto de engenharia quando comparado com o PEAD, o que poderia se tornar um ponto desfavorável quando se tivesse na etapa da escolha do material que atende ao projeto.

4.2 Sustentabilidade

4.2.1 PEAD

Conforme já mencionado os materiais poliméricos podem ser de fonte sintética ou derivados de substâncias naturais, como por exemplo, o petróleo.

O processo de extrusão é o mais importante processo de transformação de plásticos. Este processo consiste basicamente em forçar a passagem (controlada) do material granulado por dentro de um cilindro aquecido, por meio de uma ou duas roscas “sem fim”, que transportam, misturam, compactam e permitem a retirada de gases liberados no processo, na saída do cilindro (SINDIPLAST – Guia ambiental).

A ABNT NBR 15792:2010 define alguns termos importantes na reciclagem, dentre eles estão: A definição de reciclagem, sendo o reprocessamento, em um novo processo de produção, dos resíduos de materiais para o fim inicial ou para outros fins, mas não incluindo a revalorização energética e a orgânica. O processo de reciclagem, sendo a conversão de embalagens pós-consumo e/ou aparas de conversão industrial, separadas e coletadas, em um produto ou matéria-prima secundária. Além de definir matéria prima secundaria, aparta interna de produção industrial, aparta de conversão industrial e matéria pós-consumo (SINDIPLAST – Guia ambiental).

Dentre tantas vantagens da reciclagem pode-se ressaltar que todos os processos de reciclagem dos plásticos evitam a sua disposição em aterros sanitários, minimizando o problema da falta de espaço, que ocorre principalmente nas grandes cidades, com reflexos positivos sobre os aspectos ambientais da cadeia. Analisando pelo ciclo produtivo, esse material gera economia

de recursos naturais, de energia elétrica e de água consumidos na produção de matérias primas virgens (SINDIPLAST – Guia ambiental).

Apesar de o material plástico ser reciclável, as normas que regulamentam a fabricação de tubos de PE para fins industriais não permite que as tubulações sejam fabricadas de material reciclado.

4.2.2 Aço

O aço é produzido, basicamente, a partir do minério de ferro, carvão e cal. Pode-se dividir a fabricação do aço em quatro etapas, são elas: Preparação da carga, redução, refino e laminação (Instituto Aço Brasil, 2014).

O aço é considerado um material altamente sustentável, devido ao fato de ser 100% reciclável, além do que a reciclagem não acarreta nenhuma perda de suas propriedades físicas, podendo, assim ser reciclado continuamente (Instituto Aço Brasil - Relatório de Sustentabilidade, 2014 e Relatório Técnico de Reciclagem de Metais no País, 2009).

Existem três tipos de sucata ferrosa, são elas, a sucata interna que é gerada da própria Usina Siderúrgica, a sucata industrial gerada em metalúrgicas, fundições e plantas industriais, sucata de obsolescência, captada depois do consumo, provêm da coleta de qualquer material metálico colocado em desuso que estejam em condições de serem reciclados (Relatório Técnico de Reciclagem de Metais no País, 2009).

O mercado mais importante associado à reciclagem de aço é formado pelas aciarias, estas sendo responsáveis pelo derretimento da sucata, transformando-a em produtos ou novas chapas de aço. O crescimento da coleta seletiva desse material estimula o aumento da demanda de empregos e equipamentos de separação, como eletroímãs. Vale mencionar que cada tonelada de aço reciclado representa uma economia de 1.140 quilos de minério de ferro, 154 quilos de carvão e 18 quilos de cal (Relatório Técnico de Reciclagem de Metais no País, 2009).

Contudo a utilização da sucata reduz o volume de material depositado em locais inapropriados e contribui para diminuir o consumo de energia e de outros recursos naturais no processo produtivo do aço, além de minimizar a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, tal como o gás carbônico (Instituto Aço Brasil - Relatório de Sustentabilidade, 2014).

Portanto, com a reciclagem, há não só a geração de receita como também e principalmente, economia para o meio ambiente, visto que os processos produtivos via rota semi-integrada consomem muito menos matérias primas não renováveis e, conseqüentemente, diminuindo as emissões de gases do efeito estufa, conforme mencionado. Além de evitar a necessidade de novas áreas para descarte de produtos ao final de sua vida útil. Com isso, novos postos de trabalho são criados para a coleta e o processamento do material descartado. Evidenciando assim, não só o benefício ambiental como também o social (Instituto Aço Brasil - Relatório de Sustentabilidade, 2014).

4.2.3 Comparação entre o PEAD x Aço carbono

Conforme mencionado nos capítulos 4.2.1 e 4.2.2, ambos os materiais são gerados de recursos “não renováveis”, causando com isso impacto ambiental considerável devido à extração de suas matérias primas.

Além disso, ambos os materiais são recicláveis, no entanto, no caso do PEAD não é permitido nas normas brasileiras que as tubulações industriais feitas de PE sejam recicladas. Enquanto, no aço isso não ocorre, a reciclagem do aço não altera suas propriedades mecânicas permitindo assim que o mesmo seja reciclado em várias etapas de sua produção.

Apesar disso, para saber qual material teria um maior impacto ambiental, analisando desde a extração da matéria até o descarte do mesmo, deveria ser feito um estudo mais aprofundado sobre este aspecto, a fim de se ter uma melhor análise sobre este assunto. Com as

informações mencionadas neste estudo não é possível analisar qual material, aço carbono ou PEAD, tem um maior impacto ambiental.

4.3 Custo de material e montagem

O custo de material e montagem é um fator decisivo na escolha do material de um projeto de engenharia, visto que, o material deve atender as demandas solicitadas no projeto com o melhor custo-benefício.

A fim de comparar os custos de material e montagem de um projeto utilizando tubulações de aço carbono e outro utilizando tubos de PEAD, foi considerado alguns trechos de tubulação, com os diâmetros estabelecidos no estudo de caso do Capítulo 3, assim como os valores em reais por metro de tubo encontrados, geralmente, no mercado. Neste cálculo do custo foram acrescentados alguns parâmetros tais como pintura, projeto, dentre outros, que não foram mencionados neste trabalho apenas para tornar os valores de projeto o mais próximo possível da realidade de um projeto de engenharia de uma indústria. Estes valores foram obtidos junto a empresas, do mercado, fornecedoras de materiais e serviços.

4.3.1 PEAD

A Tabela 21 mostra o custo de um projeto de engenharia utilizando tubulações de PEAD PE 100. A fim de facilitar a visualização dos parâmetros considerados neste cálculo, bem como os valores dos tubos por metro em relação a cada DN é elaborada a Tabela 21.

Tabela 21: Custo de projeto utilizando tubulação de PEAD

Tubulação	De	Para	Material	Diâmetro (DE)	Custo tubos			VALOR TOTAL
					Comprimento (m)	Valor/m	Valor total (R\$)	
Água de processo		Rua 30	PEAD SDR 17 - PN 10	110	128	45,00	5.760,00	34.550,00
Água de processo	ETA	Fábrica 1	PEAD SDR 17 - PN 10	110	700	45,00	31.500,00	41.440,00
Água de processo	Rua 1	Rua 2	PEAD SDR 17 - PN 10	75	100	30,00	3.000,00	39.400,00
Água de processo	Rua 3	Rua 4	PEAD SDR 17 - PN 10	160	295	90,00	26.550,00	72.950,00
Água de processo	Rua 5	Rua 6	PEAD SDR 17 - PN 10	110	375	45,00	16.875,00	37.315,00
Água de processo	Rua 7	Rua 8	PEAD SDR 17 - PN 10	110	66	45,00	2.970,00	12.910,00
Água de processo	Rua 9	Rua 10	PEAD SDR 17 - PN 10	110	315	45,00	14.175,00	26.615,00
Água de processo	5301	6206	PEAD SDR 17 - PN 10	63	267	15,00	4.005,00	22.780,00
Água de processo	5301	5331	PEAD SDR 17 - PN 10	110	66	45,00	2.970,00	12.910,00
Água de processo		Rua 40	PEAD SDR 17 - PN 10	110	65	45,00	2.925,00	12.865,00
Água de processo		Rua 50	PEAD SDR 17 - PN 10	75	50	30,00	1.500,00	43.300,00
Água de processo	Rua 11	Rua 12	PEAD SDR 17 - PN 10	63	130	15,00	1.950,00	20.725,00
Água de processo	Rua 13	Rua 14	PEAD SDR 17 - PN 10	110	175	45,00	7.875,00	17.815,00
Água de processo	Rua 15	Rua 16	PEAD SDR 17 - PN 10	110	75	45,00	3.375,00	13.315,00
Água de processo	Rua 17	Rua 18	PEAD SDR 17 - PN 10	110	55	45,00	2.475,00	12.415,00
Água de processo	Rua 19	Rua 20	PEAD SDR 17 - PN 10	110	55	45,00	2.475,00	13.665,00
Suportes								173.988,00
Montagem tubos e acessórios								905.000,00
Montagem e fabricação de suportes								643.000,00
Supervisão								199.680,00
Inspeção / TH / Teste estanqueidade								19.968,00
Movimentação de carga								8.580,00
Andaimes								198.750,00
Pintura - Tubulações								-
Pintura - Suportes								63.333,33
VALOR TOTAL								2.647.269

4.3.2 Aço carbono

A Tabela 22 mostra o custo de um projeto de engenharia utilizando tubulações de aço carbono A 106 Gr.B. A fim de facilitar a visualização dos parâmetros considerados neste cálculo, bem como os valores em reais dos tubos por metro em relação a cada DN é elaborada a Tabela 22.

Tabela 22: Custo de projeto utilizando tubulação de Aço carbono

Tubulação	De	Para	Material	Diâmetro (DN)	Custo tubos			VALOR TOTAL
					Comprimento (m)	Valor/m	Valor total (R\$)	
Água de processo	Rua 30		A 106 B	100	128	155.00	19,840.00	26,560.00
Água de processo	ETA	Fábrica 1	A 106 B	100	700	155.00	108,500.00	111,320.00
Água de processo	Rua 1	Rua 2	A 106 B	150	100	281.00	28,100.00	44,298.00
Água de processo	Rua 3	Rua4	A 106 B	150	295	281.00	82,895.00	99,673.00
Água de processo	Rua 5	Rua 6	A 106 B	100	375	155.00	58,125.00	65,235.00
Água de processo	Rua 7	Rua 8	A 106 B	100	66	155.00	10,230.00	13,050.00
Água de processo	Rua 9	Rua 10	A 106 B	100	315	155.00	48,825.00	51,735.00
Água de processo	5301	6206	A 106 B	50	267	45.00	12,015.00	21,227.00
Água de processo	5301	5331	A 106 B	100	66	155.00	10,230.00	13,050.00
Água de processo	Rua 40		A 106 B	100	65	155.00	10,075.00	12,895.00
Água de processo	Rua 50		A 106 B	80	50	110.00	5,500.00	20,580.00
Água de processo	Rua 11	Rua 12	A 106 B	50	130	45.00	5,850.00	15,062.00
Água de processo	Rua 13	Rua 14	A 106 B	100	175	155.00	27,125.00	29,945.00
Água de processo	Rua 15	Rua 16	A 106 B	100	75	155.00	11,625.00	14,445.00
Água de processo	Rua 17	Rua 18	A 106 B	100	55	155.00	8,525.00	11,345.00
Água de processo	Rua 19	Rua 20	A 106 B	100	55	155.00	8,525.00	11,390.00
-								-
Suportes								112,362.00
Montagem tubulações e acessórios								1,164,000.00
Montagem e fabricação suportes								320,000.00
Supervisão								199,680.00
Inspeção / TH / Teste estanqueidade								19,968.00
Movimentação de carga								17,160.00
Andaimes								265,000.00
Pintura - Tubulações								95,000.00
Pintura - Suporte								26,116.84
VALOR TOTAL								2.781,097

4.3.3 Comparação entre PEAD x Aço carbono

A Tabela 23 mostra o comparativo de um projeto de engenharia utilizando tubulações de aço carbono e outro utilizando tubulações de PEAD.

Tabela 23: Comparativo do custo de projeto utilizando tubulação de PEAD versus Aço carbono

Comparativo Estimativa de custos - Adequação Água de Processo			
Tubulações Aço Carbono		Tubulações PEAD	
Engenharia (Projeto)	147.000,00	Engenharia	147.000,00
Materiais	617.771,00	Materiais	484.000,00
Suportes	112.362,00	Suportes	176.388,00
Montagem tubulações	1.164.000,00	Montagem tubulações	905.000,00
Montagem suportes	320.000,00	Montagem suportes	643.000,00
Supervisão	200.000,00	Supervisão	200.000,00
Inspeção	20.000,00	SPIE	20.000,00
Pintura (Tubulação)	95.000,00	Pintura (Tubulação)	-
Pintura (Suportes)	26.000,00	Pintura (Suportes)	63.000,00
Andaime	265.000,00	Andaime	200.000,00
Movimentação de carga	17.500,00	Movimentação de carga	8.750,00
Total (R\$)	2.984.633,00	Total	2.847.138,00
Comprimento de tubulações (m)	2.900	Comprimento de tubulações (m)	2.900
Valor / m	1.029,18	Valor / m	981,77

Pode-se analisar pelos valores encontrados acima que o custo final de um projeto utilizando PEAD está muito próximo de um projeto utilizando o aço carbono. Com isso, em relação ao custo final do projeto, ou seja, analisando algumas variáveis pertinentes ao mesmo, a tubulação de PEAD não se mostrou tão competitiva quando comparado com o aço.

5 Considerações finais

Com base nos cálculos apresentados e discutidos no Capítulo 3 e na análise qualitativa apresentada e discutida no Capítulo 4, conclui-se que:

1. Não é recomendada a troca da tubulação de aço carbono por outra de PEAD, segundo os critérios da espessura, máxima pressão de operação do tubo e vão máximo (Vide item 3.1 e 3.3).
2. Por outro lado, é recomendada a troca da tubulação considerando os critérios da potência de bombeamento e dos esforços atuantes nos suportes (Vide item 3.2 e 3.4).
3. Em relação ao procedimento de montagem, especificamente a soldagem da tubulação, a troca dos tubos de aço carbono pelo de PEAD seria mais conveniente, pois envolve uma menor necessidade de qualificação dos soldadores.
4. No caso de estudo em questão, no qual o fluido opera na temperatura de 50 °C, a troca da tubulação de aço carbono por PEAD não seria recomendada, em função da degradação que o tubo de PEAD sofreria quando em serviço nesta temperatura.
5. Entretanto, em temperaturas de serviços mais baixas, a troca da tubulação de aço carbono por outra de PEAD parece ser viável, tanto quanto aspectos da integridade estrutural do tubo quanto aspectos econômicos.

6 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestão para futuros trabalho se indica um item de suma importância que não foi abordado no contexto deste trabalho, e que é a análise da sustentabilidade da escolha do aço carbono e do PEAD em relação ao ciclo de vida destes materiais.

Referências bibliográficas

- [1] NORMA ASME ANSI B-36.10: *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*, 2000.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15561: Sistemas para distribuição e adução de água e transporte de esgoto sanitário sob pressão – Requisitos para tubos de polietileno PE 80 e PE 100, Padrões ABNT, 2011.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9058: Sistemas de ramais prediais de água – Tubos de Polietileno PE- Determinação do teor de negro de fumo, 2011.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. Capacitação técnica em critérios para projeto e instalação de tubulações de polietileno em redes de água. Apresentação: Engº José Roberto B. Danieletto, 2014.
- [5] BRANDÃO, Rosana Gouveia. Estudo de viabilidade da utilização de PVC, PEX e PPR em empreendimentos multifamiliares. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [6] Callister, W.D.Jr.,- ”Ciência e engenharia de materiais – Uma introdução”, Ed. LTC, 2012.
- [7] Carvalho. J.A. S e Medeiros. J., “Curso do Instituto Brasileiro de Petróleo, gás e Biocombustíveis (IBP) sobre de tubulações industriais”, 2014.
- [8] Castro. J.T.P e Meggiolaro.M.A.,” Iniciação de trincas- Vol I. “, 2009.
- [9] Chiaverini V., “Aços e Ferros Fundidos”, Associação Brasileira de Metais, 1977.
- [10] Coelho. R.M.P,” Capítulo 4 – Ferro e Aço, Produção e consumo de minerais e reciclagem do ferro e aço no Brasil.
- [11] Coutinho F.M. B, Mello I.L, Santa Maria L.C, - “Artigo de divulgação: Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações”, UERJ, 2003.

- [12] Danieletto J.R.B., “Manuais de tubulações de polietileno e polipropileno”, Ed. Linha aberta, 2014.
- [13] Fraga L.F.L., Verificação de adequação do projeto de uma tubulação de incêndio de uma refinaria de petróleo conforme as normas da Petrobras. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [14] Filho. J.L.F,- ”Manual para análise de tensões de tubulações industriais - Flexibilidade”, Ed.LTC, 2013.
- [15] Fox R.W, Pritchard P.J. e McDonald A.T.,” Introdução à mecânica dos fluidos, Ed. LTC, 2013.
- [16] Gere.J.M e Goodno. J.B.,- “Mecânica dos materiais”, Ed. Cengage Learning, 2010.
- [17] Gervásio H.M, - “A Sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas”, Universidade de Coimbra.
- [18] Landi,F.R, - ”A evolução histórica das instalações hidráulicas”, São Paulo, 1993.
- [19] NORMA BAYER BRASIL. NBB 50.008: “Soldagem e inspeções em tubulações de aço”, 2014.
- [20] PEREIRA M.A.G.. - “Análise técnico-econômica dos diferentes tipos de tubagens e acessórios utilizados nas instalações prediais de água e esgotos. Um caso de estudo.”, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [21] Telles P.C.S., - “Tubulações industriais: Materiais, Projeto”, Montagem”, Ed. LTC, 2001.
- [22] Telles P.C.S., - “Materiais para equipamentos de processo”, Ed. Interciência, 2003.
- [23] Telles P.C.S., - “Tubulações industriais: Cálculo”, Ed. LTC, 2004.
- [24] Telles P.C.S., -“Tabelas e gráficos para projetos de tubulações”, Ed. Interciência, 2011.

- [25] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASTM A 106:
“Seamless Carbon Steel pipe for high temperature service “ , ASTM Standards.

Referências eletrônicas

- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “- Soldagem”. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/noticias/4295-soldagem>>. Acesso em: 30 Out. 2015.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS (ABPE) . Disponível em: <<http://www.abpebrasil.com.br/>>. Acesso em: 15 Agosto 2015.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS (ABPE) . Módulo 4 – Procedimento e dimensionamento de instalação aérea. Disponível em: <http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/4_4.pdf>. Acesso em: 31 Agosto 2015.
- [29] INSTITUTO AÇO BRASIL. “- “Relatório de Sustentabilidade”, 2014. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf>. Acesso em: 01 Nov. 2015.
- [30] INSTITUTO AÇO BRASIL. O aço – Processo siderúrgico. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>>. Acesso em: 03 Out. 2015.
- [31] Lenin, L. Instalações Industriais Parte I. Virtual Book, 2009. Disponível em: <<HTTP://www.scribd.com/doc/17172048/InstalacoesIndustriaisParteI>>. Acesso em: 20 set. 2015.
- [32] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. – “ Relatório Técnico de Reciclagem de Metais no País, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256654/P57_RT83_Reciclagem_de_Metais_no_Pais.pdf/5d64a338-f6d7-426b-9f96-323892a5ba57> . Acesso em: 04 Nov. 2015.

- [33] Modenesi P.J. – “Normas e qualificação em soldagem”, Ed. 2005. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/normasqualificacao.pdf>>. Acesso em: 25 Agosto 2015.
- [34] O aço e sua obtenção. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/metallica/01/01-texto.htm>>. Acesso em 30 Set. 2015.
- [35] Piatti T.M. e Rodrigues R.A.F., 2005. “Plásticos: Características, usos, produção e impactos ambientais”. Disponível em: <http://www.ufal.edu.br/usinaciencia/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf>. Acesso em: 22 Set. 2015.
- [36] Portal metálica. - “Construção Civil “. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/a-sustentabilidade-do-aco-e-das-estruturas-metallicas>>. Acesso em: 12 Out. 2015.
- [37] Rudder editora. Disponível em: <http://rudders.com.br/web/noticiaDetalhe.php?noticia_id=37> . Acesso 15 Jul. 2015.
- [38] SINDIPLAST. – “Guia Ambiental”. Disponível em: <http://file.sindiplast.org.br/download/guia_ambiental_internet.pdf>. Acesso em: 20 Nov. 2015.

Anexo 1: Seleção de tubulação

CÓDIGO	PRODUTO					REV.: 1
XYZ	Água de Processo					Data : 03/12/15
						Folha : 1/1
CLASSIFICAÇÃO <input type="checkbox"/> TÓXICO <input type="checkbox"/> MUITO TÓXICO <input type="checkbox"/> INFLAMÁVEL <input type="checkbox"/> CORROSIVO <input checked="" type="checkbox"/> NA			ABC: ----	abc: ----		
			<input type="checkbox"/> Uso obrigatório de fita anti-respingos			
TUBULAÇÕES		OPERAÇÃO		PROJETO		Obs.
FAIXA DN	ESPEC.	PRESSÃO (bar)	TEMPERATURA (°C)	PRESSÃO (bar)	TEMPERATURA (°C)	
15-600	10AC01	2-5	< 25	10	50	
15-600	10AC01	6	< 25	10	50	
ESPEC. ORIGINAL		RADIOGRAFIAS		PINTURA/COR		
10AC01		----		Verde		
ACESSÓRIOS			JUNTAS		OBS.	
FAIXA DN	TAG	FAIXA DN	TIPO			
15-80	V 3207 XC	15-600	DA			
80-150	S 3202 XC	15-600	RA			
150-250	K 2002 AP					
15-100	R 5301 EP					
100-150	G 3001 WC					
50-300	K 2002 AP					
40-600	S 2009 PC					
10-50	V 3601PY					
15-150	G 5201 WC					
15-250	F 3001 WC					
15-250	V 3001 XC					
OBS.:						
Controle de Revisão e Emissão do Documento						
REV.	EXEC.	VERIF.	APROV.	DATA	DESCRIÇÃO DAS ALTERAÇÕES	
1	Tamara	Tamara	Tamara	03/12/15	NORMAS TÉCNICAS	

Anexo 2: Planimétrico

