



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
CURSO DE TECNOLÓGO EM INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS E
DE SOLDAGEM

REGINALDO MOREIRA SOARES

UTILIZAÇÃO DE TUBOS EM POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE (PEAD) PARA DUTOS ENTERRADOS E
EMISSÁRIOS SUBMARINOS

Salvador
2009

REGINALDO MOREIRA SOARES

**UTILIZAÇÃO DE TUBOS EM POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE (PEAD) PARA DUTOS E EMISSÁRIOS
SUBMARINOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, como exigência à obtenção do título de Tecnólogo em Inspeção de Equipamentos e de Soldagem.

Orientador: Prof. Ms. Eng. Ivo Andrei de Lino Lima

Salvador
2009

REGINALDO MOREIRA SOARES

**UTILIZAÇÃO DE TUBOS EM POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE (PEAD) PARA DUTOS E EMISSÁRIOS
SUBMARINOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, como
exigência à obtenção do título de Tecnólogo em
Inspeção de Equipamentos e de soldagem.

Aprovado em ____ de _____ de 2009.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Eng. Ivo Andrei de Lino Lima – SENAI - Cimatec

Orientador

Prof. Ms. Eng. Charles Chemale Yurgel – SENAI - Cimatec

Prof. Ms. Eng. Vitor Pinheiro Ferreira – SENAI - Cimatec

Salvador

2009

Se o SENHOR não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam; se o SENHOR não guardar a cidade, em vão vigia a sentinela. Salmo 127:1

Agradecimentos

A Deus Supremo, pela minha vida e por seu filho Jesus Cristo, amado da minha alma, por ter nos dado o ministério da Conciliação com o Pai, a qual por sua Graça e misericórdia, pude chegar até aqui.

A minha esposa Lindaci Soares e ao nosso filho, que vem em nome de Jesus, minhas filhas Raimã, Iasmin e Ingrid, também frutos de Deus para minha vida, aos meus Pais (in memória), irmã e sobrinho, os quais são importantíssimos para mim, nesta caminhada.

Aos amigos e os colegas de faculdade pelo apoio nas horas difíceis e nos momentos de alegria e confraternização que juntos passamos, aos professores e as amigas da secretaria acadêmica pela orientação e ajuda providencial nas horas onde mais precisávamos de sua intervenção.

Ao meu Orientador Ivo Andrei, que com sua ajuda e presteza contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

A Magda Motta, gerente da Trilha Consultoria e Manutenção, que com sua sensibilidade, carinho e atenção, foram indispensáveis na conclusão desta caminhada, o meu muito obrigado.

Ao Ailton Gomes de Oliveira e Álvaro Luiz Oliveira Machado da Odebrecht e a Apulcro Daltro de Melo Mota e Luis Pitta da Bahia gás pelo apoio necessário e portas abertas que me colocaram durante as pesquisas e acesso as instalações, para acompanhamento da realização de procedimentos de soldagem e material de didático exclusivo.

Obrigado Senhor, que até aqui, tem nos ajudado grandemente.

Resumo

O uso de tubos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) no Brasil, apesar de não ser tão recente, tem evoluído nestes últimos anos, sendo considerado atualmente um mercado em expansão. As aplicações com sistemas de água e gás a baixa pressão são os de maior uso, talvez, devido a pouca informação dos engenheiros de aplicação sobre o PEAD para serviços mais severos, com informações detalhadas sobre os limites de aplicação deste material. Este trabalho objetiva fazer uma comparação dos tubos de polietileno de alta densidade com os de aço carbono, aplicado em dutos e emissários submarino, tornando mais clara as limitações para aplicação nestas áreas que movimentam grandes inventários. Para tanto foram analisadas as propriedades, as características, as normas aplicáveis, as técnicas de instalação e o desempenho dos tubos de PEAD em relação aos tubos de aço carbono em tubulações e dutos. Para um melhor desenvolvimento do trabalho foi realizada pesquisa em campo com o acompanhamento da soldagem de dutos de PEAD de 1735 mm de diâmetro, indo desde a sua instalação, fixação e preparação inicial até o final da solda, na obra do emissário submarino de Salvador. Além disto, foram visitadas as instalações da Empresa Bahia Gás para conhecimento da técnica especial de instalação de dutos de PEAD sem a necessidade de abertura de vala, denominado de método não-destrutivo (MND), muito utilizado em áreas urbanas, onde os conflitos de redes e os danos as vias publicas devem ser minimizados.

Palavras - chave: Tubos de polietileno, PEAD, crescimento lento de trincas, fratura frágil, curva de regressão, ramp test, Método Não Destrutivo-MND.

Abstract

The use of tubes of Polyethylene of High Density (HDPE) in Brazil, in spite of not being so recent, it has been developing on these last years, being considered a market now in expansion. The applications with systems of water and gas the low pressure is the one of larger use, maybe, due to the application engineers' little information on HDPE for more severe services, with detailed information on the limits of application of this material. This work aims at to do a comparison of the tubes of polyethylene of high density with the one of steels carbon, applied in piping and emissaries submarine, turning clearer the limitations for application in these areas that move great inventories. For so much it will be analyzed and compared the properties, the characteristics, the acting, the norms NBR and applicable ISO, the used accessories, the installation techniques, and the acting of the tubes of HDPE, in relation to the tubes of steel carbon in piping and underwater emissaries. For a better development of this bibliographical research it was accompanied in field the welding of this thermoplastic, from his/her initial preparation to the end of the solder, besides the installation technique and fixation of the tubes of PEAD with diameter of 1735 mm, and thickness of 80,1 mm, used in the underwater emissary from Salvador. Besides, the facilities of the company Bahia Gas were visited for knowledge of the technique of installation of tubes of HDPE through the no-destructive method (MND). This technique is very used, mainly in urban areas, where the conflicts of nets and the damages the roads publish should be minimized.

Words - key: Tubes of polyethylene, HDPE, slow growth of trines, fractures fragile, it curves of regression, ramp test, Method No Destructive-MND.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Molécula básica do etileno	15
Figura 2 – Fórmula química do polietileno	15
Figura 3 – Molécula linear	16
Figura 4 – Molécula ramificada	16
Figura 5 – Polietileno de Alta Densidade (PEAD) de estrutura linear – Influência na Temperatura	20
Figura 6 a – Assentamento Sinuoso de Tubos de PE.....	27
Figura 6 b – Desfilamento de Tubos de Polietileno	27
Figura 7 – Inserção de tubos por furo direcional.....	34
Figura 8 – Seqüência de soldagem para termofusão	36
Figura 9 – Curva de regressão Tensão X tempo	38
Figura 10 – Tipos de fratura nos plásticos – Representação esquemática.....	40
Figura 11 – Inspeção visual e dimensional tubos de PE antes da soldagem – Tubos PE 100 de 1735 mm, Espessura de 80,1 mm	41
Figura 12 – Inspeção dimensional e linearidade das faces a serem soldadas	42
Figura 13 – Colocação do faceador para nivelamento das faces a serem soldadas	43
Figura 14 – Placa de aquecimento, medição temperatura por termômetro digital	44
Figura 15 – Inspeção visual e dimensional do cordão de solda	46
Figura 16 a – Ensaio de Tração do PEAD	46
Figura 16 b – Ensaio de Dobramento do PEAD	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação das propriedades do polietileno em função do grau de cristalinidade	22
Tabela 2 – Propriedades térmicas, elétricas, físicas e mecânicas do PEAD	22
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos PEAD	23
Tabela 4 – Propriedade química do PEAD	24
Tabela 5 – Propriedades elétricas do PEAD	28
Tabela 6 – Propriedades térmicas do PEAD	29
Tabela 7 – Tensão de Dimensionamento dos tubos PE 80 e PE 100	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Definição do problema	11
1.2	Objetivo	12
1.3	Importância da Pesquisa	12
1.4	Limites e limitações	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Breve histórico sobre plásticos	14
2.2	Definição de polímeros	14
2.3	Produção de polímeros	16
2.4	Divisão dos polímeros	17
2.4.1	Termoplásticos	17
2.5	Características de fabricação dos tubos de polietileno	18
2.6	Influência da Cristalinidade no PEAD	19
2.7	Propriedades mecânicas e de resistência físico-químico	22
3	- ANÁLISE DO PEAD PARA APLICAÇÃO EM DUTOS E EMISSÁRIOS SUBMARINO	27
3.1	Comparações com o tubo de aço	27
3.2	Projeto e dimensionamento	30
3.2.1	Outros fatores considerados no dimensionamento da tubulação	31
3.2.2	Resinas para fabricação e dimensionamento dos tubos de PE 80 e PE 100	32
3.2.3	Cálculo hidráulico	32
3.3	Método não destrutivo de instalação - MND	33
3.4	Processo soldagem e inspeção PEAD – emissário submarino de salvador	35
3.5	Mecanismos de rupturas	36
3.6	Descritivo das atividades de inspeção	40
4	- CONCLUSÕES	47
4.1	Sugestões para trabalhos futuros	48
	Referências Bibliográficas	49

1 INTRODUÇÃO

As tubulações de aço carbono são amplamente usadas na maioria das redes de distribuição de transporte de derivados de petróleo. Este material possui a melhor relação de custo e resistência comparado a outros metais, ainda assim apresenta dois inconvenientes comuns aos metais em geral, a corrosão e a perda de pressão devido à rugosidade interna elevada. Por outro lado, os plásticos não sofrem do fenômeno de corrosão, mesmo em ambientes úmidos e por isto podem manter sempre uma superfície interna muito mais lisa, que é sinônimo de baixas perdas de pressão. Apresentam também, em comparação aos metais, uma densidade menor, o que facilita sua instalação. Excetuando-se o preço da matéria prima, requerem, de acordo com o formato final desejado, processos de transformação e fabricação (rotomoldagem, enrolamento filamental, extrusão) mais baratos que os empregados para os metais.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os tubos plásticos, no Brasil, são ainda poucos conhecidos em aplicações industriais, com exceção, talvez, dos tubos de policloreto de vinila (PVC) rígido e eventualmente o plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), que não é inteiramente um plástico e sim um compósito. Por outro lado, nas obras civis os tubos plásticos flexíveis de pequenos diâmetros (até 4") já se tornaram populares em virtude de sua aplicação em ligações hidráulicas e elétricas domiciliares. Todavia, os tubos plásticos de médios e grandes diâmetros (acima de 4") são pouco utilizados. Percebe-se assim, que existem potenciais campos de aplicação industrial para os tubos plásticos, em especial o polietileno – PE, que já tem sua performance testada em uso, especialmente em tubulações de até 20 bar de pressão, sistemas de utilidades ou emissários submarinos. Um melhor conhecimento das suas características e propriedades são fundamentais, para prover os segmentos da sociedade, envolvidos com investimentos industriais de novas alternativas aos materiais convencionais, em especial para aplicação em dutos que envolvem grandes somas de investimento devido a sua extensão e complexidade de recursos de instalação.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho se propõe a trazer em detalhes, de forma estruturada e organizada os benefícios, as limitações e o que há de mais atual sobre o uso do PEAD como uma alternativa para dutos e emissário submarino.

1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Devido à importância destas tubulações e sua relevância em termos de investimentos econômicos e integridade, a busca por alternativas de materiais que possam trazer benefícios em termos de aquisição, instalação e manutenção destes veios, é fundamental para a sociedade. O presente trabalho será apresentado em capítulos, começando pela revisão bibliográfica com conceitos, divisão, produção, fabricação, características e propriedades térmicas, químicas, mecânicas e elétricas. Na sequência é realizada a análise do PEAD para a aplicação específica em dutos e emissários submarinos, avaliando suas propriedades gerais, o projeto, os mecanismos de falha, as técnicas de instalação, em especial o método não destrutivo de instalação - MND, requisitos de soldagem e inspeção com base no levantamento de campo realizado na obra de instalação do emissário submarino de Salvador. Por fim, serão apresentadas as conclusões, finalizando com algumas sugestões de trabalhos futuros.

1.4 LIMITES E LIMITAÇÕES

O emprego crescente desses tubos em algumas áreas, não significa que esses materiais estejam isentos de limitações. Por exemplo, devido a uma baixa resistência a flexão, os tubos plásticos apresentam resistência estrutural limitada que requer o emprego de um menor espaçamento entre suportes, quando instalados acima do solo, elevando os custos de um projeto, possuem susceptibilidade a fragilização quando submetidos à exposição contínua aos raios solares ou ultravioletas, sem a devida proteção, possuem baixa resistência ao fogo, e uma acentuada redução da resistência mecânica em temperaturas acima de 30° C.

As propriedades mecânicas dos polímeros são muito mais complexas do que as dos metais. Devido a sua natureza macromolecular, exibem propriedades mecânicas intermediárias entre as de um sólido elástico e de um líquido viscoso. Essas características, que são qualificadas de “viscoelásticas” dependem de muitos fatores como: a temperatura, o tempo ou a frequência de solicitação, a taxa e a amplitude de tensão ou deformação, o tipo de deformação (cisalhamento, tensão biaxial), sua história térmica, a natureza da atmosfera circundante e da pressão interna aplicada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – BREVE HISTÓRICO SOBRE OS PLÁSTICOS

Os materiais poliméricos não são materiais novos, eles têm sido usados desde a antiguidade, contudo, nessa época, somente eram usados materiais poliméricos naturais, como as borrachas. A síntese artificial de materiais poliméricos é um processo que requer tecnologia sofisticada, pois envolve reações de química orgânica, ciência que só começou a ser dominada a partir da segunda metade do século XIX. Nessa época começaram a surgir polímeros modificados a partir de materiais naturais. Somente no início do século XX os processos de polimerização começaram a ser viabilizados, permitindo a síntese plena de polímeros a partir de seus meros (unidade básica do polímero). Estes processos estão sendo aperfeiçoados desde então, colaborando para a obtenção de plásticos, borrachas e resinas cada vez mais sofisticadas e baratas ⁽¹⁾.

2.2 – DEFINIÇÃO DE POLÍMEROS

A definição para polímeros, segundo Gorni ^[1], são materiais compostos por macromoléculas. Essas macromoléculas são cadeias compostas pela repetição de uma unidade básica chamada mero, daí o nome: poli (muitos) + mero. Os meros estão dispostos um após o outro, como pérolas num colar. Uma macromolécula assume formato muito semelhante ao de um cordão logo, pode-se fazer a seguinte analogia: as moléculas de um polímero estão dispostas de uma maneira muito semelhantes a um novelo de lã. É difícil extrair um fio de um novelo de lã assim como é difícil remover uma molécula de uma porção de plástico, pois as cadeias “seguram-se” entre si. Por exemplo, o polietileno ou abreviadamente PE que é um plástico extremamente comum, usado por exemplo, em sacos pequenos de leite, é composto pela repetição de milhares de unidades da molécula básica do etileno ou eteno, conforme figura 1.

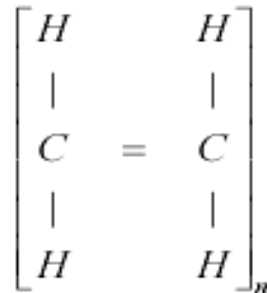


Figura 1 – Molécula básica do etileno ^[1]

Na molécula básica do etileno, n normalmente é superior a 10.000, ou seja, uma molécula de polietileno é constituída pela repetição de 10.000 ou mais unidades de etileno. O parâmetro n é definido como sendo o Grau de Polimerização do polímero, ou o número de meros que constitui a macromolécula.

Entende-se como definição de polímero, os materiais, cujo elemento essencial é constituído por ligações moleculares orgânicas, que resultam de síntese artificial ou transformação de produtos naturais. A figura 2 mostra a fórmula química do polímero ^[1].

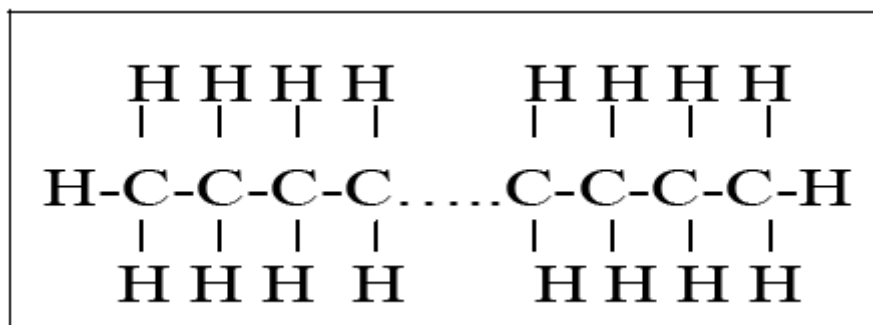


Figura 2 - Fórmula química do polietileno ^[2]

Alguns polímeros podem ser constituídos da repetição de dois ou mais meros distintos. Neste caso, eles são chamados copolímeros, por exemplo, a macromolécula da borracha sintética SBR é formada pela repetição de dois meros: estireno e butadieno. Para enfatizar que um polímero é formado pela repetição de um único mero, ele é denominado homopolímero.

Dependendo da natureza química dos monômeros e da técnica empregada para a polimerização, os polímeros podem exibir diferentes tipos de estruturas e com isso, diferentes propriedades físicas, o que influenciará na sua aplicabilidade. As mais comuns são as estruturas linear, ramificada ou em rede. A figura 3 ilustra a molécula do polietileno de alta densidade (PEAD) que é um polímero linear. Nestes polímeros, cada monômero é ligado somente a outros dois monômeros, existindo a possibilidade de pequenas ramificações que são parte do próprio monômero.



Figura 3 - Molécula Linear , com 4 a 10 cadeias laterais curtas / 1000 átomos de C ^[3]

A indústria também produz uma outra variedade de polietileno, de cadeias ramificadas ou em rede, conhecido como polietileno de baixa densidade (PEBD). A figura 4 ilustra uma molécula de polietileno de baixa densidade. Nos polímeros ramificados, um monômero pode se ligar a mais de dois outros monômeros, sendo que as ramificações não são oriundas do monômero e sim das ligações estruturais.



Figura 4 - Molécula Ramificada com 4 a 10 cadeias laterais longas / 1000 átomos de C ^[3]

2.3 – PRODUÇÃO DE POLÍMEROS

O monômero é a matéria prima que dá origem ao polímero, no caso do polietileno (PE) é o etileno (ou eteno). Por sua vez, o monômero é obtido a partir do petróleo ou gás natural, pois é atualmente a rota mais barata. É possível obter monômeros a partir da madeira, álcool, carvão e até do CO_2 , pois todas essas matérias primas são ricas em carbono, que é o átomo principal que constitui os materiais poliméricos. Contudo, todas essas rotas aumentam o preço do monômero obtido,

tornando-se pouco competitivas. No passado, os monômeros eram obtidos de “resíduos” do refino do petróleo. Hoje, o consumo de polímeros é tão elevado que esses “resíduos” de antigamente tem de ser produzidos nos complexos petroquímicos para atender a alta demanda do mercado consumidor.

2.4 – DIVISÃO DOS POLÍMEROS

Há diversas maneiras de se dividir os polímeros. A classificação conforme as características mecânicas, talvez seja a mais importante, e ela decorre da configuração específica das moléculas do polímero. Sob este aspecto, os polímeros podem ser divididos em **termoplásticos**, **termorrígidos** (termofixos) e **elastômeros** (borrachas), Gorni ^[1].

Para o objetivo deste trabalho será dado enfoque apenas aos **termoplásticos**.

2.4.1 - TERMOPLÁSTICOS

Quando o polímero funde por aquecimento e solidifica por resfriamento, em um processo continuamente reversível, ele é chamado de termoplástico. São comumente chamados de plásticos, constituindo a maior parte dos polímeros comerciais. A principal característica desses polímeros é poder ser fundido diversas vezes, e dependendo do tipo, podem dissolver-se em vários solventes, logo, sua reciclagem é possível. Esta é uma característica bastante desejável nos dias de hoje.

Dependendo das condições de polimerização, os termoplásticos podem apresentar cadeia linear ou ramificada. O tipo de cadeia é que determinará as principais propriedades mecânicas e químicas.

Quanto às propriedades mecânicas, os plásticos podem ser maleáveis, rígidos ou frágeis. O polipropileno é um exemplo de plástico maleável, que possui como suas principais propriedades: o baixo custo, a fácil moldagem, a alta resistência à fratura por flexão ou fadiga, a boa resistência ao impacto acima de 15°C, boa estabilidade térmica, uma maior sensibilidade à luz UV e a agentes oxidantes, sofrendo degradação com

maior facilidade. São aplicados em brinquedos, recipientes para alimentos, remédios, produtos químicos, carcaças para eletrodomésticos, fibras, sacarias (ráfia), filmes orientados, tubos para cargas de canetas esferográficas.

O segundo tipo de plástico, segundo a sua propriedade mecânica, são os rígidos, a exemplo do Polietileno de alta densidade (PEAD), que é um termoplástico resistente a tração e tem como principais propriedades: o fácil processamento e coloração, baixo custo, elevada resistência a ácidos e a álcalis, baixa densidade e absorção de umidade, baixa resistência a solventes orgânicos, calor e intempéries. São utilizados em bombonas, recipientes, garrafas, filmes, brinquedos, materiais hospitalares, tubos para distribuição de água e gás e tanques de combustível automotivos.

O terceiro tipo de termoplástico, segundo suas propriedades mecânicas, são os frágeis, a exemplo do PVC, que é um termoplástico formado quando o cloreto de vinil ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$) sofre polimerização. É muito utilizado para tubulações e encanamentos civis, por ser durável, de excelente resistência a corrosão e bem mais barato do que as tubulações metálicas. Tem como outras propriedades: leveza, resistência à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores, resistência à maioria dos reagentes químicos, bom isolante térmico, elétrico e acústico e apresentam impermeabilidade a gases e a líquidos. São aplicados em telhas translúcidas, portas sanfonadas, divisórias, persianas, perfis, tubos e conexões para esgoto e ventilação, esquadrias, molduras para teto e parede, etc.

2.5 – CARACTERÍSTICAS DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS DE POLIETILENO

Assim como outros materiais, como o aço ou a madeira, existem vários tipos de Polietileno (PE), alguns são mais flexíveis, outros mais rígidos, com maior ou menor resistência, etc. existindo assim uma vasta gama de características direcionadas às diversas aplicações. Na família dos Polietilenos temos o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), o Polietileno de Média Densidade (PEMD) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Dentro destes 3 grupos de materiais, existem vários tipos de Polietileno de Baixa Densidade, de Média, e de Alta densidade, mas somente alguns tipos específicos

servem para fabricação de tubos. Para os casos em que são aplicados em tubulação temos de uma forma geral os seguintes tipos:

Polietileno de baixa densidade (PEBD), possui densidade entre 0,910 - 0,925 g/cm³, é utilizado para tubos de pequenos diâmetros (9 a 32 mm) e de baixa pressão (4 bar), com finalidade de irrigação, onde se necessita muita flexibilidade, mas baixa resistência à pressão e a esforços mecânicos.

Polietileno de média densidade (PEMD), possui densidade na faixa de 0,926 – 0,940g/cm³, é muito parecido com o PEAD, sendo difícil perceber a diferença entre um e outro, tem praticamente a mesma resistência do PEAD sendo um pouco mais flexível. É utilizado normalmente para a fabricação de tubos para distribuição de gás natural de baixa pressão.

Polietileno de alta densidade (PEAD), possui densidade entre 0,935 - 0,960 g/cm³, é um plástico rígido, com mais resistência à tração, do que os outros e com moderada resistência ao impacto. São utilizados para a maioria dos tubos pressurizados diâmetros de 16 a 1600 mm, Brastubo [4].

Nos parágrafos subseqüentes, será descrito, em maiores detalhes, o polietileno de alta densidade - PEAD que é o objeto deste trabalho.

2.6 – A INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE NO PEAD

A principal diferença entre o processo industrial de polimerização do etileno de baixa pressão e o de alta pressão está no tipo de sistema iniciador. Os iniciadores são catalisadores utilizados para polimerizar sob pressões próximas à atmosférica. O PEAD obtido com catalisadores ¹Ziegler-Natta ou Phillips resulta em uma estrutura mais linear

¹ O processo de *Ziegler Natta*, cujo mecanismo envolve a reação do monômero na presença de um catalisador que é um complexo metálico, preparado, por exemplo, a partir do tetracloreto de titânio e trietil alumínio, ocorre a temperaturas de 30 a 160°C e pressões de 0,1 a 5 MPa.

com alta densidade devido a uma maior cristalinidade. A cristalinidade representa cadeias de moléculas que estão arranjadas de forma mais eficiente e ordenada, culminando num retículo mais cristalino e, portanto, menos amorfo, ou seja, mais próximo da estrutura de um sólido como a dos metais, o que influencia fortemente nas propriedades do material. A figura 5 mostra a molécula de um PEAD de estrutura linear.

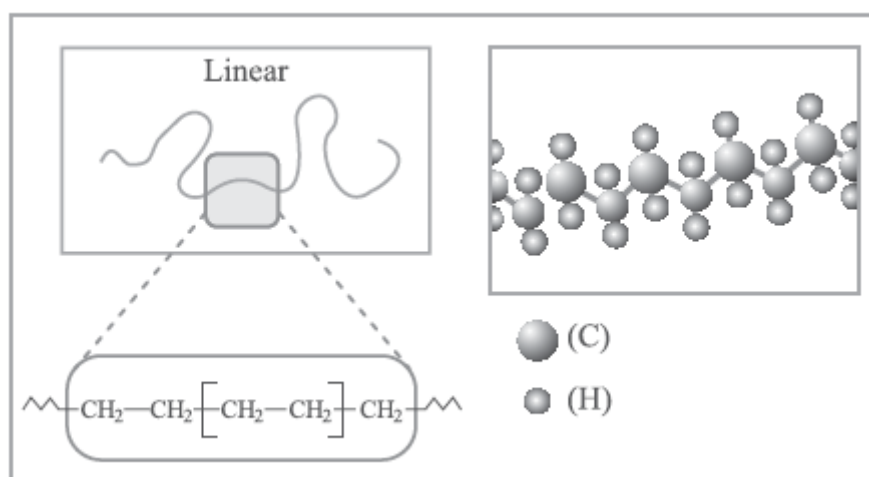


Figura 5: Polietileno de alta densidade PEAD de estrutura linear – Influência na propriedade ^[4]

Devido a esta maior cristalinidade, o polietileno de alta densidade (PEAD) é mais duro e mais resistente que o polietileno de baixa densidade (PEBD), que por sua vez é mais flexível e transparente. Um exemplo da relação de dureza e flexibilidade está no fato de que o PEAD é utilizado na fabricação de tampas com rosca (rígidas) e o PEBD em tampas sem rosca (flexíveis).

O grau de cristalinidade depende também da história térmica do polímero, Gorni^[1], explica que um polietileno resfriado lentamente do estado líquido até o estado sólido será mais cristalino que o mesmo polietileno resfriado rapidamente (têmpera

O processo *Phillips*, que consiste em dissolver o etileno num hidrocarboneto líquido (ciclohexano, por exemplo), e polimerizá-lo com a ajuda de um catalisador óxido metálico (5% de óxido de cromo, por ex. CrO₃, numa mistura de sílica– alumina com 75 - 90% de sílica) a 85 - 180°C e a pressões de 3 a 4 MPa.

térmica). O PEAD por ser linear é altamente cristalino (acima de 90%), pois apresenta um baixo teor de ramificações. Esse fenômeno pode se explicado facilmente da seguinte forma: em geral a cristalização dos polímeros é um fenômeno cinético, no estado fundido todas as cadeias poliméricas estão desordenadas (amorfas), e necessitam de tempo para se organizar em regiões ordenadas (cristalinas), portanto quanto maior o tempo de resfriamento mais alto será a organização e conseqüentemente a cristalinidade.

Muitas propriedades físicas e químicas do polietileno mudam com o grau de cristalinidade. Como a cristalização é sinônimo de organização, há um aumento do número de cadeias por unidade de espaço com um incremento da cristalinidade e um conseqüente aumento da densidade levando a uma mudança nas propriedades do material. Nas regiões cristalinas, as forças intermoleculares entre as cadeias poliméricas são mais intensas, portanto um polietileno muito cristalino apresentará uma rigidez mecânica maior, ou seja, a tensão de ruptura aumentará, mas o alongamento à ruptura diminuirá.

Do ponto de vista térmico, a intensificação das forças intermoleculares provocará o aumento da temperatura de fusão. Acrescenta-se ainda, as zonas cristalinas apresentam um espaço intermolecular (volume livre) menor que o das zonas amorfas, conseqüentemente a difusão de um líquido será mais difícil nas regiões organizadas, o que fará com que o polietileno de alta cristalinidade tenha uma menor sensibilidade aos solventes, Torres ^[2].

Além da velocidade de resfriamento, o grau de cristalinidade do polietileno também é afetado por processos mecânicos, por exemplo, um estiramento mecânico permitirá alinhar as cadeias poliméricas e assim aumentar o nível de cristalinidade. A variação da propriedade em função da cristalinidade pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 - variação das propriedades do polietileno em função do grau de cristalinidade [2]

	Cristalinidade				
	55%	62%	70%	77%	85%
Ponto de fusão (°C)	109	116	125	130	133
Densidade (g / cm ³)	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
Rigidez (MPa x10 ⁻³)	17.2	32.4	51.7	82.7	11.4
Resistência (MPa)	11.72	17.24	22.75	28.96	35.16

2.7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA FÍSICO-QUÍMICO

Enquanto as propriedades elétricas são pouco afetadas pela densidade e pelo peso molecular do polímero, as propriedades mecânicas sofrem uma forte influência. De uma forma geral, as características mecânicas e elétricas do polietileno de alta densidade são às apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD [6]

Propriedades	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Densidade, g/cm ³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Índice de refração	1,54	1,53
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Temperatura de fragilidade, °C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica, W/(m.K)	0,46 - 0,52	0,42 - 0,44
Calor de combustão, kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1 MHz	2,3 - 2,4	2,2 - 2,4
Resistividade superficial, Ω	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Resistividade volumétrica, Ω.m	1017 - 1018	1017 - 1018
Resistência dielétrica, kV/mm	45 - 55	45 - 55
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800 - 900
Resistência à tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
No ponto de escoamento	5 - 8	10 - 12
No ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza		
Brinell, MPa	60 - 70	50 - 60
Rockwell	R55, D60 - D70	
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38	20 - 36

A influência do peso molecular sobre as propriedades mecânicas do PEAD é devida, principalmente, pelo seu efeito na cinética de cristalização, na cristalinidade final e no caráter morfológico. Já o efeito do peso molecular depende da extensão da cadeia. Por exemplo, numa faixa de peso molecular entre 80.000 e 1.200.000 g/mol, típica para PEAD comercial, sempre ocorre formação de "pescoço", ou seja, rompe ductilmente. Já o PEAD com peso molecular mais baixo é frágil e quebra sob pequenas deformações, sem desenvolver "pescoço" no ensaio de tração, ou seja, rompe fragilmente. O peso molecular também exerce influência sobre a resistência ao impacto, PEAD com baixo peso molecular apresentam-se frágeis ao impacto, porém, com o aumento do peso molecular, a resistência ao impacto aumenta. De uma maneira geral, o polietileno tem elevada resistência ao impacto inclusive a temperaturas muito baixas, pelo fato de que a temperatura de transição vítrea (imobilização praticamente total das moléculas) se situa à volta dos -120 °C.

A tabela 3 descreve as propriedades mecânicas do PEAD e as especificações ASTM que as regem.

Tabela 3: Propriedades mecânicas do PEAD ^[6]

Propriedades Mecânicas	Unidades	Normas	Valores
Tensão no escoamento à tração (em placa)	MPa	ASTM D638 - 03	28
Tensão na ruptura à tração (em placa)	MPa	ASTM D638 - 03	29
Tensão na ruptura à compressão*	MPa	ASTM D695	20
Resistência à compressão **	MPa	ASTM D695	17
Resistência à flexão **	MPa	ASTM D790	14-20
		DIN 53457	
Módulo de elasticidade à tração*	MPa	ASTM D638	900
		ISO R527	
Módulo de elasticidade à compressão	MPa	ASTM D695	---
Módulo de flexão secante a 2% (em placa)	MPa	ASTM D790 - 03	1040
Alongamento na ruptura (em placa)	%	ASTM D638 - 03	860
Resistência ao impacto Izod	J/m	ASTM D256 - 03	140

*Fonte: www.incomplast.com.br/f_poliet.htm.
 ** Fonte: www.planetaplastico.com.br/litera/prop_fisicas.

A orientação das cadeias poliméricas também 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, que vem a ser a união das cadeias poliméricas por forças intermoleculares, devido ao impedimento espacial provocado pelas ramificações das cadeias, aumentando conseqüentemente a rigidez do polímero.

Quanto às propriedades de resistência química, segundo Coutinho ^[5], em geral, o PEAD exibe baixa reatividade química, que é a possibilidade de uma reação química acontecer. As regiões mais reativas das moléculas de PEAD são as duplas ligações finais e as ligações CH terciárias em ramificações. O PEAD é estável em soluções alcalinas de qualquer concentração e em soluções salinas, independente do ph, incluindo agentes oxidantes como KMnO_4 e $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Não reage com ácidos orgânicos como o HCl ou HF. Já para as soluções concentradas de H_2SO_4 (> 70%) sob elevadas temperaturas reagem vagarosamente com PEAD, produzindo sulfo-derivados. A tabela 4 apresenta a resistência química do PEAD conforme especificação ASTM.

Tabelas 4 - Propriedade químicas do PEAD ^[6]

Propriedades Químicas	Unidades	Normas	Valores
- Resistência a ácidos fortes	---	ASTM D543	(+) Nota (1) Nota (2)
- Resistência a ácidos fracos	---	ASTM D543	+
- Resistência à bases fortes	---	ASTM D543	+
- Resistência à bases fracas	---	ASTM D543	+
- Resistência a raios solares	---	ASTM D543	(+) Nota (3)
<i>Legenda:</i> <i>Resistente</i>	+	(+) <i>Resistência Limitada</i>	- <i>Não resiste</i>

Notas:

(1) Atacado somente por alta concentração de ácidos oxidantes

(2) Resiste a vários solventes à temperatura < 80°C

(3) Alguns materiais tornam-se quebradiços depois de prolongada exposição à luz solar. Usar, preferencialmente, materiais na cor preta.

O PEAD é ligeiramente permeável a compostos orgânicos, tanto em fase líquida como gasosa. Já a permeabilidade à água e gases inorgânicos é baixa, sendo menos permeável ao CO₂, O₂ e N₂ do que o PEBD. Por ser uma poliolefina e, portanto apresentar baixíssima polaridade, o polietileno apresenta uma excelente resistência aos agentes químicos habituais, pode-se destacar: é pouco sensível à água, inclusive há temperatura de ebulição e à umidade, da qual absorve menos de 0,01 %, esta qualidade se mantém inclusive a temperaturas elevadas; sua resistência aos ácidos e as bases é alta, tiras estreitas de polietileno submersas durante algumas horas a 100 °C em ácido nítrico e clorídrico concentrado a 50 % de soda cáustica, não apresentam nenhuma alteração; inerte na grande maioria dos solventes orgânicos e inorgânicos a 20 °C, começando a dissolver-se, embora em pequenas proporções, a 90 °C em alguns hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, assim como nos seus derivados halogenados.

O polietileno apresenta algumas limitações em sua resistência mecânica e química sob o efeito da temperatura e de intempéries: nos processos químicos sob alta temperatura, em meio inerte ou no vácuo, resultam em ruptura e formação de ligações cruzadas nas cadeias poliméricas do PEAD. Além disto, o oxigênio ataca a macromolécula, reduzindo seu peso molecular. Acrescenta-se ainda que os aumentos de temperatura diminuem as propriedades mecânicas, acelerando o envelhecimento. Deve salientar-se, ainda, que o polietileno tem um elevado coeficiente de dilatação térmica linear, da ordem dos $1,3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$, que deverá ter-se em consideração ao projetar-se instalações, para evitar sobre tensões térmicas que encurtariam a vida do tubo. Sob baixas temperaturas, pode ocorrer degradação foto-oxidativa. E quando exposto por tempo prolongado às intempéries, devido principalmente à componente ultravioleta da luz solar e ao oxigênio do ar, produzindo endurecimento e diminuição das suas propriedades. Isto torna necessário o uso de antioxidantes, para utilização em ambientes expostos.

² O coeficiente de dilatação linear representa a variação de comprimento que sofre uma barra unitária, quando sua temperatura varia de uma unidade

Independente da exposição à temperatura ou intempérie, o comportamento do polietileno, como o de qualquer material plástico, sofre modificação ao longo do tempo. Por isto, nos plásticos, ao contrário dos metais, o dimensionamento deve ser calculado de forma a levar-se em consideração a perda lenta das propriedades ao longo da sua vida útil, devendo os cálculos serem efetuados com base nas propriedades extrapoladas para 50 anos. Ao submeter uma tubulação de plástico a esforços mecânicos, mesmo constantes, o material tende a ter deformações crescentes, de forma similar à fluência que ocorre com os metais a alta temperatura. Por isto, para determinar o limite de resistência de um plástico a uma determinada carga é necessário estabelecer as curvas de regressão conforme será descrito em detalhes no item 3.6.

3 ANÁLISE DO PEAD PARA APLICAÇÃO EM DUTOS E EMISSÁRIO SUBMARINO

3.1 - COMPARAÇÕES COM O TUBO DE AÇO

O PEAD é 3 vezes mais leve que o alumínio e 8 vezes mais leve que o aço e possui alta flexibilidade, variável ao longo de faixa bastante ampla, conforme o tipo de polímero e os aditivos usados na sua formulação. Para tubos estas são características significativas uma vez que a leveza e a flexibilidade dos tubos de PEAD apresentam uma ampla vantagem quanto à facilidade de transporte, podendo ser enrolados em bobinas de grande comprimento e podendo ser desenrolado junto à vala, e até permitir a utilização da técnica especial do furo direcional, em que a linha é lançada sem a necessidade de abertura de vala. Esta técnica será descrita no item 3.4 a seguir.

Quando da escavação de valas, não é necessário escavar valas rigorosamente retilíneas, já que os tubos podem adaptar-se com facilidade a um traçado curvo, e mesmo em caso de movimento moderado do solo, a tubulação de PE deforma-se, mas não se rompe, as figuras 6 a) e 6 b), mostram o desfilamento sinuoso de dutos de PEAD.



Figura 6 a) Assentamento sinuoso de tubos de PE



Figura 6 b) Desfilamento de PE

A conformação de polímeros para fabricação de peças requer aquecimento entre a temperatura ambiente e 250 °C, apenas alguns plásticos especiais requerem temperaturas próximo a 400 °C, o que requer equipamentos mais simples e de menor investimento e consumo de energia quando comparado aos metais ou as cerâmicas. O que facilita a produção de tubulações de grandes diâmetros sem a necessidade de alto consumo de energia.

Devido as suas propriedades elétricas, o PEAD é altamente indicado para aplicações onde se requeira isolamento elétrico, devido aos polímeros não conterem elétrons livres, responsáveis pela condução de eletricidade nos metais. Ao se fazer adição de cargas especiais condutoras, por exemplo, limalha de ferro e negro de fumo, isto torna os polímeros fracamente condutores, evitando acúmulo de eletricidade estática, que é perigoso em certas aplicações, em especial com gás. Sua resistividade transversal é acima de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$, o que elimina a necessidade de proteção catódica como ocorre com as tubulações de aço, pois não existe corrosão ao solo com esta resistividade. A tabela 5 mostra os valores das propriedades elétricas conforme norma específica.

Tabela 5 – Propriedades elétricas do PEAD [6].

Propriedades Elétricas	Unidades	Normas	Valores
Constante dielétrica a 1000 Hz	---	DIN 53483 ASTM D150	2,3
Fator de perda dielétrica a 10 Hz	---	DIN 53483	0,0002
Resistividade volumétrica a 23 °C 50% RH(Relative Humidity – Umidade Relativa)	Ωcm	DIN 53482 ASTM D257	10^{17}
Rigidez dielétrica	KV/mm	DIN 53481	110
Resistência superficial	Ω	DIN 53482	10^{14}

Quanto a sua condutividade térmica, o PEAD chega a ter uma condutividade cerca de mil vezes menor que a dos metais. Logo, são altamente recomendados em aplicações que requeiram isolamento térmico, ou seja, a ausência de elétrons livres dificulta a condução de calor nos polímeros e esta baixa condutividade é boa para escoamento de fluidos mantendo sua temperatura interna constante. A tabela 6 mostra as propriedades térmicas do PEAD.

Tabela 6 – Propriedades térmicas do PEAD ^[6]

Propriedades Térmicas	Unidades	Normas	Valores
Calor específico a 23 °C	J/°K.g	---	1,7
Condutividade térmica a 23 °C	W/°K.m	DIN 52612	0,35
Coefficiente linear de expansão térmica a 23°C	10 ⁻⁶ /°K	---	200
Temperatura máxima de uso em curto período	°C	---	100
Ponto de fusão	°C	DIN 53736	130
Temperatura de transição vítrea	°C	DIN 53736	-95
Temp. distorção sobre ISO-R75 método A	°C	DIN 53461 ASTM D648 ISO R 75	45
Inflamabilidade	---	UL94	HB

Conforme detalhado no item 2.7, o PEAD apresenta excelentes propriedades de resistência química que permite utilizá-lo com ampla faixa de fluidos e misturas inclusive bastante corrosivas, diferente do aço que é bastante limitado neste quesito. Contudo, quando os tubos de polietileno se destinam ao transporte de gases ou vapores, é conveniente conhecer os coeficientes de permeabilidade específica para estes fluidos, pois, nenhum material plástico se constitui numa barreira completa à difusão de moléculas de gases ou vapores. Isto ocorre devido à influência das três características estruturais do material que são: Imperfeições **superficiais** (macroscópicas ou microscópicas), **porosidades** (capilares e canais submicroscópicos) e **espaços intermoleculares**.

Os coeficientes de permeabilidade, ou seja, sua “permeação” aplica-se à difusão de moléculas de gases ou vapores através dos espaços intermoleculares. Como os polímeros são substâncias de natureza macromolecular, nem todos os espaços em sua estrutura são ocupados por moléculas, existem muitos espaços vazios, onde moléculas de dimensões similares a estes podem estar localizadas. O tamanho dos espaços na estrutura de um polímero depende do estado físico em que se encontra (vítreo, elástico ou cristalino). No caso de um polímero amorfo que se encontra acima de sua

temperatura de transição vítrea (T_g), isto é, no estado elástico, os segmentos moleculares têm considerável mobilidade, de tal forma que existe um apreciável “volume livre” na massa do polímero. Já em estruturas mais organizadas ou cristalinas, estes espaços são minimizados, reduzindo a “permeação”, por isto, polímeros como o PEAD que possuem alta cristalinidade tem uma menor permeabilidade.

Quanto à resistência mecânica, o aço é talvez o mais versátil dos materiais estruturais, com uma ótima razão de resistência por peso, o que permite a confecção de estruturas comparativamente leves quando submetidos a elevadas pressões. A baixa fluência do material garante que a resistência da estrutura não se reduza consideravelmente com o tempo. Além disto, o comportamento elástico e físico próximo à hipótese de ser um material homogêneo, isotrópico e elástico linear facilita a análise e o dimensionamento. Sua natureza dúctil possibilita a redistribuição das tensões nos pontos de concentração, e torna visível a iminência de ruína da estrutura e a tenacidade do aço permite que durante a fabricação, transporte e montagem hajam pontos na peça sujeitos a grandes deformações sem aparência visível de danos. O PEAD por sua vez, é aplicável apenas para pressões relativamente baixas (comercialmente até 20 bar) quando comparado aos limites práticos de aplicação do aço.

Pela análise das propriedades apresentadas, os tubos de PEAD tornam-se uma alternativa bastante competitiva para aplicações em dutos e emissários submarinos, dentro de seus limites de resistência mecânica e de permeabilidade, quando comparando ao aço, destacando-se a necessidade de um menor investimento na fabricação, na execução da obra e principalmente, na manutenção da tubulação de PEAD.

Na sequência veremos, outras qualidades em que o PEAD demonstra ser uma alternativa viável para estas aplicações, principalmente em tubulações assentadas.

3.2 – PROJETO E DIMENSIONAMENTO

Os tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), dimensionados para operação com pressão interna, possuem valores já tabelados para as suas dimensões em função

das classes de pressão, normalizados por organismos nacionais e internacionais de normatização, com as normas ABNT NBR 15661 e ABPE / E001.

O cálculo de dimensionamento para obtenção da espessura de parede para respectiva classe de pressão é realizado a partir do conhecimento da curva de regressão do material, de onde se obtém o valor de tensão circunferencial em função da temperatura e vida útil especificada para o projeto. Após obtenção do valor da tensão circunferencial, adota-se um fator de segurança o qual varia em função do tipo da resina, norma e aplicação, de onde se obtém, portanto o valor da tensão de dimensionamento.

As normas de dimensionamento dos tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) estabelecem através das curvas de regressão a mínima tensão circunferencial requerida para uma vida útil de 50 anos à temperatura de 20°C (MRS-Minimum Required Strength), classificando-os por este fator. A partir dos valores encontrados para tensão mínima requerida nas curvas de regressão, são adotados os fatores de segurança, obtendo-se a tensão de dimensionamento, conforme descrito na tabela 7.

Tabela 7 – Tensão de dimensionamento dos tubos PE 80 e PE 100 ^[7]

<i>Materia l</i>	<i>Norma</i>	<i>Classificação</i>	<i>MRS (Mpa)</i>	<i>Fator Segurança</i>	<i>Tensão de Projeto 50 anos a 20 °C (Mpa)</i>
<i>PEAD</i>	<i>DIN 8074</i>	<i>PE 80</i>	<i>8</i>	<i>1,25</i>	<i>5</i>
<i>PEAD</i>	<i>ISO 4427</i>	<i>PE 80</i>	<i>8</i>	<i>1,25</i>	<i>6,3</i>
<i>PEAD</i>	<i>ISO 4437</i>	<i>PE 80</i>	<i>8</i>	<i>4</i>	<i>2</i>
<i>PEAD</i>	<i>ISO 4427</i>	<i>PE 100</i>	<i>10</i>	<i>1,25</i>	<i>8</i>

3.2.1 - OUTROS FATORES CONSIDERADOS NO DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

Devem ser considerados no dimensionamento dos tubos outros carregamentos além da pressão tais como: carga de peso do solo e cargas dinâmicas devido ao tráfego de veículos para linhas enterradas, a carga de colapso para tubos sujeitos à pressão externa superior à interna, tensão devido à curvatura para tubulação instalada em terreno irregular, ou no momento de instalação devido à curvatura de inserção para tubulações

subterrâneas, esforços de flexão devido à distância entre apoios em tubulações aéreas, tensões oriundas de dilatação térmica e as cargas dinâmicas devido a golpes de aríete.

3.2.2 - RESINAS UTILIZADAS PARA FABRICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS TUBOS – PE 80 e PE 100

Existem basicamente dois tipos de resinas comerciais para fabricação de tubos de PEAD, PE80 e PE100. Para uma mesma classe de pressão, os tubos calculados com a resina PE 100 apresentam espessuras menores de parede. A seleção do tipo de resina deve atender ao requisito de espessura mínima para cada diâmetro e classe de pressão. Os tubos produzidos com resina PE 100 podem ser utilizados para pressão até 700 Kpa (Pn7), superior aos 400 Kpa (Pn4) que é a pressão máxima admissível dos tubos com PE 80.

3.2.3 - CÁLCULO HIDRÁULICO

A diferença básica no dimensionamento hidráulico de tubulações de PEAD comparadas às tubulações de materiais tradicionais reside na baixíssima rugosidade que estas apresentam. As tubulações de PEAD possuem uma superfície extremamente lisa, que se traduz numa excelente capacidade de vazão. Apresentam alta resistência à corrosão, incrustações e proliferação de bactérias. Por suas excelentes propriedades, pode-se utilizar um diâmetro menor para transportar um determinado volume em comparação às tubulações de aço, ferro ou concreto. Além disso, mantém estas características de fluxo durante toda sua vida útil.

Para calcular o fluxo sob pressão, utilizam-se equações que relacionam o fluxo de um fluido com a sua queda de pressão em um sistema de tubulações envolvem um fator de atrito que depende do material da tubulação. As fórmulas mais comumente utilizadas para cálculos hidráulicos são as de Hazen-Williams e de Colebrook. Na fórmula de Hazen-Williams, a influência da rugosidade é considerada no coeficiente C (coeficiente de atrito), que para tubulações de PEAD é determinada pela literatura técnica em 150, e na fórmula de Colebrook, para a rugosidade os valores adotados são

para diâmetro ≤ 200 mm: $\Sigma = 10 \mu\text{m}$ ($1,0 \times 10^{-2}$ mm) e para diâmetro > 200 mm: $\Sigma = 25 \mu\text{m}$ ($2,5 \times 10^{-2}$ mm). Atualmente, a fórmula de Colebrook é considerada como a que proporciona resultados mais exatos.

A seleção do diâmetro interno se dá a partir da velocidade média do fluido, depois se consulta a tabela normalizada, especificando o diâmetro nominal e o correspondente diâmetro interno da tubulação, onde:

d = diâmetro interno da tubulação (mm)

Q = vazão (m^3/h)

v = velocidade média (m/s)

As perdas de carga podem ser determinadas pelas fórmulas de Hazen-Williams ou Colebrook. É recomendável aplicar ambas as fórmulas e adotar a maior perda de carga obtida. Conforme ISO 4437 e EN 1555, o PE 100 pode ser dimensionado para tubos de gás com $\delta = 5$ MPa, o que para um tubo SDR 11 resultaria em pressões de até 10 bar, entretanto, no Brasil e na maioria dos países, as tubulações de gás em PE 100 estão restritas a uma pressão máxima de 7 bar, adotando-se então $\delta = 3,85$ MPa. A limitação visa à segurança do sistema, devido há ainda pouca história de aplicação do PE 100. Seria de se esperar, que com ganho de confiabilidade na aplicação do material, as pressões de operação sejam sistematicamente aumentadas. A norma ISO 4422 admite o uso de uma Fator de Segurança mínimo de 1,6 o que resulta em δ de 15,6 MPa.

3.3 - MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE INSTALAÇÃO - MND

Os chamados Métodos Não Destrutivos utilizam máquinas especiais que perfuram o subsolo horizontalmente, entre dois poços de acesso, por onde serão passadas as tubulações, conforme figura 7, onde não é necessário rasgar toda a extensão do piso por sob o qual passará a instalação. Esse método é extremamente útil quando da travessia de vias de grande tráfego, uma vez que o trânsito de veículos não será prejudicado pelas obras.



Figura 7 – Inserção de tubos por furo direcional

A execução por este processo também evita a reposição do pavimento por abertura de valas, reposição esta que nem sempre é igual à situação original do pavimento. Sua aplicabilidade é destinada à execução de serviços em tubulações de polietileno e aço para trabalhos até 2 metros de profundidade que podem ser: transmissão e distribuição de energia elétrica; telecomunicações; transmissão e distribuição de televisão via cabo; distribuição de derivados de petróleo e gás; travessia de avenidas, rodovias, rios e ferrovias; sistemas de drenagem de subsolo; instalações industriais; substituição de tubulações, etc.

O custo direto em muitos casos já é equivalente ao método com abertura de valas contínuas, mas as vantagens são enormes, por exemplo, precisão na execução da obra, redução de prazos, não interrupção do trânsito na área de trabalho com redução do custo social. Esse avanço tecnológico, o desenvolvimento do geoprocessamento, do material dos dutos e a legislação das prefeituras na fiscalização das obras formam o conjunto de ferramentas que tendem a otimizar a instalação da rede de dutos em centros urbanos. Segundo a International Society for Trenchless Technology (ISTT, 2007) são três as possibilidades de utilização do MND: na implantação de novos dutos, na substituição dos dutos antigos por tubos de polietileno e na re-habilitação de tubulações de aço ou FoFo existentes através de revestimento interno com injeção direta de tubos plásticos.

Esses métodos se desmembram em vários outros similares sendo que no Brasil, são comumente utilizados para a implantação de novos dutos, os chamados métodos

“HDD direcionais” e para substituição da tubulação no próprio local, os “sistemas hidráulicos”.

3.4 – PROCESSOS DE SOLDAGEM E INSPEÇÃO DO PEAD – EMISSARIO SUBMARINO

Os diversos tipos de processos de soldagem para plásticos, aqui particularmente para o polietileno de alta densidade (PEAD), consistem basicamente no aquecimento dos materiais até uma determinada temperatura, tal que, se obtenha a fusão dos mesmos, posteriormente são submetidos à uma certa pressão, sendo então as massas fundidas e após resfriadas naturalmente, obtém-se um único elemento cujas propriedades se mantêm originais. São conhecidos basicamente três processos de soldagem, o processo de soldagem por termofusão, o processo de soldagem por eletrofusão e o processo de soldagem manual.

No processo de soldagem por termofusão, mais conhecido e difundido, existem três métodos distintos, a soldagem de topo, a soldagem de soquete, e a soldagem de sela. Todos os processos de soldagem devem seguir procedimentos específicos e normas aplicáveis, com profissionais e procedimentos qualificados, de modo à assegurar a qualidade da soldagem e a performance requerida.

Para o PEAD será abordado de forma sucinta e objetiva os principais procedimentos e o método de soldagem de topo, pelo processo de termofusão. A solda de topo é aplicável comumente em tubos e conexões com diâmetro externo superiores à 63 mm, proporciona grande confiabilidade através da obtenção de fatores de eficiência de solda entre 0,8 e 1,0 em ensaios de tração, quando comparados à corpos de prova sem solda., este processo de soldagem utiliza-se de equipamentos constituído de unidade de força que é composta de unidade hidráulica capaz de alinhar e fixar os dois elementos a serem soldados, movimentando longitudinalmente, e pressionando suas faces, uma contra a outra.

A placa de solda, em alumínio, é provida de resistência elétrica em seu interior e controlador eletrônico de temperatura, sendo suas faces de contato revestidas com PTFE, garantindo antiaderência.

O faceador que possui um disco rotativo, de acionamento manual, ou motorizado, com lâminas montadas em seu corpo, de ambos os lados, que quando conectada na unidade de força confere as faces dos elementos o paralelismo requerido para soldagem. Além de outros acessórios como gabaritos e dispositivos de fixação dos tubos e conexões à máquina, em função dos diversos diâmetros intercambiáveis em um mesmo equipamento, conforme ilustrado na figura 8.

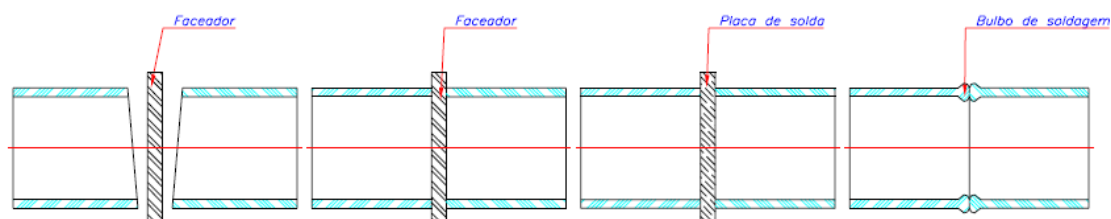


Figura 8 – Sequência de soldagem por termofusão.

3.5 – MECANISMO DE RUPTURA

A busca por melhores materiais tem levado a indústria petroquímica ao contínuo desenvolvimento de novas resinas, com maior resistência às falhas, que ocorrem através do crescimento lento de trincas. Essa resistência à falha em serviço dos tubos geralmente é avaliada através de ensaios de resistência à pressão hidrostática interna de longa duração, realizados em diferentes temperaturas.

Nestes ensaios observa-se que o PEAD apresenta comportamento dúctil (acompanhado de significativa deformação plástica) e falha em menor período de tempo a níveis elevados de tensão, enquanto que em níveis mais baixos de tensão o material apresenta falhas com aparência frágil, sem deformação plástica visível apreciável, após

longos períodos de tempo. As falhas em serviço são predominantemente deste último tipo.

A maior parte dos metais são dúcteis, os cerâmicos são frágeis e os polímeros podem ser dúcteis ou frágeis. Segundo Danieletto ⁽⁸⁾, a fratura dúctil ocorre no período de tempo correspondente a inclinação suave da curva de regressão, antes do início de sua mudança de direção ou joelho e se caracteriza por uma grande alongação, que pode alcançar 100% e ocorre sempre na direção do esforço. Perpendicular ao eixo do tubo, quando devido a sua pressão. Supõe-se que a fratura dúctil ocorre depois da deformação das moléculas nos cristalitos. Como as forças de ligação nos cristalitos são muito fortes, é necessária uma tensão muito grande para se conseguir a ruptura a qual é precedida de grande alongação. Para melhorar a resistência a fratura dúctil do polímero é necessário aumentar a densidade e o peso molecular.

A fratura frágil ocorre no período de tempo correspondente á parte inclinada da curva, depois do joelho. Apresenta-se na forma de microfissuras de arestas afiadas perpendiculares ao esforço principal (no caso de tubos sob pressão são longitudinais, paralelas ao eixo). Ocorre a longos tempos e a tensões abaixo de 50% da tensão de escoamento do material. Considera-se que a fratura frágil ocorre em virtude da ruptura nas regiões amorfas do plástico, entre os cristalitos, sendo causada por degradação do material ou por fadiga devido a tensões ambientais (*Environmental Stress Cracking - ESCR*). As fissuras por ESCR são maiores que aquelas resultantes da degradação, e são causadas pelo enfraquecimento da ligação molecular em função de temperatura elevada e/ou tensões localizadas, como as de resfriamento durante a produção, ranhuras ou objetos cortantes ou perfurantes na superfície do tubo, muito comuns durante a instalação. Portanto é um fenômeno físico.

A ruptura por degradação é conseqüente da quebra molecular (oxidação), também função de temperatura elevada, mau processamento, baixo nível de termoestabilizantes ou envelhecimento. Portanto é um fenômeno químico.

È importante destacarmos a 3ª fase, ou degradação do material, quando ocorre o esgotamento dos aditivos estabilizantes (antioxidantes e termoestabilizantes) e quebra das moléculas que provocam a degradação molecular devido a altas temperaturas ou fotoxidação pelos raios ultravioletas. Daí a importância dos aditivos na fabricação do composto. Um tubo produzido com material que não tenha sido corretamente estabilizado, ou que se tenha degradado (seja por armazenamento inadequado dos tubos ou material, ou devido a um mau processamento durante sua extrusão) irá prematuramente cair na fase 3, levando a sua ruptura. Esta transição do modo de fratura “dúctil-frágil” no comportamento do material, pelo menos ao nível da falha macroscópica, é muito importante, para eliminar ou reter parâmetros que podem abreviar a vida útil do tubo através de falhas precoces.

Dados de tensão circunferencial versus tempo de ruptura dos tubos podem ser plotados em escala bi-logarítmica, formando o que se conhece na prática industrial por “curva de regressão”, a qual é linear, com inclinação negativa e com maior inclinação (em módulo) na região correspondente às falhas do modo frágil. Dessa forma, a transição “dúctil-frágil” apresenta-se na 'curva de regressão' como um ponto de inflexão, a figura 9 exemplifica este ponto. A tensão de transição dúctil-frágil é característica de uma dada formulação (composto) e não é facilmente determinada em ensaios conduzidos à temperatura ambiente.

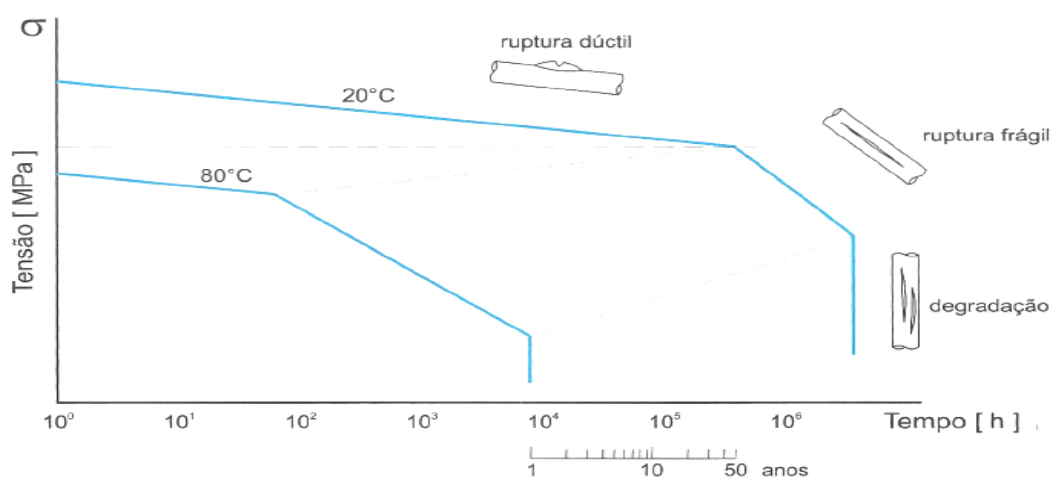


Figura 9 - Curva de regressão tensão x tempo ⁽⁸⁾

Assim, para uma melhor caracterização dos materiais, são desenvolvidos ensaios a temperaturas elevadas (40, 60, 80 e 95 °C), determinando-se com clareza o comportamento da curva de regressão em um tempo relativamente curto (10.000 h a 15.000 – 1 ano a 2 anos), definido os níveis de tensão em que ocorre a ruptura (creep), a ruptura frágil (stress cracking) e a degradação (oxidação ou quebra das moléculas).

Estes ensaios são realizados a altas pressões internas (ou seja, na região dúctil) para economizar tempo, enquanto que os tubos operam na região “frágil”. Os testes realizados na indústria também implicam que o tempo de falha é uma propriedade do material, enquanto que fatores extrínsecos, como defeitos introduzidos durante a instalação, podem reduzir o tempo de nucleação da fratura, levando à falha precoce. O crescente emprego de tubos de polietileno em sistemas de distribuição de água, além de outras aplicações, como em sistemas de gás, requer o desenvolvimento de novos métodos de avaliação de desempenho, que levem em conta não apenas o tempo de falha como também os mecanismos de fratura. Busca-se desenvolver métodos de laboratório, de curta duração, para se estabelecer o comportamento dos tubos a longo prazo, principalmente para prevenir falhas precoces, do tipo frágil, dentro do período de vida útil esperado.

Existem, dois métodos de análise do comportamento dos polímeros na presença de trincas, um chamado de “Ramp Test” e o método do trabalho essencial de fratura. O método do 'Ramp Test' permite estimar a tensão crítica correspondente à transição dúctil-frágil da “curva de regressão” a partir de ensaios simples de tração. Por outro lado, o método do trabalho essencial de fratura permite estimar diretamente as partes essenciais e não essenciais do trabalho específico de fratura.

Estes testes propostos são viáveis como substitutos ou complementares aos ensaios de resistência à pressão hidrostática na avaliação da tendência de tubos de polietileno apresentar falhas em serviço.

Na figura 10 podemos observar os tipos de fratura as quais estão sujeitos os tubos de polietileno.

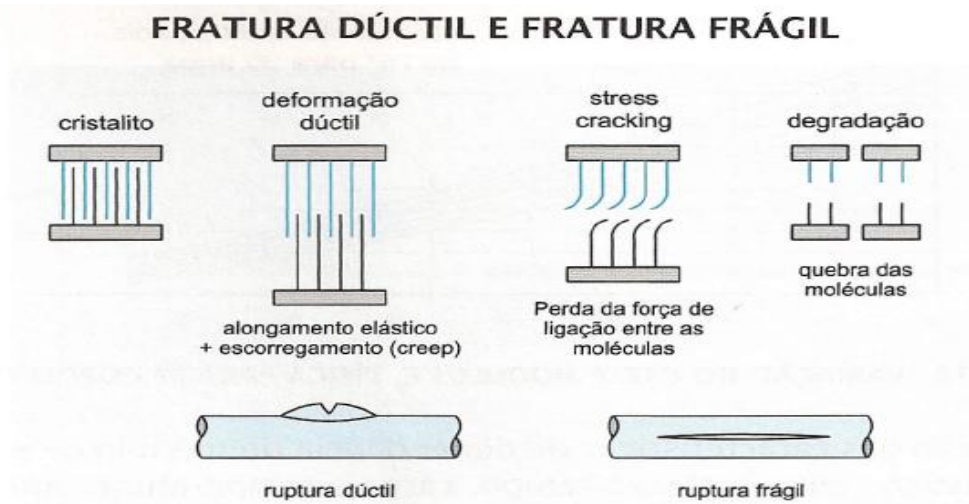


Figura 10 – Tipos de fratura nos plásticos - Representação esquemática ^[8]

3.6 - DESCRITIVO DAS ATIVIDADES DE INSPEÇÃO

A inspeção visual na área de estocagem antes do carregamento é de suma importância, por isto, nesta fase e no momento do manuseio para carregamento e transporte, os tubos são submetido à inspeção visual com objetivo único de se avaliar danos ocorridos no transporte, manuseio e armazenagem.

Esta inspeção consiste no seguinte: o inspetor de qualidade inicia a inspeção visual e com o auxílio de instrumentos de medição e ferramenta de corte (trena, paquímetro e estilete), uma vez observados danos será então avaliado quanto ao dimensional, utilizando se do paquímetro para medir a profundidade, e caso algum entalhe ultrapasse a 10% da espessura nominal do tubo será considerado crítico devendo então ser submetido à corte para re-soldagem, a figura 11 ilustra este processo.



Figura 11 – Inspeção visual e dimensional nos tubos de PE antes da soldagem – tubos de PE 100 de 1735 mm, espessura de 80,1 mm.

Durante o procedimento de preparação para soldagem, que envolve ajustes de possíveis o desalinhamento, retifica do plano perpendicular de bocas e limpeza, são feitas algumas inspeções de liberação final para o início da soldagem e em todas as etapas o controle da qualidade atua de maneira criteriosa. Nesse momento são verificados com o auxílio de instrumentos de medidas, tipo paquímetro, nível, régua, medidores de temperatura laser e termômetro ambientes, se as condições são adequadas para execução da solda.

Quando a equipe de montadores e operadores de soldagem por termofusão, após as suas verificações, faz a entrega dos tubos para verificação e liberação do controle de qualidade. Inicia-se então a inspeção começando pela verificação do plano nas extremidades dos tubos, utilizando-se de régua e nível, considerando o em condições satisfatória, quando em 300 mm não se observa diferença maior ou igual a 5 mm no esquadro de acordo com a norma ISO 4427. Em seguida será verificado o desalinhamento máximo permitido em todo perímetro, que de acordo com a norma ISO 4427, não pode ser superior a 10% da espessura média.

Após essas verificações será observada a limpeza dos elementos a serem soldados pelo menos 300 mm partindo da face de contato com a placa em ambas as bocas, a mesma limpeza deve ser observada também na placa calefatora utilizando-se de toalha de papel umedecido com álcool etílico. Na sequência para que seja liberada a peça para soldagem é necessário verificar a temperatura da placa utilizando-se

termômetro de contato laser ou com haste, o qual deve ter temperatura em torno de $210 \pm 10^\circ\text{C}$.

Deve-se adotar procedimentos de soldagem por meio da lista de verificações antes da soldagem, tomando cuidados iniciais para assentar o equipamento sobre uma base regular, colocando chapas de ferro fazendo um trilho de apoio. Colocar o equipamento em local, preferencialmente abrigado, de forma de evitar corrente de ar, que possa trazer sujeira e resfriamento descontrolado. Colocar roletes para maior facilidade de deslocamento, fazer inspeção do tubo, procurando irregularidades (danos no transporte ou no manuseio) ou perfurações maiores que 10% da espessura do PEAD. Verificar equipamentos hidráulicos antes de executar os serviços, certifique-se de possuir os parâmetros de soldagem adequada ao equipamento e dimensão dos tubos, verificar as lâminas do faceador. Se necessário ajustar ou substituir, verificar se a temperatura da placa de solda atingiu a temperatura mínima para soldagem, verificar com um termômetro, observar o dispositivo antiaderente da placa de solda. A figura 12 mostra as verificações de linearidade das faces a serem soldadas.



Figura 12 – Inspeção dimensional e linearidade das faces a serem soldadas

A solda de topo por termofusão inclui quatro etapas que são preparação, aquecimento (fusão), solda e resfriamento. A preparação é de extrema importância para uma boa soldagem, esta preparação inclui alinhamento do tubo e conexões, limpeza de superfícies de solda, faceamento das extremidades de solda, assegurando o perfeito paralelismo das partes. O aquecimento subdivide-se em duas fases, a primeira é o tempo de aquecimento uniforme e a segunda o tempo de aquecimento propriamente dito.

O tempo de aquecimento uniforme tem o objetivo de assegurar que as superfícies de solda estejam totalmente em contato com a placa de aquecimento, que

tem o tempo de 10 min (+/- 3 min). Ele ocorre à baixa pressão (14 bar), que é a pressão exercida na unidade de força, contra a placa de aquecimento, que deve ser controlada. Para que o material atinja a temperatura de fusão apropriada. Posteriormente, ao tempo de aquecimento, mantêm-se por 12 minutos para atingir o tempo de aquecimento propriamente dito.

O procedimento para início de soldagem segue parâmetros preliminares antes do início de soldagem da tubulação, como colocar abraçadeiras de alinhamento e travamento dos tubos. Usando recursos para diminuir desalinhamento obtido nos tubos a serem soldados, depois deve girar o tubo procurando o melhor alinhamento, lembrando se que os tubos não têm forma cilíndrica perfeita. O alinhamento é facilitado se for usado como referência as linhas de marcação dos tubos. Em seguida alojar o faceador na máquina e facear as extremidades dos tubos, regular o faceador tal que seja suficiente para que o faceador tire retalhos finos e contínuos dos tubos. Pressões muito altas danificam o faceador resultando em mau faceamento. Observação, o faceador deve ser ligado antes de aproximar os tubos contra si e deve ser desligado somente após a reabertura da máquina. A figura 13 exemplifica a colocação do faceador.



Figura 13 – Colocação do faceador para nivelamento das faces a serem soldadas

Verificar o paralelismo das superfícies a serem soldadas, encostando-se sem pressão, e posteriormente deve ser aplicada pressão suficiente para visualizar, se não há deslocamento das abraçadeiras. Verificar o alinhamento dos tubos. (desalinhamento Max. 10% espessura do tubo). E coletar todos os dados dimensionais do mesmo (planicidade das faces, espessura, desalinhamento).

Limpar as superfícies a serem soldadas e a placa de solda com papel ou pano embebido em álcool isopropílico ou etílico, ou acetona. Nunca usar objetos que danifique a placa e nem papel ou panos que soltem fiapos. É importante que o álcool tenha um baixo teor de água e seja de rápida evaporação. A acetona deve ter alta pureza. Outros líquidos de limpeza de alta evaporação também podem ser usados, como tricloroetano, clorietileno, etc

A solda consiste da penetração das superfícies das partes fundidas, para que ocorra a interligação molecular das duas partes. A pressão da solda deve ser mantida até que o final do tempo de resfriamento propriamente dito, que tem uma duração de 90 min. Alguns procedimentos recomendam manter a pressão de solda ainda nesta fase, outros recomendam zerar a pressão, mas sempre mantendo o conjunto imóvel até o fim do ciclo de cristalização do material.

Verificar sempre a pressão de arraste, que é a pressão da unidade de força exercida pelo avanço ou retrocesso dos roletes de condução dos tubos, que pode ser aumentada pelo travamento dos roletes ou o próprio tubo preso sobre a estrutura.

Pressionar as superfícies dos tubos com uma força de 14 bar de pressão de arraste contra a placa até a formação do cordão inicial. Após concluir o tempo de aquecimento uniforme, (a figura 14 mostra uma placa de aquecimento), que conforme já descrito dura em média 10 minutos, deve ser aliviada a pressão para dar início ao tempo de aquecimento propriamente dito que dura em média 90 minutos. A placa deverá ser retirada ao final do processo.

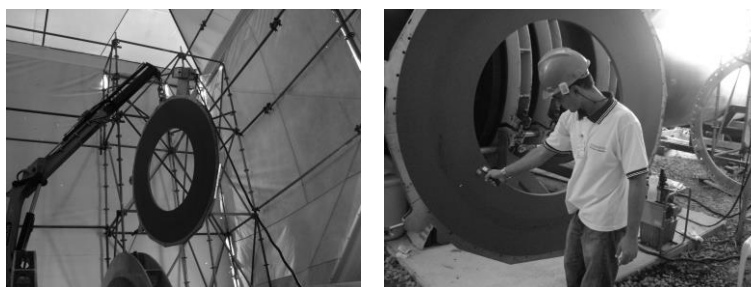


Figura 14 – Placa de aquecimento, verificação da temperatura por termômetro digital.

Verificar rapidamente se ficou material fundido na placa ou se houve deformação na superfície da solda; Fechar a máquina novamente, comprimindo as superfícies dos tubos, aplicando uma pressão de 85 bar para realização da solda. O intervalo de tempo para esta verificação deve ser de no máximo de 30 segundos para não perder a temperatura de aquecimento. A partir desse momento serão controlados todos os tempos que fazem parte do ciclo de soldagem propriamente dito. Estes tempos são, o tempo para igualdade de temperatura dos elementos com pressão, tempo de aquecimento com sem pressão, tempo para retirada da placa e união dos elementos com pressão, tempo de resfriamento, horário final, pressão de arraste, pressão de soldagem. Será observada ainda, a formação dos cordões, se os mesmos estão se formando ao longo de todo o perímetro em ambos os lados de maneira uniforme.

Em seguida aguardar o tempo de resfriamento sempre mantendo a pressão de soldagem. Este tempo é em média de 90 minutos para alívio da pressão e retirada das abraçadeiras. A retirada antes do tempo determinado pode ocasionar a perda da solda. O resfriamento não deve ser forçado com água ou ventiladores. Após o tempo de resfriamento propriamente dito, deve-se aguardar um tempo adicional de 10 minutos, mantendo esta pressão, para que a solda atinja a faixa de temperatura ambiente.

Transcorrido o tempo de soldagem após a retirada das mordças serão verificados o dimensional do cordão nos quatro quadrantes, calculando-se a largura média dos mesmos e observando-se se as diferenças entre os cordões estão dentro do critério de aceitação em função dos parâmetros de soldagem da norma ISO 4427. A figura 15 ilustra o momento da inspeção pós soldagem.

Esses dados são obtidos através dos parâmetros de soldagem pré-estabelecidos de acordo com as variáveis do processo tipo: Diâmetro e espessura, com base na Norma ISO 4427.



Figura 15 – Inspeção visual e dimensional do cordão de solda

A inspeção final da solda é feita através do ensaio por ultra-som é efetuado em 100% da junta soldada, aplicando a técnica de contacto com varredura dos dois lados do cordão pela parte externa do tubo e efetuando o ensaio com a utilização de dois cabeçotes, sendo 01(um) cabeçote normal e 01(um) cabeçote angular.

Como ferramenta de garantia da qualidade são realizados os ensaios mecânicos (Tração e dobramento), de acordo com ISO 4427, sendo que cada vinte soldas executadas, se corta uma peça de 500mm, e envio a um laboratório especializado para ser ensaiado. Existem algumas especificações que determinam os parâmetros destes ensaios como, por exemplo, a ABPE /M004 da Associação Brasileira de Poliolefinicos ou Alemã DVS 2203, a depender da especificação do comprador. As figuras 16 a e b 20 ilustra o ensaio de tração e de dobramento sendo realizado em um corpo de prova de 0,5 metros.



Figura 16a) ensaio de tração



16b) Ensaio de dobramento

4 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa bibliográfica foram descritas as características, propriedades, requisitos de fabricação e de instalação dos tubos de Polietileno de Alta Densidade – PEAD. Observou-se que esta poliolefina possui uma boa combinação de propriedades físicas (mecânicas e térmicas), químicas (baixa sensibilidade ao ataque por diversos tipos de fluídos ou solo) e facilidade de instalação que permitem a sua aplicação em dutos e tubulações enterradas que requeiram certa resistência e tempo de vida útil prolongado com investimentos competitivos. Reforça-se a importância de um excelente controle de qualidade no recebimento, na estocagem, no transporte, na inspeção e a instalação dos tubos de polietileno para evitar danos prematuros introduzidos ou originados por inadequações nestas áreas, diminuindo sua vida útil. Portanto, cuidados desde o projeto até a instalação contribuem para a manutenção de uma vida útil esperada de pelo menos 50 anos.

Contudo, certos limites de aplicação e um melhor conhecimento dos mecanismos de falha ligados as curvas de regressão, principalmente no que tange ruptura frágil após longa duração da aplicação ou ao limites de permeabilidade devido a sua porosidade devem ser melhores estudadas. Existem históricos de falhas, como o “inchamento” decorrente de aplicações com derivados de petróleo e a sua baixa resistência a flexão direciona a aplicação dos tubos de PEAD para dutos enterrados de baixa pressão (até 20 bar) como transporte de gás combustível, aquedutos e drenagens em geral, como em emissários. Logicamente, processos de melhoria e diminuição dos aspectos que limitam e restringem a aplicação, confiabilidade, conhecimento e controle dos mecanismos de danos, característicos do PEAD devem continuar a serem desenvolvidos. Isto estimula o processo evolutivo deste termoplástico, e sob tal aspecto as pesquisas e avanço tecnológico, devem se firmar.

A pesquisa conclui que para estas aplicações e determinados tipos de fluidos, mesmo com certas limitações, exceto os hidrocarbonetos aromáticos e clorados, os tubos em PEAD apresentam vantagens perante o aço carbono, o que credenciam os

tubos de PE, como solução técnica para aplicação específica, com menor custo operacional, logístico, e maior vida útil.

4.1 - Sugestões para trabalhos futuros

Pesquisar quais são as causas, que levam o PEAD ao inchamento e a baixa resistência a determinados solventes e derivados de petróleo.

Pesquisa sobre métodos de determinação das curvas de regressão com resultados mais próximo do tempo de vida esperada.

REFERÊNCIAS

- [1] GORNI, A. A. Introdução aos Plásticos [S.I], set. 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/textpol.html>>. Acesso em: 22 mar.2009, 16:30:30
- [2] TORRES, Amélia Angélica U. Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregados em redes de distribuição de derivados de petróleo. Rio de Janeiro. Pontifca Universidade Católica PUC, 2007.
- [3] OSSWALD, T. A.; MENGES, G. - Materials Science of Polymers for Engineers. Munich: Hanser Publishers, 1995. 492 p. ISBN 3-446-172610.
- [4] MANUAL Técnico do Polietileno – BRASTUBO. [2009?]
- [5] COUTINHO, F.M.B. et al. Polímeros: Ciência e tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] DOAK, K. W. – “Ethylene Polymers”. Em: Mark, H. M.; Bikales, N. M.; Overberg, C. G.; Menges, G. – “Encyclopedia of Polymer Science and Engineering”, John-Wiley & Sons, New York, Volume 6 (1986).
- [7] PEAD: Polietileno. [S.I], Incomplast, Caderno Técnico, 2009. Disponível em: <<http://www.incomplast.com.br/materiais/polietil.htm>>
- [8] CATALOGO Técnico da Aflon - Edição Ago/98.
- [9] DANIELETTO, Jose Roberto B. - Manual de Tubulação de Polietileno e Polipropileno: Características, dimensionamento e instalação. São Paulo: Ed. Linha Aberta, 2007.