



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE ESPESSURA NAS TUBULAÇÕES DE AR
COMPRIMIDO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DA CASA DE
FORÇA 2 DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ**

**MAYCON FLABIO DA SILVA FERREIRA
TIAGO AUGUSTO MOREIRA COSTA**

**MAYCON FLABIO DA SILVA FERREIRA
TIAGO AUGUSTO MOREIRA COSTA**

**AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE ESPESSURA NAS TUBULAÇÕES DE AR
COMPRIMIDO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DA CASA DE
FORÇA 2 DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí,
como requisito para a obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

**Orientador: Prof. Me. Jessé Luís
Padilha**

**Tucuruí
2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE ESPESSURA NAS TUBULAÇÕES DE AR
COMPRIMIDO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DA CASA DE
FORÇA 2 DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à aprovação como requisito
para a obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico pela banca examinadora
formada pelos professores e membros
externos:

Orientador: Profº Me Jessé Luís Padilha
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFPA

Coorientador: Eng Me Gilton Carlos de Andrade Furtado
Representante da Eletrobrás Eletronorte

Membro da Banca Examinadora: Profº Me Ronaldo Raposo de Moura
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFPA

Membro da Banca Examinadora: Profº Me Douglas Neves Garcia
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFPA

Membro da Banca Examinadora: Eng Me Mikelly Chaves Cruz
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFPA

Conceito: _____

AGRADECIMENTOS

Maycon Ferreira: Agradeço a Deus por todas as conquistas e pelas bênçãos ao longo desses cinco anos de curso, a minha família, em especial ao meu pai Luiz Ferreira Filho e minha mãe Gilsa Monteiro da Silva, pelo grande apoio que me deram, possibilitando assim prosseguir meus estudos.

Agradeço aos meus amigos de faculdade pelo apoio nas dificuldades encontradas durante o curso, pela parceria durante os trabalhos e estudos em várias madrugadas que passamos juntos sem dormir.

Ao meu parceiro de TCC Tiago, pelo grande empenho e cooperação, aos meus amigos de trabalho da escola Municipal Plácido de Castro e a todos que participaram direta e indiretamente da minha jornada.

Tiago Augusto: Agradeço, primeiramente, a Deus, pela realização de um sonho, bençãos, me dando saúde e forças para vencer as dificuldades enfrentadas durante esse período da graduação. A minha família, principalmente, meu pai José Augusto dos Santos Costa, minha mãe Selma Moreira Costa, pela dedicação, me dando forças para conseguir meus objetivos e dar continuidade aos meus estudos. Ao meu irmão Wellington Augusto Moreira Costa que vivenciou ao meu lado durante todo esse período me dando forças para seguir em frente. E a todos aos meus familiares que, indiretamente e/ou diretamente, participaram desta conquista. Agradeço a turma de Engenharia Mecânica 2011, ao qual faço parte, e em especial aos meus amigos Capitão Saimo, Viviane, Renato, Fabrício, Guilherme, Gentil e ao meu parceiro de TCC Maycon, pelo apoio na realização dos trabalhos, dificuldades e alegrias durante o curso.

Agradecemos em especial ao nosso grande amigo e colega de curso João de Deus “Jota Cão”, pela grande ajuda no decorrer deste trabalho.

Agradecemos ao nosso Orientado Jessé Luiz Padilha, ao nosso coorientador Gilton Carlos de Andrade Furtado e a empresa Eletrobrás Eletronorte, pelo apoio, acolhimento e ensinamentos proporcionados durante o período de estágio. Agradecemos a Universidade Federal do Pará e a todos os professores que contribuíram com o nosso aprendizado durante o curso.

RESUMO

AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE ESPESSURA NAS TUBULAÇÕES DE AR COMPRIMIDO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DA CASA DE FORÇA 2 DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

RESUMO: Para regular o sistema de velocidade das máquinas geradoras na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, se faz necessário transportar fluidos em pressões de trabalho elevadas através de tubulações. Estas são vasos de pressão e necessitam ser inspecionadas para que a manutenção preditiva consiga detectar a existência de possíveis riscos, presentes em suas utilizações. E devido a essa necessidade, foi realizado um planejamento para determinar o procedimento de inspeção mais adequado para as tubulações de ar comprimido do sistema de regulação de velocidade da Casa de Força 2, onde foi objetivado determinar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), para essas tubulações, correspondente a menor espessura encontrada durante o procedimento inspeção, após a escolha do método de medição, buscou-se atender as normas técnicas de medição de espessura por ultrassom e cálculo de PMTA, onde para o cálculo dessa última foi utilizada a norma ASME Code, Divisão 1, Seção VIII. Os resultados foram demonstrados e comparados com a espessura mínima que essa tubulação poderia atingir de acordo com esse código.

Palavras chave: ASME Code, Pressão Máxima de Trabalho Admissível, Ultrassom.

ABSTRACT

THICKNESS MEASUREMENTS EVALUATION OF AIR PIPES OF THE SPEED CONTROL SYSTEM OF THE POWERHOUSE 2 OF THE TUCURUÍ'S HYDRELECTRIC POWER PLANT

ABSTRACT: In order to adjust the speed system of generating machines at the Tucuruí hydrelectric power plant, it is necessary to work with fluids at high pressures. These pipes are pressure vessels and must be inspected. So that the predictive maintenance can detect possible risks presented on these pipes operation. Due to this need, a plan was carried out to determine the most appropriate inspection procedure for compressed air pipes of the speed adjustment system of the powerhouse 2, which was objectified to determine the Maximum Allowable Operating Pressure (MAOP) for these pipes, corresponding to the thinner thickness found during the inspection. After choosing the analysis method, it sought to meet the technical thickness measurement standards by ultrasound and MAOP calculus, where for the calculation latter was used the ASME Code standard, Division 1, Section VIII. The results were shown and, according to the standard, compared with the minimum thickness that these pipes would reach.

Keywords: ASME Code, Maximum Allowable Working Pressure, Ultrasound.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Tubulação do sistema de vapor rompida da Usina Nuclear de Mihama.....	11
Figura 2.1. Classificação geral das tubulações.....	15
Figura 2.2. Classificação das tubulações quanto ao fluido conduzido	17
Figura 2.3. Fabricação de tubos por laminação	19
Figura 2.4. Fabricação de tubos por laminação – Laminadores de acabamentos	19
Figura 2.5. Fabricação de tubos a partir de bobinas de chapa.....	21
Figura 2.6. Tipos de solda em tubos	21
Figura 2.7. Tubo com solda helicoidal	21
Figura 2.8. Ligações rosqueadas de tubo	24
Figura 2.9. Tipos de ligações de solda	25
Figura 2.10. Componentes das válvulas de esfera	27
Figura 2.11. Sistema de retirada de umidade.....	29
Figura 2.12. Filtros com materiais sinterizados	29
Figura 2.13. Campo de audibilidade das vibrações mecânicas	31
Figura 2.14. Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom.....	32
Figura 2.15. Medição de espessura em um tubo	32
Figura 2.16. Técnicas de ensaio por ultrassom	33
Figura 2.17 Tanque de armazenamento	34
Figura 3.1. Dimensões para tubos Schedule	39
Figura 3.2. Instrumento de medição DM5E-GE.....	40
Figura 3.3. Bloco padrão para ajuste	41
Figura 3.4. Acoplante a base de Gel.....	42
Figura 3.5. Inspeção na tubulação localizada no corredor da CF2.....	43
Figura 3.6. Inspeção realizada entre o corredor e os acumuladores.....	43
Gráfico 1. Dispersão dos valores medidos no Trecho 1.....	46
Gráfico 2. Dispersão dos valores medidos no Trecho 2.....	46
Gráfico 3. Dispersão dos valores medidos no Trecho 3.....	46
Gráfico 4. PMTA ao longo do Trecho Crítico 1.....	47
Gráfico 5. PMTA ao longo do Trecho Crítico 2.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Faixa de utilização de alguns aços inoxidáveis	22
Tabela 2.2. Principais materiais para tubulações de ar comprimido	28
Tabela 2.3. Coeficiente de eficiência de solda.....	36
Tabela 3. Medições no bloco padrão	41
Tabela 4.1. Valores de média e desvio padrão dos dados filtrados	45
Tabela 4.2. Resultados obtidos	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

mm	Milímetros
Hz	Hertz
UHT	Usina Hidrelétrica de Tucuruí
UGH	Unidade Geradora Hidráulica
CF2	Casa de Força 2
ABENDI	Associação Brasileira Ensaios Não Destrutivos
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
ASME	Sociedade Americana de Engenharia Mecânica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
CO ₂	Gás Carbônico
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Ti	Titânio
Nb	Níbio
MPa	Mega Pascal
NR 13	Norma regulamentadora 13
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
<i>e</i>	Espessura Mínima
R	Raio Interno
P	Pressão
S	Tensão Admissível do Material
E	Coefficiente de Soldabilidade
C	Margem para Corrosão
De	Diâmetro Externo
Eq.	Equação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 LIMITES DO TRABALHO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 TUBULAÇÕES	15
2.1.1 Classificação das tubulações quanto ao emprego	15
2.1.2 Classificação das tubulações quanto ao fluido conduzido	16
2.1.3 Processos de fabricação de tubos	17
2.1.3.1 Fabricação de tubos por laminação	18
2.1.3.2 Fabricação de tubos com costura	20
2.1.4 Materiais para tubos de aços inoxidáveis	22
2.1.5 Ligações das tubulações	23
2.1.5.1 Ligações rosqueadas	24
2.1.5.2 Ligações soldadas	25
2.1.6 Válvulas	26
2.1.7 Tubulações de ar comprimido	27
2.1.8 NR 13 – Tubulações	30
2.2 MÉTODO DE ENSAIO POR ULTRASSOM	31
2.3 VASOS DE PRESSÃO	34
2.3.1 Código ASME, Seção VIII, Divisão 1	35
2.3.1.1 Cálculo de cascos cilíndricos para pressão interna	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 CARACTERÍSTICAS DA TUBULAÇÃO INSPECIONADA	39
3.2 INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO	40
3.3 CALIBRAÇÃO E AJUSTE	40
3.4 ACOPLANTE	41
3.5 PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO	42
4 RESULTADOS E DISCURSÕES	45
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	49
5.1 CONCLUSÕES	49
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE I	52
APÊNDICE II	56
APÊNDICE III	57

1 INTRODUÇÃO

Segundo Telles (2001) tubulações são por definição consideradas vasos de pressão, chama-se de “tubulação” um conjunto de tubos e seus diversos acessórios. Essas são utilizadas em inúmeros processos no meio industrial e podem transportar fluidos nas mais variáveis condições de temperatura e pressão. Como em todos os meios de processos que ocorrem na indústria, as tubulações devem ser regularmente inspecionadas. Devido a necessidade de manutenção preditiva, para detecção de redução de espessura, por causa da ação corrosiva pela interação com o fluido de trabalho, prevenindo assim possíveis falhas estruturais, como rompimentos, e evitando eventuais danos aos equipamentos, meio ambiente e colaboradores envolvidos nas atividades de rotina da empresa.

Um trágico exemplo do que a negligência em relação as inspeções regulares de tubulações pode causar, é o acidente ocorrido em agosto de 2004 na Usina Nuclear de Mihama (Japão), onde uma brusca ruptura em uma linha de água quente à alta pressão, atingiu onze funcionários que estavam na sala de turbinas da usina, todos ficaram gravemente queimados, sendo que quatro vieram a óbito no mesmo dia do acidente. A principal causa desse acidente foi a progressiva corrosão da parede dessa tubulação, uma vez que a mesma tinha um diâmetro original de projeto de 10 mm, e poderia atingir até 4,7 mm de espessura (espessura mínima). Quando ocorreu a ruptura sua parede foi quase que completamente erodida alcançando 1,4 a 1,5 mm, esse baixo valor de espessura pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1. Tubulação do sistema de vapor rompida da Usina Nuclear de Mihama.

Fonte: Blog de inspeção de equipamentos; estudo de caso (2013)

Acidentes como o ocorrido em Mihama, podem ser evitados por medidas que apliquem os princípios da engenharia de manutenção preditiva. Inspeções periódicas teriam revelado a progressiva perda na parede da tubulação, como por exemplo, um ensaio não destrutivo.

Os ensaios não destrutivos são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, montagem e manutenção, de acordo com à (ABENDI, 2015). Um dos métodos mais utilizados para esse tipo de procedimento é o ensaio por ultrassom, tal método consiste na emissão de ondas sonoras de alta frequência (acima de 20.000 Hz), emitidas pela conversão de energia elétrica em energia sonora através de cristais chamados piezoelétricos (ANDREUCCI, 2002). O procedimento de ensaio por ultrassom permite uma ampla variedade de ensaios, sendo seguro, eficiente e versátil. Pode se realizar desde uma simples detecção de descontinuidade em uma peça, até medições de espessura em chapas, tubulações, vasos de pressão, entre outros.

Na Usina Hidrelétrica de Tucuruí existem diversos tipos de tubulações, que transportam fluidos de trabalho diferentes como óleo, água e ar comprimido. Esses fluidos atendem sistemas que auxiliam o processo de geração de energia elétrica, esses sistemas fazem parte de uma cadeia produtiva composta por tubulações responsáveis pela lubrificação de equipamentos, sistemas de combate a incêndio, reguladores de velocidade, acionamentos diversos através de mecanismos hidráulicos e outros. O gerenciamento, bem como o encargo pela manutenção desse “parque industrial” é de responsabilidade da empresa Eletrobrás Eletronorte.

A partir desse contexto da presença de inúmeros sistemas que apresentam a necessidade de manutenções periódicas em suas tubulações, é de extrema importância que a empresa realize os procedimentos de manutenção preditiva visando garantir o bom funcionamento de seus sistemas, a integridade de seus equipamentos, meio ambiente e de seus colaboradores.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um engenheiro mecânico deve conhecer e aplicar os procedimentos de ensaios não destrutivos, saber utilizar normas técnicas que estejam relacionadas aos conhecimentos adquiridos durante a graduação, baseando suas decisões em análises de dados coletados a partir de inspeções em realizadas em campo.

Dentro da área de atuação desse profissional está o estudo do comportamento dos materiais, onde são necessárias análises que identifiquem fenômenos físicos e químicos, bem como o comportamento dos mesmos quando submetidos a condições de trabalho diversas, possibilitando previsões que estimem a vida útil desses materiais aplicados em projetos. É

também função atribuída ao mesmo, a detecção de situações de eminente risco, bem como propor medidas efetivas para garantir a segurança em campo.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

Determinar a espessura mínima de trabalho através de comparação com a espessura mínima a ser determinada por norma.

1.3.2 Objetivos específicos

Realizar os ajustes necessários do equipamento para realização das medições em campo, aferindo suas leituras, através de blocos padrão calibrados.

Utilizar os cálculos de PMTA, de cascos para vasos de pressão, adaptando-os para tubulações.

Utilizar critérios estatísticos para identificar os trechos mais críticos, filtrando os valores encontrados nas medições de espessura.

Analisar os resultados obtidos e compará-los com valores previamente estabelecidos por normas técnicas, dando um parecer acerca da segurança na utilização dessas tubulações.

1.4 LIMITES DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seções, que apresentam um desenvolvimento teórico acerca dos princípios científicos, nos quais as tecnologias utilizadas neste se baseiam. Onde os resultados foram discutidos e explanados de maneira clara e objetivando a tomada de algumas decisões. Ao todo esse trabalho é formado por cinco seções que apresentam as seguintes divisões, onde a primeira seção já foi discutida:

Posteriormente, na seção 2, é apresentada a revisão bibliográfica, onde um conjunto de referências garante o embasamento teórico acerca do tema abordado, demonstrando como se dá o emprego de algumas normas técnicas e de alguns procedimentos necessários para realização do trabalho.

A seção 3 descreve os materiais e métodos utilizados bem como algumas particularidades do caso estudado.

Na seção 4 os resultados são apresentados de forma clara e precisa, e estão relacionados com o conteúdo apresentado na seção 2, onde são apresentadas também as discussões acerca dos valores obtidos.

A seção 5 apresenta as conclusões obtidas pelas análises dos resultados, e ainda, apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Finalizando esse trabalho as referências bibliográficas utilizadas estão descrita no final do mesmo, seguidas por apêndices que auxiliam em sua compreensão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TUBULAÇÕES

Tubos são utilizados no meio industrial para o transporte de fluidos, nas mais diversas condições de pressão e temperatura. Tubulações podem apresentar conjuntos de acessórios e ligações simples, ou sistemas mais complexos, compostos por muitas ramificações e derivações. Os diversos tubos que são utilizados no meio industrial ou não, apresentam diâmetros comerciais, processos de fabricação e materiais que seguem normas técnicas ASME (American Society for Testing and Materials), onde é importante para a instalação de um determinado projeto um levantamento de informações que caracterizem seus riscos (TELLES, 2001).

A classificação das tubulações pode auxiliar um projeto, sendo necessário entender sua finalidade, bem como o fluido que a mesma irá transportar e suas respectivas pressões e temperaturas de trabalho, variações durante o percurso do fluido do local de origem/armazenagem até o local de utilização (TELLES, 2001).

2.1.1 Classificação das tubulações quanto ao emprego

As tubulações industriais podem ser classificadas de diversas formas, sem dar uma abrangência a todos os casos, as principais classes estão demonstradas na figura 2.1.

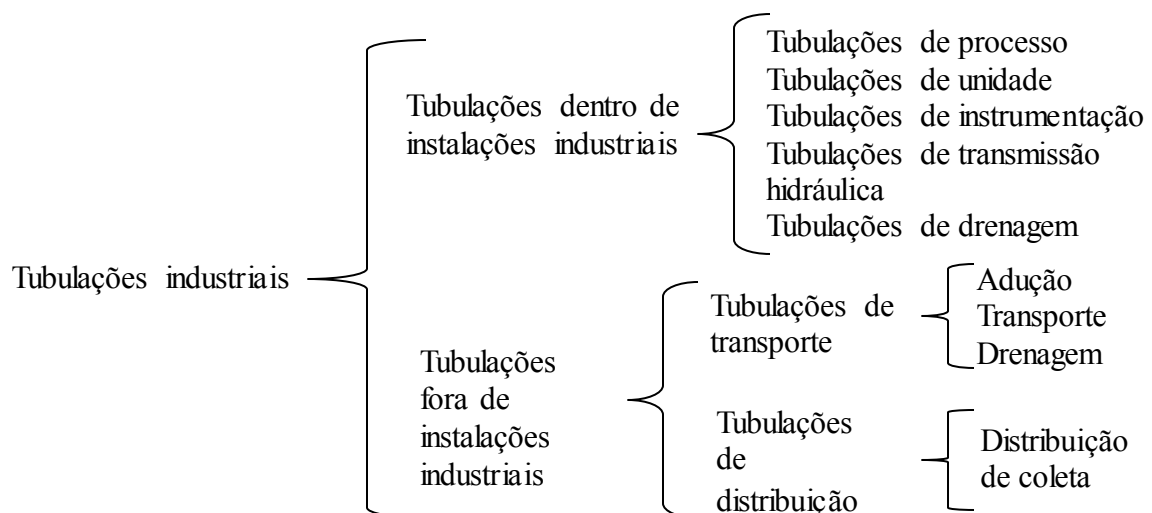


Figura 2.1. Classificação geral das tubulações.

Fonte: Telles (2001)

Na indústria a principal atividade é o processamento, armazenagem ou a distribuição de fluidos. Como esse exemplo cita-se, as tubulações de óleos em refinarias, terminais em

instalações de armazenagem ou distribuição de produtos do petróleo, tubulações de vapor em centrais termoeletricas, tubulações de produtos químicos em indústrias químicas, e etc (TELLES, 2001).

Segundo Telles (2001), as tubulações de utilidade são os fluidos auxiliares nas indústrias, sendo que, tem como principal função o processamento, armazenagem e/ou a distribuição de fluidos, e as tubulações em geral que se dedicam a outras atividades. Essas tubulações também podem servir para outras finalidades normais ou eventuais, como: manutenção, limpeza, combate a incêndio etc. Elas são empregadas principalmente em redes de água doce, água salgada, vapor, condensado e ar comprimido, de modo geral na indústria.

Tubulações de instrumentação são aquelas em que ocorrem transmissões de sinais de ar comprimido para válvulas de controle e automáticas, elas não utilizadas no transporte de fluido (TELLES, 2001).

As tubulações de transmissão hidráulica são destinadas a líquidos sobre pressão para os comandos e servomecanismos hidráulicos, essas também não se destinam ao transporte de fluidos (TELLES, 2001).

As tubulações de drenagem têm por finalidade a condução do fluido ao destino conveniente, em seus diversos efluentes em uma instalação industrial. Elas não são incluídas nas tubulações de utilidades, porque todas as tubulações de drenagem trabalham sem pressão e com fluidos muito variados (TELLES, 2001).

Dentro do limite de uma instalação industrial, podemos distinguir dois casos gerais:

- Tubulações no interior nas áreas de trabalho ou de processamentos de fluidos (TELLES, 2001).
- Tubulações externas, isto é as linhas fora das áreas de processo, que são as tubulações em áreas de armazenagem de fluidos, tubulações de interligação entre áreas de processo e de armazenagem e etc (TELLES, 2001).

As tubulações de transporte são utilizadas no transporte de líquidos e gases a longa distância fora das instalações industriais, oleodutos, gasodutos e coletores de drenagem. Também podem ser de distribuição propriamente dito (TELLES, 2001).

2.1.2 Classificação das tubulações quanto ao fluido conduzido

As tubulações também podem ser classificadas quanto ao fluido conduzido, como mostra a figura 2.2.

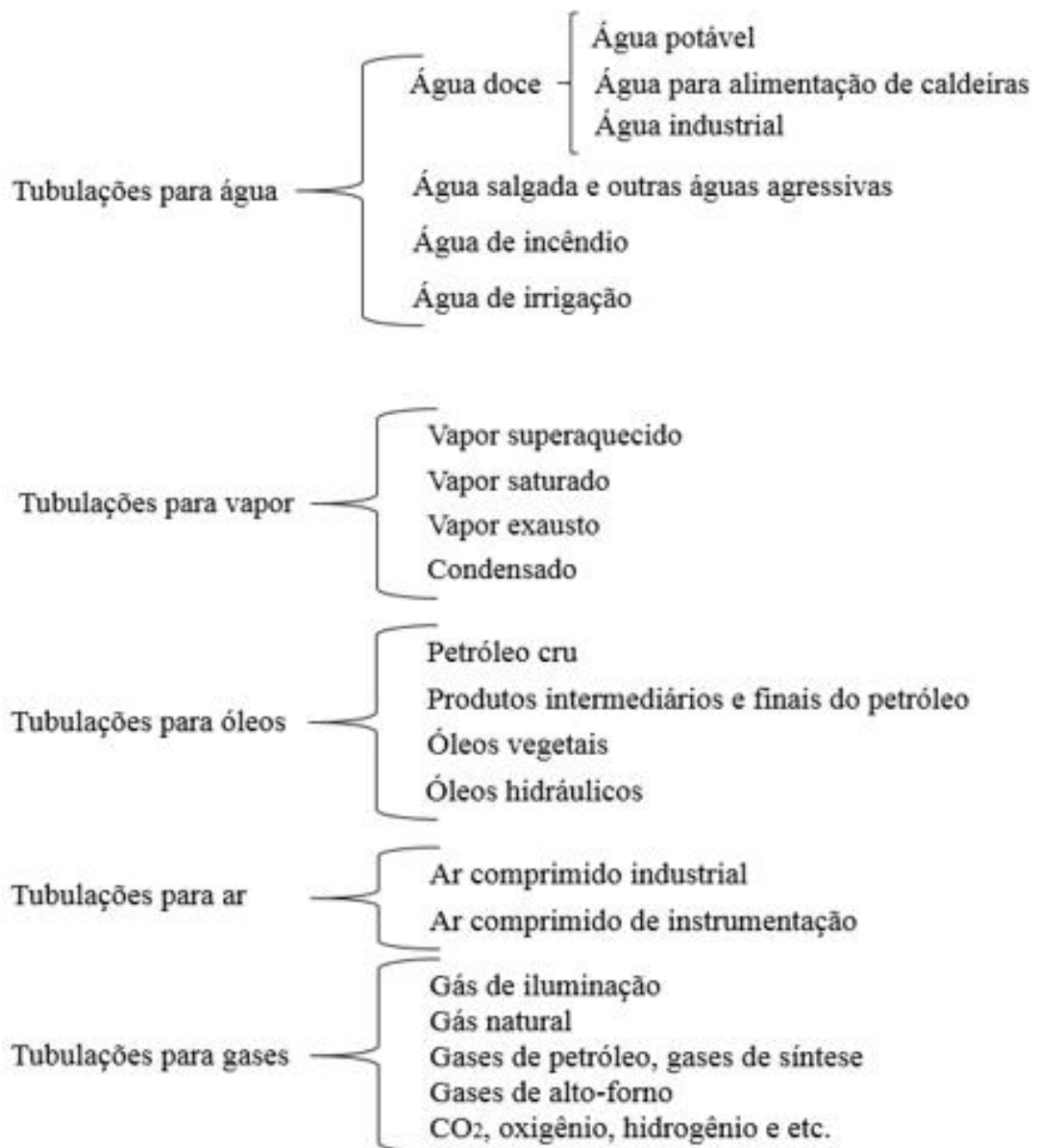


Figura 2.2. Classificação das tubulações quanto ao fluido conduzido.

Fonte: Telles (2001)

Existem outras tubulações que apresentam outras classificações quanto ao fluido transportado, que são as tubulações de esgotos e drenagens, bem como as chamadas tubulações para fluidos diversos. Essas podem transportar produtos gerais, como tintas, resinas produtos alimentícios, xaropes, bebidas, misturas para refrigerantes, produtos químicos diversos e etc (TELLES, 2001).

2.1.3 Processos de fabricação de tubos

Uma extensa variedade de materiais utilizados para a construção de tubos, onde só a

ASTM especifica centenas de materiais para diversas aplicações. A classificação dos tubos quanto ao material utilizado é realizada primeiramente destacando-se alguns grandes grupos. O grupo dos materiais metálicos onde esse pode ser dividido em ferrosos e não ferrosos, o grupo dos não metálicos que compreende os tubos formados a partir de materiais com cerâmicos e polímeros, e por fim os tubos de aço com revestimento interno (TELLES, 2001).

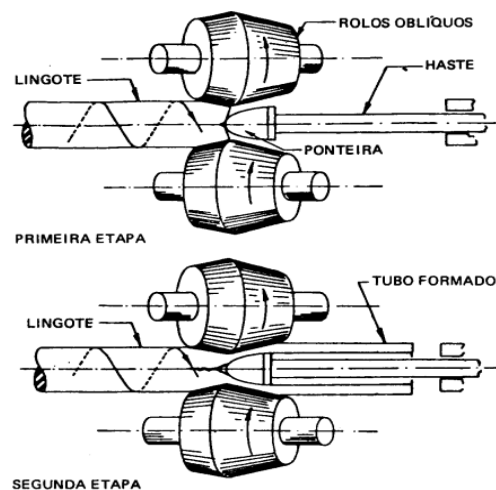
O processo de fabricação e o material selecionado para construção dos tubos estão relacionados com o seu desempenho, onde podem apresentar excelentes propriedades mecânicas e químicas, a partir de um controle adequado em seu processo de fabricação. Para especificar um determinado material é necessário utilizar uma sigla ou alfanumérica que o designe, bem como informar a classe e o grau do material, sendo que algumas vezes ainda são exigidas exigências opcionais (TELLES, 2001).

Os processos de fabricação podem dar origem a tubos com e sem costura. Para os processos que dão origem a tubos sem costura destaca-se o processo de fabricação por laminação, sendo que, os outros dois menos utilizados são a fundição e a extrusão. Já os tubos com costura são fabricados utilizando-se processos de soldagem. Os dois processos de fabricação mais utilizados são o de laminação e o de fabricação por solda, onde juntos abrangem cerca de 2/3 de todos os processos de fabricação de tubos (TELLES, 2001).

2.1.3.1 Fabricação de tubos por laminação

Dentre todos os processos de fabricação de tubos de aços sem costura, destaca-se o processo de laminação, pois esse é utilizado na confecção de tubos de aços-carbono, aços-ligas e aços inoxidáveis, desde cerca de 80 até 650 mm de diâmetro (TELLES, 2001).

Há vários processos de fabricação por laminação, porém o de maior destaque entre eles é o processo de “Mannesmann”, que tem como características: um lingote cilíndrico de aço com o diâmetro externo aproximado do tubo a ser fabricar e é aquecido acerca de 1.200°C e levado ao equipamento denominado de laminador oblíquo, este possui dois rolos de cone duplo, cujos eixos formam entre si um pequeno ângulo (figura 2.3). O lingote é colocado entre os dois rolos, que o prensam fortemente, e lhe imprimem, ao mesmo tempo, um movimento helicoidal de rotação e translação. O lingote é pressionado contra uma ponteira cônica que se encontra entre os rolos. Este por consequência abre um furo no centro do lingote, transformando em tubos, e também alisa a superfície interna recém formada (TELLES, 2001).



Laminador Oblíquo (Mannesmann)

Figura 2.3. Fabricação de tubos por laminação.

Fonte: Telles (2001)

Durante o processo, a ponteira é então retirada, e o tubo é levado a um segundo laminador oblíquo, com uma ponteira de diâmetro um pouco maior, que afina as paredes do mesmo, aumentando o comprimento e ajustando consideravelmente o diâmetro externo. Depois desses procedimentos nos laminadores, o tubo fica com características de empenação, porém são levados para máquinas desempenadoras de rolos. Finalmente passam pela operação de calibragem dos diâmetros internos e externos e alisamentos das superfícies (TELLES, 2001). Nesse processo são feitas várias passagens em laminadores com mandris e em laminadores calibrados, figura 2.4.

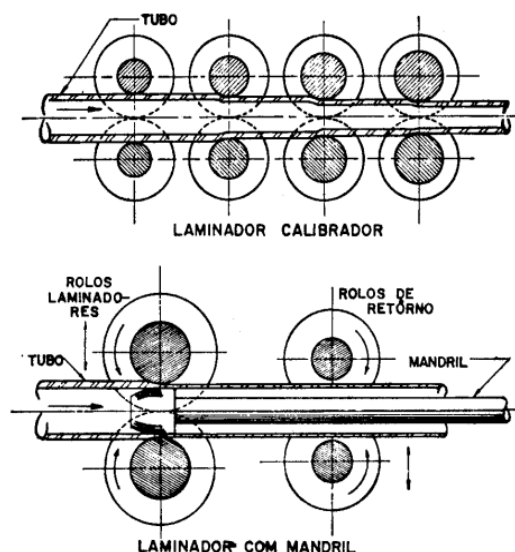


Figura 2.4. Fabricação de tubos por laminação – Laminadores de acabamentos.

Fonte: Telles (2001)

2.1.3.2 *Fabricação de tubos com costura*

Para a fabricação de tubos com costuras, destacam-se a confecção de tubos de aço carbono, aço ligas, aço inoxidáveis e ferro forjado, em todas as faixas de diâmetro na indústria (TELLES, 2001).

Dentro desse processo de fabricação de costura soldada, existem dois modos processamento que são: longitudinal e helicoidal. Haja vista, que o primeiro é utilizado na maioria dos casos. A soldagem é sempre feita automaticamente, visto que, existem vários processos de soldagem, porém o mais empregado é a soldagem por arco submerso, e por resistência elétrica, sem adição de metal (TELLES, 2001).

Na soldagem de tubos longitudinais, destacam-se os materiais para as suas confecções, que pode ser uma bobina de chapa enrolada, ou chapadas planas. Na fabricação de tubos de pequeno e médio diâmetro, (cerca de 450 mm aproximadamente), são empregadas bobinas para a fabricação contínua de tubos, e chapas planas para confecção de tubos de médio e grande diâmetro (TELLES, 2001).

Para a fabricação contínua a partir de uma bobina, a circunferência dos tubos é a largura da bobina, que deverá possuir as dimensões exatas, depois do desbobinamento e aplainação. Esses, por consequência, são formados por rolos conformadores que comprimem a chapa sucessivamente em duas direções, figura 2.5. A soldagem empregada neste procedimento é feita por resistência elétrica e depois os tubos são submetidos a tratamentos térmicos, passando posteriormente, por rolos de calandragem e despeno (TELLES, 2001).

O processo de conformação de chapas pode ser feito em prensas e/ou calandras, com diâmetros não superiores a 760 mm. Para diâmetros maiores, a chapa é calandrada no sentido transversal, porque a maior largura comercial de chapas de aço é de 2,44 mm. A soldagem é feita, com a exigência da norma ASME B.31 (TELLES, 2001), que é a norma norte americana para tubulações pressurizadas, utilizada nas indústrias do petróleo e gás e nas indústrias químicas e petroquímicas. Essa norma exige uma soldagem de topo, como mostra a figura 2.6, com no mínimo dois passes, e feita interna e externamente. Para a finalização do processo de fabricação, os tubos são submetidos a um processo de expansão a frio.

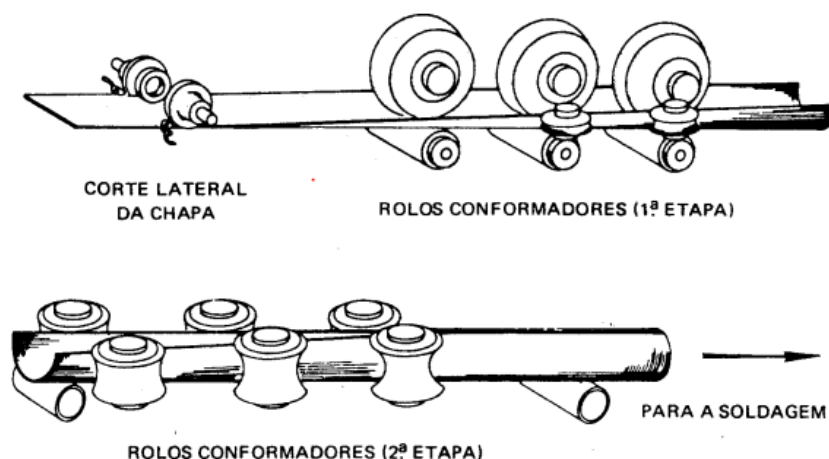


Figura 2.5. Fabricação de tubos a partir de bobinas de chapa.
 Fonte: Telles (2001)

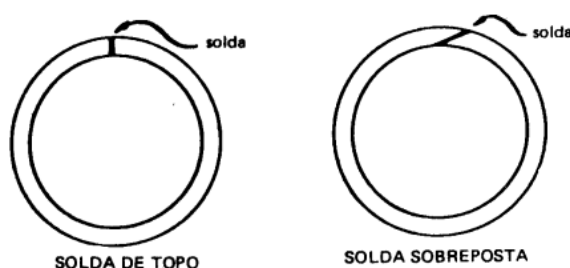


Figura 2.6. Tipos de solda em tubos.
 Fonte: Telles (2001)

Para o tipo de solda helicoidal a fabricação é sempre contínua, e a matéria prima é a bobina, independentemente do diâmetro do tubo, em decorrência disso, o processo de fabricação ocorre sem limitação de diâmetro, figura 2.7. A bobina é enrolada sobre si mesma, sendo a largura da bobina igual à distância entre duas espiras sucessivas de solda. O processo de soldagem pode ser feito por arco submerso ou por resistência elétrica (TELLES, 2001).

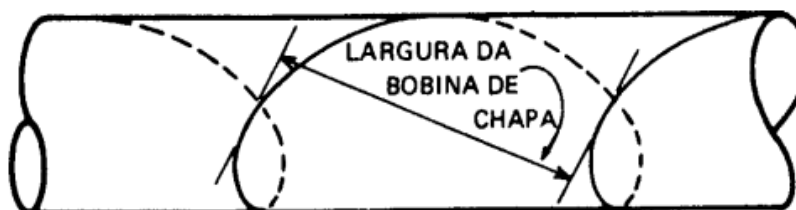


Figura 2.7 Tubo com solda helicoidal.
 Fonte: Telles (2001)

Os tubos com costura, independentemente, do processo de fabricação e do diâmetro, são submetidos a um teste hidrostático de pressão interna, e a solda é inspecionada por radiografia ou por ultrassom.

Portanto é interessante justificar, que os tubos com costura não são necessariamente de qualidade inferior do que os sem costura, isto é, existem tubos com costura de alta qualidade. A qualidade de um tubo, com ou sem costura, é determinada principalmente pelas maiores exigências da especificação do material com o qual o tubo é confeccionado (TELLES, 2001).

2.1.4 Materiais para tubos de aços inoxidáveis

Os tubos de aços inoxidáveis apresentam valores comerciais bem mais elevados que os tubos de aço carbono, os projetos de instalação, soldagem e conformação, são bem mais dificultosos e por consequência bem mais caros (TELLES, 2001).

As principais classes de tubos de aços inoxidáveis são divididas em austeníticos, que apresentam faixas de composição química de 16 a 26% de Cr e 6 a 22% de Ni, e os ferríticos (magnéticos) variam sua composição em cromo de 12 a 30%, onde os austeníticos apresentam uma maior faixa de utilização, devido demonstrarem excelente desempenho quando expostos a condições severas de oxidação e uma elevada resistência a fluência. Diante desse desempenho as temperaturas limites de utilização dos aços inoxidáveis austeníticos apresentam valores mais elevados, com exceção dos tipos 304 L e 316 L, onde a resistência mecânica desses aços é inferior, devido ao seu menor teor de carbono, o que limita sua temperatura de utilização (TELLES, 2001).

Segundo a tabela 2.1, é possível observar o maior valor dos limites de temperatura de utilização para os aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 2.1. Faixa de utilização de alguns aços inoxidáveis.

Tipos (denominação do AISI)	Estrutura metalúrgica	Elementos de liga (%)			Limites de temperatura (°C)	
		Cr	Ni	Outros	Máxima	Mínima
304	Austenítica	18	8		600	– 255
304 L	Austenítica	18	8	C (máx.): 0,03	400	sem limite
310	Austenítica	25	20		600	– 195
316	Austenítica	16	10	Mo: 2	650	– 195
316 L	Austenítica	16	10	Mo: 2; C (máx.): 0,03	400	– 195
321	Austenítica	17	9	Ti: 0,5	600	– 195
347	Austenítica	17	9	Nb + Ta: 1	600	– 255
405	Ferrítica	12	—	Al: 0,2	470	Zero

Fonte: Telles(2001)

A sensitização ocorre na maioria dos aços inoxidáveis austeníticos, que é um fenômeno onde ocorre a precipitação de carbonetos de Cr, sendo que as faixas de temperaturas mais vulneráveis ocorrem entre 450 e 850°C. Quando esses aços encontram-se sensitizados pode ocorrer um mecanismo de corrosão denominado intergranular, tal mecanismo ocorre de

maneira crítica na presença de meios ácidos. Os casos mais comuns para que ocorra a sensibilização dos aços inoxidáveis austeníticos são: os processos de soldagem, trabalhos em temperaturas elevadas e tratamentos térmicos. Os aços inoxidáveis podem ser estabilizados com a adição de elementos de liga como Ti e Nb, ou ainda pela redução do teor de carbono como ocorre com os tipos 304 L e 316 L, objetivado dessa forma evitar o processo de sensibilização (TELLES, 2001).

Outros mecanismos de corrosão bastante comuns são o por pites e o sob tensão, que podem causar uma degradação intensa do material, as condições ideais para que esse mecanismo se propague é a presença de quantidades, mesmo muito pequenas dos íons cloro em geral (TELLES, 2001).

Existe uma elevada gama de aplicação para os aços inoxidáveis austeníticos, principalmente em temperaturas elevadas, na indústria alimentícia onde existe a exigência de produtos livres de contaminação, escoamento de alguns gases como o hidrogênio e serviços criogênicos. Já os ferríticos são mais baratos, e menos sujeitos aos mecanismos de corrosão por pite e sob tensão, porém, apresentam menores temperaturas de utilização e são de difícil soldabilidade (TELLES, 2001).

2.1.5 Ligações das tubulações

Para os sistemas de tubulações, existem diferentes formas para a conexão de tubos, e não só entre esses, como também, para a ligação de tubos nas válvulas, em equipamentos (tanques, bombas, vasos etc.). Sendo que, os principais meios de ligação desses tubos são: ligações rosqueadas, ligações soldadas, ligações flangeadas, ligações de ponta e bolsa e outros sistemas de ligações, como exemplo, ligação de compressão, ligações patenteadas e etc (RIBEIRO, 2011).

A escolha do meio de ligação dos tubos que será utilizada para determinado processo terá que levar em conta algumas considerações, entre as quais se cita: grau de segurança exigida, diâmetro da tubulação, custo, pressão e temperatura de trabalho, fluido transportado, necessidade ou não de desmontagem, finalidade e localização da tubulação, existência ou não de revestimento interno nos tubos e etc (RIBEIRO, 2011).

Pode ser dar ênfase aos dois principais meios de ligações entre tubos:

2.1.5.1 Ligações rosqueadas

Segundo Ribeiro (2011), as ligações rosqueadas são muito utilizadas em tubos de pequeno diâmetro, pois essa operação geralmente significa um meio acessível e mais barato. Para procedimentos de instalações, desmontagem, ou substituição de alguma parte da tubulação, esse meio de ligação apresenta-se vantajoso, em relações as uniões soldadas.

Para ligar as varas dos tubos, por exemplo, podem ser utilizadas ligações rosqueadas de dois tipos de peças, luvas e uniões. Onde as roscas garantem a interferência necessária para que a vedação seja completa. Quando se desejam ligações desmontáveis empregam-se as uniões, pois sem estas, os rosqueamentos seriam impossíveis. Visto que, a união entre as duas é alcançada por meio de uma gaxeta (TELLES, 2001), figura 2.8.

Nota-se que o rosqueamento fragiliza a parede da tubulação, por essa consideração, sempre é empregado nos tubos de parede espessa (TELLES, 2001).

Para vários tipos de materiais os rosqueamentos são as únicas ligações utilizadas, porque as ligações soldadas nesses materiais poderiam apresentar defeitos, tornando-se inviáveis. Exemplos desses materiais, tubos galvanizados, tubos de aço liga e ferro forjado. Para tubos de aços inoxidáveis e metais não ferrosos, a ligação rosqueadas é muito difícil de ser realizada, haja vista, que os tubos são geralmente de paredes finas. Essas ligações são utilizadas também em materiais plásticos, aço carbono, ferro fundido, aço liga (TELLES, 2001).

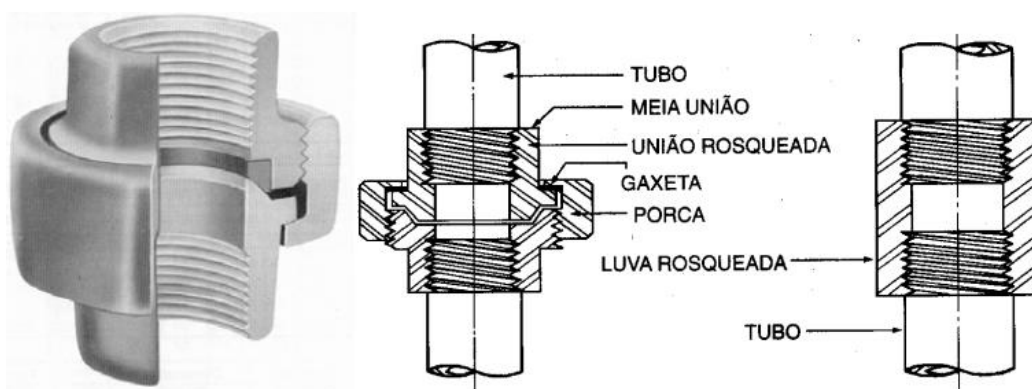


Figura 2.8. Ligações rosqueadas de tubos.

Fonte: Telles(2001)

As normas que regulamentam esse tipo de ligação rosqueadas de tubos são as ASME. B. 1.20.1 e a API.5.B (rosca NPT), e a norma ASME. B.31.3, americanas. Essas normas de projeto recomendam que as ligações não fiquem expostas a grandes esforços e nem a existência de momentos de desatarraxamento das roscas (TELLES, 2001).

Para fluidos inflamáveis, tóxicos e outros, a norma recomenda que seja utilizada solda de vedação nas rocas, e também que as roscas dos tubos sejam cônicas (TELLES, 2001).

As ligações rosqueadas são poucas utilizadas em tubulações que trabalham com fluidos de grande periculosidade, exceto as citadas acima, pois essas ligações são geralmente pontos fracos das tubulações (TELLES, 2001).

2.1.5.2 Ligações soldadas

Em estabelecimentos industriais, as ligações soldadas são as mais utilizadas nas tubulações, pois apresentam diversos benefícios, por exemplo, boa aparência, facilidade na aplicação de pinturas e isolamento térmico, boa resistência mecânica, e uma das suas principais características, que a é pouca e/ou inexistência de manutenção. Em contrapartida, exige mão de obra qualificada e a desmontagem é mais dificultosa. As principais formas de ligação de tubulações por soldagem são as de topo e encaixe (TELLES, 2001), como demonstrado na figura 2.9.

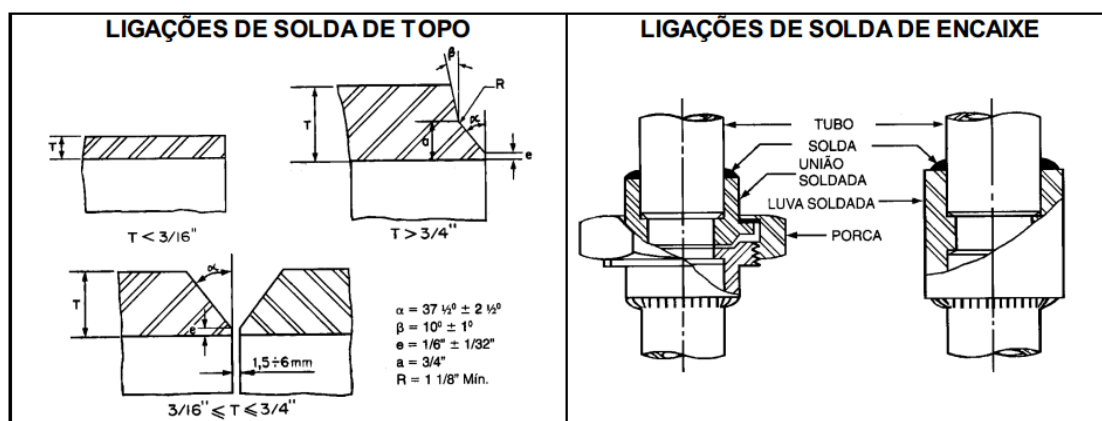


Figura 2.9. Tipos de ligações de solda.

Fonte: Telles(2001)

A norma de projeto que regulamenta esse tipo de ligação é a ASME.B.31.3, aonde essa faz várias recomendações sobre a soldagem em tubulações, dentre elas, para o tratamento térmico, teste de inspeção, aceitação e etc. Faz referência também na utilização dessas ligações sem restrições quanto ao serviço (TELLES, 2001).

É necessário destacar a existência de outros tipos de ligações nas tubulações além das ligações correntes de emenda entre dois tubos, ligação entre um tubo e uma conexão (joelho, tê, curva, redução e etc.) e entre outras conexões, ligações extremas das tubulações, onde está se liga a um equipamento e/ou máquinas (bomba, vasos e etc.) ou com peças desmontáveis (válvulas e etc.) da própria tubulação (TELLES, 2001).

Para as duas primeiras classes, respectivamente, o que se busca é o baixo custo e facilidade de execução, além da segurança contra vazamentos. Em contrapartida, a última classe objetiva a facilidade da desmontagem, proporcionando tornar acessíveis os trabalhos de manutenção. Percebe-se que toda ligação desmontável é sempre bem mais cara e bem menos segura contra vazamentos do que as não desmontáveis. As ligações de todas as classes devem apresentar as mesmas propriedades comumente, material, diâmetro e espessura do tubo, para o determinado serviço executado (TELLES, 2001).

2.1.6 Válvulas

As válvulas apresentam a maior importância dentre todos os outros componentes utilizados nas tubulações, servem para estabelecer o fluxo, bloquear, ou mesmo alterar algumas propriedades do seu escoamento. A ausência de válvulas inutilizaria o transporte de fluidos a partir de tubulações. Ao se projetar uma tubulação deve-se atentar para a utilização do menor número de possível de válvulas, visto que, seu uso representa um custo considerável para instalações de processo (TELLES, 2001).

Ao se selecionar uma válvula é necessário um estudo levando-se em conta o local a ser instalado, para que sua manutenção, ou até mesmo, operação (no caso de ser de operação manual) não apresente riscos ou impossibilidades de acesso. A seleção de uma válvula também estabelece valores para suas condições de trabalho, bem como, a temperatura na qual a mesma irá trabalhar, valores de pressão, e ainda outros critérios como características dos fluidos. É importante que os materiais construtivos de uma válvula apresentem bom desempenho quando expostos as condições de operação (TELLES, 2001).

Segundo Telles (2001), podem ser destacados os tipos mais importantes de válvulas: de bloqueio, de regulação, válvulas que permitem o fluxo em um só sentido, válvulas que controlam a pressão de montante e válvulas que controlam a pressão de jusante.

As válvulas de bloqueio, por exemplo, servem para estabelecer o fluxo e funcionam completamente abertas ou completamente fechadas, os principais tipos de válvulas de bloqueio são as válvulas de esfera, de macho, de gaveta e de comporta (TELLES, 2001). A figura 2.10 demonstra os principais componentes de uma válvula de esfera.

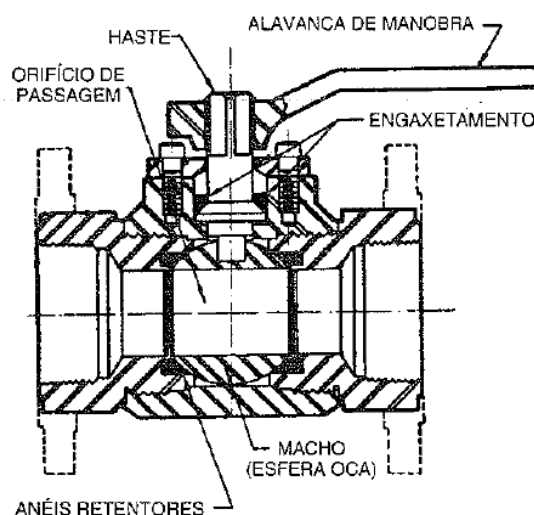


Figura 2.10. Componentes das válvulas de esfera.

Fonte: Telles(2001)

O macho dessa válvula tem formato de esfera, esse gira sobre anéis retentores interrompendo ou liberando o fluxo, sendo esse procedimento realizado pelo acionamento manual da alavanca. Apresentam menores tamanhos e pesos que outras válvulas de bloqueio, menor perda de carga que as válvulas de gaveta, e o material resiliente dos anéis retentores garantem uma excelente vedação (TELLES, 2001).

As válvulas de regulação têm como finalidade em seu emprego controlar o fluxo, seu diâmetro muitas vezes é menor que o da tubulação, devido seu custo mais elevado, causando uma maior perda de carga devido à redução na seção de escoamento. Os principais tipos de válvulas de regulação são: de globo, de controle, de agulha, de borboleta e de diafragma. Os dois últimos tipos citados também podem se comportar algumas vezes como válvulas de bloqueio (TELLES, 2001).

2.1.7 Tubulações de ar comprimido

Segundo Telles (2001), ar comprimido é considerado um fluido de baixa corrosão, onde os materiais utilizados são selecionados de acordo com a pressão de trabalho e o diâmetro dos tubos que a compõe. As informações contidas na Tabela 2.2, apresentam orientações para seleção do material de tubos e válvulas a ser utilizados, de acordo com o seu respectivo diâmetros e pressão de trabalho.

Tabela 2.2. Principais materiais para tubulações de ar comprimido.

Tubulações de baixa pressão (até 0,7 Mpa)	Tubulações de alta pressão (mais de 0,7 Mpa)
— Tubos, até 4" de diâmetro: Aço carbono Galvanizado (ASTM A120), com extremidade rosqueadas. — Válvulas, até 4" carcaça de bronze, com mecanismo interno de bronze, extremidades rosqueadas. — Tubos, diâmetro 2", ou maior: aço carbono (ASTM A120 ou A134), com margem para corrosão de 1,2 mm, com extremidades de solda de topo. — Válvulas, diâmetros de 3", ou maior: Carcaça de ferro fundido, com mecanismo interno de bronze, extremidades com flanges de face plana.	— Tubos: Aço carbono (ASTM A53 ou API5L), com margem para corrosão de 1,2 mm, com extremidades lisas em diâmetro até 1 1/2", e para soldas de top em diâmetros maiores. — Válvulas: Carcaça de aço carbono forjado com extremidades para solda de encaixe, para diâmetro até 1 1/2", e de aço carbono fundido, com extremidades com flanges de face com ressalto, para diâmetros maiores; em todos os casos o mecanismo interno será de aço inoxidável tipo 410.

Fonte: Telles (2001).

Os flanges devem ser de aço carbono, onde devem possuir face de ressalto. As juntas poderão ser de borracha natural para temperaturas e pressões não superiores a 60°C e 1 MPa respectivamente, caso esses valores sejam ultrapassados deve-se utilizar papelão hidráulico (TELLES, 2001).

As tubulações de ar comprimido estão à mercê de um problema sempre recorrente para esse tipo de transporte de fluido, que se configura devido á condensação da umidade presente no ar comprimido, sendo necessária a instalação de separadores de água nos pontos baixos dessas tubulações, geralmente antes das válvulas de bloqueio e nas extremidades das linhas, onde a água que se condensa deve correr por gravidade facilitando assim sua retirada da linha (TELLES, 2001).

A figura 2.11 demonstra um separador de condensado, que está acoplado a um trocador de calor resfriado a água, e na parte inferior está o sistema de dreno.

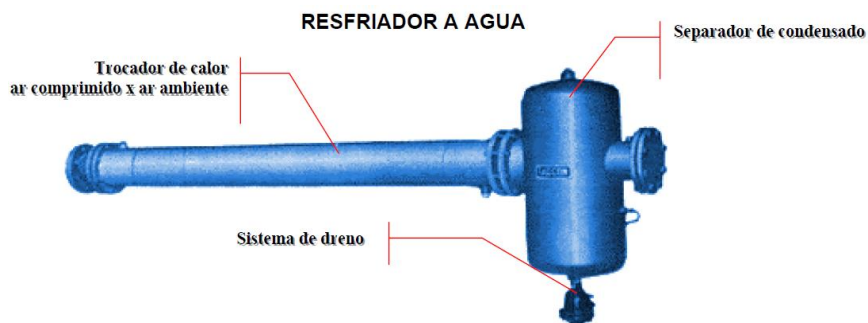


Figura 2.11. Sistema de retirada de umidade.

Fonte: Fargon (2006)

É essencial manter o ar que circula no interior dessas tubulações limpo e livre de poeiras e outras impurezas que possam danificar os equipamentos alimentados por essas. Óleos e graxas deve ser rigorosamente mantidos longe do contato com o ar comprimido, pois ao reagirem com o gás oxigênio, que se encontra comprimido no interior das tubulações, podem dar origem a explosões (TELLES, 2001). Para evitar a contaminação do ar nessas situações utilizam-se filtros. Alguns desses filtros são compostos por materiais sinterizados (vidro, inox, polietileno, bronze e outros) como demonstra a figura 2.12.



Figura 2.12. Filtros com materiais sinterizados.

Fonte: Fargon (2006)

Vários outros materiais podem constituir filtros utilizados nas tubulações de ar comprimido, como os chamados elementos esterilizantes (teflon, nylon, polipropileno e outros), existem também filtros de carvão ativo utilizados em alguns casos para eliminação de odores (TELLES, 2001).

As aplicações mais comuns para as tubulações de ar comprimido são a de transmissão de sinais, seja para instrumentos automáticos ou para válvulas de controle. Geralmente para essas aplicações as pressões utilizadas não apresentam valores muito elevados, permitindo

aplicações de materiais para sua construção que sejam capazes de suportar esses valores de pressão, como: tubos de alumínio, latão e alguns materiais plásticos (TELLES, 2001).

2.1.8 NR 13 – Tubulações

Foi anexada à norma NR 13 a parte acerca das tubulações e/ou sistemas de tubulações, pela Portaria MTE n.º 594, de 28 de abril de 2014.

Acerca das disposições gerais que a NR 13 aborda sobre as tubulações, estabelece que as empresas possuam um programa e um plano de inspeção que considere condições e premissas: os fluídos transportados, pressão de trabalho, temperatura de trabalho, os mecanismos de danos previsíveis, as consequências para os trabalhadores, instalações e meio ambientes trazidos por possíveis falhas nas tubulações.

Esta NR recomenda que os sistemas de tubulações devam possuir dispositivos de segurança conforme os critérios do código de projeto utilizado. Contudo, as tubulações também devem possuir um indicador de pressão de operação, conforme definido no projeto de processo de instrumentação.

Nota-se também, que a NR regulamenta que todo estabelecimento que possuem tubulações, sistemas de tubulações ou linhas deve ser documentado e atualizado periodicamente. Com os seguintes documentos: especificações aplicáveis às tubulações ou sistemas necessários ao planejamento e execução de sua inspeção, fluxograma de engenharia com a identificação da linha e seus acessórios e relatórios de inspeção. Na ocorrência da inexistência ou extravio dos mesmos, esta NR recomenda que os mesmos sejam refeitos pelo empregador. Esta documentação deve sempre estar disponível para fiscalização da autoridade competente, e também para a consulta dos operadores, pessoal de manutenção, de inspeção e etc. Sempre que for solicitado.

É interessante ressaltar, que essa NR dá ênfase em segurança na operação de tubulações, em que consiste que os dispositivos de indicação de pressão da tubulação devem ser mantidos em ótimas condições operacionais. Concomitantemente, a de vapor e seus acessórios também devem estar em boas condições operacionais, de acordo com um plano de manutenção elaborado pelo estabelecimento recorrente.

A NR 13 também faz referência às inspeções periódicas e de segurança nas tubulações. Na qual essa deve atender os prazos máximos de inspeção interna do vaso mais crítico a ela interligado. Esses prazos não podem exceder os estabelecidos em seu programa, considerando

as tolerâncias permitidas. Para ser realizada uma avaliação estrutural utilizam-se normas e códigos aplicáveis em exames e análises nas quais se enquadram as tubulações.

Podem ser citadas algumas ocasiões em que as inspeções devem ser realizadas, como nos seguintes casos: sempre que a tubulação for danificada por acidente ou outra ocorrência que comprometa a segurança dos trabalhadores, quando a tubulação for submetida a reparos provisórios ou alterações significativas que sejam capazes de alterar sua capacidade de contenção do fluido, antes da tubulação ser colocada em funcionamento permanecendo inativa por mais de 24 meses.

2.2 MÉTODO DE ENSAIO POR ULTRASSOM

Esse método de ensaio foi expandido para escala industrial a partir de 1945, principalmente devido a necessidade de atender projetos que exigissem um alto grau de responsabilidade. Tal procedimento consiste em um tipo de ensaio denominado de não destrutivo, onde não comprometem a funcionalidade das peças ensaiadas (ANDREUCCI, 2002).

O ultrassom é caracterizado por ondas sonoras que vibram com frequências acima de 20 kHz, as ondas ultrassônicas não atingem o campo de frequência audível como mostra a figura 2.13 (ANDREUCCI, 2002).

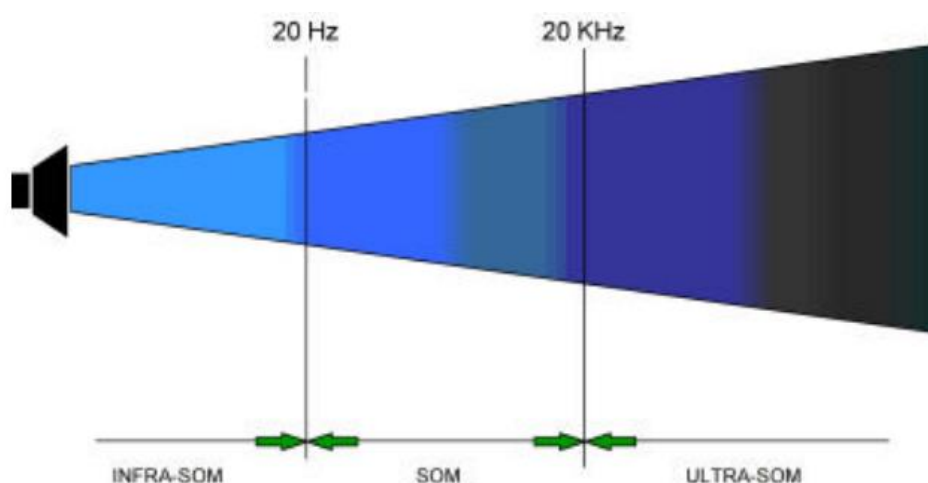


Figura 2.13. Campo de audibilidade das vibrações mecânicas.
Fonte: Andreucci (2002)

Os métodos de ensaio por ultrassom tornam-se possíveis graças ao fenômeno que ocorre com as ondas sonoras, quando essas estão se propagando em um meio e colidem com as paredes do mesmo ou encontram algum obstáculo/descontinuidade, elas podem refletir ou mesmo reverberar. O método mais comum de geração de ondas ultrassônicas para ensaios mecânicos, é

o chamado efeito piezoelétrico, que ocorre devido à capacidade de alguns materiais converterem os sinais elétricos do equipamento, em ondas sonoras, sendo que esse processo ocorre no cabeçote (transdutor) (ANDREUCCI, 2002). A figura 2.14, ilustra de maneira clara uma alteração detectada pelo equipamento quando uma descontinuidade é encontrada durante um ensaio.

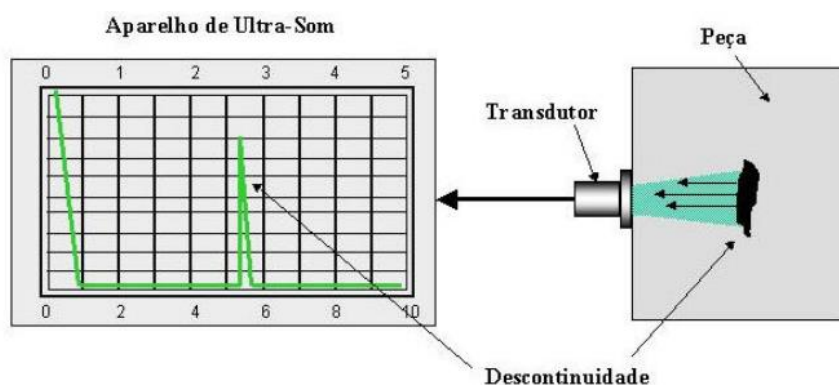


Figura 2.14. Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom.

Fonte: Andreucci (2002)

Segundo Andreucci (2002), o campo de aplicações dos métodos de ensaio por ultrassom é bastante abrangente no meio industrial e dentre outros. Não sendo apenas utilizado para verificar descontinuidades, outra aplicação bastante útil é a capacidade que esse ensaio permite para se obter de maneira rápida e precisa medições em diversas peças de materiais e tamanhos diferentes, como medições de espessuras de chapas e tubulações. A figura 2.15 demonstra um exemplo de medição de espessura em tubos, através de um equipamento portátil e compacto.



Figura 2.15. Medição de espessura em um tubo.

Fonte: Andreucci (2002)

A mão de obra deve ser bem especializada, conhecer as propriedades acústicas das ondas, como, velocidade, impedância acústica, formas e comprimentos de ondas e etc. Os

profissionais qualificados para trabalhar com esse tipo de ensaio devem seguir normas técnicas específicas para o mesmo (ANDREUCCI, 2002).

Os principais métodos de ensaio ou técnicas utilizados nos ensaios por ultrassom são a técnica de pulso-eco e a técnica da transparência. A primeira é uma técnica onde é utilizado somente um transdutor, que é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material. Já na técnica da transparência os transdutores são utilizados em forma de pares, onde um transmite as ondas ultrassônicas e o outro recebe (ANDREUCCI, 2002). A figura 2.16 demonstra o princípio básico dessas duas técnicas.

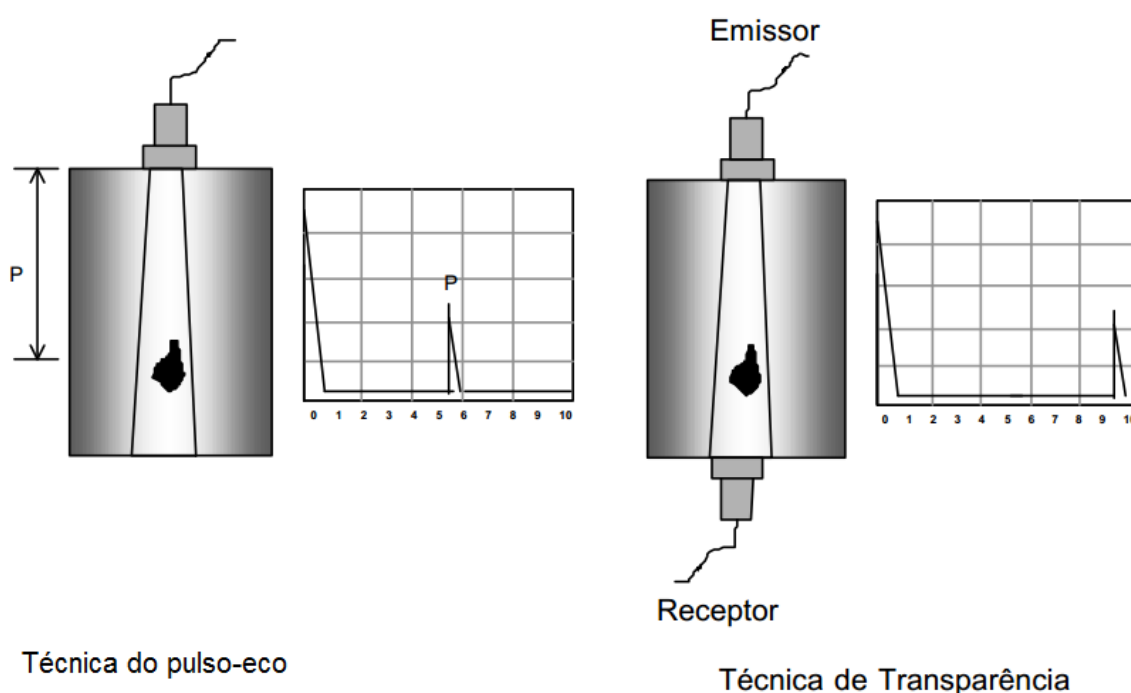


Figura 2.16. Técnicas de ensaio por ultrassom.

Fonte: Adaptado de Andreucci(2002)

O ensaio de materiais por ultrassom apresenta muitas vantagens com relação a outros métodos, tais como, alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, os processos intermediários para interpretação dos resultados são praticamente inexistentes (caso de radiografias ou gamografias que exigem revelação do filme), dispensa planos especiais de segurança ao contrário dos ensaios que utilizam radiações, permite além da detecção de descontinuidades sua localização espacial ao revelar sua profundidade (ANDREUCCI, 2002).

Por outro lado, possui algumas limitações, que exigem uma atenção especial antes de uma eventual seleção do método de ensaio por ultrassom, como por exemplo: o elevado custo de aquisição dos equipamentos, a exigência de grande conhecimento teórico por parte dos técnicos e assistentes executores dos ensaios, alguns ensaios apresentam um grau de dificuldade

elevado, que é o caso de algumas inspeções de solda, também pode ser ineficaz para espessuras muito finas de chapas ou outras peças (ANDREUCCI, 2002).

2.3 VASOS DE PRESSÃO

Vasos de pressão são reservatórios que contêm fluídos, líquidos ou gases, que em geral são armazenados no seu interior. Eles devem ser projetados para resistir com segurança a pressões internas e externas. De uso significativo, os vasos de pressão constituem um conjunto importante de equipamentos que abrangem os mais variados usos. O projeto e a construção de vasos de pressão envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, sendo considerados equipamentos de grande periculosidade. Podem ser de paredes finas e de paredes espessas (NOGUEIRA, 2013).

Segundo Telles (2007), são utilizados em muitos processos dentro da indústria, praticamente todo produto ou material passa por esta etapa na sua confecção durante o processo de fabricação. Eles são submetidos a utilizações severas e contínuas sem parada diária para manutenção, onde uma eventual falha ou necessidade de parada não programada acarreta em prejuízos significativos para as empresas, além de trabalhar muitas vezes com fluídos, tóxicos ou inflamáveis, por esses e outros motivos é essencial que a fabricação dos vasos de pressão siga criteriosamente as normas e teste estabelecidos, além das inspeções periódicas previstas conforme a norma brasileira NR-13 que estabelece os requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão e suas tubulações de interligação nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores. A figura 2.17 demonstra um vaso de pressão sendo provavelmente transportado para o seu local de trabalho.



Figura 2.17 Tanque de armazenamento.

Fonte: Mildred B. Hecke (2010)

Como tubulações apresentam formato geométrico cilíndrico, o cálculo estabelecido para sua avaliação estrutural é o mesmo utilizado para cascos de vasos de pressão de formatos cilíndricos, onde se verifica que as tensões se distribuem do mesmo modo pela sua parede circular. Em decorrência dessas características, na NR 13 recomenda que seja utilizado o mesmo procedimento matemático dos vasos de pressão para a avaliação estrutural das tubulações.

2.3.1 Código ASME, Seção VIII, Divisão 1

Em virtude, do que já foi mencionado anteriormente, este é o código recomendado pela NR 13, para a avaliação estrutural de tubulações, no qual esboça o procedimento de cálculo para a identificação da PMTA (pressão máxima de trabalho admissível), utilizado para quantificação da região que está sujeita ao maior processo de corrosão no sistema de tubulações.

Este código é o de maior aplicação no Brasil. Estabelece regras apenas para dimensionamento dos componentes principais (casco, tampos, reduções, flanges bocais e reforços), submetidos a pressão interna ou externa para vasos de pressão. Informa que outros carregamentos, como cargas de vento e sísmica, peso próprio e do conteúdo, esforços localizados em suportes soldados no equipamento ou em bocais, cargas cíclicas devidas a flutuações de pressão e temperatura, gradientes e expansões térmicas, devem ser consideradas, porém não estabelece metodologia para esta avaliação.

Este código é limitado a pressões interna, máxima de 20685 e mínima de 103 kPa, ou pressão externa máxima de 103 kPa. Tem como critério de projeto a teoria da “máxima tensão de ruptura”. Apresenta critérios e tabelas para obtenção de tensões admissíveis de tração e curvas para as tensões admissíveis de compressão, na Seção II desse código.

2.3.1.1 Cálculo de cascos cilíndricos para pressão interna

O Código distingue entre os cascos cilíndricos de pequenas e grandes espessuras, denominados de “grandes espessuras” os cascos em que se tenha: $e > 1/2 R$, ou $P > 0,385 SE$.

- a) *Cascos cilíndricos de pequena espessura* – para esses cascos, a espessura mínima necessária deve ser calculada pela eq.(1):

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6P} + C \quad (1)$$

Essa fórmula é obtida considerando a expressão teórica da tensão máxima circunferencial de membrana em um cilindro (TELLES, 2007).

S = tensão básica admissível do material, em função da temperatura de projeto do vaso.

E = Coeficiente de eficiência de solda, conforme a tabela UW – 12 do código, de acordo com tipo de solda e o grau de inspeção adotado; para cilindros sem costura $E = 1,0$. Estes coeficientes, que estão resumidos na Tabela 2.3, destinam-se a compensar a possível menor resistência na região da solda, em relação à chapa inteira da mesma espessura, devido à existência de defeitos na solda.

C = Margem para corrosão e/ou para erosão ou usinagem, não são estabelecidos valores ou critérios para essa margem, exigindo-se somente que os vasos destinados a vapor, água ou ar comprimido, com espessura calculada de parede inferior a 6 mm, tenham uma margem de no mínimo $1/6$ da espessura.

Tabela 2.3. Coeficiente de eficiência de Solda.

Tipo de Solda	Limitações	Grau de inspeção		
		Radiografia total	Radiografia parcial (por amostragem)	Não radiografada
Solda de topo, feita por ambos os lados, ou por procedimentos equivalentes, de forma a obter penetração e fusão totais. (Excluem as soldas como mata-junta permanente)	Nenhuma	1,00	0,85	0,70
Solda de topo, feita só por um lado, com mata-junta permanente.	Nenhuma	0,90	0,80	0,65
Solda de topo, feita só por um lado, sem mata-junta permanente.	Uso permitido apenas para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15 mm, e diâmetro do vaso inferior a 610 mm	-	-	0,60
Solda sobreposta, com filete duplo de altura total.	Uso permitido para soldas longitudinais em espessuras inferiores a 10 mm, e para soldas circunferenciais em espessuras inferiores a 15 mm	-	-	0,55

Fonte: Telles (2001)

A pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) dos cascos cilíndricos de pequena espessura é dada pela eq.(2):

$$PMTA = \frac{S.E.e}{R + 0,6.e} \quad (2)$$

Nesta expressão, a espessura e e a tensão admissível S terão valores correspondentes à condição para qual a PMTA estiver sendo calculada, isto é, a espessura pode ou não incluir a margem para corrosão, e a tensão admissível pode ser relativa à temperatura de projeto ou à temperatura ambiente. Essa mesma observação quanto aos valores de espessura e da tensão admissível vale também para todas as demais fórmulas de PMTA referidas para as demais partes dos vasos de pressão.

- b) *Cascos cilíndricos de grande espessura* – de acordo com o Código ASME, Seção VIII, Divisão 1, parágrafo 1-1 e 1-2, a espessura mínima dos cascos cilíndricos denominados de “grande espessura” (isto é $e > 1/2R$ ou $P > 0,385 SE$) deve ser calculada pela eq.(3).

$$e = R \left[\sqrt{\frac{SE + P}{SE - P} - 1} \right] + C \quad (3)$$

A espessura mínima em função das tensões longitudinais (quando necessário o cálculo) é dada pela fórmula apresentada na eq.(4):

$$e = R \left[\sqrt{\frac{P}{SE} + 1} - 1 \right] + C \quad (4)$$

Esta última fórmula é válida quando $e > 1/2R$ ou quando $P > 1,25 SE$.

- c) *Observações gerais* – Todos os cálculos referentes aos cascos cilíndricos aplicam-se também aos pescoços de bocais e outras partes cilíndricas dos vasos submetidas a pressão interna, inclusive tubos de feixes tubulares, serpentinas, distribuidores e etc. Todas as fórmulas dadas anteriormente podem ser empregadas em qualquer sistema de unidade, desde que seja homogêneo. Deve-se ter, portanto, todas as dimensões lineares (e , R , C etc.) expressas na mesma unidade também as pressões (P), tensão admissível (S) e módulo de elasticidade expressos na mesma unidade. Essa observação aplica-se igualmente a todas as outras fórmulas do código ASME, Seção VIII, Divisão 1.

É de suma importância ressaltar, que independentemente da espessura calculada para pressão interna, a parede do vaso deve ter no mínimo a espessura necessária para a resistência estrutural. O Código ASME, Seção VIII, Divisão 1, não fornece, entretanto, valores nem critérios de cálculos para essa espessura mínima estrutural.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da necessidade de medir a espessura das paredes das tubulações de ar comprimido do sistema de regulação de velocidade da Casa de Força 2 da UHT, foi realizado um planejamento para definir os procedimentos e métodos utilizados, visando uma inicial vistoria das tubulações, buscando encontrar situações de não conformidade, como; pequenos vazamentos oriundos de falhas nos meios de vedação das ligações, e outros fatores que poderiam oferecer riscos a integridade desse sistema.

Durante o planejamento foi definido o tipo de procedimento que seria realizado, sendo que, o ensaio por ultrassom foi selecionado por ser considerado confiável, apresentar resultados instantâneos e a sem necessidade de processos intermediários para interpretar as leituras, e principalmente porque a empresa possui o equipamento para esse tipo de ensaio, bem como profissionais capacitados em seu manuseio.

Todos os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para avaliações estrutural dessas tubulações estão presentes nos tópicos seguintes.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA TUBULAÇÃO INSPECIONADA

A tubulação a ser inspecionada é a de ar comprimido do sistema de regulação de velocidade da CF2, que é constituída por tubos e conexões de aço inoxidável AISI 304, um material de excelentes propriedades mecânicas e alta resistência a corrosão, muito aplicado em transporte de fluidos altamente corrosivos em indústrias químicas, petrolíferas, têxteis, de laticínios, frigoríficas, de tintas e etc. Os tubos que a constituem são Schedule 80 de 1", cujas dimensões originais podem ser obtidas utilizando um catálogo padronizado específico para tubos conforme as informações catalogadas na figura 3.1.

O Apêndice II no final deste trabalho apresenta o desenho isométrico das tubulações de ar comprimido identificando os trechos mais críticos.

TUBO SCHEDULE					Aços Carbono/Ligado/Inox Preto/Galvanizado	
Com ou Sem Costura						
NOMINAL POLEGADAS	EXTERNO MM	INTERNO MM	PAREDE MM	PESO KG/MT	DENOMINAÇÃO	SCHEDULE
1	33,40	26,64	3,38	2,50	STD	40
		24,30	4,55	3,23	XS	80
		20,68	6,36	4,23	*	160
		15,22	9,09	5,45	XXS	*

Figura 3.1. Dimensões para tubos Schedule.

Fonte: BRASTETUBOS, 2011

3.2 INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

O instrumento utilizado foi o DM5E-GE, conforme demonstra a figura 3.2, que tem como princípio de funcionamento o método de pulso eco, que consiste em sinais elétricos (tensão) enviadas ao transdutor, esse por sua vez converte esses sinais em ondas ultrassônicas que incidem em um material e ao refletirem chegam ao transdutor e são novamente convertidas em sinais elétricos. A medição de espessura depende principalmente do material, onde a velocidade de propagação das ondas sonoras deve ser levada em consideração para cada tipo de material.

Esse equipamento deve estar em conformidade com as Normas Brasileiras ABNT NBR 15824 e 15865 (2015), para medição e calibração respectivamente. Onde pelas mesmas esse instrumento deve ser de leitura digital direta, com resolução melhor ou igual a 0,1 mm.



Figura 3.2. Instrumento de medição DM5E-GE.

Fonte: Autoria nossa, 2015

3.3 CALIBRAÇÃO E AJUSTE

O equipamento deve ser periodicamente calibrado em um período não superior a 24 meses, sendo que os componentes que devem ser calibrados são cabeçote e blocos padrões. A periodicidade de calibração depende do sistema da frequência e condições de utilização. Qualquer reparo ou manutenção no sistema de medição implica necessidade de nova calibração, independentemente da periodicidade estabelecida.

Para realizar o ajuste utilizou-se um bloco padrão de aço carbono, com espessura de 5 à 25 mm, estando em conformidade com a norma da ABNT, que estabelece uma faixa de $\pm 25 \%$ entre a espessura da peça a ser medida e a espessura do bloco padrão para o ajuste. Para realizar

o ajuste no equipamento foi selecionado o material para aço carbono, e posteriormente verificaram-se as leituras para comparação com o bloco padrão. Todas as leituras entre 5 e 25 mm indicaram estar em conformidade com o bloco padrão demonstrado na figura 3.3. Essas medições podem ser visualizadas na tabela 3.

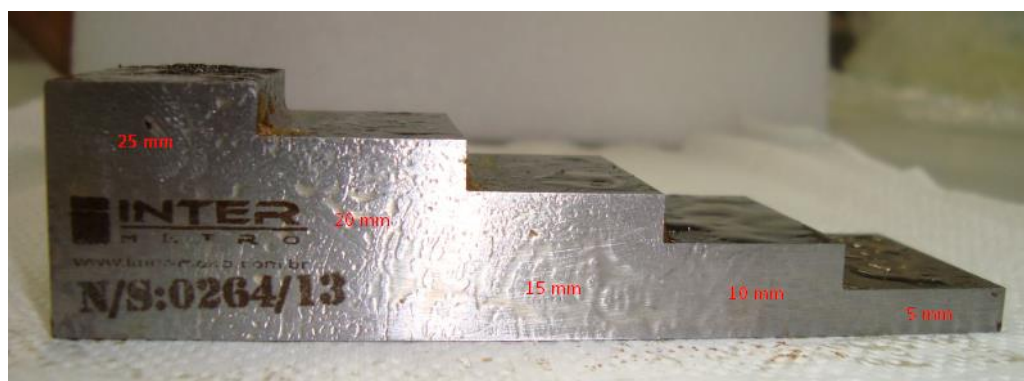


Figura 3.3. Bloco padrão para ajuste.

Fonte: Autoria nossa, 2015

Tabela 3. Medições no bloco padrão.

Dados obtidos na calibração e ajuste			
Espessura do bloco (mm)	1ª medição (mm)	2ª medição (mm)	Valor médio (mm)
5	4.98	4.97	4.975
10	10.01	10.03	10.02
15	15.04	15	15.02
20	20.08	20.07	20.075
25	25.05	25.04	25.045

Fonte: Autoria nossa, 2015

Percebe-se que as medições não diferiram mais de 0,1 mm do valor obtido na leitura do equipamento com relação as medições indicadas no bloco padrão, sendo assim, o equipamento demonstrou-se calibrado.

3.4 ACOPLANTE

O acoplante deve facilitar a transmissão das ondas ultrassônicas do cabeçote para a peça a ser medida, devendo possuir boas propriedades, aderindo facilmente à superfície e não contaminando a material. O acoplante utilizado para auxiliar nas medições foi gel SONOGLIDE ® FE, o mesmo é indicado para utilizações gerais em ensaios por ultrassom, possui um elevado tempo de secagem permitindo que o ensaio seja repetido posteriormente se necessário, além de considerado ambientalmente correto, não contendo metais pesados, surfactantes, éter glicol, nitritos, silicones, corantes ou aromatizantes. Esse produto apresenta

uma faixa temperaturas de trabalho de -51 a 121 °C. A figura 3.4 demonstra o gel SONOGLIDE[®] FE utilizado como acoplante.



Figura 3.4. Acoplante a base de Gel.

Fonte: Autoria nossa, 2015

3.5 PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO

Após os ajustes realizados no equipamento, o mesmo encontrou-se apto para o início do procedimento de medição. Os dados foram coletados ao longo de um comprimento de tubulação estimado em 460 m, com auxílio de alguns estagiários. Sendo as medições realizadas a cada 3 m intervalados aproximadamente e esses valores foram armazenados no equipamento, posteriormente visualizados em forma de planilhas no Excel, conforme o Apêndice I no fim desse trabalho.

A armazenagem de dados foi dividida por setores de localização da tubulação, no corredor e entre as máquinas, e entre o corredor e os acumuladores, sendo o número limite para uma sequência de medições, limitado pela capacidade do equipamento em número de medições por planilha gerada, uma vez que cada planilha tem a capacidade de armazenar 100 resultados. As medições realizadas no corredor, como demonstra a figura 3.5, foram divididas em Regulação 1, Regulação 2 e Regulação 3. Já a parte Superior é referente a tubulação entre o corredor e as máquinas. A figura 3.6 mostra o funcionário da empresa realizando as medições de espessura na tubulação (parte superior), verifica-se que o mesmo está utilizando cinto para trabalho em altura.

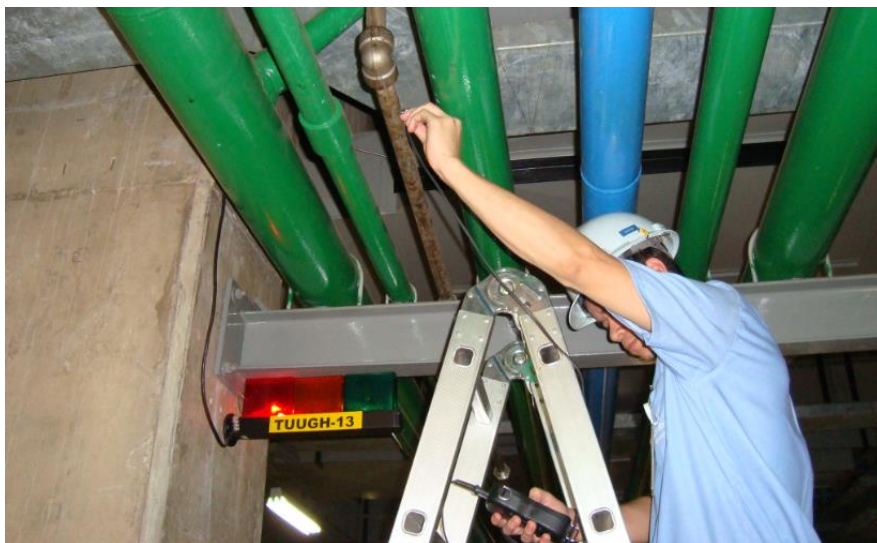


Figura 3.5. Inspeção na tubulação localizada no corredor da CF2.
Fonte: Autoria nossa, 2015



Figura 3.6. Inspeção realizada entre o corredor e os acumuladores.
Fonte: Autoria nossa, 2015

Algumas medições necessitaram de cuidados especiais com relação à segurança, pois a da tubulação entre o corredor e as máquinas estava instalada em uma altura considerável em relação ao chão. Para que o procedimento atenda as normas de segurança da empresa, o responsável pela inspeção dessa parte da tubulação foi um funcionário com prévio conhecimento de trabalho em altura, onde foi necessária a utilização de uma escada, sendo que o colaborador da empresa utilizou cinto para atenuar o risco de acidentes durante a inspeção, ainda como demonstrado na figura 3.6.

Para a avaliação da espessura da tubulação foi utilizado o cálculo da PMTA, segundo o

código ASME (American Society of Mechanical Engineers), seção VIII, divisão 1, o qual especifica a máxima pressão que o fluido de trabalho pode exercer na tubulação.

Para encontrar o raio interno da tubulação foi feita a medição do diâmetro externo em campo e realizada uma comparação com o resultado obtido em catálogo, porém para a realização dos cálculos utilizou-se o valor obtido na tabela do catálogo Brastetubos, pois é mais confiável, devido que o resultado de campo pode apresentar erros do equipamento de medição (paquímetro), paralaxe devido as posições para as medições serem dificultosas para a visualização dos valores medidos como também o posicionamento do paquímetro nos locais de medição. Com o resultado da menor espessura coletada, durante o procedimento de medição, foi obtido o diâmetro interno, consequentemente, o raio interno.

Na tubulação foi identificada a menor espessura, verificando a condição estrutural dos pontos em que a corrosão provocou maior perda de material na parede da tubulação. Pelo código ASME, a tubulação é considerada, para efeito de cálculo, como sendo um vaso de pressão. E, estas pressões são calculadas pelas fórmulas dadas na mesma norma de projeto adotado para o cálculo de vaso. O cálculo da PMTA deve ser feito em função das espessuras corroídas, destacando-se, portanto, a sobre espessura para a corrosão que houver.

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Para avaliar os pontos mais críticos da tubulação, foram utilizados critérios estatísticos, que consideram o desvio padrão e os valores das médias de espessuras em alguns trechos. Sendo esses trechos identificados por possuírem alto desvio padrão e baixos valores nas médias das medições de espessura.

Segundo Medeiros (2009), o desvio padrão é a medida da variação, da dispersão, de um conjunto. Sendo assim, um valor de desvio padrão mais elevado diminui a probabilidade de resultados próximos a média serem encontrados com maior frequência, fica explícito uma grande variação de valores na amostra de dados coletada. Por esse motivo as regiões com maior desvio padrão apresentam resultados menos uniformes.

Todos os valores obtidos foram submetido a uma filtragem de dados que identificou os trecho com a ocorrência de maior desvio padrão. Dois trechos apontaram para valores mais elevados de desvio padrão e valores de média inferiores aos outros trechos.

Por essa razão os intervalos considerados mais críticos são: a tubulação localizada entre a máquina 13 e o corredor, e a tubulação intermediária do corredor (Regulação 1). A tabela 4.1 apresenta os dados de média e desvio padrão de três trecho da tubulação, sendo o trecho 1 a tubulação entre a máquina 13 e o corredor, o trecho 2 a tubulação intermediária do corredor, já o trecho 3 não apresenta-se como um setor considerado crítico diferentemente dos trechos anteriores.

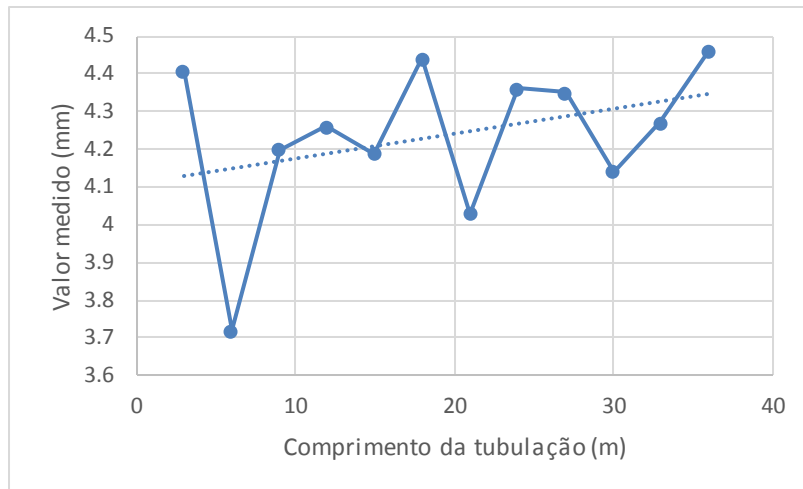
Tabela 4.1. Valores de média e desvio padrão dos dados filtrados.

	Trecho crítico 1	Trecho crítico 2	Trecho crítico 3
Desv. Padrão	0.207	0.173	0.067
Média	4.236	4.090	4.477

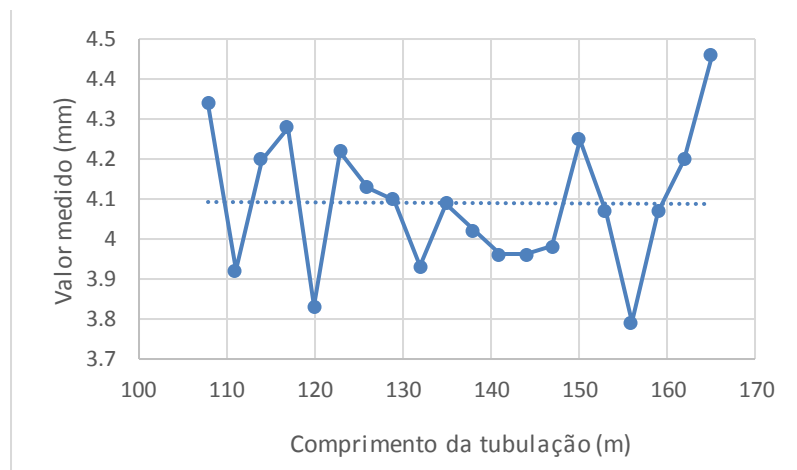
Fonte: Autoria nossa, 2015

Para os dois trechos crítico os valores de desvio padrão mais elevados indicam uma maior dispersão dos valores medidos, seus valores de média também são inferiores aos outros trechos da tubulação, isso indica que suas espessuras de parede estão abaixo das médias dos valores encontrados em outras regiões. Já o trecho 3 é citado como exemplo de comparação, sendo sua média mais elevada que os outros dois, e o desvio padrão indica uma uniformidade maior dos seus valores encontrados durante as medições, sendo que, a possibilidade de encontrar valores próximos a sua elevada média nesse trecho é alta.

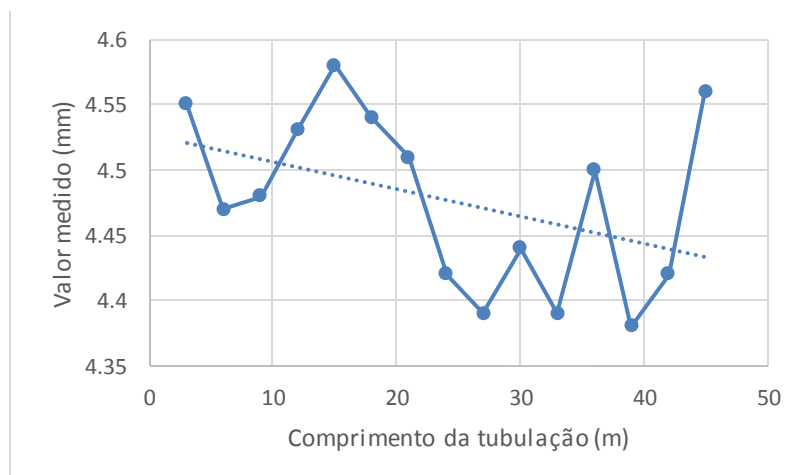
Os gráficos 1, 2 e 3 demonstram a dispersão dos valores medidos ao longo dessa tubulação.

Gráfico 1. Dispersão dos valores medidos no Trecho 1.

Fonte: Autoria nossa, 2015

Gráfico 2. Dispersão dos valores medidos no Trecho 2.

Fonte: Autoria nossa, 2015

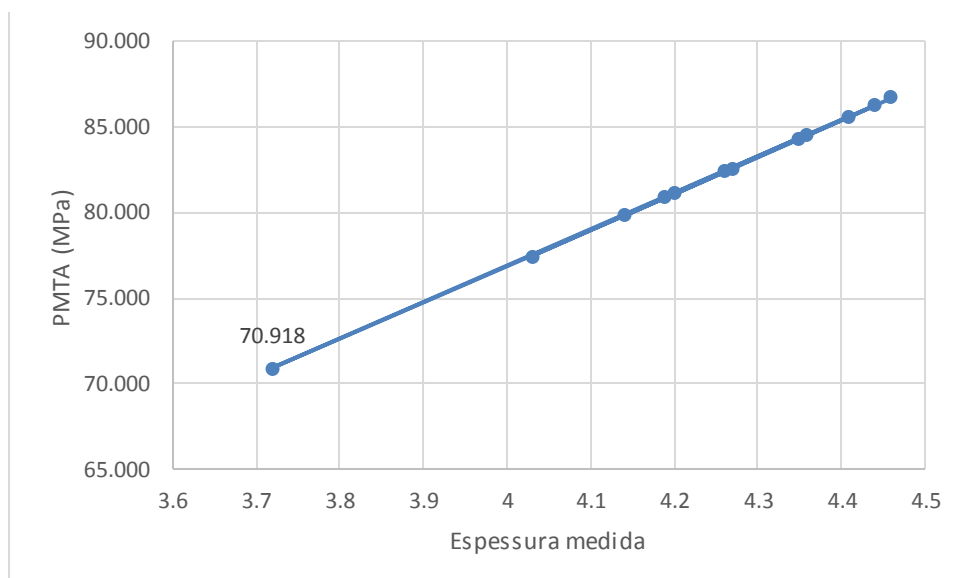
Gráfico 3. Dispersão dos valores medidos no Trecho 3.

Fonte: Autoria nossa, 2015

Pode-se inferir que ocorre um maior afastamento dos valores encontrados com relação a suas linhas de tendência, nos Gráficos 1 e 2. Já no gráfico 3 os seus valores apresentam-se mais próximos de um padrão que tende a acompanhar seu valor médio nesse intervalo.

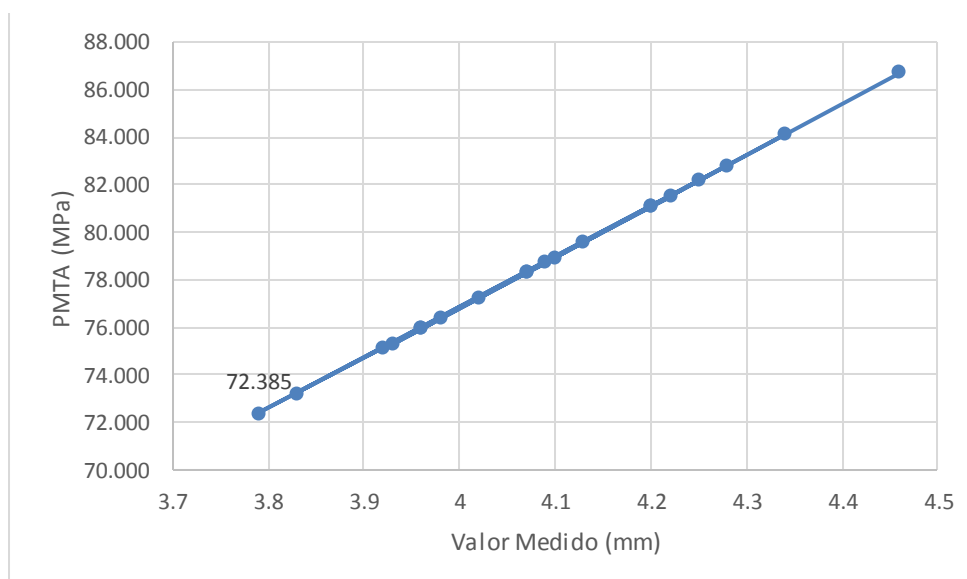
Após identificados os trechos mais críticos da tubulação foi utilizado a eq.2, do código ASME seção VIII, para determinar a PMTA nos diversos pontos dos dois trechos críticos. O valor de tensão admissível utilizado foi de 290 MPa, conforme o catálogo da Acoartex. Os gráficos 4 e 5 demonstram a variação da PMTA em função da espessura.

Gráfico 4. PMTA ao longo do Trecho Crítico 1.



Fonte: Autoria nossa, 2015

Gráfico 5. PMTA ao longo do Trecho Crítico 2.



Fonte: Autoria nossa, 2015

É possível verificar que a PMTA é reduzida linearmente com redução da espessura da parede da tubulação. O menor valor de PMTA encontrado está presente no Trecho 1 e corresponde ao ponto de menor espessura medida. A tabela 4.2 apresenta o valor do ponto de menor espessura bem como da espessura crítica para essa tubulação.

Tabela 4.2. Resultados obtidos.

MENOR ESPESSURA (mm)	PMTA (MPa)
3,72	70,92
ESPESSURA CRÍTICA (mm)	PMTA (MPa)
0,372	6,5

Fonte: Aatoria nossa, 2015

O valor de PMTA encontrado é bem superior ao valor da pressão de trabalho dos vasos nos quais essas tubulações estão conectadas. E para se ter uma ideia de qual a espessura mínima que a tubulação pode suportar com uma pressão de trabalho de 6,5 MPa, pode-se utilizar a eq.(2), onde é possível realizar o “cálculo inverso”, uma vez que, pode-se determinar o menor valor de espessura para o qual a tubulação ainda atenderá o código ASME, que é de 0,372 mm, sendo essa denominada de espessura crítica.

A partir desse valor de espessura crítica encontrado, afirma-se que o coeficiente de segurança para o funcionamento dessas tubulações é de 10 (dez), uma vez que, a menor espessura encontrada em inspeção é dez vezes maior que a espessura crítica, onde a partir da qual, valores inferiores a essa sujeitariam a tubulação a rompimentos (falha estrutural).

É possível perceber que essa tubulação está superdimensionada, pois seu menor coeficiente de segurança encontrado é de 10. Considerando o ar comprimido um fluido de baixa corrosão, essa tubulação poderia ter sido projetada com um tubo de menor valor em sua espessura de parede, ou ainda um material de custo inferior.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre uma análise estrutural de tubulações de ar comprimido, priorizando o cumprimento de normas técnicas e dando ênfase para os riscos que a ausência do correto procedimento de inspeção nas mesmas pode apresentar. Levando em consideração os principais conhecimentos acerca de tubulações, como funções de seus acessórios, materiais para projetos e fluidos transportados. Foi também abordado a parte específica de tubulações da NR 13, a partir da sua alteração através da portaria de abril de 2014.

Considerando as vantagens do método de ensaio por ultrassom, a facilidade de manuseio do equipamento, precisão dos resultados e leituras rápidas. Pode-se afirmar que os resultados obtidos foram satisfatórios também do ponto de vista prático, uma vez que outros métodos poderiam tornar essa inspeção muito longa, devido a necessidade de processos intermediários para análises de resultados. Os procedimentos de ajuste demonstram que as medidas apontadas nas leituras estavam em conformidade com as dimensões do bloco padrão utilizado.

Com o auxílio de critérios estatísticos foi possível determinar os trechos mais críticos da tubulação, filtrando os dados coletados.

Os cálculos de PMTA para vasos de pressão foram adaptados para a tubulação inspecionada, onde pelos valores encontrados foi demonstrado que a espessura mínima, denominada nesse trabalho de espessura crítica, apresenta-se muito distante dos valores medidos. Sendo assim essas tubulações não apresentam risco em potencial devido falhas estruturais abruptas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a sugestão é mapear os pontos mais críticos da tubulação, gerando assim um banco de dados para manutenção, compará-los com as espessuras de tubulação medidas nesse trabalho, visando estimar uma taxa de decaimento das paredes internas da mesma, sendo possível determinar o tempo estimado para a substituição dessas tubulações.

Demonstrar por métodos numéricos computacionais os valores críticos de tensões para essas tubulações, e compará-los com os que a norma recomenda.

REFERÊNCIAS

- ACOPLANTE PARA ENSAIOS POR ULTRASSOM SONOGLIDE ® FE. Disponível em: <<http://www.qualyden.com.br/index.php/produtos/ensaios%20n%3c%A3o%20destrutivos/sonoglide-fe-acoplante-para-ultrassom-ambientalmente-correto-detail>>. Acesso em 16/07/2015 às 10:22.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **Normas técnicas**, 1918.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), boiler and pressure vessel code, section VIII, Divisions 1 and 2, New York, 2007.
- ANDREUCCI, Ricardo, **Apostila ensaio por ultrassom**, Ed. Julho de 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 15824 e 15865**, 2015.
- BLOG DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS. Disponível em: <<http://www.inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/11/caso-048-ruptura-de-tubulacao-por.html?m=1>>. Acesso em 10/09/2015 às 21:35.
- CATALOGO DIMENCIONAL PARA TUBOS. Disponível em: <<http://www.brastetubos.com.br/tubos-schedule.php>>. Acesso em 19/07/2015 às 18:00.
- DONATO G.P.V. 2003 **Vasos de Pressão** Universidade Petrobras 2005. Programa de Eng. Trainee – Mecânica Rio de Janeiro Brasil.
- ELETROBRÁS Eletronorte, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, 2015.
- MANUAL OPERACIONAL, **DM5E – GE**, Equipamento de Ultrassom. Disponível em: <<https://www.gemeasurement.com>>. Acesso em 19/05/2015.
- MEDEIROS, C.A. **Estatística Aplicada à Educação**. 1º Edição. Universidade de Brasília, 2009.
- NOGUEIRA, B.F. **Estratégia Computacional para Projeto de Vaso de Pressão**. 2013 Projeto Final (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- RIBEIRO, A.C. **Tubulações Industriais**. Faculdade de Engenharia Química de Lorena, 2011.
- São Paulo (Estado). Divisão de engenharia e planejamento. **Tratamento de ar Comprimido. Fargon**, 2006: manual de tratamento de ar comprimido. Disponível em: <www.fargon.com.br>. Acesso em 19/05/2015.
- SILVA TELLES, P.C. **Vasos de Pressão**. 2º Edição. Editora TCL, 2007.
- SILVA TELLES, P.C. **Tubulações Industriais** – Materiais, Projeto, Montagem. 10º Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2001.

TABELA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS. Disponível em: <http://www.acoartex.com.br/tipos_aco.pdf>. Acesso em 20/07/2015 às 3:00.

<<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>>. Acesso em 16/07/2015 às 8:30.

APÊNDICE I

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO							
Local 74bar UGH 13	Medida (mm)	Local 74bar UGH 16	Medida (mm)	Local 74bar UGH 19	Medida (mm)	Local 74bar UGH 22	Medida (mm)
1	4,41	1	4,52	1	4,42	1	4,55
2	3,72	2	4,37	2	4,47	2	4,52
3	4,2	3	4,42	3	4,52	3	4,44
4	4,26	4	4,46	4	4,54	4	4,54
5	4,19	5	4,54	5	4,5	5	4,31
6	4,44	6	4,43	6	4,48	6	4,32
7	4,03	7	4,38	7	4,37	7	4,3
8	4,36	8	4,4	8	4,52	8	4,39
9	4,35	9	4,47	9	4,52	9	4,32
10	4,14	10	4,55	10	4,55	10	4,32
11	4,27	11	4,29	11	4,49	11	4,35
12	4,46	12	4,47	12	4,29	12	4,36
13	4,46	13	4,31	13	4,45	13	4,16
14	4,34	14	4,44	14	4,57	14	4,32
15	4,41	15	4,44	15	4,04	15	4,2
16	4,39	16	4,69	16	4,05	16	4,46
17	4,41	17	4,52	17	4,23	17	4,21
18	EMPTY	18	EMPTY	18	4,23	18	EMPTY
19	EMPTY	19	EMPTY	19	EMPTY	19	EMPTY
20	EMPTY	20	EMPTY	20	EMPTY	20	EMPTY
-	-	-	-	21	EMPTY	21	EMPTY
-	-	-	-	22	EMPTY	22	EMPTY
-	-	-	-	23	EMPTY	23	-

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO							
Local Regulação 1	Medida (mm)	Local Regulação 1	Medida (mm)	Local Regulação 1	Medida (mm)	Local Regulação 1	Medida (mm)
1	4,29	24	4,36	47	3,96	70	4,37
2	4,62	25	4,06	48	3,96	71	4,43
3	4,1	26	4,26	49	3,98	72	4,41
4	4,18	27	4,37	50	4,25	73	4,42
5	4,39	28	4,11	51	4,07	74	4,41
6	4,43	29	4,32	52	3,79	75	4,27
7	4,47	30	4,3	53	4,07	76	4,47
8	4,43	31	4,17	54	4,2	77	4,26
9	4,47	32	4,28	55	4,46	78	4,45
10	4,29	33	4,35	56	4,17	79	4,47
11	4,45	34	4,21	57	4,27	80	4,43
12	4,45	35	4,35	58	4,27	81	4,47
13	4,43	36	4,34	59	4,45	82	4,59

Figura. Tabela com os valores medidos.

Fonte: Autoria nossa, 2015

14	4,46	37	3,92	60	4,3	83	4,45
15	4,41	38	4,2	61	4,45	84	4,55
16	4,44	39	4,21	62	4,17	85	4,42
17	4,43	40	3,83	63	4,17	86	4,51
18	4,41	41	4,22	64	4,43	87	EMPTY
19	4,4	42	4,13	65	4,48	88	EMPTY
20	4,4	43	4,1	66	4,1	89	EMPTY
21	4,07	44	3,93	67	4,1	90	EMPTY
22	4,17	45	4,09	68	4,44	91	EMPTY
23	4,35	46	4,02	69	4,42	92	EMPTY

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO							
Local Regulação 1	Medida (mm)	Local Regulação 2	Medida (mm)	Local Regulação 2	Medida (mm)	Local Regulação 2	Medida (mm)
93	EMPTY	1	4,55	24	4,5	47	4,37
94	EMPTY	2	4,47	25	4,5	48	4,16
95	EMPTY	3	4,48	26	4,69	49	4,36
96	EMPTY	4	4,53	27	4,68	50	4,27
97	EMPTY	5	4,58	28	4,68	51	4,17
98	EMPTY	6	4,54	29	4,52	52	4,27
99	EMPTY	7	4,51	30	4,58	53	4,35
100	EMPTY	8	4,42	31	4,56	54	4,26
-	-	9	4,39	32	4,56	55	4,27
-	-	10	4,44	33	4,49	56	4,14
-	-	11	4,39	34	4,46	57	4,24
-	-	12	4,5	35	4,38	58	4,12
-	-	13	4,38	36	4,36	59	4,25
-	-	14	4,42	37	4,46	60	4,09
-	-	15	4,56	38	4,26	61	4,3
-	-	16	4,46	39	4,41	62	4,34
-	-	17	4,49	40	4,22	63	4,46
-	-	18	4,43	41	4,38	64	4,44
-	-	19	4,42	42	4,52	65	4,44
-	-	20	4,41	43	4,3	66	4,33
-	-	21	4,61	44	4,17	67	4,36
-	-	22	4,67	45	4,44	68	4,39
-	-	23	4,47	46	4,2	69	4,38

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO							
Local Regulação 2	Medida (mm)	Local Regulação 2	Medida (mm)	Local Regulação 3	Medida (mm)	Local Regulação 3	Medida (mm)
70	4,28	93	EMPTY	1	4,24	24	4,6
71	4,06	94	EMPTY	2	4,52	25	4,5
72	4,11	95	EMPTY	3	4,15	26	4,4
73	4,95	96	EMPTY	4	4,42	27	4,41
74	4,36	97	EMPTY	5	4,33	28	4,41
75	4,18	98	EMPTY	6	4,34	29	4,35
76	4,31	99	EMPTY	7	4,15	30	4,11

Figura. Tabela com os valores medidos.

Fonte: Autoria nossa, 2015

77	4,42	100	EMPTY	8	4,2	31	4,23
78	4,5	-	-	9	4,36	32	4,37
79	4,42	-	-	10	4,27	33	4,16
80	4,21	-	-	11	4,43	34	4,22
81	4,16	-	-	12	4,32	35	4,15
82	4,39	-	-	13	4,25	36	4,14
83	EMPTY	-	-	14	4,3	37	4,27
84	EMPTY	-	-	15	4,57	38	4,3
85	EMPTY	-	-	16	4,33	39	4,23
86	EMPTY	-	-	17	4,46	40	4,35
87	EMPTY	-	-	18	4,24	41	4,28
88	EMPTY	-	-	19	4,41	42	4,19
89	EMPTY	-	-	20	4,51	43	4,34
90	EMPTY	-	-	21	4,46	44	3,95
91	EMPTY	-	-	22	4,57	45	3,97
92	EMPTY	-	-	23	4,64	46	4,39

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO							
Local Regulação 3	Medida (mm)	Local Regulação 3	Medida (mm)	Local Regulação 3	Medida (mm)	Local Regulação parte superior UGHZ 13 e 23	Medida (mm)
47	4,3	70	EMPTY	93	EMPTY	1	4,13
48	4,22	71	EMPTY	94	EMPTY	2	4,39
49	4,32	72	EMPTY	95	EMPTY	3	4,47
50	4,44	73	EMPTY	96	EMPTY	4	4,21
51	4,44	74	EMPTY	97	EMPTY	5	4,42
52	4,11	75	EMPTY	98	EMPTY	6	3,95
53	4,17	76	EMPTY	99	EMPTY	7	4,37
54	4,23	77	EMPTY	100	EMPTY	8	4,49
55	4,41	78	EMPTY	-	-	9	4,5
56	4,31	79	EMPTY	-	-	10	4,44
57	4,31	80	EMPTY	-	-	11	4,55
58	4,32	81	EMPTY	-	-	12	4,51
59	4,35	82	EMPTY	-	-	13	4,45
60	4,16	83	EMPTY	-	-	14	4,46
61	4,33	84	EMPTY	-	-	15	4,55
62	4,22	85	EMPTY	-	-	16	4,65
63	4,45	86	EMPTY	-	-	17	4,66
64	4,06	87	EMPTY	-	-	18	4,66
65	4,08	88	EMPTY	-	-	19	4,49
66	4,2	89	EMPTY	-	-	20	4,34
67	4,3	90	EMPTY	-	-	21	4,54
68	4	91	EMPTY	-	-	22	4,41
69	4,2	92	EMPTY	-	-	23	4,46

Figura. Tabela com os valores medidos.

Fonte: Autoria nossa, 2015

MEDIÇÕES NO EQUIPAMENTO	
Local Regulação parte superior UGRA 13 e 23	Medida (mm)
24	4,37
25	4,66
26	4,58
27	4,73
28	4,48
29	4,49
30	4,46
31	4,38
32	4,33
33	4,52
34	4,55
35	4,4
36	4,46
37	EMPTY
38	EMPTY
39	EMPTY
40	EMPTY
41	EMPTY
42	EMPTY
43	EMPTY
44	EMPTY
45	EMPTY
46	EMPTY

Figura. Tabela com os valores medidos.
 Fonte: Autoria nossa, 2015

APÊNDICE II

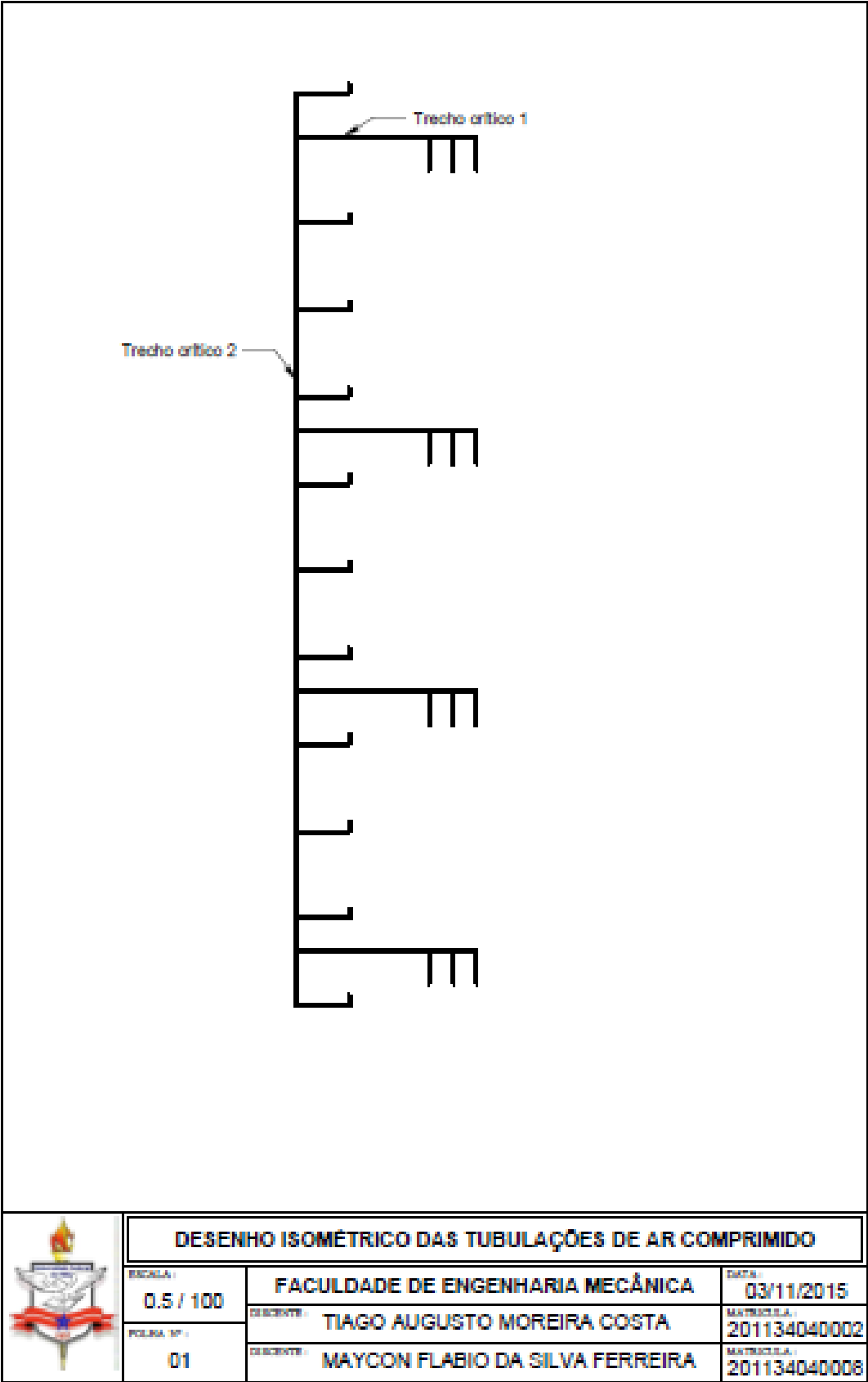


Figura. Isométrico da tubulação.
Fonte: Autoria nossa, 2015

APÊNDICE III

Esse apêndice é referente aos cálculos realizados para obtenção dos resultados na seção 4, conforme a eq. (2) localizada na seção 2.

PMTA = Pressão máxima de trabalho admissível

S_y = Tensão admissível do aço inox 304 = 290 MPa

E = Coeficiente de eficiência de solda, cilindro sem costura = 1,0

e = Espessura mínima

R = Raio interno

$$\begin{aligned}
 PMTA &= \frac{S_y \cdot E \cdot e}{R + (0,6 \cdot e)} \\
 PMTA &= \frac{290 \text{ MPa} \cdot 1,0 \cdot 3,72 \text{ mm}}{12,98 \text{ mm} + (0,6 \cdot 3,72 \text{ mm})} \\
 PMTA &= 70,917 \text{ MPa} \\
 PMTA &= 709,2 \text{ bar}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Para se ter uma ideia de qual a espessura mínima que a tubulação pode suportar com uma pressão de trabalho de 6,5 MPa, foi feito o cálculo inverso.

De = Diâmetro externo

$$\begin{aligned}
 PMTA &= \frac{S_y \cdot E \cdot e}{\left(\frac{De}{2} - e\right) + (0,6 \cdot e)} \\
 6,5 \text{ MPa} &= \frac{290 \text{ MPa} \cdot 1,0 \cdot e}{\left(\frac{33,5 \text{ mm}}{2} - e\right) + 0,6 \cdot e} \\
 6,5 \text{ MPa} &= \frac{290 \text{ MPa} \cdot 1,0 \cdot e}{(16,75 - 0,4 \cdot e)} \\
 e &= 0,372 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2}$$