

Karilen Endler

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE
AÇO COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski.

Coorientador: Prof. Dr. Prof. Luís Orlando Emerich dos Santos.

Joinville
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Endler, Karilen

Análise do comportamento mecânico de tubos de aço com variação dimensional / Karilen Endler ; orientador, Alexandre Mikowski, coorientador, Luís Orlando Emerich dos Santos, 2019.
119 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2019.

Inclui referências.

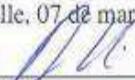
1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Propriedades mecânicas. 3. Tubos de aço. 4. Razão t / D. I. Mikowski, Alexandre. II. Santos, Luís Orlando Emerich dos. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Karilen Endler

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE AÇO COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL

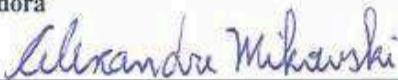
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas, área de concentração Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 07 de março de 2019.

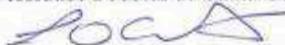


Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr. Eng.
Coordenador do Pós-ECM

Banca Examinadora



Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Orientador e Presidente da Banca Examinadora
Universidade Federal de Santa Catarina



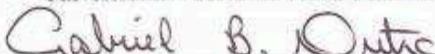
Prof. Luís Orlando Emerich dos Santos, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Derce de Oliveira Souza Recouvreux, Dra. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser meu guia e protetor, por estar comigo me protegendo nestes anos de mestrado, de idas e vindas de Joinville a SBS. Por, em nenhum momento, deixar que eu esmorecesse e desistisse de meu objetivo maior.

Aos meus pais, Ursula e Nilson, por serem o meu porto seguro, minha companhia. Agradeço por suas orações, mesmo que em silêncio. Agradeço a Deus por todos os minutos que passei (e ainda passo) com vocês. Eternamente serei agradecida por tudo que fizeram por mim.

À minha irmã Ketlin e sua linda família. Aos meus sobrinhos, Kauê, Valentina e Antony por serem minha alegria. Obrigada por vocês aturarem a tia/dinha maluca. Amo vocês como se fossem meus filhos.

Ao meu amor, Thiago, pelos bons momentos e pelos difíceis que já passamos. Obrigada por me entender, me alegrar e me apoiar em todos os momentos.

À empresa Tuper, por autorizar minhas saídas para assistir as aulas do mestrado e assim ter a oportunidade de adquirir mais conhecimentos, também pela autorização da utilização de dados da empresa para esta dissertação. Aos colegas de trabalho, principalmente à equipe de Engenharia de Materiais e Laboratórios, o conhecimento repassado dia-a-dia é aquele que nos engrandece.

Em especial ao meu orientador Dr. Alexandre Mikowski, por subir no barco e remar junto comigo. Por confiar na minha pesquisa e acreditar que eu poderia chegar ao final desta batalha com a vitória.

Ao LabMAD (Laboratório de Modelagem e Análise de Dados) da UFSC campus Joinville, que foi ajuda determinante na avaliação dos dados desta dissertação.

À banca examinadora, pela disponibilidade para ler, avaliar e contribuir com a dissertação de mestrado.

RESUMO

Um dos principais processos de fabricação de tubos de aço é a conformação de chapas de aço e posterior a soldagem por indução de alta frequência (HFIW). Independente da aplicação, estas estruturas devem suportar esforços mecânicos a que serão submetidas, e é através do ensaio mecânico de tração que os tubos serão testados para determinar suas propriedades mecânicas. O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o comportamento mecânico de tubos de aço soldados da classe SAE 1012 com variação dimensional, a partir da análise de dados experimentais de um banco de dados de propriedades mecânicas e de composição química. O limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LRT) e o alongamento (AL) são as principais propriedades mecânicas a serem observadas em tubos de aço soldados. Dependendo do diâmetro externo, o tubo poderá ser ensaiado inteiro ou através de um corpo de prova retirado do mesmo. O material empregado na fabricação do tubo influenciará em suas propriedades mecânicas finais, bem como a relação espessura/Diâmetro (t/D). Um estudo de caso utilizando mais de três mil dados brutos experimentais de LE , LRT e AL , bem como de composição química, de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados de um banco de dados da empresa Tuper S/A foi utilizado para verificar as médias e desvios padrões de cada elemento da composição química e a influência do diâmetro e da espessura no LE , LRT e AL . Os resultados mostram que a composição química, em média, atende as tolerâncias do SAE 1012, conforme Norma J403 e que esta composição é muito próxima à composição encontrada por outros pesquisadores. Comparando os resultados com algumas referências, LE teve uma pequena parte dos dados não qualificados, enquanto que LRT teve um maior número de dados não qualificados. Ao calcular as médias aritméticas de LE , LRT e AL em relação ao diâmetro externo e espessura do tubo observou-se que apenas 1 resultado (do total de 3.141) ficou fora do limite de confiança de 99,7%. As propriedades mecânicas LE e LRT não apresentaram uma lei de tendência de acréscimo ou decréscimo em função do diâmetro e da espessura. No entanto, LE e LRT crescem em função da razão t/D , enquanto que AL decresce.

Palavras-chave: Tubos. Propriedades Mecânicas. Diâmetro. Espessura.

ABSTRACT

One of the main manufacturing processes of steel tubes is the shaping of steel plates and subsequent to high frequency induction welding (HFIW). Regardless of application, these structures must withstand the mechanical stresses to which they will be subjected, and it is through the mechanical tensile test that the tubes will be tested for their mechanical properties. The general objective of this work is to evaluate the mechanical behavior of welded steel tubes of class SAE 1012 with dimensional variation, from the analysis of experimental data of a database of mechanical properties and chemical composition. The yield strength (LE), the tensile strength (LRT) and the elongation (AL) are the main mechanical properties to be observed in welded steel tubes. Depending on the outside diameter, the tube may be tested either whole or through a specimen taken from it. The material used to manufacture the tube will influence its final mechanical properties as well as the thickness / Diameter ratio (t / D). A case study using more than 3,000 experimental data of LE , LRT and AL , as well as chemical composition, of SAE 1012 grade steel tubes welded from a Tuper S / A database was used to verify the means and standard deviations of each element of the chemical composition and the influence of diameter and thickness on LE , LRT and AL . The results show that the chemical composition, on average, meets the tolerances of SAE 1012, according to Norm J403 and that this composition is very close to the composition found by other researchers. Comparing the results with some references, LE had a small part of the unqualified data, while LRT had a higher number of unqualified data. When calculating the arithmetic averages of LE , LRT and AL in relation to external diameter and tube thickness, it was observed that only 1 result (out of the total of 3,141) was outside the 99.7% confidence limit. The mechanical properties LE and LRT did not present an increase or decrease trend law as a function of diameter and thickness. However, LE and LRT increase as a function of the t / D ratio, while AL decreases.

Keywords: Tubes. Mechanical properties. Diameter. Thickness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de tubos de aço.	24
Figura 2 - Processo de corte longitudinal da bobina, originando fitas. .	27
Figura 3 - Rolos de formação do tubo.	28
Figura 4 - Flor de formação do tubo.	29
Figura 5 - Soldagem HFIW com indutor tipo bobina.	30
Figura 6 - Vista de perfil de uma solda após processo HFIW.	31
Figura 7 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em peças automotivas.	34
Figura 8 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em máquinas agrícolas.	34
Figura 9 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em caldeiras.	35
Figura 10 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro na extração de petróleo.	36
Figura 11 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro na construção civil – Estádio Aquático Olímpico.	37
Figura 12 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em andaimes.	38
Figura 13 - Maiores produtores de petróleo em 2018, em milhões de barris por dia.	39
Figura 14 - Aplicação de tubos de grande diâmetro – Máquinas agrícolas.	40
Figura 15 - Aplicação de tubos de grande diâmetro – Aeroporto de Natal (RN).	40
Figura 16 - Demonstração da amostra de seção completa (tubo inteiro) e do mandril de aço posicionados na máquina de ensaios universal.	44
Figura 17 - Região de corte da amostra, no sentido longitudinal, em um tubo.	44
Figura 18 - Corpo de prova cortado e usinado a partir de um tubo.	45
Figura 19 - Representação esquemática de curva típica da tensão em função da deformação para materiais metálicos.	46
Figura 20 - Fases de uma revisão bibliográfica efetiva.	49
Figura 21 - Modelo para condução da revisão sistemática bibliográfica – RBS Roadmap.	50
Figura 22 - Sete passos da fase de processamento no modelo RBS Roadmap.	50
Figura 23 - Orientação dos corpos de prova TT, PT, PS e TS no tubo.	52
Figura 24 - Formação do tubo e preparação de corpos de prova.	60
Figura 25 - Modelo esquemático mostrando a parte interna e externa do tubo, em relação à espessura (t) e ao diâmetro (D).	61
Figura 26 - Processo de produção de tubos de aço, soldados por ERW.	62

Figura 27 - Modelo de flor de formação do tubo e solda por ERW.....	63
Figura 28 - Distribuição de espessura após a conformação do tubo, em relação a espessura inicial de 8,84 mm.	64
Figura 29 - Representação esquemática demonstrando a deformação na espessura durante a formação do tubo.....	66
Figura 30 - Variação de LE de chapas de origem e tubos para quatro tipos de aços em relação a razão t/D	67
Figura 31 - Máquina Universal para ensaios de tração modelo EMIC de 600kN.....	73
Figura 32 - Corpos de prova (CP) retirado do tubo para ensaio mecânico de tração em tubos de aço carbono. a) Corte de parte de tubo de origem, b) CP retirado do tubo e usinado e c) CP retirado do tubo e já ensaiado.	74
Figura 33 - Tipos de corpos de prova (CP) para ensaio mecânico de tração em tubos de aço carbono. a) CP tubo retirado de tubo, b) CP tubo e já ensaiado.	74
Figura 34 - Planilha RAP.....	77
Figura 35 - Percentual em massa de Carbono (a) e Manganês (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.....	85
Figura 36 - Percentual em massa de Fósforo (a) e Enxofre (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.....	86
Figura 37 - Percentual em massa de Silício (a) e Alumínio (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.....	87
Figura 38 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do limite de escoamento (LE) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.	92
Figura 39 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do limite de resistência à tração (LRT) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.....	94
Figura 40 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do alongamento (AL) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.	96
Figura 41 - Médias aritméticas simples do limite de escoamento (LE) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro	

externo (D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.....	98
Figura 42 - Médias aritméticas simples do limite de resistência à tração (LRT) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro externo (D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.	99
Figura 43 - Médias aritméticas simples do alongamento (AL) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro externo (D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.	100
Figura 44 - Médias aritméticas simples do limite de escoamento (LE) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t/D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.	102
Figura 45 - Médias aritméticas simples do limite de resistência à tração (LRT) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t/D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.	103
Figura 46 - Médias aritméticas simples do alongamento (AL) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t/D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Composições químicas* especificadas para alguns tipos de aço utilizados na produção de tubos soldados.	26
Quadro 2 - Propriedades mecânicas no tubo, conforme orientação do corpo de prova.	52
Quadro 3 - Propriedades mecânicas obtidas conforme condição do processo testado.	53
Quadro 4 - Média de <i>LE</i> , <i>LRT</i> e <i>AL</i> nas amostras de tubo inteiro e CP.	54
Quadro 5 - Comparativo de propriedades mecânicas via indentação portátil e ensaio de tração convencional.	56
Quadro 6 - Propriedades mecânicas de iniciais em chapas e após a conformação de diversos dimensionais (diâmetros e espessuras) de tubos.	57
Quadro 7 - Propriedades mecânicas em tubos VHS e não tratados com corpo de prova de tubo inteiro e CPs retirados do tubo.	59
Quadro 8 - Modo das deformações na parede interna e externa do tubo, devido as tensões de compressão ou tração.	61
Quadro 9 - Condições de processo nas chapas e tubos estudados.	65
Quadro 10 - Etapas da seleção de dados da planilha RAP.	79
Quadro 11 - Tamanho de cada amostra em função do diâmetro externo do tubo (<i>D</i>) e espessura da fita que gerou o tubo (<i>t</i>) dos dados selecionados da planilha RAP.	81
Quadro 12 - Média aritmética simples, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e intervalo para os percentuais em massa do C, Mn, P, S, Si e Al para o aço da classe SAE 1012, em 3.141 conjuntos de dados de cada elemento.	88
Quadro 13 - Comparativo de resultados de percentuais em massa de teores C, Mn, P, S, Si e Al desta dissertação e demais literaturas, para o aço da classe SAE 1012.	90
Quadro 14 - Dados da literatura de <i>LE</i> para o aço da classe SAE 1012, quantitativo de tubos qualificados e não qualificados e percentuais de tubos não qualificados.	93
Quadro 15 - Dados da literatura de <i>LRT</i> para o aço da classe SAE 1012, quantitativo de tubos qualificados e não qualificados e percentuais de tubos não qualificados.	95

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA	21
2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E APLICAÇÕES DE TUBOS DE AÇO	23
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	23
2.2 APLICAÇÕES.....	32
2.2.1 Aplicação de tubos de pequeno diâmetro.....	32
2.2.2 Aplicação de tubos de grande diâmetro	39
3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE AÇO	43
3.1 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO EM TUBO METÁLICO..	43
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS METÁLICOS	48
3.2.1 Efeito da orientação de corpos de prova retirados de tubos ..	51
3.2.2 Efeito da trefilação e do recozimento em tubos	53
3.2.3 Efeito do tipo de corpo de prova	54
3.2.4 Efeito e relação do tipo de ensaio mecânico	55
3.2.5 Efeito das propriedades mecânicas iniciais do aço no tubo ..	56
3.2.6 Efeito de tratamento térmico na ductilidade.....	58
3.2.7 Efeito da razão espessura pelo diâmetro – t/D	59
3.2.8 Efeito da formação de tubos ERW na tensão de escoamento	62
3.2.9 Efeitos do processamento do aço de origem e razão t/D	64
3.2.10 Síntese integradora de propriedades mecânicas em tubos...	68
4 METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE DADOS.....	71
4.1 PROCESSO PRODUTIVO DE TUBOS DE AÇO CARBONO..	71
4.1.1 Bobina de aço carbono e seu processamento	71
4.1.2 Conformação mecânica e soldagem de tubos.....	72
4.1.3 Ensaio mecânico de tração em tubos.....	72
4.1.4 Relatório de análise de produto	75
4.2 SELEÇÃO DE DADOS DA PLANILHA RAP	78
5 ANÁLISE DE DADOS DA PLANILHA RAP	83
5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRAGEM DE AÇO SAE 1012	83
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DA AMOSTRAGEM DE AÇO SAE 1012	91
5.2.1 Influência do diâmetro externo e da espessura nos dados brutos das propriedades mecânicas	91

5.2.2 Influência do diâmetro externo, da espessura e da razão t/D nos dados tratados das propriedades mecânicas.....	97
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A – AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA TUPER S/A PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS DA EMPRESA	119

INTRODUÇÃO

Produtos de aço são mundialmente utilizados em diversas aplicações, seja em um estádio coberto com telhas metálicas, ou em um automóvel produzido com diversos componentes de aço, ou ainda em uma ponte construída com vigas de aço. Tubos de aço também estão presentes na vida das pessoas, mesmo sem elas notarem. Grandes e pequenas empresas têm fornecido aos diversos mercados consumidores a quantidade de tubos necessária para que as empresas possam produzir máquinas agrícolas, veículos automotores sejam montados, tubulações de indústrias entrem em operação, dentre outras inúmeras aplicações em que os tubos de aço vêm sendo utilizados.

A Revista Siderurgia Brasil, em sua reportagem de capa, na edição de julho de 2014 (FREDIANI, 2014), destaca: “O aço entra em campo”. Nesta época, o Brasil e o mundo respiravam Copa do Mundo, e o termo “campo” referenciava-se aos campos dos estádios de futebol. Cabe ressaltar que a presença do aço, nos seus mais diversos produtos, é inegável.

A construção, a reforma e a ampliação de estádios, portos, aeroportos e projetos de mobilidade urbana foram determinantes para que a Copa do Mundo no Brasil tivesse um brilho mais que especial, sem comentar todo o embate político sobre os gastos públicos com estas obras.

Empresas líderes em produtos de aço, como Tuper, Brafer e Vallourec estiveram presentes em grande parte destas obras. A Brafer foi uma das fornecedoras das estruturas metálicas para as arquibancadas no Maracanã, fornecendo a estrutura e cobertura metálica da Arena Corinthians e toda a estrutura metálica da Arena da Baixada. A Tuper, por sua vez, esteve presente em obras de nove estádios e sete aeroportos, fornecendo tubos estruturais em aço carbono. A Vallourec, produtora de tubos de aço sem costura, forneceu seus produtos para nove estádios e para projetos ligados à mobilidade urbana, como exemplo os BRTs (*Bus Rapid Transit*, tradução, do inglês, Transporte Rápido por Ônibus) (FREDIANI, 2014).

Cada tubo, dependendo da aplicação, deverá ter o dimensional (diâmetro e espessura) e o material adequado para que suporte as tensões mecânicas a que a estrutura estará submetida. Dentro deste contexto, surge a necessidade da avaliação do comportamento mecânico de tubos de aço soldados através das propriedades mecânicas (Limite de escoamento – *LE*, Limite de Resistência à Tração – *LRT* e Alongamento – *AL*) em função do dimensional do tubo, sendo este tipo de análise, o propósito deste trabalho. A espessura do tubo é dada pela espessura da

chapa metálica utilizada no processo de fabricação do tubo, e o seu diâmetro é o diâmetro externo do tubo. É através das propriedades mecânicas (*LE*, *LRT* e *AL*) que um engenheiro projetista poderá avaliar qual tubo (diâmetro, espessura e tipo de aço) deverá ser utilizado em uma determinada aplicação.

Neste trabalho, foram utilizados dados experimentais selecionados de um banco de dados da Tuper S/A das propriedades mecânicas *LE*, *LRT* e *AL* de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados com variação dimensional; obtidas a partir de ensaios mecânicos de tração, para efetuar a análise de dados do comportamento mecânico destas propriedades mecânicas em função do dimensional do tubo. Esse aço carbono é comercialmente utilizado em tubos estruturais e tubos para condução de fluidos, pois possui um excelente custo benefício, devido ao baixo custo de produção e razoáveis propriedades mecânicas da chapa metálica.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral e os específicos são descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico de tubos de aço soldados da classe SAE 1012 com variação dimensional, a partir da análise de dados experimentais de um banco de dados de propriedades mecânicas e de composição química.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i) Revisar conceitos teóricos do processo de fabricação de tubos de aço carbono soldados, bem como exemplificar aplicações de tubos de pequeno e grande diâmetros, com a aplicação das metodologias de pesquisa documental e bibliográfica;
- ii) Aplicar a metodologia da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), para efetuar uma pesquisa bibliográfica, e assim, revisar sistematicamente os avanços científicos na área de comportamento mecânico de tubos de aço, afim de possibilitar a análise de dados e discussão de resultados;
- iii) Propor uma metodologia para a seleção de dados das propriedades mecânicas Limite de Escoamento (*LE*), Limite de Resistência à Tração (*LRT*) e Alongamento (*AL*) em tubos de aço da classe SAE 1012 soldados,

bem como dos percentuais em massa dos elementos da composição química do referido aço, obtidas a partir do Relatório de Análise de Produto (RAP) da empresa Tuper S/A, com a aplicação das metodologias de pesquisa documental e estudo de caso;

iv) Aplicar a estatística descritiva nas distribuições dos percentuais em massa dos elementos químicos Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofe (S), Silício (Si) e Alumínio (Al), e assim, qualificar a composição química do aço da classe SAE 1012 utilizado pela empresa Tuper S/A no processo de fabricação de tubos, confrontando com dados da literatura e normas;

v) Verificar o comportamento das propriedades mecânicas, Limite de escoamento (*LE*), Limite de Resistência à Tração (*LRT*) e Alongamento (*AL*) em função da espessura e do diâmetro de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados, utilizando a estatística descritiva, bem como, qualificar os resultados pela confrontação de dados com a literatura e normas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA

Esta dissertação está organizada em cinco seções para melhor entendimento do leitor, sendo uma seção de referencial teórico, uma seção de revisão da literatura, uma seção de metodologia para a seleção de dados, uma seção de análise de dados e uma de conclusão geral da dissertação.

Sendo assim, a Seção 2 caracteriza-se como uma fundamentação teórica ou referencial teórico sobre o processo de fabricação de tubos de aço carbono, e também, indica as principais aplicações práticas destes tubos. Esta seção qualifica-se como uma pesquisa documental e também bibliográfica. Na pesquisa documental, segundo Gil (2009, p. 44), as fontes de pesquisa são “diversificadas e dispersas” e os documentos de órgãos públicos e instituições privadas podem ser utilizados na pesquisa. Já a pesquisa bibliográfica, conforme Gil (2009, p. 44) “é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”.

A Seção 3 trata-se de uma revisão bibliográfica ou revisão da literatura abordando o comportamento mecânico de tubos de aço. Utilizou-se a metodologia de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) (CONFORTO *et al.*, 2011) para explorar estudos recentes sobre as

propriedades mecânicas de tubos metálicos. Esta seção caracteriza-se essencialmente como uma pesquisa bibliográfica. Segundo Marconi e Lakatos (2013, p. 57) o objetivo da pesquisa bibliográfica é “colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências”. Marconi e Lakatos (2013, p. 57) ainda enfatizam que a pesquisa bibliográfica “não é mera repetição do que já foi dito ou escrito, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque, chegando a conclusões inovadoras”.

A Seção 4 aborda uma metodologia para seleção de dados de um banco de dados de *LE*, *LRT* e *AL* e composição química do aço da classe SAE 1012. Caracteriza-se como uma pesquisa documental, haja visto que este banco de dados é proveniente de documentos de uma instituição privada, neste caso da empresa Tuper S/A. E também um estudo de caso, que, segundo Gil (2009, p. 54) “consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento”, neste caso, o estudo sobre propriedades mecânicas em tubos de aço da classe SAE 1012 soldados.

E finalmente, a Seção 5 aborda uma análise de dados do comportamento mecânico das propriedades mecânicas de tubos de pequeno diâmetro formados e soldados na empresa Tuper S/A, os quais foram filtrados e selecionados a partir de um banco de dados (Seção 4). Previamente, nesta seção, um tratamento estatístico de dados experimentais de composição química do aço da classe SAE 1012 é apresentado e validado com literatura. A modalidade de pesquisa nesta seção também é o estudo de caso.

2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E APLICAÇÕES DE TUBOS DE AÇO

Ao longo desta seção serão apresentadas as principais etapas do processo de fabricação de tubos de aço carbono, com principal enfoque no processo de conformação a frio e na soldagem ERW (*Electric Resistance Welding*, tradução, do inglês, Soldagem por Resistência Elétrica). Também serão abordadas algumas das principais aplicações de tubos soldados, que foram, neste trabalho, subdivididos em tubos de pequeno e tubos de grande diâmetro.

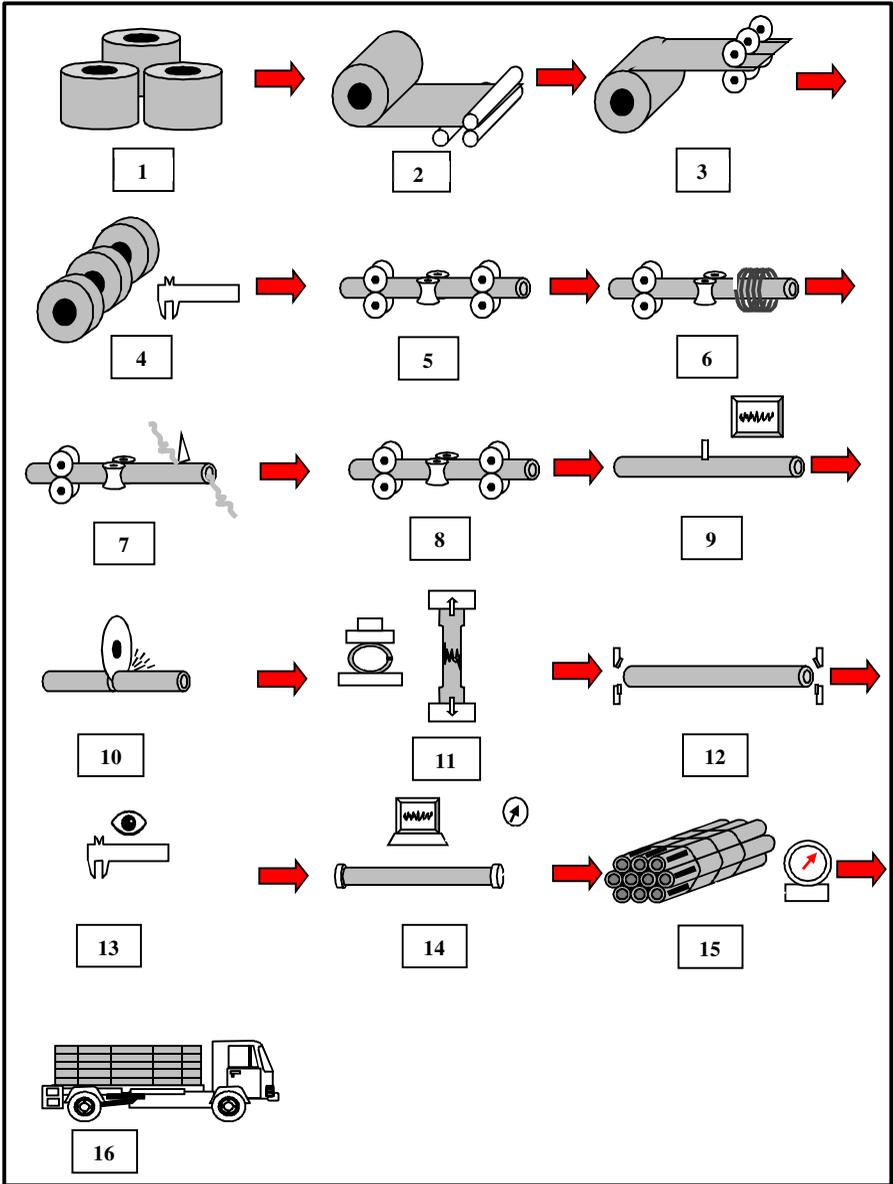
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Tubo soldado de aço é um produto metálico de seção oca podendo apresentar formato redondo, retangular, quadrado ou especial obtido através da conformação mecânica a frio (perfilação), solda e calibração de uma fita de chapa de aço.

Tubos de aço soldados (antigamente chamados “com costura”) são obtidos a partir de fitas de aço laminadas a quente ou à frio, em que a largura da fita corresponde à circunferência do tubo e a espessura da fita à espessura do tubo. O processo de fabricação consiste em passar as fitas por uma matriz adequada que dobra-as na forma de um cilindro, ao mesmo tempo que suas extremidades são soldadas, de modo a ficar constituído o tubo (CHIAVERINI, 2008). Estes tubos podem apresentar diversos dimensionais para diferentes aplicações.

A Figura 1 apresenta detalhadamente o fluxograma das etapas em um processo de fabricação de tubos de aço soldados, sendo que as principais etapas são a formação, a soldagem ERW e a calibração. Ao longo desta seção todas as etapas do fluxograma serão explicadas, com maior enfoque às etapas principais.

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de tubos de aço.



Fonte: Adaptado de Braga (2003).

As etapas do processo de fabricação de tubos são:

- 1) Recebimento e inspeção da matéria-prima (neste caso a bobina de aço laminada à quente ou à frio);
- 2) Desbobinamento;
- 3) Corte longitudinal da bobina, originando fitas;
- 4) Inspeção visual e dimensional de fitas;
- 5) **Formação do tubo através de rolos compressores;**
- 6) **Soldagem ERW;**
- 7) Rebarbamento interno e externo;
- 8) Calibração e endireitamento;
- 9) Ensaio não destrutivo;
- 10) Corte de comprimento dos tubos;
- 11) Ensaio mecânico destrutivo (por exemplo, ensaio de tração);
- 12) Faceamento ou biselamento (etapa não obrigatória);
- 13) Inspeção visual e dimensional dos tubos;
- 14) Teste hidrostático (etapa não obrigatória);
- 15) Marcação, embalagem e pesagem;
- 16) Expedição.

A matéria prima para a formação de tubos de aço soldados são as bobinas laminadas de aço. Estas bobinas podem ser laminadas à quente ou à frio. Bobinas laminadas à quente são produtos de um processo de laminação à quente, onde obtém-se normalmente produtos de espessuras desde 2,00 mm à 25,40 mm. Bobinas laminadas à quente podem originar bobinas laminadas à frio através de um processo de laminação à frio (à temperatura ambiente), onde obtém-se bobinas na espessura de 0,38 mm a 2,00 mm.

Atualmente, o Brasil conta com três principais usinas siderúrgicas produtoras e distribuidoras de bobinas laminadas à quente e à frio: ArcelorMittal Brasil (CST), Usiminas e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). E ainda, para suprir a demanda nacional da indústria, a importação de aço se faz necessária de países como China, Coréia do Sul e Índia.

Os aços mais utilizados na produção de tubos soldados são os aços de baixo teor de Carbono (de 0,10 a 0,25%) (CHIAVERINI, 2008), visto que aços de elevado teor de Carbono não oferecem boa soldabilidade aos tubos. Podem-se citar alguns tipos de aço de baixo Carbono amplamente utilizados: SAE 1008; SAE 1012; SAE 1020; dentre outros. O Quadro 1 apresenta a composição química especificada para cada tipo de aço mencionado.

Quadro 1- Composições químicas* especificadas para alguns tipos de aço utilizados na produção de tubos soldados.

Tipo do Aço	% Carbono	% Manganês	% Fósforo	% Enxofre
SAE 1008	0,10 máx.	0,50 máx.	0,030 máx.	0,035 máx.
SAE 1010	0,08 a 0,13	0,30 a 0,60	0,030 máx.	0,035 máx.
SAE 1012	0,10 a 0,15	0,30 a 0,60	0,030 máx.	0,035 máx.
SAE 1016	0,13 a 0,18	0,60 a 0,90	0,030 máx.	0,035 máx.
SAE 1020	0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,030 máx.	0,035 máx.
SAE 1021 CaSi**	0,17 a 0,21	0,60 a 0,90	0,025 máx.	0,015 máx.
ASTM A36	0,26 máx.	Não especificado	0,04 máx.	0,05 máx.
ASTM A572 G50	0,23 máx.	1,35 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.
St 52.3TP**	0,14 a 0,22	1,20 a 1,60	0,025 máx.	0,013 máx.
HC 340 LA	0,12 máx.	1,5 máx.	0,030 máx.	0,025 máx.
HC 420 LA	0,14 máx.	1,6 máx.	0,030 máx.	0,025 máx.

*Apresentados somente teores especificados de C, Mn, P e S. Alguns graus de aços especificam outros elementos não reportados aqui.

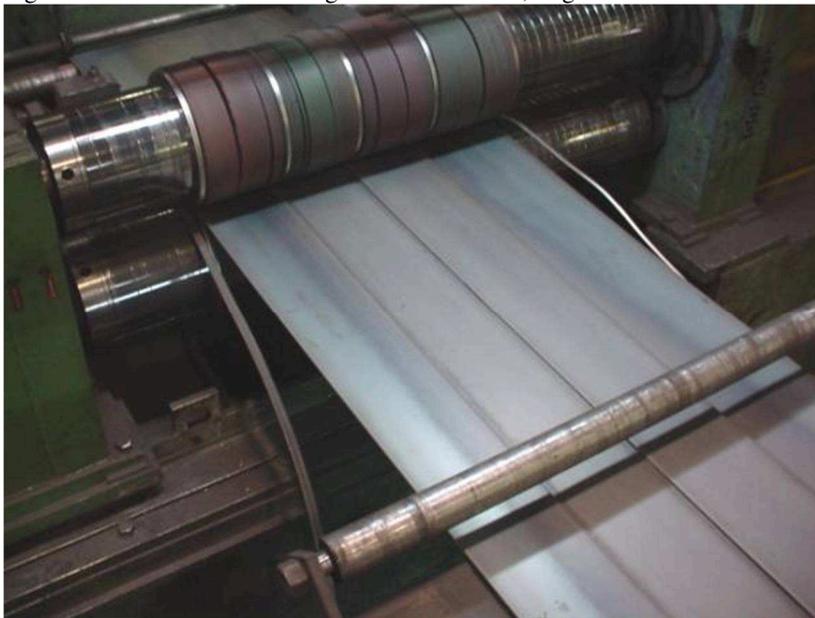
**Graus customizados, não seguem uma norma específica.

Fonte: SAE INTERNATIONAL, 2014, J403; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014, A36/A36M; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018, A572/A572M; EUROPEAN STANDARD, 2013, EN10268.

Após o recebimento e inspeção da matéria-prima (bobina), as bobinas passam pelos processos de desbobinamento e corte. O corte ocorre longitudinalmente na bobina através de facas rotativas, conforme pode ser observado na Figura 2, onde uma bobina de largura de 1200 mm foi cortada em 4 fitas. A fita é cortada de acordo com o diâmetro do tubo que se pretende produzir. Quanto maior a largura da fita, maior será o

diâmetro final do tubo. A espessura da fita não é modificada, e será a espessura final do tubo.

Figura 2 - Processo de corte longitudinal da bobina, originando fitas.



Fonte: Cortesia Tuper (2017).

Após o processo de corte das fitas, estas seguem até o acumulador, onde a ponta de cada fita é soldada uma na outra para uma alimentação ininterrupta para o processo seguinte, que é a formação dos tubos. Entre estas etapas existe uma etapa intermediária que é a inspeção visual e dimensional das fitas.

A formação de tubos soldados por solda elétrica é realizada através de *roll forming* (tradução, do inglês, formação por rolos). De acordo com Han *et al.* (2004, tradução nossa) a formação por rolos é um termo geral para descrever uma grande classe de produtos de fabricação contínua onde uma longa tira de aço é deformada em produtos com geometria desejada, passando por uma série de rolos dispostos em conjuntos. O conceito de formação por rolos também pode ser explicado da seguinte maneira: “Formar longitudinalmente com linhas de curvamento paralelas, através de múltiplos rolos com perfis adequados, uma tira de metal plana sem mudar sua espessura e à temperatura ambiente” (HALMOS, 2006, p.1-3, tradução nossa).

A estação de trabalho é equipada por rolos perfilados e está mostrada na Figura 3, onde o elemento de ligação destes rolos de conformação é o próprio produto, ou seja: o tubo formado. A formação tem como finalidade formar o tubo através da chapa de aço, cada rolo tem uma função específica durante a operação (SILVA FILHO; BETFUER, 2012).

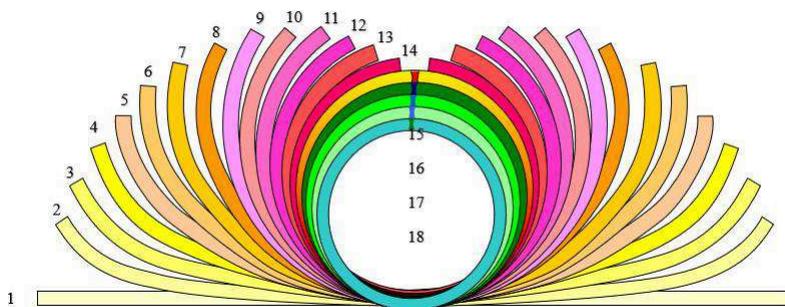
Figura 3 - Rolos de formação do tubo.



Fonte: Cortesia Tuper (2018).

Para exemplificar o que acontece durante a formação do tubo, Braga (2003) ilustrou a Figura 4 que traz o que se conhece como “Flor de formação do tubo”. É uma vista de perfil do processo de formação do tubo, da fita de aço até se transformar num tubo soldado. As etapas de formação, soldagem e calibração são evidenciadas neste esquema de flor.

Figura 4 - Flor de formação do tubo.



Fonte: Adaptado de Braga (2003).

Nas etapas de 1 a 9, indicadas na Figura 4, atuam os rolos denominados *Breakdown* (tradução, do inglês, rolos pré-formadores) que preparam a formação do tubo com o raio final de solda. Nestas etapas as fibras externas da tira de aço sofrem esforço de tração e as fibras internas sofrem compressão (BRAGA, 2003).

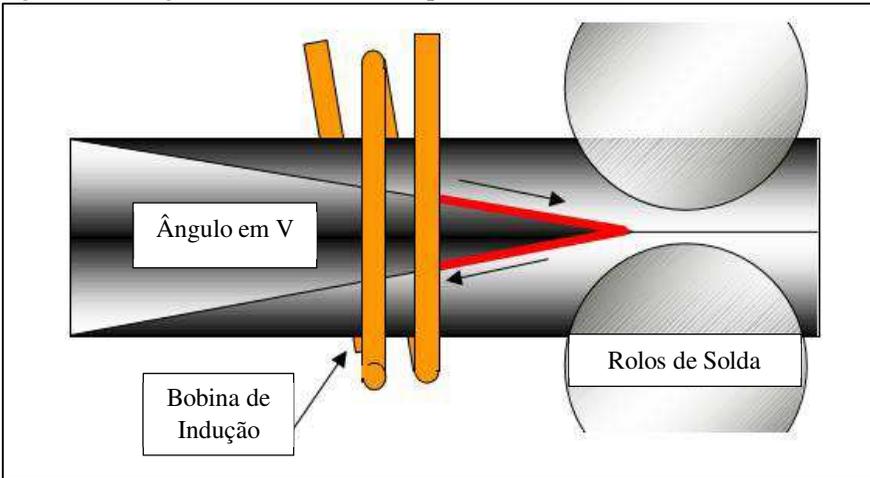
Nas etapas subsequentes, 10 a 14, a fita de aço é gradualmente conformada no formato de tubo e finalmente soldada, sendo chamadas *Fin Pass* (tradução, do inglês, rolos de guia central) e têm como objetivo principal fechar o tubo para então fazer a solda (SILVA FILHO; BETFUER, 2012). As etapas posteriores à soldagem, marcadas como etapas 15 a 18, são chamadas de *Sizing* (tradução, do inglês, calibração) e *Turks Head* (tradução, do inglês, cabeça turca).

A principal etapa durante o processo de formação do tubo é a soldagem do mesmo, isso porque se não houver a solda é apenas um perfil conformado, não podendo ser chamado de tubo. Dentre outros processos de soldagem de tubos, o enfoque principal neste trabalho é a soldagem por indução por resistência elétrica de alta frequência, HFIW (*High Frequency Induction Welding*, tradução, do inglês, Soldagem de Indução por Alta Frequência).

No processo por alta frequência, a solda é obtida pelo calor gerado pela resistência à passagem de corrente elétrica alternada de alta frequência e pela aplicação rápida de pressão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Alta frequência entendida por Marques, Modenesi e Bracarense (2009) é a corrente alternada de 10 a 500 kHz. Já Nichols (1999), traz a informação que a soldagem por alta frequência acontece de 100 a 800 kHz, ou seja, de 100.000 a 800.000 ciclos por segundo.

A soldagem com método de indução por bobina está ilustrada na Figura 5. O princípio básico da soldagem por alta frequência envolve a criação de um ângulo em V, onde as duas superfícies a serem soldadas são unidas. As bordas do tubo são aquecidas pela resistência da corrente de alta frequência e esta corrente flui nas bordas do ângulo em V. À medida que se aproximam, a contribuição do efeito de proximidade concentra a corrente e mais calor é criado até que no ápice do ângulo em V, o metal na superfície da borda é fundido (NICHOLS, 1999).

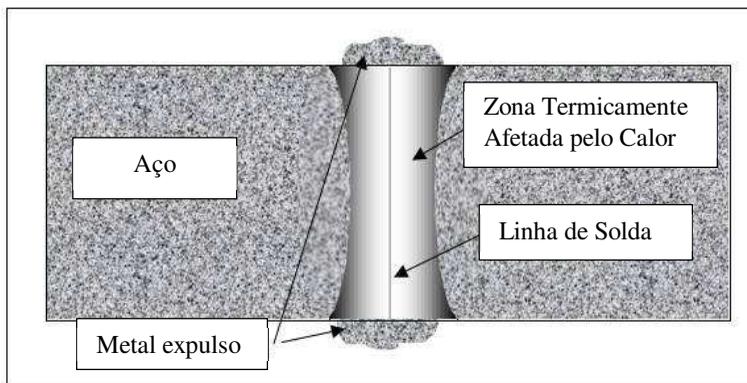
Figura 5 - Soldagem HFIW com indutor tipo bobina.



Fonte: Adaptado de Nichols (1999).

A solda de alta frequência não utiliza nenhum metal de adição, como fazem os métodos de soldagem mais convencionais. A solda HFIW é realizada aplicando-se a corrente de alta frequência às bordas, seja por contato direto ou bobina de indução e, em seguida, as bordas são unidas sob pressão, forçando o metal líquido a ser expulso do plano de união. Por fim, o metal quente e não oxidado sob o metal líquido em cada borda se liga metalurgicamente para formar a solda (NICHOLS, 1999). A Figura 6 apresenta esquematicamente um corte transversal desta solda, onde há uma zona termicamente afetada pelo calor, uma linha de solda e o material expulso durante a pressão das bordas do tubo.

Figura 6 - Vista de perfil de uma solda após processo HFIW.



Fonte: Adaptado de Nichols (1999).

O processo HFIW é bastante usado na soldagem longitudinal de tubos e perfis de aço de parede de pequena espessura, podendo ser usado, também, para tubos de grande espessura de parede (até 25 mm), com uma grande velocidade de soldagem (até cerca de 300 m/min). O processo pode ser usado para diferentes metais e ligas, incluindo aços carbono e de baixa liga, aços inoxidáveis e ligas de alumínio, cobre, titânio e níquel (MONDENESI; MARQUES, 2006).

O processo HFIW tem sido amplamente utilizado na produção de tubulações para gasodutos e oleodutos API (*American Petroleum Intitute*, tradução, do inglês, Instituto Americano do Petróleo). “Tal processo, quando aplicado na fabricação de tubos API 5L, gera boa tenacidade à baixa temperatura, excelente para aplicações Árticas” (SOEIRO JUNIOR; ROCHA; BRANDI, 2013, p.186).

O tubo, após ser soldado, passa por um processo de rebarbamento interno e externo, que tem como principal finalidade a remoção do metal expulso da solda. O processo de rebarbamento interno não é obrigatório, ou seja, dependerá da aplicação final do tubo.

A etapa posterior é a calibração e endireitamento, ou seja, o tubo é calibrado nas tolerâncias desejadas ou ocorre a transformação da seção em perfil quadrado, retangular ou outra forma especial. A seção de calibração é responsável para dar a dimensão final do tubo. A cada passagem, um conjunto de ferramentas tracionadas força o tubo vindo da solda longitudinal a passar por uma dimensão ou forma diferente. Essa redução deve ser dividida pelas passagens existentes para suavizar a deformação. Entre uma passagem e outra, um conjunto lateral é instalado

para controlar as dimensões liberadas pelos rolos calibradores anteriores (SILVA FILHO; BETFUER, 2012).

Após as etapas de calibração e endireitamento, o tubo passa então por ensaios não destrutivos, ensaios mecânicos destrutivos, inspeção visual e dimensional, e teste hidrostático. O objetivo principal destas etapas é o controle de qualidade do tubo soldado. Os ensaios não destrutivos, como por exemplo Correntes Parasitas, tem como principal objetivo a detecção de defeitos na solda. Os ensaios mecânicos destrutivos, como exemplo, achatamento e expansão, têm como objetivo avaliar a resistência da solda quando submetida à esforços mecânicos. Já o teste de tração é realizado para verificar as propriedades mecânicas dos tubos soldados. Através deste ensaio são mensurados o Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e o Alongamento do tubo. O teste hidrostático é comumente utilizado para garantir a qualidade de tubos para condução de fluidos, em que os tubos são submetidos à determinada pressão para verificar se há ocorrência de vazamentos através da solda.

As etapas finais do fluxo, marcação, embalagem e pesagem ocorrem para garantir a rastreabilidade e integridade do tubo que será expedido ao cliente final.

2.2 APLICAÇÕES

Dependendo do diâmetro, da forma e da espessura do tubo, existem diversas aplicações em que tubos soldados poderão ser empregados. A importância destes produtos está fortemente ligada à diversidade de sua empregabilidade.

Nesta seção, os tubos foram divididos em 2 classificações: tubos de pequeno diâmetro, contemplando diâmetros até 101,60 mm; e tubos de grande diâmetro, contemplando diâmetros acima de 101,60 mm. Esta classificação é meramente ilustrativa e servirá de base para a explicação dos mecanismos de deformação plástica envolvidos, que cada classe de tubo sofrerá após conformação mecânica, oriunda do ensaio mecânico de tração.

2.2.1 Aplicação de tubos de pequeno diâmetro

Produtos derivados do aço, mais especificamente tubos, são largamente utilizados na construção civil, indústria de automóveis, máquinas agrícolas, e demais indústrias. As propriedades mecânicas desses produtos garantem características únicas aos produtos finais.

Tubos de aço são largamente utilizados na construção civil, por serem soluções leves e econômicas, face a sua elevada resistência mecânica. Também reduzem expressivamente os prazos de construção e os custos de gerenciamento do canteiro de obras e antecipam o retorno de capital (TUPER, 2016).

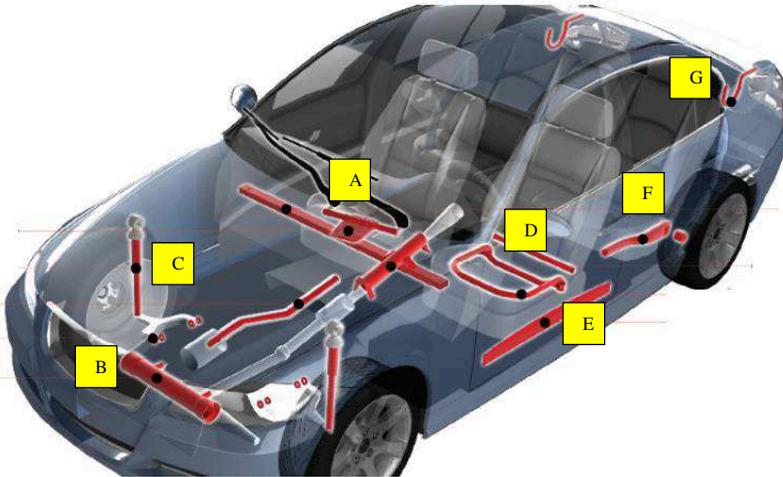
Tubos de aço de pequeno diâmetro (até 4” ou 101,60 mm) soldados através do processo HFIW, podem ter basicamente estas aplicações: peças para automóveis e motocicletas; estruturas de máquinas agrícolas e implementos rodoviários; tubulação para caldeiras, trocadores de calor, condução de fluidos e gás; produção de óleo e gás; estruturas utilizadas na construção civil, andaimes e demais usos gerais. Dependendo da aplicação, aços carbono comuns (à exemplo, o SAE 1012 e SAE 1020) são utilizados. Porém, se a aplicação demanda propriedades especiais, por exemplo a resistência à corrosão atmosférica, aços carbono com ligas especiais são então empregados.

A indústria de automóveis e motocicletas utiliza largamente tubos de aço nas estruturas de seus produtos. A Figura 7 apresenta alguns exemplos das aplicações de tubos em um automóvel: suporte de limpador de para-brisas (Figura 7, A), caixas de direção (Figura 7, B), amortecedores (Figura 7, C), estruturas de bancos (Figura 7, D), barras de impacto (Figura 7, E), eixo de suspensão (Figura 7, F) e dobradiças de porta-malas (Figura 7, G) (TUPER, 2018).

A tendência mundial é que os automóveis sejam cada vez mais leves e consumam menos combustível, por isso a utilização de aços cada vez mais resistentes e menos espessos. Preethi *et al.* (2014) já citavam esta tendência, mencionando que tubos de aço de alta resistência são cada vez mais utilizados em aplicações automotivas, sendo que a vantagem da utilização destes tubos está ligada à diminuição de peso em automóveis e, conseqüentemente, maior eficiência energética quanto ao consumo de combustível.

A produção dos tubos para estas aplicações, em grande parte, é referenciada pelas Normas EN 10305-3 (2016) e EN 10305-2 (2016). Estas normas determinam os requisitos técnicos de atendimento a itens com e sem tratamento térmico, como também em trefilados para aplicações de precisão. As grandes montadoras também possuem normas próprias, neste caso, o fabricante do tubo deve seguir os requisitos específicos de cada montadora.

Figura 7 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em peças automotivas.



Fonte: Tuper (2018).

Máquinas agrícolas e implementos rodoviários também têm tubos soldados de aço carbono de pequeno diâmetro (principalmente 38,10 e 50,80 mm) em suas estruturas. Um exemplo está apresentado na Figura 8, onde os tubos são empregados em braços de pulverizadores agrícolas, com o principal objetivo a sustentação dos dutos pulverizadores. A maior parte destes tubos são produzidos conforme Norma Brasileira NBR 8261 (2010) ou Americana ASTM A500 (2018), em que ambas especificam requisitos técnicos para fabricação de tubos estruturais.

Figura 8 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em máquinas agrícolas.



Fonte: John Deere (2019).

Os tubos de pequeno diâmetro também são muito utilizados nas tubulações de caldeiras, trocadores de calor e para condução de fluidos e gás. Os tubos de aço carbono utilizados em redes de água, esgoto, tubulações industriais de água e vapor são produzidas conforme Normas Brasileiras NBR 5580 (2015) e NBR 5590 (2015). Tubos para caldeiras e

trocadores de calor são produzidos conforme Normas Americanas ASTM A178 (2012) ou ASTM A214 (2018). A Figura 9 apresenta a aplicação dos tubos em caldeiras, sendo este o interior da caldeira que posteriormente será envolto por uma carcaça.

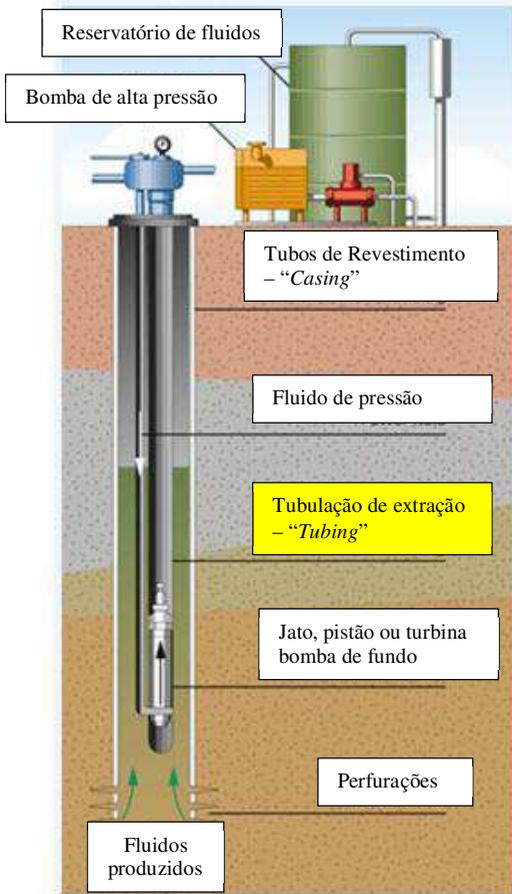
Figura 9 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em caldeiras.



Fonte: Incase (2019).

Também pode-se citar a aplicação de tubos de pequeno diâmetro na produção de óleo e gás. Apesar destes tubos serem, em sua maioria, de grandes diâmetros, podem-se citar aqui uma classe de tubos de pequenos diâmetros, chamados *Tubing* (tradução, do inglês, tubulação), que tem a função de transportar o óleo ou gás do interior do poço até a superfície. Estes tubos pertencem a uma classe chamada de OCTG (*Oil Country Tubular Goods*, tradução, do inglês, Produtos Tubulares para Petróleo) que são tubos usados na produção e extração de óleo e gás (VOESTALPINE, 2019). A Norma Americana API 5CT (2018) rege os requisitos técnicos para a fabricação destes tubos. A Figura 10 apresenta uma representação esquemática de um poço reservatório de petróleo, bem como a utilização do *Tubing* na extração.

Figura 10 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro na extração de petróleo.



Fonte: Adaptado de Rigzone (2019).

Na construção civil, os tubos são aplicados em grande quantidade e diversidade: para estruturas de galpões, instalações elétricas e hidráulicas, estaleiros, placas de sinalização, estruturas de equipamentos industriais, dentre outras (TUPER, 2016). Nos anos de 2014 e 2016 as estruturas de portos, aeroportos e estádios da Copa do Mundo e das Olimpíadas, ambas realizadas no Brasil, tiveram uma quantidade expressiva de tubos de aço, bem como diversos outros produtos de aço (FREDIANI, 2014). Um exemplo destas grandes obras foi o Estádio

Aquático Olímpico do Rio de Janeiro, ilustrado na Figura 11, que possui em sua estrutura tubos de pequenos diâmetros.

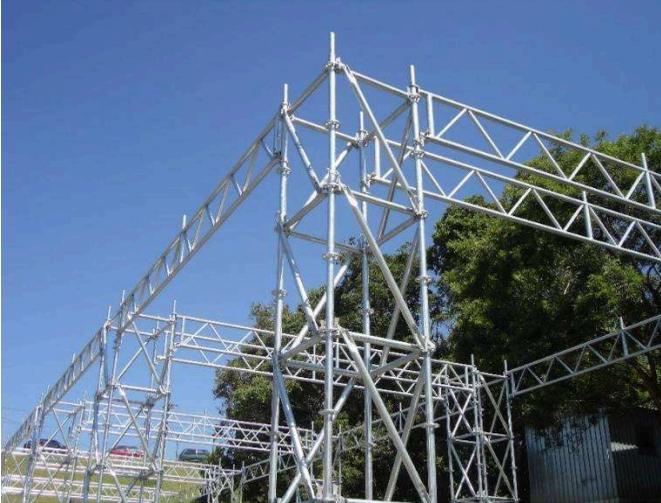
Figura 11 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro na construção civil – Estádio Aquático Olímpico.



Fonte: Marques (2017).

Como aplicação na construção civil também pode-se citar os andaimes produzidos com tubos de aço carbono, ilustrados na Figura 12. Geralmente são utilizados tubos de perfil redondo soldados (com costura) ou sem costura. Estes tubos devem ter um limite de escoamento mínimo (LE) de 235 MPa e podem ser produzidos com diâmetro de 48,30 mm e espessura a partir de 2,90 mm. Os andaimes produzidos a partir de tubos tiveram sua superioridade reconhecida, em termos de razões técnicas (uniformidade de inércia em todas as direções) e em razões práticas (montável e desmontável facilmente).

Figura 12 - Aplicação de tubos de pequeno diâmetro em andaimes.



Fonte: Cortesia Tuper (2018).

Tubos de pequeno diâmetro, quando são conformados e soldados por HFIW, conforme processo já visto na seção 2.1, estão sujeitos a um tipo de pré-deformação chamado de encruamento ou trabalho a frio. O encruamento ocorre quando é aplicada uma tensão que exceda o limite de escoamento (LE) original do material metálico, e então a cada vez que é aplicada uma deformação plástica maior, o LE aumentará e a ductilidade (Alongamento – AL) diminuirá (ASKELAND; PHULÉ, 2008). O encruamento é fortemente dependente da razão entre a espessura de parede do tubo e seu diâmetro externo (t / D) (ZHANG; DING; GU, 2012). Tubos com alta razão espessura/diâmetro (t / D) terão pré-deformação predominantemente de encruamento e o limite de escoamento será maior que tubos com baixa razão t / D .

Segundo Chiaverini (2008) o limite de resistência à tração (LRT) também pode ser maior em tubos de menor diâmetro e mesma composição química (mesma corrida do aço), resultado da conformação mecânica mais intensa a que são submetidos.

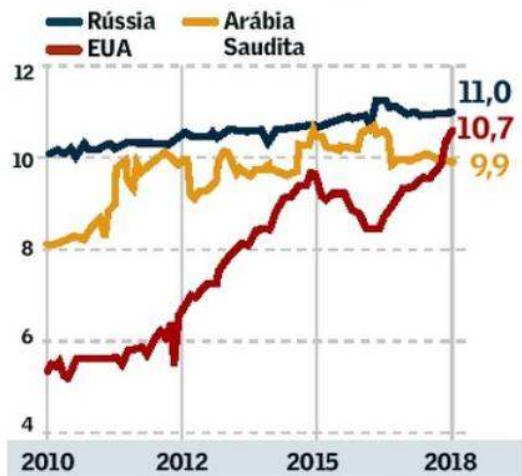
Os tubos de pequeno diâmetro serão o objeto de estudo deste trabalho de dissertação, e o encruamento será o principal mecanismo de deformação plástica a ser verificado de forma indireta, a partir dos resultados de limite de escoamento em função do dimensional de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados (Seção 5).

2.2.2 Aplicação de tubos de grande diâmetro

A exemplo das aplicações dos tubos de pequeno diâmetro, os tubos de grande diâmetro também são utilizados em estruturas de máquinas agrícolas e implementos rodoviários, tubulação para condução de fluidos e gás, produção de óleo e gás, estruturas utilizadas na construção civil e demais usos gerais.

Tubos de grande diâmetro, a partir de 4" ou 101,60 mm de diâmetro, são amplamente utilizados nas tubulações para condução e prospecção de óleo (petróleo) e gás. Estes tubos são produzidos conforme requisitos das Normas Americanas API 5L (2018) (para condução de óleo e gás) e API 5CT (2018) (para extração de óleo e gás). Os produtores americanos de petróleo têm aquecido o mercado brasileiro de exportação de tubos de grande diâmetro, visto que a produção de petróleo nos Estados Unidos quase dobrou na última década, conforme Figura 13.

Figura 13 - Maiores produtores de petróleo em 2018, em milhões de barris por dia.



Fonte: Departamento de Energia, Opep e Ministério de Energia da Rússia (2018) apud Moraes (2018).

Um grande destaque na utilização de tubos de grande diâmetro são as aplicações estruturais em máquinas agrícolas. A Figura 14 destaca um tubo de dimensional 168,30 mm na espessura 12,70 mm, utilizado na junção dos braços do carregador (indicado pela seta) em uma retroescavadeira.

Figura 14 - Aplicação de tubos de grande diâmetro – Máquinas agrícolas.



Fonte: Cortesia Tuper (2018).

Dentre as aplicações estruturais, os tubos de grande diâmetro são utilizados na construção civil em geral. A Figura 15 apresenta uma imagem do saguão do Aeroporto de Natal (RN), construído com o auxílio de tubos.

Figura 15 - Aplicação de tubos de grande diâmetro – Aeroporto de Natal (RN).



Fonte: Matias (2019).

Tubos de grande diâmetro, quando são conformados e soldados por HFIW, processo já visto na Seção 2.1, estão sujeitos ao chamado efeito de Bauschinger.

Yan (1998 apud Haus, 2011) afirma que “quando os materiais são carregados em uma direção axial (por exemplo, tração uniaxial) no regime elástico, descarregados e, em seguida, carregados no sentido inverso (por exemplo, compressão uniaxial), eles podem produzir, durante a recarga, um nível de tensão mais baixo do que o do carregamento realizado no sentido original”; ou seja, há diminuição do limite de escoamento, sendo este mecanismo de deformação denominado como efeito de Bauschinger, predominante em tubos com baixa razão t/D .

Os tubos de grande diâmetro não foram abordados neste trabalho, e consequentemente o efeito de Bauschinger poderá não estar tão evidente na análise dos dados das propriedades mecânicas de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados (Seção 5).

3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE AÇO

Esta seção tem o objetivo de tratar sobre o ensaio mecânico de tração em tubos de aço, as propriedades mecânicas que podem ser mensuradas neste ensaio e avanços científicos alcançados em outros trabalhos, com o foco em tubos metálicos.

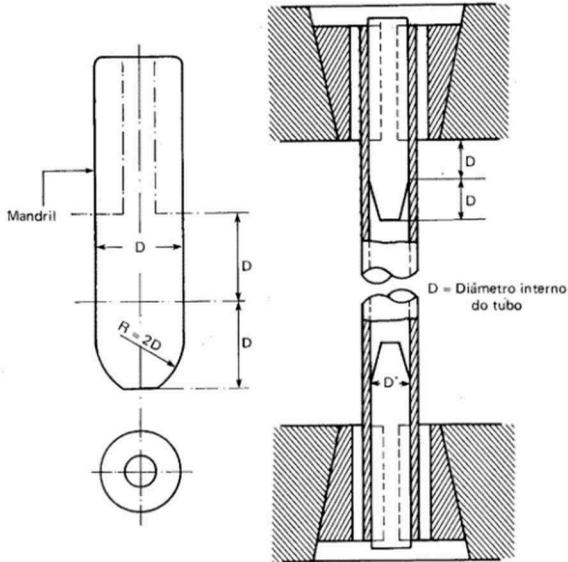
3.1 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO EM TUBO METÁLICO

O ensaio mecânico de tração em tubos de aço é realizado em máquinas de tração convencionais. O ensaio e o tipo de amostra são muito parecidos com as amostras para ensaio de chapas de aço, porém, para tubos, existe mais de um tipo de amostra possível para a realização do ensaio, dependendo do dimensional do tubo.

Existem dois tipos de amostra que podem ser utilizadas para realização do ensaio mecânico de tração em produtos tubulares: amostras de seção completa, ou seja, de tubo inteiro, e em corpos de prova cortados e usinados destes tubos. O que determina a escolha do tipo de amostra é, em geral, o diâmetro externo do tubo. Conforme ASTM E8/E8M (2016a), em tubos com diâmetro externo de até 25 mm é prática adotar amostras de seção completa (tubo inteiro). Para tubos de grande diâmetro, ou quando existe limitação do equipamento, deve-se utilizar o corpo de prova usinado.

Para amostras de seção completa (tubo inteiro) são inseridos mandris de aço (também chamado de insertos) nas extremidades do tubo, com objetivo de prender as amostras corretamente à máquina e também de impedir que as garras da máquina amassem o tubo durante o ensaio. Em geral, existem diversos conjuntos de mandris que são acoplados diretamente nos tubos por contato direto, em que cada conjunto de mandril tem a medida ideal para encaixar num determinado diâmetro, ou seja, se o tubo tem 20,00 mm de diâmetro o conjunto de mandris deve ter pouco menos de 20,00 mm de diâmetro. Conforme ASTM E8/E8M (2016a), estes mandris não podem estender-se para a parte da amostra na qual o alongamento (AL) é medido. A Figura 16 ilustra o mandril e a maneira adequada de posicionar o tubo para o ensaio mecânico de tração.

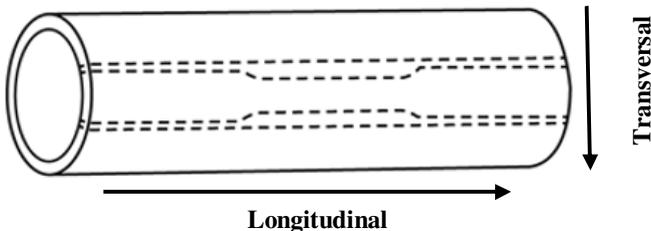
Figura 16 - Demonstração da amostra de seção completa (tubo inteiro) e do mandril de aço posicionados na máquina de ensaios universal.



Fonte: Souza (1986).

Tubos de grande diâmetro, que não possuem dimensões adequadas para realização do ensaio mecânico de tração de um tubo inteiro, ou que não possam ser ensaiados inteiros, devido às limitações de equipamentos, devem ser cortados e usinados gerando corpos de prova originárias do tubo. O corpo de prova deve ser cortado no sentido longitudinal do tubo e à 90° da solda (ASTM E8/E8M, 2016a). A amostra poderá também ser retirada no sentido transversal, caso a norma do produto especifique este sentido. A Figura 17 mostra a região de corte da amostra em um tubo.

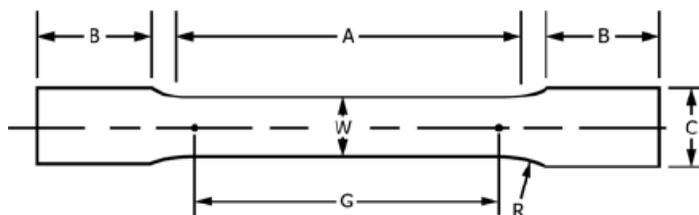
Figura 17 - Região de corte da amostra, no sentido longitudinal, em um tubo.



Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M (2016a).

Após cortada, a amostra (Figura 17) deverá ser usinada para ficar no formato de “gravata” (Figura 18). A Figura 18 mostra uma representação esquemática de um corpo de prova cortado a partir de um tubo, em que A é o comprimento da seção paralela reduzida, B é o comprimento da seção de fixação, G é o comprimento da área usinada (amplamente chamada de L_0), W é a largura do corpo de prova na seção reduzida, C é largura da cabeça (região que o corpo de prova será fixado na máquina de tração), e R é o raio de concordância (ASTM E8/E8M, 2016a). As dimensões A, B, W, G, C e R são determinadas por normas específicas de ensaio mecânico de tração em materiais metálicos ou normas de produtos para aplicações de tubos de aço. Algumas normas utilizadas para determinação destas dimensões são: Norma Americana ASTM E8/E8M (2016a), Norma Brasileira ABNT NBR ISO 6892-1 (2015) ou Norma Europeia EN 10002-1(2001).

Figura 18 - Corpo de prova cortado e usinado a partir de um tubo.



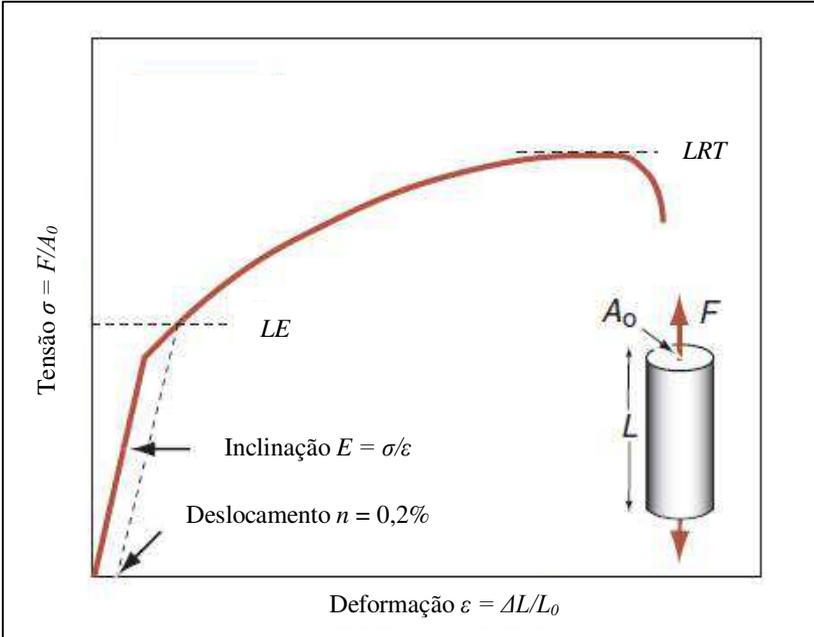
Fonte: ASTM E8/E8M (2016a).

Após a escolha do tipo de corpo de prova, a próxima etapa consiste em realizar o ensaio mecânico de tração. Para a realização do ensaio, conforme ASTM E8/E8M (2016a), a garra da máquina de tração deve ser curva, a fim de acompanhar a curvatura do corpo de prova. Caso não seja possível, as extremidades do corpo de prova (cabeça) poderão ser achatados (para melhor fixação da amostra à garra) mas não é permitido que a parte útil seja achatada (pois sofreria deformação à frio) o que poderia alterar suas propriedades mecânicas antes do ensaio.

Conforme Souza (1986), na parte útil (Figura 18, medida G) são realizadas as medidas de propriedades mecânicas (Limite de escoamento – LE , Limite de Resistência à Tração – LRT e Alongamento – AL) do componente, e a cabeça (Figura 18, medidas B e C) é apenas uma área de fixação do corpo de prova na máquina de ensaios mecânicos, sem nenhuma relação com os resultados.

O ensaio mecânico de tração fornece uma curva da tensão em função da deformação, conforme Figura 19, e é neste gráfico que o *LE*, *LRT* e *AL* são identificados.

Figura 19 - Representação esquemática de curva típica da tensão em função da deformação para materiais metálicos.



Fonte: Adaptado de Ashby (2005).

A tensão de engenharia (σ) é definida por (CALLISTER, 2007):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

em que F é a força de tração exercida sobre o corpo de prova, e A_0 é a área de seção transversal em que as propriedades mecânicas são medidas (ou seja, a área útil). Para um corpo de prova de seção completa (conforme Figura 16), a área inicial (A_0) pode ser definida por (ASTM A370, 2017):

$$A_0 = 3,1416 t(D - t) \quad (2)$$

em que t é a espessura do tubo e D é o diâmetro externo do tubo. Para um corpo de prova retirado de um tubo (conforme Figuras 17 e 18), a área inicial (A_0) será calculada por (ASTM E8/E8M, 2016a; EN 10002-1, 2001):

$$A_0 = \left[\left(\frac{W}{4} \right) \sqrt{(D^2 - W^2)} \right] + \left[\left(\frac{D^2}{4} \right) \arcsen \left(\frac{W}{D} \right) \right] - \left[\left(\frac{W}{4} \right) \sqrt{(D - 2t)^2 - W^2} \right] - \left[\left(\frac{D - 2t}{2} \right)^2 \arcsen \left(\frac{W}{D - 2t} \right) \right] \quad (3)$$

em que W é a largura do corpo de prova na seção reduzida, D é o diâmetro externo do tubo e t é a espessura do corpo de prova retirado do tubo.

O cálculo da área inicial (A_0) pela Equação (3) é válido para o caso $D/W \leq 6$. Quando $D/W > 6$, a área inicial (A_0) será calculada por (ASTM E8/E8M, 2016a).

$$A_0 = Wt \quad (4)$$

O Limite de Escoamento (LE) e o Limite de Resistência à Tração (LRT) são importantes propriedades mecânicas determinadas a partir de um ensaio mecânico de tração, conforme curva típica representada na Figura 19.

O Limite de Escoamento pode ser chamado também de tensão de escoamento ($LE = \sigma_{ys}$). Conforme Garcia, Spim e Santos (2008), a tensão de escoamento é a máxima tensão atingida na região de escoamento, ou seja, no ponto de transição do regime elástico para o regime plástico. A tensão de escoamento é calculada pela razão entre a força atingida no escoamento com a área inicial (A_0). Para casos de escoamento imperceptível (como em produtos de aço) convencionou-se adotar uma deformação padrão que corresponda ao limite de escoamento, conhecida como limite n de escoamento, para metais e ligas $n = 0,2\%$. O limite de resistência à tração, também denominado tensão máxima ($LRT = \sigma_{m\acute{a}x}$), é a tensão correspondente ao ponto de máxima força da curva tensão em função da deformação.

A deformação de engenharia é definida por (CALLISTER, 2007):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (5)$$

em que ΔL é a variação do comprimento final após a ruptura (L_f) em relação ao comprimento inicial do corpo de prova antes do ensaio (L_0) (medida G na Figura 18), sendo a deformação a grandeza do eixo da horizontal da curva da Figura 19. Segundo Callister (2007, p. 135) “a grandeza $L_f - L_0$ representa o alongamento da deformação ou a variação no comprimento a um dado instante, conforme referência ao comprimento original”. Quando este alongamento é representado em termos percentuais, após a fratura, AL é definido como (ABNT NBR ISO 6892-1, 2015):

$$AL = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) 100 (\%) \quad (6)$$

Segundo Souza (1986), “o alongamento dá uma medida comparativa da ductilidade de dois materiais. Quanto maior for o alongamento, mais dúctil será o material”.

Existe um grande número de normas de tubos que definem exatamente como deverão ser dimensionados os corpos de prova para o ensaio mecânico de tração, e as correspondentes especificações mínimas de LE , LRT e AL que os tubos de aço deverão atender. Podem ser citadas algumas Normas, tais como: NBR 5590 (2015), NBR 8261 (2010), ASTM A500 (2018) e EN 10305-3 (2016).

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS METÁLICOS

Propriedades mecânicas, em especial o Limite de Escoamento (LE) e o Limite de Resistência à Tração (LRT), são amplamente estudadas, e o conhecimento destas duas propriedades é essencial ao se estudar estruturas mecânicas sujeitas a cargas de tração uniaxial. Atualmente existem diversos componentes de aço que estão submetidos a estas cargas e, mais especificamente, tubos produzidos com os mais variados tipos de aço estão no mercado e no dia-a-dia das pessoas. Visando identificar na literatura mundial qual é o enfoque atual das pesquisas relacionadas às propriedades mecânicas em tubos de aço soldados, as técnicas de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foram empregadas neste trabalho.

“A revisão bibliográfica sistemática é um método científico para busca e análise de artigos de uma determinada área da ciência”

(CONFORTO *et al.*, 2011). Mulrow (1994, apud CONFORTO *et al.*, 2011, p.2) cita que muitos setores, como saúde, estudos demográficos e legisladores políticos, analisam uma grande quantidade de informação utilizando a revisão sistemática, tornando a tomada de decisão mais eficaz e aumentando a confiabilidade das conclusões do estudo. Para Higgins e Green (2008, apud ARAÚJO; MELLO, 2013) a RSL é um método padronizado de busca utilizado para responder questões específicas de pesquisa através de critérios de elegibilidade predefinidos. O pesquisador deve definir a questão principal de pesquisa, estabelecer as palavras-chaves (*strings* de busca) e os critérios de elegibilidade (filtros) para incluir ou eliminar um artigo, assim possibilitando a coleta de dados e posterior análise (ARAÚJO; MELLO, 2013).

A abordagem sistemática em uma revisão bibliográfica possibilita maior nível de confiabilidade. A busca e análise de dados devem ser realizadas com estratégia e um método sistemático, através da repetição de ciclos contínuos, até que os objetivos da revisão sejam alcançados (CONFORTO *et al.*, 2011). Um exemplo desta busca e análise dos resultados através de ciclos é o modelo proposto por Levy e Ellis (apud Conforto *et al.*, 2011, p.4), em que os resultados devem ser alcançados através de três fases principais: Entrada; Processamento e Saída. A Figura 20 mostra, através de um diagrama, estas fases e enfatiza a realização de ciclos de busca.

Figura 20 - Fases de uma revisão bibliográfica efetiva.

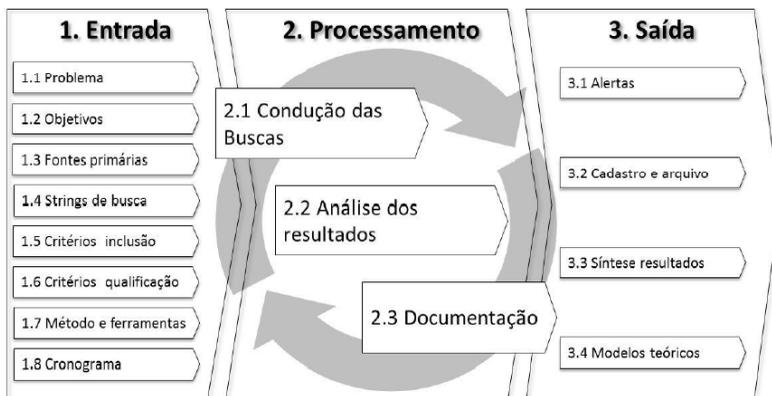


Fonte: Levy e Ellis (apud Conforto *et al.*, 2011).

Conforto *et al.* (2011), notando a ausência de modelos específicos para a revisão sistemática na área de gestão de operações, desenvolveram um roteiro de condução de revisão sistemática chamado RBS Roadmap. O modelo proposto segue as mesmas fases propostas na Figura 20, porém

cada fase é mais detalhada. RBS Roadmap está ilustrada na Figura 21, apresentando as principais fases e etapas.

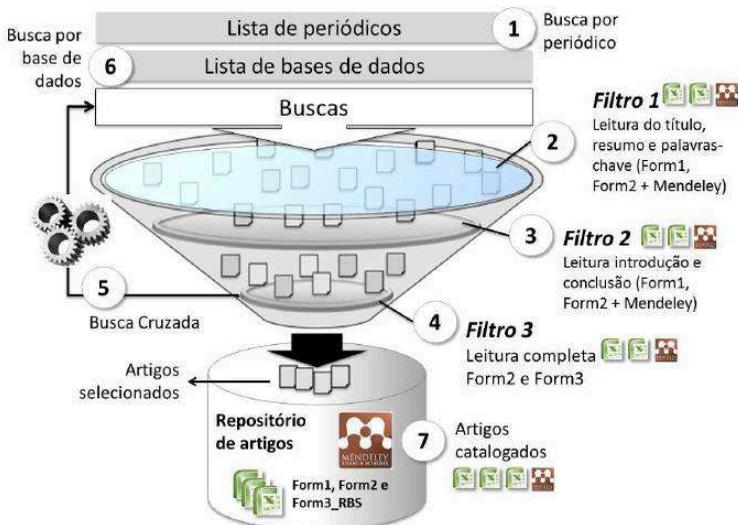
Figura 21 - Modelo para condução da revisão sistemática bibliográfica – RBS Roadmap.



Fonte: Conforto *et al.* (2011).

Conforto *et al.* (2011) propõem que a fase de processamento (2) siga um processo iterativo contendo sete passos, ilustrados da Figura 22.

Figura 22 - Sete passos da fase de processamento no modelo RBS Roadmap.



Fonte: Conforto *et al.* (2011).

As etapas 1, 5 e 6 compreendem a busca por periódico e bases de dados. Nas etapas 2, 3 e 4 são realizadas as leituras e análise dos resultados. Nas etapas 2, 3, 4 e 7 os artigos são selecionados através de filtros e catalogados em formulários (conforme indicação na Figura 22: Form1, Form2, Form3). Ao final da fase 2 (processamento) tem-se catalogados: quantidade de artigos encontrados por periódico; quantidade de artigos excluídos; quantidade de artigos encontrados na busca cruzada, dentre outros (Conforto *et al.*, 2011).

Para a pesquisa desta dissertação, as plataformas de busca de dados Scopus, Science Direct e Google Scholar foram utilizadas e os *strings* de busca adotados foram combinações entre os termos: “*mechanical properties*”; “*steel tubes*”; “*welded tubes*”; “*work hardening*”; “*yield strength*”; “*tensile tests*”; “*Bauschinger effect*”. Os filtros, ou critérios de elegibilidade (conforme Figura 22) foram utilizados: no filtro 1 foi realizada a leitura de título, resumo e palavras-chave; no filtro 2 foi realizada a leitura de introdução e conclusão; no filtro 3 foi realizada a leitura completa dos artigos selecionados. Os artigos científicos e trabalhos completos publicados em anais de congressos considerados relevantes (artigos catalogados, etapa 7) para esta dissertação estão resumidos e apresentados nos itens 3.2.1 a 3.2.9. Uma Síntese Integradora é apresentada no item 3.2.10, a fim de sumarizar as informações levantadas com a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), para a temática “Propriedades Mecânicas de Tubos Metálicos”.

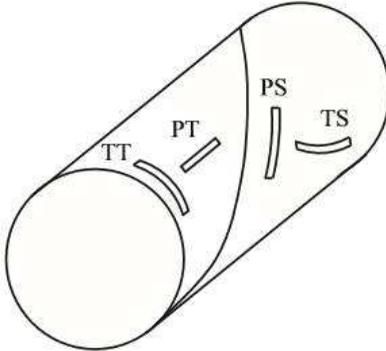
3.2.1 Efeito da orientação de corpos de prova retirados de tubos

Sadowski *et al.* (2015) estudaram propriedades mecânicas em tubos soldados em espiral a partir de bobinas laminadas de aço carbono no grau API 5L X52 (com limite de escoamento nominal de média igual a 52 ksi ou 360 MPa). Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para comparar os valores médios das propriedades mecânicas (*LE* - limite de escoamento e *LRT* - limite de resistência à tração), considerando diferentes orientações relativas aos eixos do tubo, visando verificar a influência da anisotropia do material sobre a resistência à flexão do tubo. Conforme Sadowski *et al.* (2015), estes tubos de grande diâmetro, soldados em espiral (helicoidais), são interligados por estacas (formando Combitubes) e são utilizados em muros de contenção (barragens, por exemplo), em que a aplicação requer considerável resistência mecânica para resistir às forças horizontais do solo e da pressão da água.

Amostras foram tomadas a partir de tubos de 820 mm de diâmetro, com espessuras de 8 mm e 11 mm, em diferentes orientações: paralelo ao

eixo do tubo (PT), transversal ao eixo do tubo (TT), paralelo ao eixo da tira (PS) e transversal ao eixo da tira (TS) (Figura 23).

Figura 23 - Orientação dos corpos de prova TT, PT, PS e TS no tubo.



Fonte: Sadowski *et al.* (2015).

O Quadro 2 apresenta a média dos resultados das propriedades mecânicas *LE* e *LRT* por orientação de amostras retiradas de tubo metálico.

Quadro 2 - Propriedades mecânicas no tubo, conforme orientação do corpo de prova.

Orientação do CP	Média do <i>LE</i> (MPa)	Média do <i>LRT</i> (MPa)
PT (paralelo ao eixo do tubo)	377,68	514,85
TT (transversal ao eixo do tubo)	355,87	506,85
PS (paralelo ao eixo da tira)	380,39	529,62
TS (transversal ao eixo da tira)	373,49	512,88

Fonte: Adaptado de Sadowski *et al.* (2015).

A conclusão do estudo através da ANOVA é de que os valores extraídos vêm de uma única população, com uma média comum, independente da orientação do corpo de prova do tubo. A orientação do corpo de prova não demonstra efeito significativo nas propriedades do material. O estudo fornece evidências para apoiar o tratamento isotrópico para tubos helicoidais em análises computacionais da resistência mecânica para designs estruturais.

3.2.2 Efeito da trefilação e do recozimento em tubos

Preethi *et al.* (2014) estudaram o desenvolvimento de tubos de aço carbono com grãos ultrafinos (UFG), através de múltiplos passes de trefilação e tratamento de recozimento. Os pesquisadores utilizaram o aço SAE 1019M para formação dos tubos, soldados através de processo ERW, trefilados com deformações de 0,3 a 1,4, e, logo após tratamento térmico de recozimento em temperaturas de 400, 450 e 500 °C.

“Em aços de baixo carbono, um tamanho de grão menor que 3 micrômetros é considerado uma microestrutura de grãos ultrafinos (UFG)” (PREETHI *et al.*, 2014, p.682, tradução nossa).

O estudo também visou o desenvolvimento de tubos de aço com limite de resistência à tração (*LRT*) em um intervalo de 560 a 1000 MPa com melhor alongamento percentual (*AL*), para aplicações em estruturas de suspensão de automóveis. A trefilação a frio em tubos de aço foi adaptada para introduzir deformação plástica severa no material. Daí em diante, a baixa temperatura de tratamento térmico de recozimento foi realizada, para restaurar a ductilidade nos tubos (PREETHI *et al.*, 2014).

O Quadro 3 apresenta as propriedades mecânicas médias em cada processo estudado.

Quadro 3 - Propriedades mecânicas obtidas conforme condição do processo testado.

Condição do processo testado	Propriedades Mecânicas	Deformação na trefilação			
		0,3	0,6	0,9	1,4
Somente Trefilado	<i>LE</i> (MPa)	700	770	880	934
	<i>LRT</i> (MPa)	725	813	914	966
	<i>AL</i> (%)	10	7	5	5
Trefilado com recozimento final de 400 °C	<i>LE</i> (MPa)	711	850	940	1053
	<i>LRT</i> (MPa)	767	872	947	1061
	<i>AL</i> (%)	12	7	9	9
Trefilado com recozimento final de 450 °C	<i>LE</i> (MPa)	687	800	882	940
	<i>LRT</i> (MPa)	708	833	903	953
	<i>AL</i> (%)	13	11	11	11
Trefilado com recozimento final de 500 °C	<i>LE</i> (MPa)	685	745	807	852
	<i>LRT</i> (MPa)	706	786	831	880
	<i>AL</i> (%)	13	12	12	13

Fonte: Adaptado de Preethi *et al.* (2014).

O estudo concluiu que as condições mais adequadas de processamento para produção de UFG é uma deformação de 1,4 no

processo de trefilação, seguido de recozimento à temperatura de 500 °C. Quanto aos resultados de propriedades mecânicas, foi conseguido um limite de resistência à tração de até 1061 MPa, com 9% de alongamento, utilizando deformação de 1,4 e temperatura de recozimento 400 °C. Estes resultados indicam que para aplicações automotivas, o processo utilizando SAE 1019M tem mostrado bons resultados (PREETHI *et al.*, 2014).

3.2.3 Efeito do tipo de corpo de prova

Vieira *et al.* (2013) fizeram investigações com relação a diferença de propriedades mecânicas (*LRT*, *LE* e *AL*) em tubos de aço soldados, quando as amostras para o ensaio mecânico de tração são obtidas no componente original (tubo inteiro) e amostras de corpos de prova (CP) retirados dos mesmos tubos. Segundo Vieira *et al.* (2013, p. 2358) “Quando realizados no próprio produto, os ensaios têm maior significado, pois procuram simular as condições reais de funcionamento do mesmo”. Porém, devido às limitações de equipamento e dimensões dos tubos, nem sempre é possível realizar o ensaio no tubo inteiro.

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados em dez amostras de tubo inteiro e dez amostras de corpos de prova retirados dos tubos, sendo que os tubos tinham 22,22 mm de diâmetro e espessura de 1,60 mm.

Os resultados da pesquisa demonstraram que, quando as amostras eram provenientes de corpos de prova retirados dos tubos, as propriedades mecânicas eram menores do que quando as amostras eram o tubo inteiro. O resultado médio de *LE* em tubo inteiro foi 23% maior que em CP. O *LRT* ficou 18% maior em tubo inteiro em relação ao CP. O Quadro 4 demonstra os resultados médios de *LE*, *LRT* e *AL* nas amostras de tubo e CP.

Quadro 4 - Média de *LE*, *LRT* e *AL* nas amostras de tubo inteiro e CP.

Tipo de corpo de prova	<i>LE</i> médio (MPa)	<i>LRT</i> médio (MPa)	<i>AL</i> médio (%)
Tubo inteiro	506	519	22
CP	411	439	8

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2013).

Para valores de *AL*, os resultados em tubos inteiros também foram maiores que em amostras de CP. Enquanto em tubos inteiros a média de

AL foi em torno de 22%, para amostras de CP esta média foi de 8%, ou seja, três vezes menor.

A conclusão do estudo é que ensaios em amostras de corpos de prova retirados de tubos (CP) trazem resultados mais cautelosos do que ensaios realizados no componente tubo soldado. “Pode-se afirmar que a utilização dos CPs leva a um fator de segurança, pois não representa exatamente o que acontece com o material em sua condição real” (VIEIRA *et al.*, 2013, p.2361). A diferença entre as propriedades mecânicas dos tubos e dos CPs foi influenciada por três mecanismos: i) na usinagem dos corpos de prova ocorre um fenômeno semelhante ao efeito de Bauschinger, e o *LE* é reduzido; ii) nas amostras de tubos o cordão de solda tende a restringir a deformação plástica, aumentando a resistência do tubo; iii) nas amostras de tubos há uma maior quantidade de estricção, aumentando o alongamento percentual (*AL*).

3.2.4 Efeito e relação do tipo de ensaio mecânico

DAS; PAL; DAS (2012) estudaram o uso de indentação portátil automatizada para avaliar propriedades mecânicas em tubos de aço. Através desta técnica é possível medir e estimar o limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LRT*), traçar a curva tensão em função da deformação verdadeira, determinar o coeficiente de resistência (*K*), o coeficiente de encruamento (*n*), a dureza Brinell (*HB*), a tenacidade à fratura (*K_{1C}*) e o módulo de elasticidade (*E*).

Testes mecânicos convencionais, tal como o ensaio mecânico de tração, requerem uma grande quantidade de material de teste e, na maior parte dos casos, isto pode não estar disponível a partir dos componentes que se encontram em serviço. Portanto, em pesquisas no campo industrial, o ensaio mecânico de dureza é utilizado para estimar as propriedades mecânicas em campo, tendo grande importância. Tais técnicas em campo devem ser não destrutivas ou pelo menos minimamente invasivas, para que não inviabilize o funcionamento dos componentes (DAS; PAL; DAS, 2012).

O princípio básico da técnica de indentação (denominação genérica para o ensaio mecânico de dureza) é que possibilita efetuar múltiplas indentações por um indetador esférico em um único local de teste, na amostra. Uma esfera de 1,5 mm de diâmetro foi usada para obter vários dados, e assim obter curvas carga-deslocamento. Cabe ressaltar que a carga aumenta aproximadamente linearmente com a profundidade de penetração (DAS; PAL; DAS, 2012).

Uma unidade PABI (*Portable Automated Ball Indentation*, tradução, do inglês, Indentação Esférica Portátil Automatizada) foi concebida, desenvolvida e fabricada para determinar as propriedades mecânicas dos tubos em campo. Foram testados tubos de Aço Inox SS304LN, Aço Baixo Carbono, Aço ligado ao Ni-Cr, e SA333. Alguns tubos de aço de vários diâmetros externos e espessuras foram escolhidos para avaliar algumas propriedades mecânicas usando a unidade PABI. Os dados obtidos foram comparados com os resultados de ensaios mecânicos convencionais (tração, dureza Brinell e dureza Vickers) obtidos com as mesmas amostras de tubulações (DAS; PAL; DAS, 2012). O Quadro 5 apresenta um comparativo de resultados para *LE* e *LRT* considerando a técnica PABI e os ensaios convencionais (tração, por exemplo).

Quadro 5 - Comparativo de propriedades mecânicas via indentação portátil e ensaio de tração convencional.

Tubo	Teste	<i>LE</i> (MPa)	<i>LRT</i> (MPa)
Aço Inox SS340LN	PABI	260	639
	Convencional	252	643
Aço Baixo Carbono	PABI	270	461
	Convencional	266	454
Aço ligado ao Ni-Cr	PABI	408	676
	Convencional	400	660
Aço SA333	PABI	316	462
	Convencional	310	459

Fonte: Adaptado de DAS; PAL; DAS (2012).

Os pesquisadores concluíram que as propriedades mecânicas derivadas de PABI ficaram próximas às obtidas a partir de ensaios mecânicos convencionais, comprovando que esta metodologia demonstra bons resultados (DAS; PAL; DAS, 2012).

3.2.5 Efeito das propriedades mecânicas iniciais do aço no tubo

Morais *et al.* (2011) investigaram a variação de propriedades mecânicas entre chapas e tubos, com objetivo de obter uma equação de previsão do grau de encruamento, adquirido na conformação de tubos de pequeno diâmetro soldados por ERW. Esta variação de propriedades mecânicas, segundo Morais *et al.* (2011), não é simples de ser calculada, pois vários fatores podem influenciar como: o dimensional final do tubo, a forma de amostragem e conformação, e as características de encruamento do aço.

O acréscimo de propriedades mecânicas (*LE* e *LRT*) durante a conformação do tubo é de grande interesse do fabricante do tubo, uma vez que o acréscimo de propriedades em um aço relativamente barato evita a utilização de aços mais nobres com propriedades mais altas, mas a um custo mais alto (relação custo benefício).

Os pesquisadores utilizaram neste trabalho dois tipos de aços: Carbono-Manganês (C-Mn) com adição de microligantes e Carbono-Manganês (C-Mn) sem adição de microligantes, observando as propriedades mecânicas nas bobinas laminadas à quente (que são a matéria-prima dos tubos) e as propriedades mecânicas após formação e solda do tubo. O estudo foi realizado com amostras de chapas e tubos provenientes de regiões fora dos extremos das bobinas, o que diminui a variação de propriedades mecânicas numa mesma bobina (MORAIS *et al.*, 2011).

Os resultados de *LE*, *LRT* e *AL* obtidos para amostras de chapas e tubos produzidos com o aço C-Mn sem microligante estão no Quadro 6.

Quadro 6 - Propriedades mecânicas de iniciais em chapas e após a conformação de diversos dimensionais (diâmetros e espessuras) de tubos.

Diâmetro (mm)	30,0	42,2	60,3	60,3	82,6	101,6	101,6
Espessura (mm)	2,65	3,75	2,65	3,00	4,25	4,75	5,00
<i>LE</i> chapa (MPa)	401	327	325	316	328	322	294
<i>LE</i> tubo (MPa)	484	461	367	393	453	423	403
Varição <i>LE</i> (MPa)	83	135	42	77	125	101	109
<i>LRT</i> chapa (MPa)	557	467	458	453	525	477	455
<i>LRT</i> tubo (MPa)	576	519	470	470	536	486	498
Varição <i>LRT</i> (MPa)	19	53	12	17	11	9	43
<i>AL</i> chapa (%)	27	37	39	37	27	32	32
<i>AL</i> tubo (%)	23	24	35	35	28	29	29
Varição <i>AL</i> (%)	-4	-12	-4,2	-2,4	1,1	-2,6	-3,3

Fonte: Adaptado de Morais *et al.* (2011).

Os dados experimentais apresentados no Quadro 6 indicam que com os acréscimos simultâneos do diâmetro externo do tubo e sua espessura (igual a espessura da chapa), as propriedades mecânicas *LE* e *LRT* decrescem. Este comportamento mecânico é observado para corpos de prova de amostras convencionais para o ensaio mecânico de tração, assim como para amostras de corpos de prova de tubo, sejam retiradas do tubo ou do próprio tubo, de acordo com o diâmetro externo.

É possível concluir também que o *LE* tem variação significativa após a formação do tubo (42 a 135 MPa) enquanto que para o *LRT*, a

variação é menos expressiva (9 a 53 MPa). O alongamento percentual (*AL*), por sua vez, é reduzido (diferenças de até 12% para menos), concluindo-se que a formação do tubo causa aumento na sua resistência mecânica e decréscimo em sua ductilidade.

Para demonstrar o grau de severidade de conformação na produção do tubo e avaliar o encruamento do mesmo usualmente emprega-se a relação diâmetro/espessura (*D/t*) (MORAIS *et al.*, 2011). A razão *D/t* é bastante utilizada em produtores de tubos nacionais, enquanto que para as referências de estudos, posteriormente aqui apresentadas, a razão utilizada é a *t/D*.

Os autores desta pesquisa enfatizam que a previsão de propriedades mecânicas em tubos não é trivial e depende de alguns fatores determinantes, como uma boa rastreabilidade, boa amostragem e ensaios mecânicos precisos, ou seja, que sigam as normas apropriadas.

3.2.6 Efeito de tratamento térmico na ductilidade

Em outra pesquisa, Jiao e Zhao (2001) abordaram a ductilidade em tubos de aço de alta resistência, chamados VHS (*Very High Strength*, tradução, do inglês, Altíssima Resistência). Estes tubos passam por tratamento térmico de têmpera e revenimento, em que o limite de escoamento chega a 1350 MPa e o limite de resistência à tração alcança 1500 MPa. Tubos não tratados termicamente, utilizados para fazer os tubos VHS, também foram testados para fins comparativos.

O trabalho analisou o comportamento da ductilidade destes tubos através do limite de resistência à tração (*LRT*), limite de escoamento (*LE*) e o alongamento percentual (*AL*). Foram ensaiados tubos de diâmetros entre 31,8 a 75,0 mm e espessuras entre 1,6 a 2,0 mm. “A ductilidade é normalmente definida como a capacidade de um material se deformar plasticamente antes de fraturar. Geralmente é avaliada medindo-se o alongamento em um ensaio de tração” (JIAO; ZHAO, 2001, p.888, tradução nossa).

Ensaio mecânicos de tração em doze corpos de tubo inteiro mostraram que a média dos limites de escoamento em tubos não tratados termicamente é de 465 MPa, enquanto em tubos VHS a média do *LE* é de 1327 MPa. Outros ensaios mecânicos de tração em quinze corpos de prova retirados do tubo mostraram que a média dos limites de escoamento em tubos não tratados termicamente é de 433 MPa, enquanto que em tubos VHS, a média do *LE* é de 1365 MPa (JIAO; ZHAO, 2001). O Quadro 7 mostra os resultados dos ensaios mecânicos de tração nos tubos, para os dois tipos de corpos de prova.

Quadro 7 - Propriedades mecânicas em tubos VHS e não tratados com corpo de prova de tubo inteiro e CPs retirados do tubo.

Tipo de Corpo de Prova	Tipo de Tubo	<i>LRT</i> (MPa) média	<i>LE</i> (MPa) média	<i>AL</i> $L_0=50\text{mm}$ (%) média	<i>LRT/LE</i>
Tubo inteiro	VHS	1487	1327	10,96	1,119
	Não tratados	507	465	13,0	1,090
Corpo de prova retirado do tubo	VHS	1520	1365	7,32	1,113
	Não tratados	502	433	26,9	1,160

Fonte: Adaptado de Jiao e Zhao (2001).

Os resultados encontrados (Quadro 7) foram comparados à normas Australianas e europeias de medição de ductilidade. A Norma Australiana, por exemplo, AS/NZS4600 (1996) apud Jiao e Zhao (2001), determina ductilidade através de dois critérios: a razão entre o limite de resistência à tração com o limite de escoamento, ou seja, $LRT / LE \geq 1,08$; e o alongamento $AL \geq 10 \%$, para $L_0 = 50 \text{ mm}$. Sendo assim, os tubos VHS e os tubos não tratados atenderam aos requisitos de ductilidade das normas, à que foram avaliados.

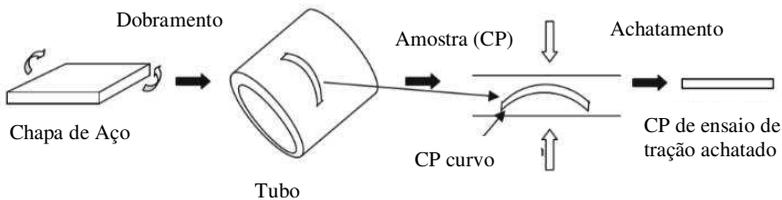
3.2.7 Efeito da razão espessura pelo diâmetro – t / D

Zhang; Ding; Gu (2012) elaboraram um modelo de previsão da diferença da tensão de escoamento (chamado de limite de escoamento, *LE*, nesta dissertação) entre tubo e chapa de aço. Utilizaram uma combinação de cálculos por elementos finitos e ensaios mecânicos de tração e compressão. Foram utilizados três tipos de aços com microligantes e microestruturas diferentes. Os tubos foram produzidos e soldados através do processo de solda de alta frequência (ERW). Os pesquisadores afirmam que a diferença entre a tensão de escoamento (*LE*) nos tubos e na chapa de origem é resultado de uma combinação entre o efeito de Bauschinger e o endurecimento por deformação plástica (encruamento), causados por deformações de dobramento e dobramento reverso. Isso é fortemente dependente da razão entre a espessura da parede do tubo (espessura da chapa empregada no processamento do tubo) e o diâmetro externo do tubo (razão t / D). Em razões de baixo t / D o efeito de Bauschinger é dominante, resultando um decréscimo da tensão de escoamento (*LE*). Encruamento é dominante em elevadas razões t / D , resultando num acréscimo de tensão de escoamento (*LE*).

A relação entre a tensão de escoamento da chapa e do tubo é dependente de muitos parâmetros, incluindo a composição do aço, a microestrutura, a razão t / D do tubo, o método empregado para testar a resistência do tubo e o processo de produção da chapa. A diferença entre a tensão de escoamento da chapa e do tubo muitas vezes fornece uma grande dificuldade na seleção de aços para a produção de tubos, e, portanto, a previsão quantitativa da diferença entre as tensões de escoamento é necessária (ZHANG; DING; GU, 2012).

A metodologia adotada na pesquisa de Zhang; Ding; Gu (2012) levou em consideração o processo de formação e solda por ERW, onde a chapa de aço é submetida a deformações de dobramento e achatamento, e assim, é transformada em tubos. No processo de preparação do corpo de prova para o ensaio mecânico de tração, nesta pesquisa, o CP curvado foi retirado transversalmente ao corpo do tubo, e então ele foi achatado, causando deformação reversa de dobramento. Na Figura 24, a representação esquemática dos processos descritos é apresentada.

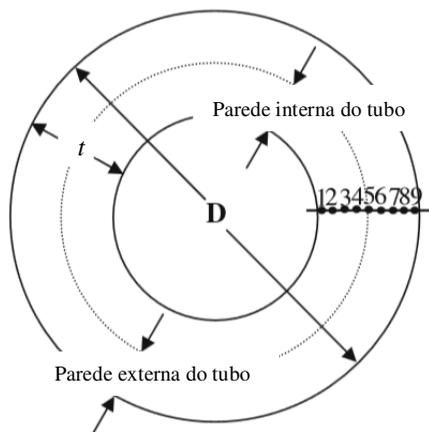
Figura 24 - Formação do tubo e preparação de corpos de prova.



Fonte: Adaptado de ZHANG; DING; GU (2012).

Os pesquisadores Zhang; Ding; Gu (2012) também estudaram o modo das deformações nas paredes internas e externas do tubo, desde o processo de formação até o ensaio mecânico de tração, conforme modelo esquemático mostrado na Figura 25. Os modos das deformações nas partes interna ou externa do tubo, conforme o processo de conformação mecânica empregado, fazem com que as partes do tubo fiquem submetidas à tensões mecânicas após os processos, sendo tensões de compressão ou tração, conforme Quadro 8. Na parede interna do tubo (posição 1, 2, 3 e 4 da Figura 25) o modo de deformação é compressão-tração-tração. Na parede externa do tubo (posição 6, 7, 8 e 9 da Figura 25) o modo de deformação é tração-compressão-tração.

Figura 25 - Modelo esquemático mostrando a parte interna e externa do tubo, em relação à espessura (t) e ao diâmetro (D).



Fonte: Adaptado de ZHANG; DING; GU (2012).

Quadro 8 - Modo das deformações na parede interna e externa do tubo, devido as tensões de compressão ou tração.

Processo de Conformação Mecânica	Modo de Deformação – Parede interna do tubo	Modo de Deformação – Parede externa do tubo
Dobramento	tensão de compressão	tensão de tração
Achatamento	tensão de tração	tensão de compressão
Teste de tração	tensão de tração	tensão de tração

Fonte: Adaptado de ZHANG; DING; GU (2012).

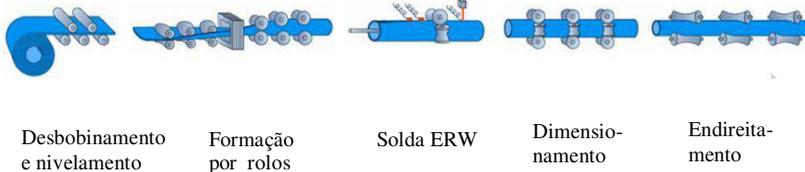
Através dos resultados obtidos nos ensaios, concluiu-se que o aumento da tensão de escoamento é maior na parte interna do tubo, indicando que o encruamento é mais forte nesta região. Ao estudar a microestrutura nestes tubos concluiu-se que a tensão de escoamento aumenta acentuadamente quando há presença de ferrita acicular no aço. Quando a microestrutura contém bainita granular, a tensão de escoamento tem um leve acréscimo, indicando que a ferrita acicular tem importante influência sobre a tensão de escoamento no aço (Zhang, Ding e Gu, 2012).

3.2.8 Efeito da formação de tubos ERW na tensão de escoamento

Lee *et al.* (2017) investigaram a alteração da tensão de escoamento em tubos formados e soldados por ERW, considerando o efeito de Bauschinger. Os autores afirmam que não é fácil prever a tensão de escoamento (LE) após a produção do tubo, uma vez que tensões de tração e compressão são repetidamente aplicadas à chapa.

Conforme a Figura 26, o processo de produção de tubos de aço, soldados por ERW com formação por rolos é amplamente utilizado e é normalmente composto por: desbobinamento e nivelamento; formação por rolos; soldagem ERW; dimensionamento (ou calibração) e endireitamento (Lee *et al.*, 2017).

Figura 26 - Processo de produção de tubos de aço, soldados por ERW.



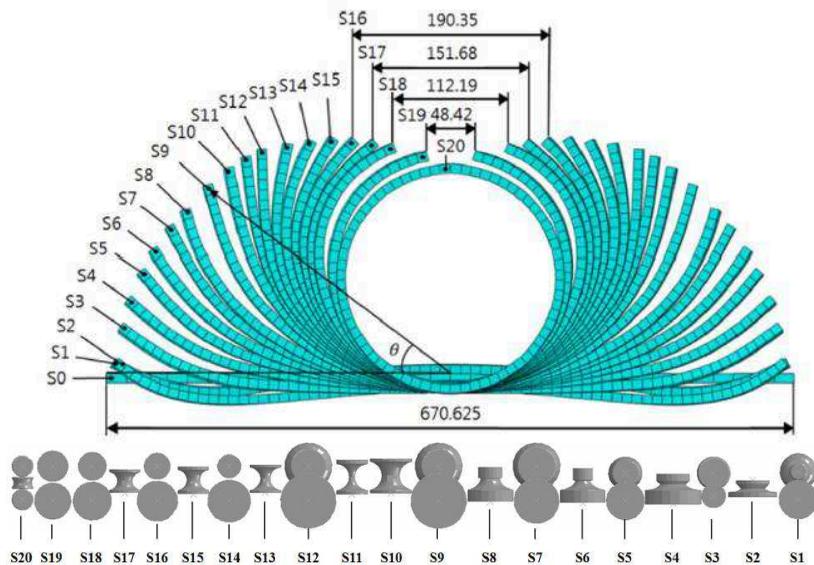
Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2017).

A alteração no limite de escoamento (LE , ou tensão de escoamento) da chapa em relação ao tubo pode ser diferente dependendo do processo de formação em cada produtor de tubo. O efeito de Bauschinger pode ser um dos causadores desta alteração de LE (Lee *et al.*, 2017).

A alteração da tensão de escoamento é estudada através de uma análise baseada em um modelo numérico de previsão. O aumento de espessura do tubo em relação à chapa também foi abordado (Lee *et al.*, 2017). O aço utilizado nesta pesquisa foi um API padrão K55 e o comportamento mecânico do material foi avaliado por tração uniaxial e teste de carga cíclica. O efeito de Bauschinger causa uma redução na tensão de escoamento, após o re-escoamento comparado com a tensão inicial (Lee *et al.*, 2017).

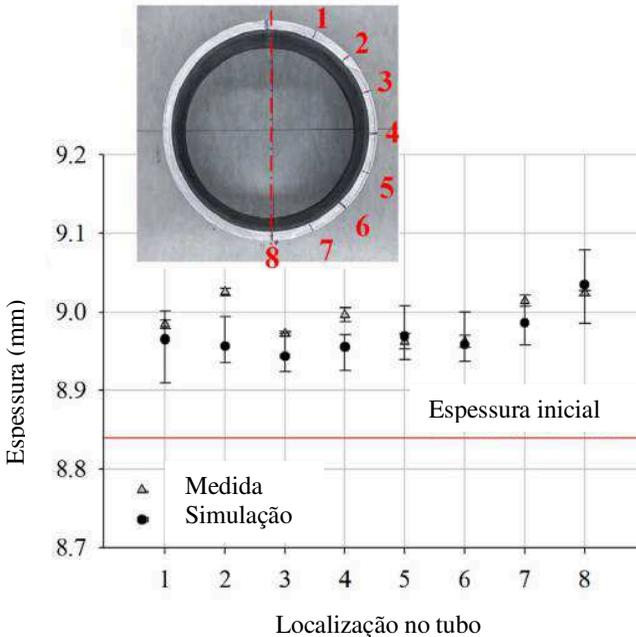
Lee *et al.* (2017, p. 307) rastream o histórico de deformações em tubos formados por rolos nas localizações a 90° e 180° da linha de solda. O modelo de flor de formação do tubo, Figura 27, mostra que a cada rolo (de S1 a S20) deforma a tira a partir de um ângulo conhecido (sendo de aproximadamente $2,65^\circ$ para S1 e $89,99^\circ$ para S20).

Figura 27 - Modelo de flor de formação do tubo e solda por ERW.



Cada ponto do tubo, em relação a circunferência, experimenta uma tensão-deformação específica, ϵ , conforme o estudo de Lee *et al.* (2017), a espessura nestes pontos pode claramente aumentar após o processo de formação do tubo (demonstrado na Figura 28), porém a quantidade do aumento difere de posição, de acordo com seu histórico de deformação.

Figura 28 - Distribuição de espessura após a conformação do tubo, em relação a espessura inicial de 8,84 mm.



Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2017).

Em relação à alteração na tensão de escoamento do tubo, comparando com a chapa de origem, a tensão de escoamento aumenta em todos os cenários testados na simulação e também nos resultados medidos em ensaios mecânicos de tração. Porém, considerando os pontos ao longo do diâmetro do tubo de 1 a 8 (conforme demonstrado na Figura 28) a tensão de escoamento é maior nos pontos 1, 2 e 3. Este aumento deve ser atribuído à deformação excessiva inicial durante o estágio inicial do processo de dobramento em W.

3.2.9 Efeitos do processamento do aço de origem e razão t/D

Jo *et al.* (2017) investigaram os efeitos da microestrutura da chapa de origem e a razão t/D na variação do limite de escoamento de tubos de aço nas classes API 5L X70 e API 5L X80. A microestrutura da chapa de origem foi constituída utilizando diferentes teores de molibdênio e diferentes temperaturas de bobinamento, sendo que em aços X80 a quantidade de molibdênio foi três vezes maior que em aços X70. Os tubos

foram conformados mecanicamente e soldados por ERW com diferentes razões t/D .

Os aços e as condições de processamento dos tubos estão descritos no Quadro 9. Os aços API 5L X70 e API 5L X80 foram identificados apenas como X7 e X8 respectivamente, e as letras subsequentes indicam: Primeira letra – a temperatura de bobinamento (H para *high*, tradução, do inglês, alta; e L para *low*, tradução, do inglês, baixa); Segunda letra – a razão t/D (H para *high*, tradução, do inglês, alta; e L para *low*, tradução, do inglês, baixa).

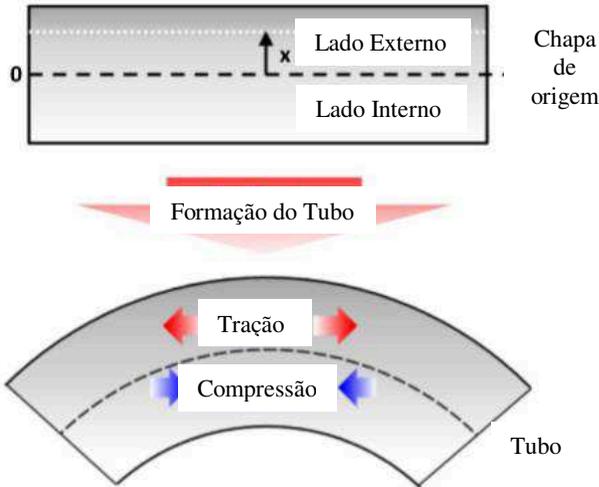
Quadro 9 - Condições de processo nas chapas e tubos estudados.

Grau do Aço	Temperatura de bobinamento (°C)	Espessura da Chapa (mm)	Diâmetro do tubo (mm)	Razão t/D
X7 HH	550-580	19,0	508	0,0374
X7 LL	510-540	12,7	508	0,0250
X8 HL	540-570	12,0	508	0,0236
X8 LL	490-520	12,0	508	0,0236

Fonte: Adaptado de Jo *et al.* (2017).

Após a formação dos tubos, os lados externos e internos dos tubos estão submetidos a diferentes estados de tensões, conforme Figura 29; sendo a tensão de tração no lado externo e tensão de compressão no lado interno, que também podem variar com a tensão de formação do tubo expressa pela razão espessura/diâmetro (t/D) (Jo *et al.*, 2017).

Figura 29 - Representação esquemática demonstrando a deformação na espessura durante a formação do tubo.

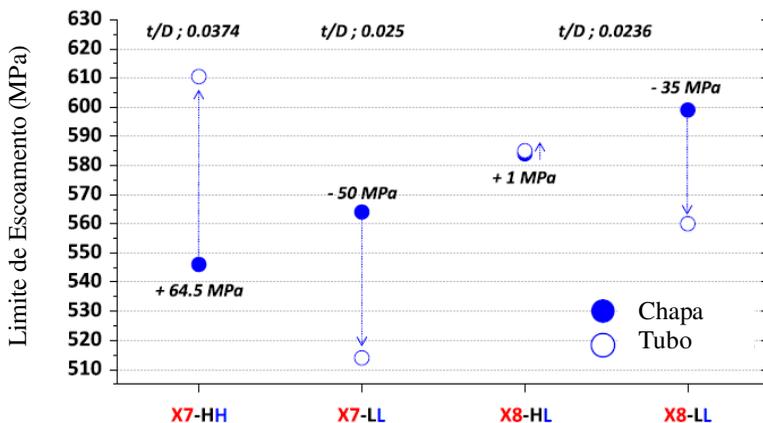


Fonte: Adaptado de Jo *et al.* (2017).

A tensão de escoamento (LE) geralmente aumenta com o acréscimo da razão t/D resultando em encruamento, enquanto LE decresce com o aumento do efeito de Bauschinger. Portanto, efeitos de microestrutura e t/D no LE devem ser sistematicamente analisados para identificar a variação no LE , e investigar o mecanismo concorrente entre o efeito do encruamento e o efeito de Bauschinger (Jo *et al.*, 2017).

Os autores realizaram ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios mecânicos de tração e ensaios de tensão-compressão para avaliar as propriedades mecânicas dos tubos. Os resultados dos ensaios mecânicos de tração demonstram que nos aços fabricados com temperatura de bobinação alta (X7-HH e X8-HL), o limite de escoamento aumentou em 64,5 e 1,0 MPa respectivamente, conforme ilustrado na Figura 30. Já nos aços com temperatura de bobinação baixa (X7-LL e X8-LL) o limite de escoamento decresceu, sendo -50 e -35 MPa respectivamente, conforme ilustrado no gráfico da Figura 30. Quando aços com diferentes razões t/D são comparados, X7-HH e X8-HL, com t/D de 0,0374 e 0,0236 respectivamente, nota-se que a alta t/D do aço X7-HH faz com que o LE tenha um acréscimo acentuado, mesmo que os aços tenham microestruturas diferentes.

Figura 30 - Variação de LE de chapas de origem e tubos para quatro tipos de aços em relação a razão t/D .



Fonte: Adaptado de Jo *et al.* (2017).

A conclusão da pesquisa levou em consideração a microestrutura de cada um dos aços testados (visto que a microestrutura é afetada pela concentração de molibdênio), pela temperatura de bobinamento da chapa e pela razão t/D dos tubos formados. Quando os aços X70 e X80 processados a baixa temperatura de bobinamento (X7-LL e X8-LL) são comparados, nota-se que a redução de LE em X8-LL é menor (-35 MPa) do que em X7-LL (-50 MPa) em razão da maior concentração de molibdênio em X8-LL, aumentando o efeito do encruamento e reduzindo o efeito de Bauschinger. No entanto, quando aços com alta temperatura de bobinamento (X7-HH e X8-HL) são comparados, apesar de X8-HL ter maior concentração de molibdênio em sua composição, X7-HH teve maior acréscimo de LE na formação do tubo, isso se deve principalmente pela razão t/D ser maior em X7-HH, elevando o efeito do encruamento e anulando o efeito de Bauschinger.

Segundo Jo *et al.* (2017), além da consideração microestrutural, o controle da deformação na formação do tubo pela razão (t/D) é importante, porque o aumento de t/D , causa o aumento do efeito de encruamento sobre o efeito Bauschinger.

3.2.10 Síntese integradora de propriedades mecânicas em tubos

Diante dos resumos dos trabalhos selecionados (artigos científicos e trabalhos completos de anais de congresso) através de uma RSL, é possível apontar as principais contribuições, por ordem cronológica, de cada pesquisa, as quais serão utilizadas para análise dos dados das propriedades mecânicas de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados (Seção 5).

(i) Pesquisa de Jiao e Zhao (2001): utilizaram tubos de aço de pequeno diâmetro, com e sem tratamento térmico de têmpera para avaliar *LE*, *LRT* e principalmente a ductilidade. Os pesquisadores utilizaram dois tipos de amostras para avaliar os resultados: tubo inteiro e CP retirado do tubo. A média dos resultados destas propriedades mecânicas apontou que, para os tubos não tratados termicamente, em amostras de tubo inteiro os resultados de *LRT* e *LE* foram maiores que em corpos de prova retirado do tubo. Porém, para tubos tratados (chamados VHS) as propriedades mecânicas foram maiores em CPs. Os resultados de ductilidade, para ambos tipos de tubos e tipos de corpos de prova, atenderam requisitos de normas australianas.

(ii) Pesquisa de Morais *et al.* (2011): a contribuição deste trabalho foi de que, tubos produzidos com o mesmo tipo de aço, dependendo do diâmetro e da espessura, podem ter *LE* e *LRT* diferentes. Os resultados demonstram que o aumento no dimensional (diâmetro e espessura) causa queda em propriedades mecânicas (*LE* e *LRT*). O estudo também apontou que *LE* tem uma variação significativa após a formação de tubos de pequeno diâmetro, enquanto que o *LRT* tem um acréscimo bem mais sutil. Estes autores utilizaram a razão D/t para avaliar o encruamento em tubos de aço.

(iii) Pesquisa de Zhang, Ding e Gu (2012): avaliaram a tensão de escoamento (*LE*) em tubos soldados por ERW produzidos com três tipos de aço de microestrutura e microligantes diferentes. A contribuição desta pesquisa é a afirmação de que a razão t/D influencia em propriedades mecânicas dos tubos, combinada à composição química do aço e sua microestrutura. Também como ponto relevante pode-se citar o estudo dos modos de deformação nas paredes internas e externas do tubo, concluindo que o encruamento sempre é mais forte na região interna, resultado das tensões compressivas.

(iv) Pesquisa de Das, Pal e Das (2012): utilizaram o método de indentação portátil para verificar propriedades mecânicas em tubos produzidos em aços diversos e compararam os resultados encontrados com resultados de ensaios convencionais de tração. A conclusão foi de

que o método de indentação com ponta esférica apresentou LE e LRT muito próximos do ensaio mecânico de tração, comprovando que o método é efetivo para mensurar propriedades mecânicas em tubulações, para situações em que não podem ser retiradas amostras para um ensaio mecânico de tração convencional (destrutivo).

(v) Pesquisa de Vieira *et al.* (2013): fizeram um comparativo de propriedades mecânicas de amostras de tubos inteiros e amostras de CPs. As amostras de tubos inteiros resultaram em maior LE , LRT e AL . A principal contribuição foi de que quando o tubo é ensaiado através de CPs os resultados de propriedades mecânicas são mais conservadores, porém, quando a amostra é de tubo inteiro os resultados demonstram um simulado das condições reais a que o tubo poderá suportar durante a aplicação estrutural.

(vi) Pesquisa de Preethi *et al.* (2014): o estudo conduzido por estes autores demonstra que valores elevados de propriedades mecânicas (LE e LRT) podem ser atingidas com processamento do tubo, não dependendo somente da composição química e das propriedades mecânicas iniciais da bobina de origem. O LRT máximo atingido (1061 MPa) com AL considerável (9%) foi através de trefilação seguido de tratamento térmico de recozimento, utilizando um aço SAE 1019M.

(vii) Pesquisa de Sadowski *et al.* (2015): a contribuição deste artigo é de que o corpo de prova retirado do tubo (de grande diâmetro com solda helicoidal), em qualquer orientação, tende a dar resultados muito próximos de LE e LRT . O estudo concluiu que o material assim pode ser classificado como isotrópico.

(viii) Pesquisa de Lee *et al.* (2017): nesta pesquisa foi investigado o efeito de Bauschinger que causa a diminuição do LE de tubos soldados por ERW. Uma das principais contribuições deste estudo foi a investigação de aumento de espessura e alteração de LE em diversos pontos do tubo em relação a chapa de origem.

(ix) Pesquisa de Jo *et al.* (2017): o estudo conduzido por estes autores utilizou aços da classe API com condições de processamento diferentes e produziu tubos com diferentes razões t/D . Os tubos com maior t/D aumentaram LE em relação a chapa de origem, pois o encruamento é dominante. Já nos tubos de menor t/D o LE decresce em relação ao LE da chapa de origem, pois o efeito de Bauschinger é dominante. Os autores também afirmam que a microestrutura do aço pode influenciar nestes mecanismos de deformação.

4 METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE DADOS

Nesta seção será descrita a metodologia empregada para a seleção de dados de propriedades mecânicas (*LE*, *LRT* e *AL*) e composição química do aço carbono SAE1012 após a formação de tubos, a partir do “Relatório de Análise de Produto (RAP)” da Empresa Tuper S/A, localizada em São Bento do Sul, norte de Santa Catarina. Previamente a apresentação da metodologia para a seleção de dados, uma breve descrição da metodologia empregada pela Tuper S/A para o processo produtivo de tubos metálicos será apresentada, que compreende o processamento da bobina de aço até a qualificação do produto, sendo este último, com a realização de ensaio mecânico de tração em tubos.

4.1 PROCESSO PRODUTIVO DE TUBOS DE AÇO CARBONO

O processo produtivo de tubos metálicos da Empresa Tuper S/A que será apresentado compreende: i) bobina de aço carbono e seu processamento; ii) conformação mecânica e soldagem de tubos; iii) ensaio mecânico de tração em tubos; iv) relatório de análise de produto. Maiores detalhes, com relação ao processo de fabricação de tubos de aço carbono, foram detalhados no Referencial Teórico, Seção 2.

4.1.1 Bobina de aço carbono e seu processamento

As bobinas de aço carbono são fornecidas à Empresa Tuper S/A pelas usinas siderúrgicas brasileiras, como um exemplo, a ArcelorMittal Brasil. As bobinas são classificadas pelo tipo de laminação utilizado para o processamento final. As bobinas laminadas à quente, recebidas pela Tuper S/A, são bobinas que tem espessura desde 2,00 mm (usualmente) até espessuras de 25,40 mm, sendo que para alguns tubos, a espessura máxima já processada foi de 14,27 mm. As bobinas laminadas à frio são derivadas de bobinas laminadas à quente, em que estas passam por um processo de laminação à frio, e a espessura varia entre 0,95 a 1,90 mm para produção de tubos Tuper S/A.

Além da espessura, as composições químicas destas bobinas podem variar dependendo da norma solicitada, por parte do cliente. A composição química é definida já no momento de produção do aço, na aciaria da usina siderúrgica, e uma vez definida, a composição química não é mais alterada, e assim ela será carreada até o produto final, neste caso o tubo. A composição química determina como será chamado o aço, bem como as propriedades mecânicas, e desta maneira, o aço é

enquadrado em classes SAE (*Society of Automotive Engineers*), classes ASTM (*American Society for Testing and Materials*), classes DIN (*Deutsches Institut für Normung*) e API (*American Petroleum Institute*), por exemplo.

Após o recebimento da bobina na Tuper S/A, ela é destinada ao corte longitudinal, gerando subprodutos chamados fitas (ou tiras). Estas fitas não são cortadas aleatoriamente, e sim de acordo com o diâmetro externo final do tubo, em que cada diâmetro terá uma largura de fita específica.

4.1.2 Conformação mecânica e soldagem de tubos

A fita é colocada em um equipamento chamado acumulador, o qual libera a fita aos poucos, e assim a fita é conformada mecanicamente em tubos. A fita passa entre diversos pares de rolos, os quais vão dando o formato de tubo e preparando-o para ser soldado. Estes rolos são posicionados conforme o diâmetro do tubo.

Após a conformação, os tubos são soldados longitudinalmente. O processo de soldagem realizado na Tuper S/A é do tipo HFIW, utilizando indutor do tipo bobina. Após o processo de soldagem, os tubos passam por calibração, sendo um conjunto de rolos que tem como função deixar o tubo nas tolerâncias exigidas pela norma que o cliente solicitou, ou então quadrificar um tubo redondo.

A Tuper S/A tem capacidade de fornecer tubos, dentre outras, conforme as Normas: NBR 5590, NBR 8261, NBR 5580, ASTM A500, EN10305-3, EN 10305-2.

A maioria destas normas fornece especificações quanto às propriedades mecânicas mínimas exigidas, para que os tubos sejam qualificados pelas referidas normas. Neste caso, o ensaio mecânico de tração é utilizado para verificar se o tubo atenderá determinada especificação prevista em norma.

4.1.3 Ensaio mecânico de tração em tubos

O ensaio mecânico de tração é realizado em uma Máquina de Ensaio Universal EMIC (Figura 31), com capacidade máxima de força de 60.000 kgf (600 kN) e, geralmente, o corpo de prova e o ensaio mecânico seguirão parâmetros conforme a norma do tubo solicitada pelo cliente. O corpo de prova pode ser produzido a partir do tubo ou o tubo inteiro é ensaiado. A escolha do tipo de corpo de prova é dependente do

diâmetro do tubo, pois quando o diâmetro é grande, torna-se inviável ensaiar o tubo inteiro por limitações de equipamento.

Figura 31 - Máquina Universal para ensaios de tração modelo EMIC de 600kN.



Fonte: Cortesia Tuper (2019).

A Figura 32 apresenta uma fotografia do tipo de corpo de prova (CP) utilizado no ensaio mecânico de tração, sendo corpo de prova retirado de tubo. A Figura 32 a) refere-se ao tubo que foi retirado o corpo de prova; a Figura 32 b) é o corpo retirado do tubo já usinado nas dimensões corretas para o ensaio mecânico de tração; e a Figura 32 c) é o corpo de prova já fraturado, após a realização do ensaio.

Figura 32 - Corpos de prova (CP) retirado do tubo para ensaio mecânico de tração em tubos de aço carbono. a) Corte de parte de tubo de origem, b) CP retirado do tubo e usinado e c) CP retirado do tubo e já ensaiado.



Fonte: A autora (2019).

A Figura 33 apresenta fotografia do tipo de corpo de prova (CP) utilizado no ensaio mecânico de tração, corpo de prova tubo inteiro, onde a amostra ensaiada é o próprio tubo, ou seja, CP tubo. A Figura 33 a) refere-se ao tubo que já é o próprio corpo de prova; a Figura 33 b) é o corpo de prova já fraturado, após a realização do ensaio.

Figura 33 - Tipos de corpos de prova (CP) para ensaio mecânico de tração em tubos de aço carbono. a) CP tubo retirado de tubo, b) CP tubo e já ensaiado.



Fonte: A autora (2019).

O resultado de um ensaio mecânico de tração uniaxial de tubos é uma curva da tensão função da deformação, conforme Fundamentação Teórica apresentada na Seção 3.1. As propriedades mecânicas limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LRT*) e Alongamento (*AL*) são medidas a partir da curva tensão-deformação e inclusas no “Relatório de Análise de Produto” (RAP), bem como a composição química do aço utilizado na produção do tubo.

4.1.4 Relatório de análise de produto

A Tuper S/A possui um banco de dados de resultados dos ensaios mecânicos de tração realizados em seus produtos tubulares metálicos desde 2005. Conforme Guinchat e Menou (1994, p. 295), “os bancos de dados tratam das informações factuais, numéricas ou textuais diretamente utilizáveis”, isto é, segundo Albrecht e Ohira (2000, p.132) “proporcionam acesso direto à informação primária”.

Este banco de dados faz parte de um sistema utilizado pela empresa Tuper S/A para preenchimento de resultados de análises experimentais de produtos. Os dados são disponibilizados em uma planilha no formato Microsoft Excel, chamada internamente na empresa de planilha RAP. Esta planilha é utilizada como histórico de resultados gerados de ensaios mecânicos de tração em tubos de aço.

A planilha RAP contém as seguintes informações, conforme Figura 34:

- a) Espessura da chapa de origem, expressos em milímetros;
- b) Especificação do cliente, a qual define a norma em que o tubo deverá ser produzido (podem ser citadas as Normas NRB 8261, NBR 5590, ASTM A500 e DIN EN10305-3, por exemplo) e a condição final de fornecimento (que pode ser apenas soldado, soldado e trefilado, soldado e tratado termicamente pelos processos de normalização ou recozimento, por exemplo);
- c) Aço utilizado na produção do tubo, por exemplo SAE 1008, SAE 1010, SAE 1012, SAE 1020, ASTM A36 e ASTM A572;
- d) Dimensional e descrição do tubo (expresso em diâmetro x espessura x comprimento x informações auxiliares x norma do tubo);
- e) Plano de corte, corrida e lote da bobina, que são informações pertinentes à rastreabilidade do aço utilizado;

- f) Propriedades mecânicas ensaiadas no tubo, tais como o Limite de Escoamento (*LE*), o Limite de Resistência à Tração (*LRT*), o Alongamento (*AL*);
- g) Composição química do aço utilizado para produzir o tubo, com teores em percentuais de Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S), Silício (Si), Alumínio (Al);
- h) Rastreabilidade do cliente e número da RAP.

Inicialmente, a planilha RAP utilizada nesta pesquisa continha 85.485 conjuntos de dados, contemplando resultados de propriedades mecânicas e composição química de 2005 até 2015. Cada conjunto de dados é apresentado em uma linha na planilha RAP (Figura 34).

A planilha RAP foi utilizada para a seleção de dados e análise (Seção 5) do comportamento mecânico das propriedades mecânicas *LE*, *LRT* e *AL* em função dos dimensionais do tubo, a espessura (espessura da fita de aço) e diâmetro (neste caso, diâmetro externo do tubo).

Figura 34 - Planilha RAP

Espessura	Norma cliente	Aço	Dimensional do tubo	Plano	Bobina	Comtil	LRT	LE	AI	C	Min	P	S	Si	AI
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	129.695	1956657210	633501	447	384	29	0.140	0.540	0.016	0.014	0.017	0.046
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	129.696	1956608910	633499	442	368	30	0.140	0.530	0.021	0.011	0.015	0.047
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	130.278	157878221	318559	420	352	31	0.110	0.530	0.019	0.006	0.010	0.048
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	130.280	157878962	318559	413	337	33	0.110	0.530	0.019	0.006	0.010	0.048
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	130.287	197733910	633540	447	381	28	0.140	0.520	0.019	0.008	0.019	0.051
5,60	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	88.90x5,49-SCH40x6000-NBR5590-6	130.306	197743810	633540	443	369	32	0.140	0.520	0.019	0.008	0.019	0.051
5,30	ASTM A 500 Gr B	SAE 1012	70x70x6,30x4330- SAE 1012	131.212	206046510	74167	472	406	26	0.130	0.470	0.019	0.015	0.012	0.049
5,30	ASTM A 500 Gr B	SAE 1012	70x70x6,30x6904- SAE 1012	131.212	206046510	74167	472	406	26	0.130	0.470	0.019	0.015	0.012	0.049
5,60	ASTM A 500 Gr C	SAE 1012	50.80x76,20x6,30x6600- SAE 1012	131.279	199017510	633913	456	367	28	0.140	0.510	0.021	0.011	0.015	0.047
3,00	ASTM A 500 Gr C	SAE 1020	31.75x3,00x6000- SAE 1020	123.445	1822844710	70286	530	465	17	0.200	0.480	0.017	0.009	0.027	0.075
3,00	ASTM A 500 Gr C	SAE 1020	31.75x3,00x6000- SAE 1020	131.578	208777910	63766	555	488	13	0.200	0.540	0.012	0.009	0.024	0.055
6,30	ASTM A 500 Gr B	SAE 1012	70x70x6,30x4330- SAE 1012	131.212	206046510	74167	472	406	26	0.130	0.470	0.019	0.015	0.012	0.049
6,30	ASTM A 500 Gr B	SAE 1012	70x70x6,30x5636- SAE 1012	131.212	206046510	74167	472	406	26	0.130	0.470	0.019	0.015	0.012	0.049
4,75	ASTM A 500 Gr B	SAE 1012	50x100x4,75x5100- SAE 1012	130.436	205972910	63796	451	365	29	0.120	0.470	0.017	0.011	0.008	0.027
1,90	E 195 +CR1	SAE 1010	22.22x1,90x6540Rr- Honda- 1010-TT	130.921	204532810	73192	364	316	28	0.100	0.480	0.017	0.012	0.035	0.062
1,90	E 195 +CR1	SAE 1010	22.22x1,90x6540Rr- Honda- 1010-TT	131.629	12817644	318221	372	352	30	0.098	0.480	0.012	0.005	0.013	0.039
1,90	E 195 +CR1	SAE 1010	22.22x1,90x6540Rr- Honda- 1010-TT	131.628	121166440	73192	389	376	30	0.100	0.480	0.017	0.012	0.035	0.062
1,90	E 195 +CR1	SAE 1010	22.22x1,90x6540Rr- Honda- 1010-TT	131.630	197079710	63222	385	368	29	0.100	0.400	0.021	0.020	0.008	0.042
4,75	ASTM A 500 Gr A	SAE 1012	50x50x4,75x6000- SAE 1012	124.868	1876506710	61956	453	359	25	0.130	0.500	0.012	0.004	0.016	0.055
4,75	ASTM A 500 Gr A	SAE 1012	50x50x4,75x6000- SAE 1012	130.399	205926910	63734	434	398	30	0.120	0.500	0.021	0.012	0.015	0.045
4,25	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	33.70x4,25x6000- RioHidProc-NBR5590	131.242	16866031	274415	447	387	27	0.130	0.520	0.020	0.007	0.011	0.038
5,30	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	114.30x6,02-SCH40x6000-NBR5590-131708	1219304310	63951	423	438	365	29	0.130	0.430	0.019	0.010	0.015	0.048
5,30	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	114.30x6,02-SCH40x6000-NBR5590-131711	1219305010	63951	433	361	29	0.130	0.430	0.019	0.010	0.015	0.048	
5,30	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	114.30x6,02-SCH40x6000-NBR5590-131790	1219301910	63952	445	367	29	0.140	0.480	0.008	0.014	0.009	0.043	
5,30	NBR 5590 Gr A	SAE 1012	114.30x6,02-SCH40x6000-NBR5590-131708	1219304310	63951	428	365	29	0.130	0.430	0.019	0.010	0.015	0.048	

Fonte: Cortesia Tuper (2019).

4.2 SELEÇÃO DE DADOS DA PLANILHA RAP

Uma seleção de dados (*LE*, *LRT*, *AL* e composição química) armazenados na planilha RAP foi realizada em etapas, devido às oito variáveis envolvidas e suas subdivisões (Quadro 10), visando uma amostragem de dados adequada para a análise. As etapas que compreendem a seleção de dados da planilha RAP estão descritas abaixo, e foram realizadas com a utilização de “filtros” da planilha em formato Microsoft Excel:

i) Primeira etapa de seleção de dados: foram retirados resultados de propriedades mecânicas zeradas. Neste caso o ensaio não foi realizado, provavelmente devido à norma pedida pelo cliente não especificar ensaio de tração. Também foram retirados dados de tubos trefilados ou com algum tratamento térmico (normalização / alívio de tensões / recozimento), visto que o interesse deste trabalho é em tubos apenas soldados. Com a retirada de tubos nestas condições automaticamente algumas espessuras e diâmetros externos são desconsiderados, visto que alguns dimensionais são produzidos apenas após a trefilação ou tratamento térmico do tubo. Nesta etapa também foram retirados dados de tubos produzidos com aços que não fosse SAE 1012, em que optou-se por trabalhar com composição química fixa, variando apenas os parâmetros dimensionais do tubo. Os dados anteriores à 2013 também foram suprimidos, em que os dados de ensaios mais atuais foram preferidos, pois representam uma quantidade de ensaios representativos. Dados posteriores a 2015 não foram considerados, visto que no ano de 2016 houve uma grave crise no setor e os resultados de ensaios no material de interesse (SAE 1012) foram drasticamente reduzidos;

ii) Segunda etapa de seleção de dados: nesta etapa todos os resultados de ensaios em duplicidade foram retirados. Os resultados em duplicidade ocorrem devido a um resultado de ensaio mecânico de tração ser válido para um mesmo lote de produção, e assim, são reportados duas ou mais vezes, de acordo com a quantidade de clientes que compram do mesmo lote de tubos.

iii) Etapa final de seleção de dados: foram retirados os resultados de ensaios para tubos quadrados e retangulares, visando somente tubos de seção circular. Tubos quadrados e retangulares devem ser tratados separadamente, visto que estes tubos, na etapa de produção, recebem outras formas de conformação mecânica, diferente de tubos circulares. Portanto, este trabalho não irá contemplar resultados de propriedades mecânicas em tubos quadrados e retangulares.

A seguir, no Quadro 10, as etapas de seleção de dados são apresentadas. A letra X refere-se à exclusão dos dados relacionados às variáveis na devida etapa de seleção.

Quadro 10 - Etapas da seleção de dados da planilha RAP.

Variáveis\Etapas	Planilha RAP na sua configuração inicial	Após 1ª etapa de seleção	Após 2ª etapa de seleção	Após a etapa final de seleção
1ª) Condição final do tubo	Somente soldado	Somente soldado	Somente soldado	Somente soldado
	Soldado e trefilado	X	X	X
	Soldado e com tratamento térmico de normalização	X	X	X
	Soldado e com tratamento térmico de alívio de tensões	X	X	X
	Soldado e com tratamento térmico de recozimento	X	X	X
	Soldado, trefilado e com tratamento térmico de normalização	X	X	X
2ª) Forma geométrica do tubo	Circular	Circular	Circular	Circular
	Retangular	Retangular	Retangular	X
	Quadrado	Quadrado	Quadrado	X
3ª) Tipo de aço utilizado na fabricação do tubo	SAE 1008	X	X	X
	SAE 1010	X	X	X
	SAE 1012	SAE 1012	SAE 1012	SAE 1012
	SAE 1016	X	X	X
	SAE 1020	X	X	X
	ASTM A36	X	X	X
	St52.3	X	X	X
	Outros aços	X	X	X
4ª) Espessura do tubo (mm)	0,75 a 6,30	1,20 a 6,30	1,20 a 6,30	1,20 a 6,30
5ª) Diâmetro do tubo (mm)	12,00 a 127,00	15,87 a 127,00	15,87 a 127,00	15,87 a 127,00
6ª) Resultados duplicados	Resultados duplicados	Resultados duplicados	X	X
7ª) Resultado zerados	Resultados zerados	X	X	X
8ª) Data do ensaio mecânico de tração	2005 até 2015	2013 a 2015	2013 a 2015	2013 a 2015
Quantidade de conjunto de dados	85.485	7.942	3.964	3.141

Fonte: A autora (2018).

Finalmente, os dados de interesse foram definidos: propriedades mecânicas de tubos somente soldados, de forma circular, produzidos com o aço SAE 1012, de espessura variando entre 1,20 mm e 6,30 mm, diâmetro variando entre 15,87 mm e 127,00 mm, produzidos no período de 2013 a 2015, totalizando 3.141 conjuntos de resultados de ensaios experimentais. O Quadro 11 apresenta a quantidade de conjunto de dados, ou seja, o tamanho da amostra obtida para cada diâmetro externo do tubo (ver coluna no Quadro 11) e espessura da fita que gerou o tubo (ver linha no Quadro 11) correspondente.

Cabe ressaltar que no Quadro 11 estão indicados os tamanhos das amostras de *LE*, *LRT*, *AL* e composição química dos dados selecionados da planilha RAP, ou seja, a quantidade de conjunto de dados a cada diâmetro e espessura. Um conjunto de dados representa uma linha da planilha RAP, conforme Figura 34.

Na Seção 5, a estatística descritiva será empregada, e assim resultados da média aritmética simples e o respectivo desvio padrão de cada população, quando for o caso, serão apresentados para efetuar a análise do comportamento das distribuições dos elementos químicos e das propriedades mecânicas de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da variação dimensional dos tubos, ou seja, *D* e *t*.

Quadro 11 - Tamanho de cada amostra em função do diâmetro externo do tubo (D) e espessura da fita que gerou o tubo (t) dos dados selecionados da planilha RAP.

		Espessura da fita (t) [mm]											TOTAL		
		1,20	1,50	2,00	2,25	2,65	3,00	3,35	3,75	4,25	4,75	5,60		6,30	
Diâmetro do tubo (D) [mm]	15,87	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	19,05	1	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
	21,30	0	0	0	2	18	0	0	0	0	0	0	0	0	20
	22,22	6	13	20	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	52
	25,00	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
	25,40	0	12	3	22	45	1	0	0	0	0	0	0	0	83
	26,00	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	26,70	0	0	0	24	6	0	6	0	0	0	0	0	0	36
	26,90	0	0	0	3	26	0	1	0	0	0	0	0	0	30
	28,57	115	122	0	0	0	0	1	8	1	0	0	0	0	247
	28,60	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	31,75	10	1	0	16	6	15	0	0	4	0	0	0	0	52
	33,40	0	0	5	2	0	0	54	2	34	19	0	0	0	116
	33,70	0	0	15	0	16	0	43	6	11	1	0	0	0	92
	34,92	23	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
	35,00	2	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	38,10	1	0	3	0	115	3	7	15	0	3	0	0	0	147
	38,60	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	41,27	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	42,20	0	0	0	0	3	1	62	0	24	14	0	0	0	104
	42,40	0	0	13	0	32	0	52	10	0	20	0	0	0	127
	44,45	0	0	0	1	8	0	0	2	0	35	0	0	0	46
	45,00	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	48,30	0	0	6	1	52	120	15	62	0	35	0	0	0	291
	50,80	0	0	3	2	5	78	2	7	41	0	0	4	0	142
	60,30	0	0	6	8	38	3	10	84	42	5	0	0	0	196
	63,50	0	0	1	169	27	10	22	2	10	0	0	8	0	249
70,00	0	17	5	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	28	
73,00	0	0	0	0	6	158	0	0	0	44	0	10	0	218	
76,20	0	0	17	5	7	11	4	5	0	2	9	15	0	75	
88,90	0	0	5	15	1	36	2	1	0	4	114	2	0	180	
101,60	0	0	6	35	0	2	0	15	3	0	19	17	0	97	
114,30	0	0	10	22	8	111	17	12	2	14	165	4	0	365	
127,00	0	0	5	6	1	6	1	0	0	13	2	15	0	49	
TOTAL	162	184	157	354	428	561	299	231	172	209	309	75	0	3.141	

Fonte: A autora (2018).

5 ANÁLISE DE DADOS DA PLANILHA RAP

Nesta seção será apresentada a análise de dados dos resultados de *LE*, *LRT* e *AL*, bem como da composição química, dos 3.141 conjuntos de amostras da planilha RAP, cujas informações foram filtradas e selecionadas do banco de dados da empresa Tuper S/A, conforme a Seção 4. Os resultados da análise de dados serão apresentados de forma gráfica e com quadros para a apresentação dos resultados da estatística descritiva. Também será apresentada uma análise do comportamento mecânico das propriedades mecânicas *LE*, *LRT* e *AL* em função dos parâmetros dimensionais diâmetro (*D*) e espessura (*t*) do tubo.

5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRAGEM DE AÇO SAE 1012

Através da seleção de dados da planilha RAP, os percentuais em massa dos principais elementos químicos do aço da classe SAE 1012 foram analisados pela representação gráfica de histogramas estatísticos, além de cálculos de média aritmética simples e desvio padrão, para uma população de 3.141 conjuntos de dados experimentais de cada elemento químico. A composição química deste aço, além do elemento principal Ferro (Fe), é composta basicamente de quatro elementos químicos: Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S), conforme Norma SAE J403 (2014). Os elementos Silício (Si) e Alumínio (Al) também foram considerados para esta análise de dados, pois são elementos considerados importantes no aço.

Conforme Chiaverini (2008, p. 176), no Brasil a classificação de aços-carbono considera a composição química do aço e segue os critérios adotados pela AISI (*American Iron and Steel Institute*) e SAE (*Society of Automotive Engineers*), que coincidem com a designação UNS (*Unified Numbering System*). Para aços-carbono comuns, por exemplo, a designação AISI-SAE é 10XX e a UNS é G10XXX, onde, segundo Chiaverini (2008, p. 176), “as letras XX ou XXX correspondem às cifras indicadoras dos teores de carbono”. Na designação AISI-SAE o aço 1012 tem 0,12% de carbono em média e sua classificação na designação UNS é G10120.

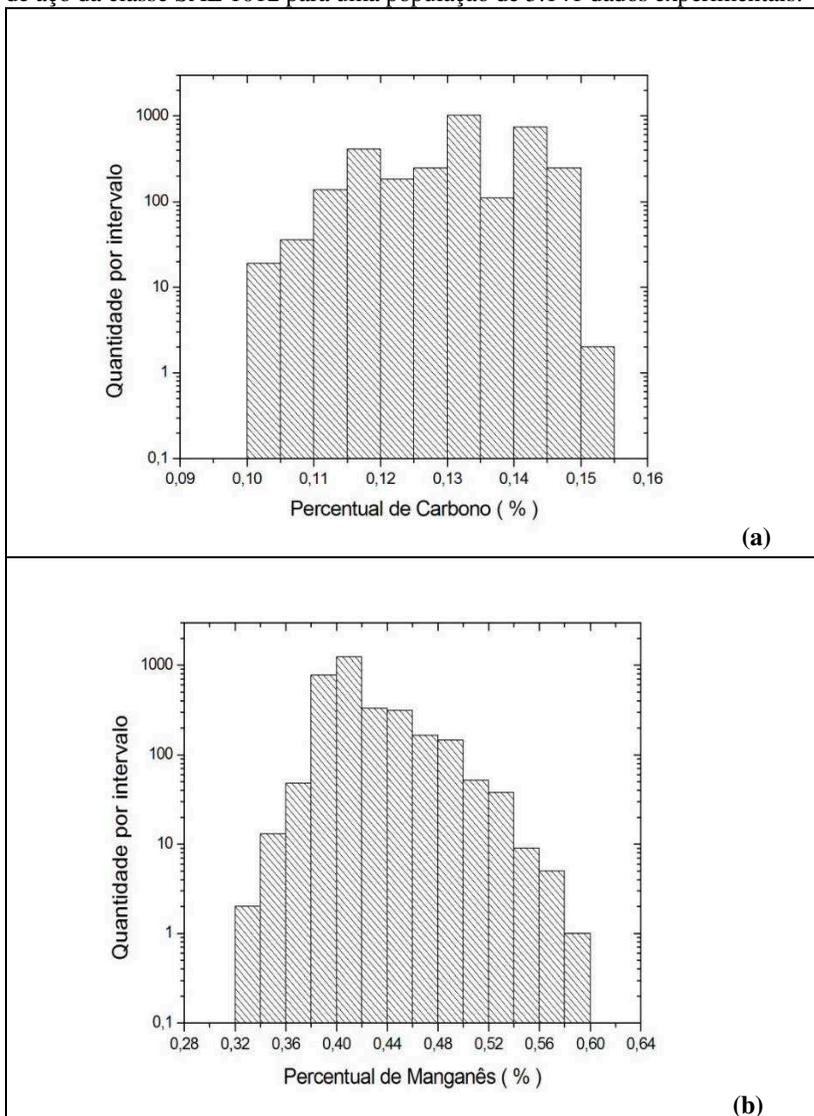
A composição química de aços-carbono da classe SAE é regida pela Norma SAE J403. Esta norma especifica desde aços de baixo Carbono (à exemplo SAE 1008 e SAE 1012) até aços de alto teor de Carbono (à exemplo SAE 1095) para aplicação em chapas, fios, arames, tubos soldados e sem costura.

O ensaio experimental de composição química, nas usinas siderúrgicas, é realizado diretamente no aço líquido, chamada *cast analysis* ou análise de panela. Ao receber a bobina de aço, o cliente (por exemplo, a Tuper S/A) pode realizar um ensaio experimental para verificar se a composição química da bobina de aço está conforme o especificado pela Norma SAE J403 e também em conformidade com o certificado da usina. Porém, na maioria dos casos, a própria análise de panela é considerada, e o ensaio experimental de contraprova é realizado somente em casos específicos, a pedido do cliente, ou quando um resultado de propriedade mecânica é suspeito.

Para a determinação da composição química em aços, um dos métodos utilizados é a espectrometria de emissão óptica. Segundo Thomsen (1997, apud Galhardi, 2017, p. 36), “a análise por Espectrometria de Emissão Óptica (OES) utiliza o espectrômetro de emissão óptica para realizar a identificação do espectro proveniente do fornecimento de energia ao material. Nesse equipamento a excitação ocorre através de uma centelha elétrica, onde através de um espaço muito pequeno entre o eletrodo e o corpo de prova são realizadas as descargas de elétrons. A região onde foi realizada a descarga elétrica é caracterizada por apresentar uma marca característica de queima. O elemento é identificado através do comprimento de onda detectado pelo aparelho e sua quantidade através da intensidade da linha espectral”. O método de ensaio de composição química em produtos de aço segue a Norma ASTM A751.

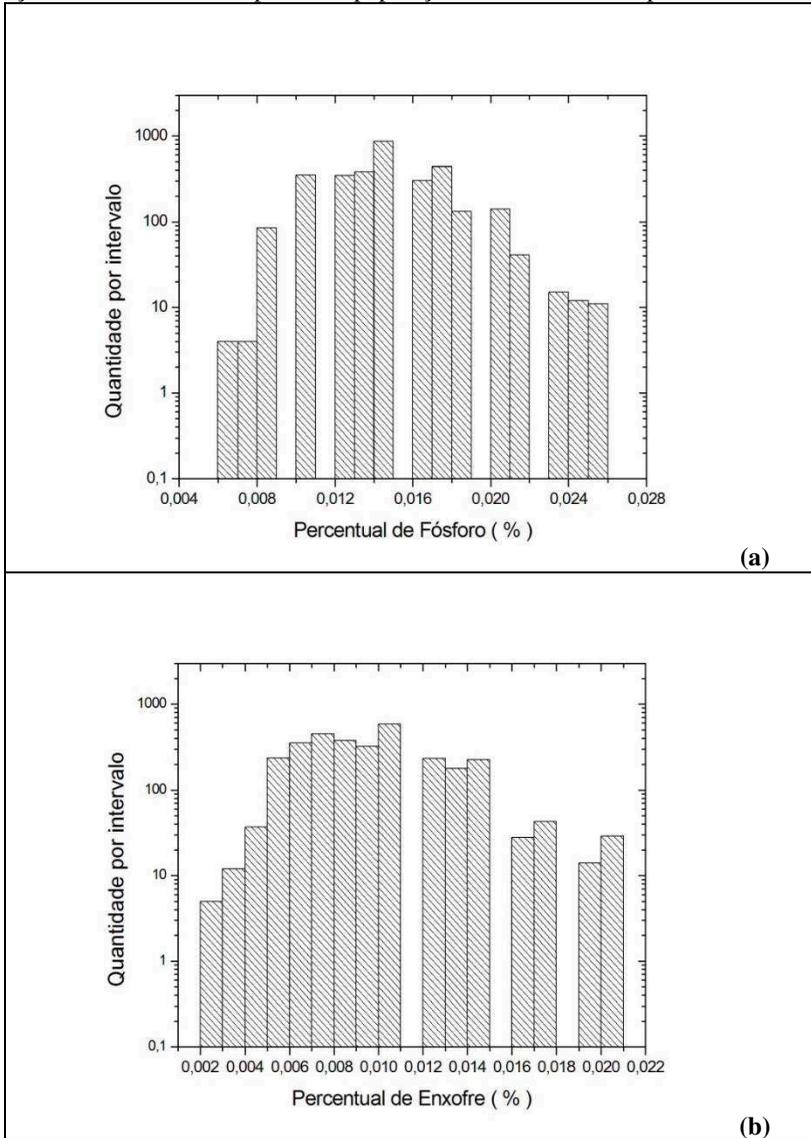
Os resultados de composição química desta dissertação provêm dos resultados da análise de panela, analisados pela usina siderúrgica fornecedora do aço da classe SAE 1012. Os resultados dos teores de Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S), Silício (Si) e Alumínio (Al) de 3.141 amostras foram representados por histogramas estatísticos para avaliação da distribuição e dispersão dos resultados. As Figuras 35 a 37 apresentam os histogramas estatísticos para os percentuais em massa dos elementos químicos C (Figura 35, parte a), Mn (Figura 35, parte b), P (Figura 36, parte a), S (Figura 36, parte b), Si (Figura 37, parte a) e Al (Figura 37, parte b). Os valores toleráveis para o aço SAE 1012, conforme Norma J403, estão no Quadro 13, posteriormente.

Figura 35 - Percentual em massa de Carbono (a) e Manganês (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.



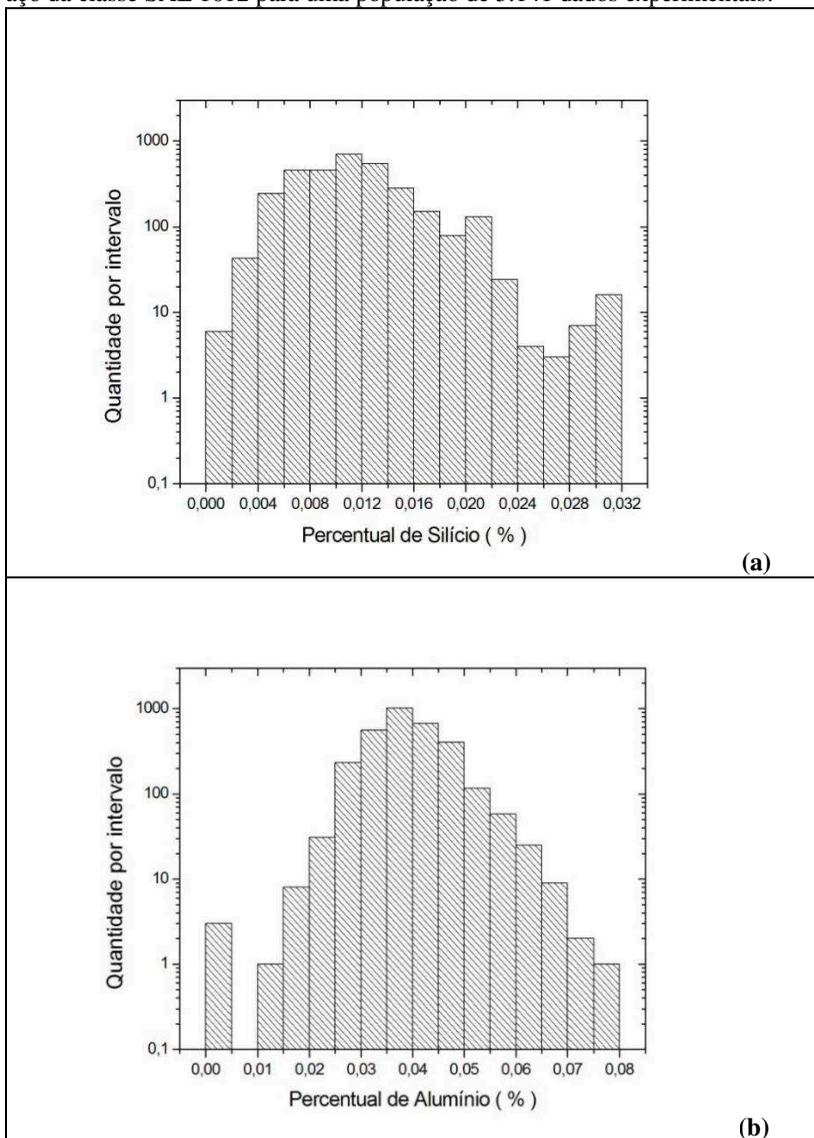
Fonte: A autora (2019).

Figura 36 - Percentual em massa de Fósforo (a) e Enxofre (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.



Fonte: A autora (2019).

Figura 37 - Percentual em massa de Silício (a) e Alumínio (b) em amostras de aço da classe SAE 1012 para uma população de 3.141 dados experimentais.



Fonte: A autora (2019).

Nos histogramas estatísticos apresentados nas Figuras 35 a 37, a escala logarítmica foi empregada no eixo da vertical, ou seja, a “Quantidade por intervalo”, pois em algumas situações, alguns intervalos nos histogramas possuem poucas e muitas observações. Também foi observado que o formato geométrico do histograma da Figuras 37b) (Percentual de Alumínio, Al) aproxima-se de uma distribuição gaussiana, enquanto que os demais histogramas não apresentam um formato de uma distribuição conhecida (por exemplo, gaussiano, uniforme, etc.).

O Quadro 12 fornece as informações da estatística descritiva, sendo os cálculos numéricos da média aritmética simples, do desvio padrão, os valores mínimo e máximo, bem como o intervalo para percentuais em massa dos elementos Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S), Silício (Si) e Alumínio (Al) para o aço da classe SAE 1012, para uma amostragem de 3.141 conjuntos de dados experimentais, da planilha RAP.

Quadro 12 - Média aritmética simples, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e intervalo para os percentuais em massa do C, Mn, P, S, Si e Al para o aço da classe SAE 1012, em 3.141 conjuntos de dados de cada elemento.

Elemento	Média	Desvio Padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo
C [%]	0,131	0,010	0,100	0,152	0,052
Mn [%]	0,420	0,034	0,230	0,590	0,360
P [%]	0,015	0,003	0,006	0,025	0,019
S [%]	0,009	0,003	0,002	0,020	0,018
Si [%]	0,011	0,004	0,001	0,030	0,029
Al [%]	0,039	0,008	0,000	0,090	0,090

Fonte: A autora (2019).

Os valores encontrados para média aritmética simples e o desvio padrão de todos os elementos estão dentro do aceitável, quando se compara com a especificação do aço da classe SAE 1012, conforme Norma J403 (Quadro 13).

Cabe ressaltar que o Carbono é o principal elemento em aços carbono esfriados normalmente (transformação total da austenita), e à medida que seu teor aumenta as propriedades mecânicas *LE* e *LRT* crescem, porém, o *AL* decresce (CHIAVERINI, 2008, p. 182). A média encontrada para o Carbono, nos dados selecionados da planilha RAP, foi de 0,131%. O Manganês também atua no aço com objetivo de aumento de resistência mecânica, principalmente *LE* (MOURÃO *et al.*, 2011, p. 414), porém este elemento em excesso pode causar inclusões não

metálicas (CHIAVERINI, 2008, p. 180). O Fósforo é um elemento considerado nocivo ao aço, visto que confere ao aço a fragilidade à frio, porém para aços de baixo teor de Carbono o efeito nocivo é menor e este elemento pode favorecer o aumento de dureza e *LRT* (CHIAVERINI, 2008, p.178). A média encontrada para o Fósforo, nos dados selecionados da planilha RAP, foi de 0,015%, um teor relativamente baixo. O Enxofre é um elemento considerado extremamente prejudicial no aço (MOURÃO *et al.*, 2011, p. 414), pois “reduz a soldabilidade e desfavorece a ductilidade e tenacidade do aço”, por isso a maioria das normas de aço especificam um valor baixo como aceitável. A média encontrada, nos dados selecionados da planilha RAP, foi de 0,009%, considerada muito baixa. Os elementos Silício e Alumínio são elementos desoxidantes do aço (CHIAVERINI, 2008, p. 181). Um nível alto de Silício é indesejável para aços que posteriormente serão galvanizados, por isso os produtores de tubos tem especial interesse no controle deste elemento. A média encontrada para estes elementos, nos dados selecionados da planilha RAP, foi de 0,011% para Silício e 0,039% para Alumínio.

Observou-se que para o teor de Manganês houve um valor mínimo de 0,23%, que estaria fora da especificação conforme Norma J403 grau SAE 1012, porém este dado representa apenas 0,003% de dados com teor abaixo da especificação e pode ser classificado como um erro de medição ou até mesmo de seleção dos dados.

O Quadro 13 apresenta os percentuais em massa de teores de C, Mn, P, S, Si e Al em comparativo com os resultados da média aritmética simples obtidos nesta dissertação e outras fontes de pesquisa, comparando também com a Norma do aço J403.

Quadro 13 - Comparativo de resultados de percentuais em massa de teores C, Mn, P, S, Si e Al desta dissertação e demais literaturas, para o aço da classe SAE 1012.

Referência	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Al [%]
Seleção de dados da planilha RAP desta dissertação (2019)	0,131	0,420	0,015	0,009	0,011	0,039
Norma SAE J403 (2014)	0,10 a 0,15	0,30 a 0,60	máximo 0,030	máximo 0,035	*	*
Aparicio, Ramirez e Lezama (2014)	0,11 a 0,15	0,35 a 0,55	0,025	0,02	0,04	0,01 a 0,07
Kalvala, Akram e Misra (2016)	0,12	0,40	0,02	0,01	*	*
Krishnadev, et al. (2008)	0,12	0,51	< 0,01	0,026	0,30	*
Andrade e Al-Qureshi (2009)	0,15	0,53	0,008	0,007	0,002	0,05

*teores não especificados

Fonte: A autora (2019).

É possível notar que os teores de C, Mn, P e S observados na média de 3.141 conjuntos de dados desta dissertação estão atendendo 100% da Norma J403. Comparando com as demais referências, os teores são semelhantes, principalmente a pesquisa de Kalvala, Akram e Misra (2016). Ao se comparar com o trabalho de Krishnadev *et al.* (2008) a principal diferença é o teor de Silício mais alto que o encontrado nesta dissertação. Teores de P e S são muito baixos em todas as pesquisas, reforçando a teoria que estes elementos são considerados maléficos ao aço, e assim, os produtores de aço mundialmente tentam deixar estes elementos na mais baixa concentração possível.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DA AMOSTRAGEM DE AÇO SAE 1012

Nesta seção serão apresentados os resultados das propriedades mecânicas Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência à Tração (LRT) e Alongamento (AL) em função dos parâmetros dimensionais de tubos, a espessura (t) e o diâmetro externo (D) e também considerando a razão t/D .

5.2.1 Influência do diâmetro externo e da espessura nos dados brutos das propriedades mecânicas

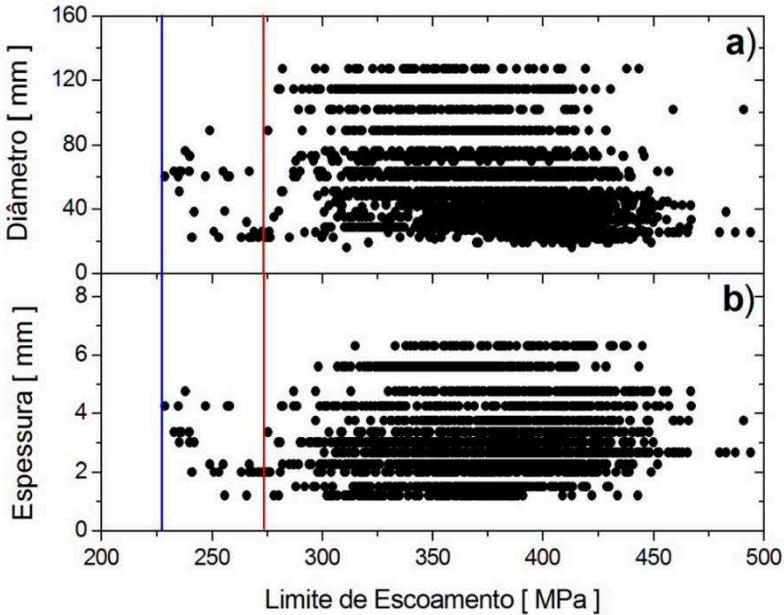
As Figuras 38 a 40 apresentam os comportamentos do diâmetro externo (parte “a”) das referidas figuras) e da espessura (parte “b”) das referidas figuras) em função do Limite de escoamento (Figura 38), Limite de Resistência à Tração (Figura 39) e Alongamento (Figura 40). Conforme o Quadro 11, da Seção 4.2, a espessura apresenta 12 valores distintos (1,20 a 6,30 mm), enquanto que o diâmetro externo apresenta 34 valores distintos (15,87 a 127,00 mm). Em cada um dos seis gráficos das Figuras 38 a 40 estão representados 3.141 pontos, em que muitos coincidem e outros estão próximos, em seus resultados numéricos.

Cabe ressaltar que os resultados das propriedades mecânicas LE , LRT e AL foram determinados por ensaio mecânico de tração, e o objetivo desta análise de dados (Seção 5.2) é verificar o comportamento das referidas propriedades em função da espessura e diâmetro. Para os dados brutos representados, não se observou uma lei de tendência em função da espessura e diâmetro. Fisicamente, como a tensão é a razão entre a força aplicada e a área de seção transversal do corpo de prova, com a alteração de parâmetros dimensionais, ocorre uma alteração da força a ser aplicada no ensaio mecânico de tração para atingir certo nível de tensão, por exemplo a tensão de escoamento (conhecida por limite de escoamento) ou a tensão máxima (limite de resistência à tração), as quais são propriedades do material. Dentro desta argumentação física, as tensões de escoamento e máxima representadas nas Figuras 38 e 39 variam estatisticamente, mas não ao ponto de descrever uma lei de acréscimo ou decréscimo das propriedades mecânicas LE e LRT em função de t e D . Numa aplicação de engenharia, com a variação dimensional, a grandeza física que será alterada é a força interna que o material irá suportar numa estrutura metálica (ver aplicações em Seção 2.2), por exemplo.

As linhas verticais em vermelho e azul nos gráficos da Figura 38 representam os níveis de limite de escoamento (LE), conforme as Normas

Europeia EN 10305-3 grau E235 + CR1 (2016) e Brasileira NBR 8261 grau A (2010), respectivamente. Os pontos à esquerda das linhas verticais não satisfazem o valor mínimo estipulado em norma.

Figura 38 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do limite de escoamento (LE) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.



Fonte: A autora (2019).

No Quadro 14 estão apresentados valores de LE de duas referências de livros e de três normas, bem como o quantitativo de tubos (resultados de LE ou pontos no gráfico da Figura 38) que atendem a norma ou livro, quantitativo de tubos não qualificados e percentuais de tubos não qualificados. Verifica-se que poucos dados de LE não satisfazem as normas e livros, dentro da amostragem de 3.141 dados de LE .

Quadro 14 - Dados da literatura de LE para o aço da classe SAE 1012, quantitativo de tubos qualificados e não qualificados e percentuais de tubos não qualificados.

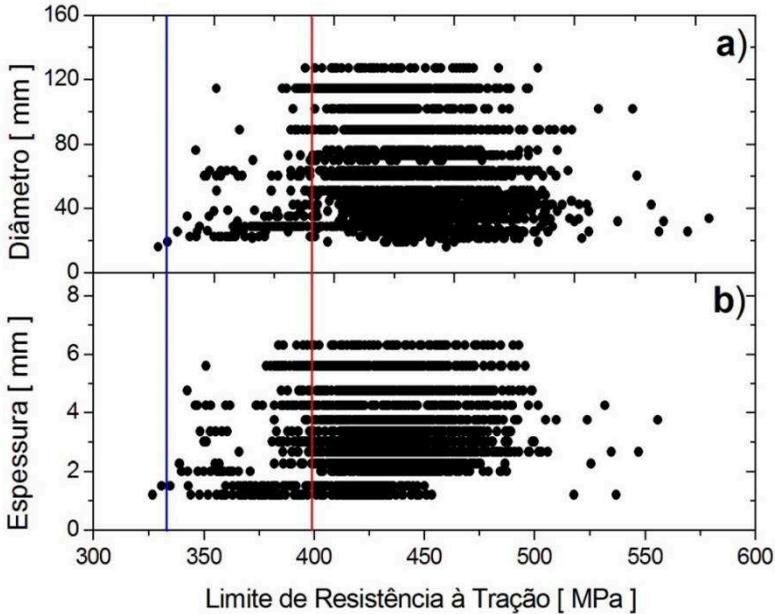
Literatura	LE [MPa]	Quant. de tubos qualificados ($>LE$)	Quant. de tubos não qualificados ($<LE$)	Percentual de tubos não qualificados [%]
Chiaverini (2008, p.34)	250	3.133	8	0,25
Callister (2007, p.249)	205	3.141	0	0
NBR 5590 grau A (2015)	205	3.141	0	0
NBR 8261 grau A (2010)	228	3.141	0	0
DIN EN 10305-3 grau E235 + CR1 (2016)	273*	3.121	20	0,64

* LE especificado apenas para fins de cálculo, neste caso o $LE \geq 0,7*390$.

Fonte: A autora (2019).

De maneira análoga, as linhas verticais em vermelho e azul nos gráficos da Figura 39 representam os níveis de limite de resistência à tração (LRT), conforme o livro de Chiaverini (2008, p.34) e a Norma Brasileira NBR 5590 grau A (2015), respectivamente. Os pontos à esquerda das linhas verticais não satisfazem o valor mínimo estipulado no livro e em norma.

Figura 39 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do limite de resistência à tração (LRT) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.



Fonte: A autora (2019).

No Quadro 15 estão apresentados valores de LRT de dois livros e de três normas, bem como o quantitativo de tubos (resultados de LRT ou pontos no gráfico da Figura 39) que atendem a norma ou livro, quantitativo de tubos não qualificados e percentuais de tubos não qualificados. Ao contrário do observado para LE , para LRT verifica-se que uma maior quantidade de dados não satisfaz as normas e livros, dentro da amostragem de 3.141 dados de LRT .

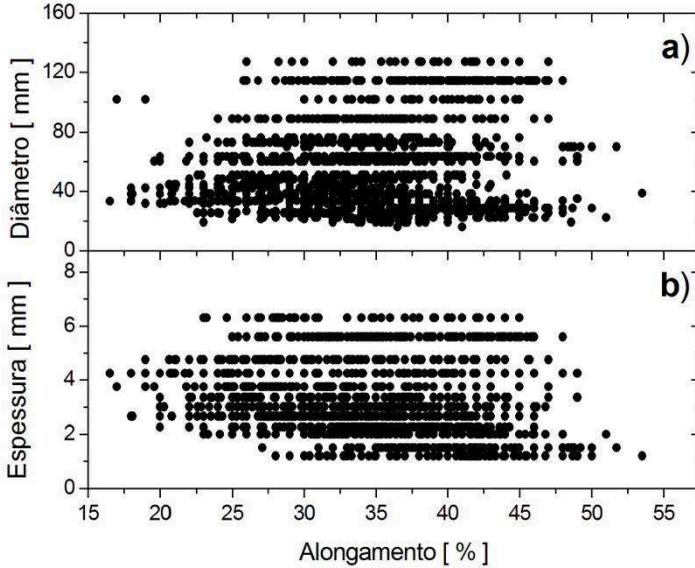
Quadro 15 - Dados da literatura de *LRT* para o aço da classe SAE 1012, quantitativo de tubos qualificados e não qualificados e percentuais de tubos não qualificados.

Literatura	<i>LRT</i> [MPa]	Quant. de tubos qualificados (> <i>LRT</i>)	Quant. de tubos não qualificados (< <i>LRT</i>)	Percentual de tubos não qualificados [%]
Chiaverini (2008, p.34)	405	2.853	288	9,17
Callister (2007, p.249)	380	3.083	58	1,85
NBR 5590 grau A (2015)	330	3.140	1	0,03
NBR 8261 grau A (2010)	310	3.141	0	0
DIN EN 10305- 3 grau E235 + CR1 (2016)	390	3.033	108	3,44

Fonte: A autora (2019).

O Alongamento (*AL*) varia num intervalo de 12,0 mm a 53,5 mm, e esta amplitude considerável está, provavelmente, relacionada com a variação da geometria do corpo de prova utilizado no ensaio mecânico de tração, conforme Figuras 32 e 33, Seção 4.1.3.

Figura 40 - a) Diâmetro externo (D) e em b) espessura (t) da chapa utilizada na fabricação do tubo em função do alongamento (AL) em amostras de tubos soldados de aço SAE 1012. Amostragem para uma população de 3.141 dados brutos.



Fonte: A autora (2019).

Na próxima seção, os dados de LE , LRT e AL das amostragens do Quadro 11, Seção 4.2, dos tubos de diâmetro externo (D) e espessura (t) serão representados em termos da média aritmética simples, em função dos parâmetros dimensionais. Um intervalo de confiança será apresentado para a média aritmética simples e o desvio padrão da população de 3.141 dados de LE , LRT e AL .

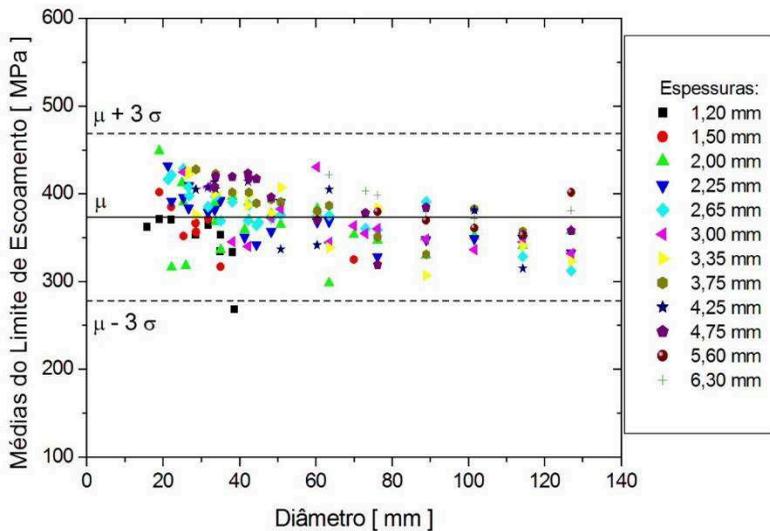
5.2.2 Influência do diâmetro externo, da espessura e da razão t / D nos dados tratados das propriedades mecânicas

As Figuras 41 a 43 apresentam os comportamentos das médias aritméticas simples do limite de escoamento (LE , Figura 41), do limite de resistência à tração (LRT , Figura 42) e do alongamento (AL , Figura 43), as três propriedades mecânicas em função do diâmetro externo (D) do tubo. As diferentes geometrias utilizadas e cores para representar os pontos dos gráficos das Figuras 41 a 43 indicam as diferentes espessuras dos tubos.

Com relação aos resultados da estatística descritiva, as médias aritméticas simples de LE , LRT e AL foram calculadas das 153 populações, conforme o Quadro 11, da Seção 4.2, sendo realizado um total de 459 cálculos de médias, na análise de dados. As linhas contínuas nos gráficos de LE , LRT e AL representam às médias populacionais (μ) dos 3.141 conjunto de dados, para cada uma das propriedades mecânicas. As linhas pontilhadas, nos três gráficos, correspondem aos limites superiores ($\mu + 3\sigma$) e limites inferiores ($\mu - 3\sigma$), sendo o erro máximo tolerável no controle estatístico da qualidade. O intervalo entre estes limites é interpretado como o limite de confiança para 99,7%, ou seja, o percentual de observações dentro do intervalo, em relação à população (MONTGOMERY; RUNGER, 2016). Apenas um ponto nos gráficos de LE , LRT e AL ficou fora do intervalo de confiança, correspondendo ao tubo de aço da classe SAE 1012 soldado de espessura $t = 1,20$ mm e diâmetro externo $D = 38,60$ mm. As médias aritméticas simples e os desvios padrões das propriedades mecânicas correspondentes à amostragem desse tubo são: $LE = [268,10 \pm 17,25]$ MPa, $LRT = [361,35 \pm 7,85]$ MPa e $AL = [49,5 \pm 5,66]$ %. Dentro do exposto, verifica-se que a amostragem em relação à média é consistente, sendo que apenas um baixo percentual de dados é discrepante, conforme discutido na seção anterior.

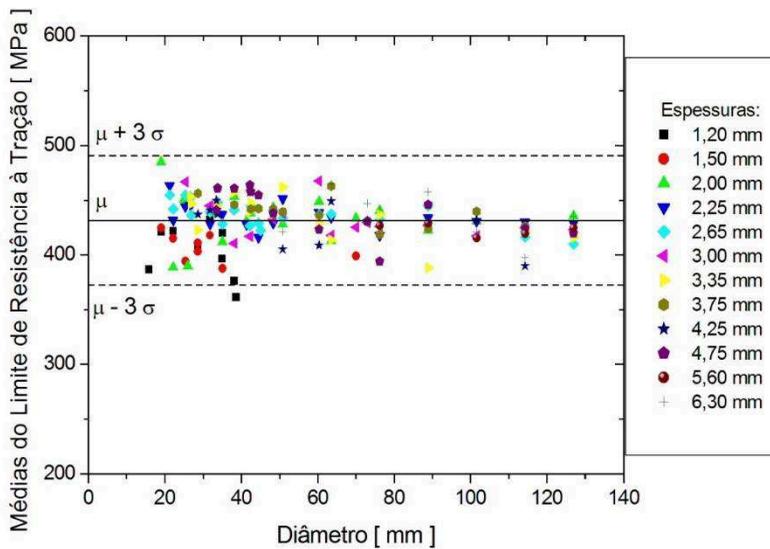
Um resultado importante observado nos gráficos de LE , LRT e AL em função do diâmetro externo D e da espessura t é de flutuações estatísticas dos dados em torno das médias populacionais (μ), indicando um comportamento mecânico de uma função constante em função dos parâmetros dimensionais. Por fim, os intervalos de confiança para 99,7%, calculados para as propriedades mecânicas de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados são: $LE = [373,45 \pm 97,76]$ MPa, $LRT = [431,67 \pm 59,18]$ MPa e $AL = [34,76 \pm 12,77]$ %.

Figura 41 - Médias aritméticas simples do limite de escoamento (LE) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro externo (D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.



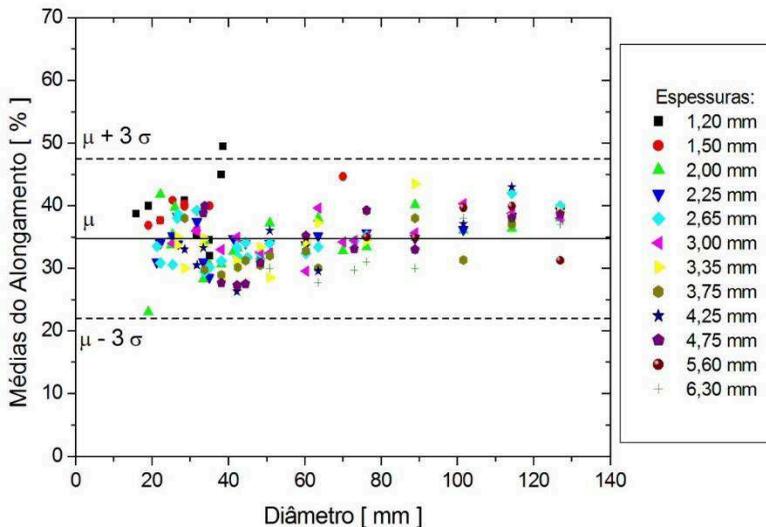
Fonte: A autora (2019).

Figura 42 - Médias aritméticas simples do limite de resistência à tração (*LRT*) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro externo (*D*) dos tubos, para diferentes espessuras (*t*), representados pelos diferentes pontos coloridos.



Fonte: A autora (2019).

Figura 43 - Médias aritméticas simples do alongamento (AL) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função do diâmetro externo (D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.



Fonte: A autora (2019).

Correlacionando os resultados obtidos (gráficos das Figuras 41 a 43) com a pesquisa de Das, Pal e Das (2012), onde os pesquisadores utilizaram ensaio mecânico de tração e PABI para medição de LE e LRT em tubos de aço baixo carbono, pode-se notar que o LE encontrado (266 MPa por tração e 270 MPa por PABI) é um pouco abaixo do limite mínimo do intervalo de confiança encontrado na análise de dados realizada neste trabalho com o banco de dados da empresa Tuper S/A ($LE = [373,45 \pm 97,76]$ MPa). Já o valor de LRT encontrado por Das, Pal e Das (2012) de 454 MPa por ensaio mecânico de tração e 461 MPa por PABI, está dentro do intervalo de confiança dos resultados encontrados para LRT nesta pesquisa ($LRT = [431,67 \pm 59,18]$ MPa).

A pesquisa de Morais *et al.* (2011) muito se assemelha a este trabalho de dissertação, por correlacionar LE , LRT e AL de diversos diâmetros e espessuras em tubos de aço soldados por ERW (ou HFIW). A larga faixa de variação de LE nos diversos dimensionais ensaiados também foi encontrada nesta dissertação, bem como uma menor variação

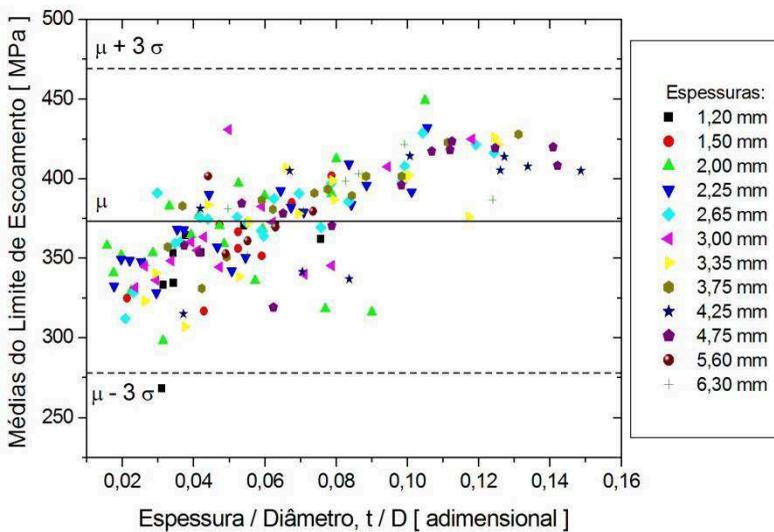
de *LRT* em função do diâmetro e da espessura. Enquanto *LE* variou até 125 MPa, na pesquisa de Morais *et al.* (2011) a variação nesta pesquisa foi de $\pm 97,76$ MPa. Já para *LRT*, na pesquisa de Morais *et al.* (2011) a variação foi de no máximo 52 MPa, e nesta pesquisa, foi de $\pm 59,18$ MPa. Ou seja, *LE* tem maior variação do que *LRT* quando diâmetro e espessura variam. O Alongamento também foi pesquisado por Morais *et al.* (2011) e todos os resultados encontrados para *AL* estão dentro do intervalo de confiança desta pesquisa ($AL = [34,76 \pm 12,77]$ %).

Jiao e Zhao (2001) também ensaiaram tubos de aço em dimensionais contemplados nesta dissertação, de diâmetros entre 31,8 a 75 mm e espessuras entre 1,6 a 2,0 mm. A média encontrada de *LE* para tubos não tratados (antes de serem VHS) foi de 433 e 465 MPa respectivamente, para amostras de corpo de prova e tubo inteiro. Este resultado, em comparação com média e intervalo de confiança encontrado nesta dissertação, pode-se afirmar que estão dentro desta faixa. A média encontrada de *LRT* para tubos não tratados (antes de serem VHS) foi de 502 e 507 MPa, respectivamente, para amostras de corpo de prova e tubo inteiro. Este resultado, em comparação com média e intervalo de confiança encontrado nesta dissertação, pode-se afirmar que estão acima desta faixa. Em relação ao *AL* pode-se afirmar que o valor de 26,9%, ensaiado em corpo de prova, ficou dentro do intervalo de confiança encontrado nesta dissertação, porém, quando ensaiado em tubo inteiro, o resultado de 13,0% fica abaixo do intervalo de confiança. A conclusão é de que provavelmente o aço utilizado por Jiao e Zhao (2001) deve ser um aço com maior resistência mecânica do que o SAE 1012.

As Figuras 44 a 46 apresentam os comportamentos das médias aritméticas simples do limite de escoamento (*LE*, Figura 44), do limite de resistência à tração (*LRT*, Figura 45) e do alongamento (*AL*, Figura 46), as três propriedades mecânicas em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t / D) dos tubos. As diferentes cores dos símbolos utilizados para representar os pontos dos gráficos das Figuras 44 a 46 indicam as diferentes espessuras dos tubos.

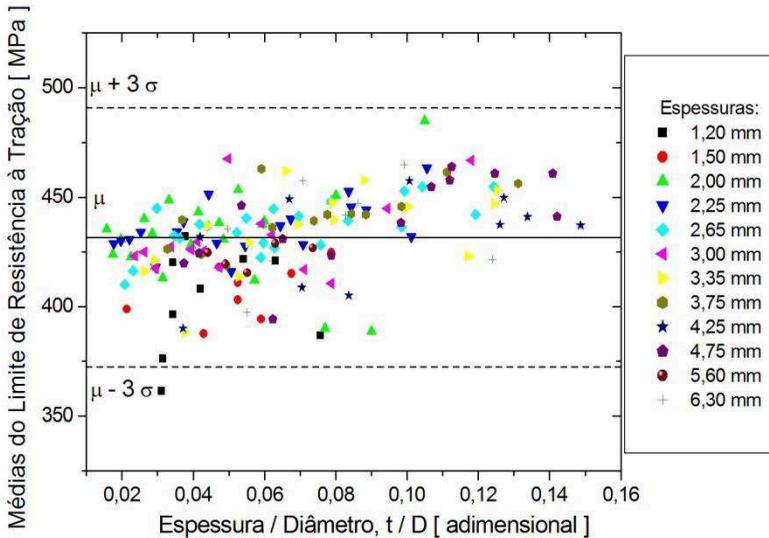
Observa-se nos gráficos das Figuras 44 e 45 para o *LE* e *LRT*, respectivamente, que ambas as propriedades mecânicas são crescentes em função da razão t / D , sendo que o *LE* apresenta uma maior taxa de crescimento, quando comparada com *LRT*, para uma análise visual dos gráficos.

Figura 44 - Médias aritméticas simples do limite de escoamento (LE) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t / D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.



Fonte: A autora (2019).

Figura 45 - Médias aritméticas simples do limite de resistência à tração (*LRT*) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t/D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.

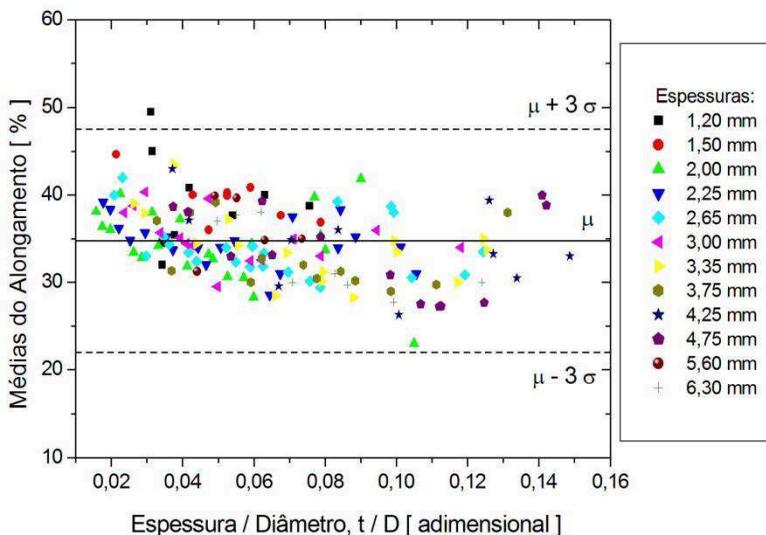


Fonte: A autora (2019).

Este efeito de crescimento das propriedades mecânicas *LE* e *LRT* em função da razão t/D acontece devido ao efeito do encruamento, pois conforme Zhang, Ding e Gu (2012), em elevadas razões t/D o encruamento é dominante. Conforme já mencionado na Seção 2.2.1, o encruamento ocorre quando é aplicada uma tensão que exceda o limite de escoamento (*LE*) original do material metálico, e então a cada vez que é aplicada uma deformação plástica maior, o *LE* aumentará e a ductilidade (Alongamento – *AL*) diminuirá (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Para o *AL*, Figura 46, esta propriedade mecânica é decrescente em função da razão t/D , quando compara-se os valores das médias em relação à média populacional, para uma análise visual deste gráfico. A explicação para o decrescimento suave do *AL* em função da razão t/D é novamente o encruamento. Segundo Callister (2007, p. 192) enquanto as propriedades *LE* e *LRT* aumentam com o encruamento, a ductilidade, representada pelo alongamento percentual, é reduzida.

Figura 46 - Médias aritméticas simples do alongamento (AL) de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados em função da razão da espessura pelo diâmetro externo (t / D) dos tubos, para diferentes espessuras (t), representados pelos diferentes pontos coloridos.



Fonte: A autora (2019).

Os resultados encontrados estão em acordo com as referências bibliográficas apresentadas em algumas pesquisas da Seção 3.2. Moraes *et al.* (2011), em sua pesquisa, não apresentaram as principais diferenças de LE e LRT quando comparadas em relação a razão t / D , porém se for comparada, por exemplo, no diâmetro 60,3 mm e espessura 2,65 mm a razão t / D é de 0,043 e as propriedades mecânicas de LE , LRT e AL no tubo foram respectivamente 367 MPa, 470 MPa e 35%. Porém quando a razão t / D aumenta para 0,088 no diâmetro 30 mm com espessura 2,65 mm os resultados encontrados para LE , LRT e AL no tubo foram respectivamente 484 MPa, 576 MPa e 23%. Ou seja, o aumento da razão t / D de 0,043 para 0,088 em tubos produzidos com um mesmo aço (C-Mn sem microligante) o LE aumentou em 32%, LRT aumentou em 22% e AL caiu 34%. Estes resultados demonstram similaridade com os resultados dos gráficos das Figuras 44 a 46, onde o acréscimo de t / D resulta em maior aumento de LE , aumento menos expressivo em LRT e decréscimo de AL .

Outra pesquisa que o mesmo fenômeno pode ser encontrado foi em Jiao e Zhao (2001, p. 892), onde os pesquisadores ensaiaram vários dimensionais de tubos sem tratamento térmico para avaliação das propriedades mecânicas. Pode-se citar o tubo de 38,1 mm de diâmetro e 1,58 mm de espessura com a razão t/D igual a 0,041 em que LE , LRT e AL no tubo foram respectivamente 455 MPa, 487 MPa e 19,4%. Ao ensaiar um tubo de 38,0 mm de diâmetro e 1,99 mm de espessura com uma razão t/D de 0,052, as propriedades mecânicas LE e LRT aumentaram para 481 e 527 MPa, respectivamente, enquanto o alongamento percentual não teve uma diferença significativa, apresentando 20,0% de alongamento. A diferença de propriedades nesta pesquisa não foi tão expressiva pois a razão t/D teve apenas um pequeno aumento.

A pesquisa de Jo *et al.* (2017), apesar de ter estudado as principais diferenças de propriedades mecânicas de tubos produzidos com diferentes aços em relação às propriedades de origem da chapa, também pode-se fazer uma correlação entre LE e a razão t/D . A figura 30 demonstra que, apesar dos tubos X8-HL e X8-LL apresentaram LE de aproximadamente 585 e 560 MPa respectivamente e razão t/D de 0,0236 enquanto que X7-HH o LE foi de 610 MPa enquanto a razão t/D de 0,0374. Ou seja, novamente o LE aumentou com o aumento da razão t/D .

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais e conclusões obtidas nesta dissertação serão apresentadas por seção.

Com base na pesquisa documental e bibliográfica sobre o processo de fabricação de tubos metálicos e suas aplicações, Seção 2, foi possível chegar às seguintes considerações:

- i) o processo de fabricação de tubos de aço com solda HFWI é composto por diversas etapas, sendo as mais importantes a formação por rolos (*roll forming*) e a soldagem do tubo. A conformação é composta por várias estações de rolos formadores do tubo com o objetivo de dar forma ao tubo e prepará-lo para a etapa de soldagem. A solda HFIW é realizada com a passagem de uma corrente elétrica alternada de alta frequência com aplicação de pressão.
- ii) os tubos soldados de aço podem ter uma grande diversidade de aplicações nos mais diferentes produtos finais. A aplicação dependerá do tamanho do diâmetro externo do tubo, classificados nesta dissertação como tubos de pequeno e grande diâmetro. Destacam-se as aplicações de tubos para peças automotivas; máquinas e implementos agrícolas; tubos de condução de fluidos, vapor, óleo e gás; e construção civil.
- iii) o mecanismo de deformação plástica a que o tubo é submetido é dependente da conformação do tubo soldado por HFIW, sendo o encruamento para tubos de pequeno diâmetro e efeito de Bauschinger para tubos de grande diâmetro. A relação t/D é um dado muito utilizado para determinar se o tubo terá maior ou menor influência destes mecanismos. Tubos com baixa t/D o efeito de Bauschinger é dominante enquanto tubos com alta t/D o encruamento é predominante.

Na Seção 3, em que a pesquisa bibliográfica foi realizada com a utilização da metodologia de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) obteve-se as considerações:

- i) o ensaio mecânico de tração em tubos soldados de aço pode ser realizado com dois tipos de corpos de prova: tubo inteiro e CP cortado e usinado do tubo. A escolha é determinada pelo diâmetro externo do tubo.

As dimensões do corpo de prova sempre seguirão a norma de tubo para o qual o mesmo foi produzido. As principais propriedades mecânicas que são produto de um ensaio mecânico de tração são o Limite de Escoamento, o Limite de Resistência à Tração e o Alongamento.

ii) as pesquisas selecionadas via RSL demonstram que propriedades mecânicas em tubos metálicos são pesquisadas mundialmente, em diversas frentes. Estas pesquisas foram importantes fontes para a discussão dos resultados obtidos nesta dissertação.

iii) dentre as pesquisas selecionadas, destacam-se as pesquisas de *Morais et al.* (2011) e *Jo et al.* (2017) que correlacionam *LE* e *LRT* com os dimensionais do tubo (razão t / D), assim como *Jiao e Zao* (2001) que pesquisaram propriedades mecânicas em tubos de pequeno diâmetro.

A Seção 4, onde a pesquisa documental e o estudo de caso foram realizados, as principais conclusões são:

i) a metodologia aplicada a um banco de dados com mais de 85.000 resultados foi efetiva para selecionar resultados de propriedades mecânicas de tubos de aço SAE 1012, a fim de realizar um estudo estatístico nestes dados.

ii) a metodologia poderá ser uma ferramenta a ser implementada com os demais aços utilizados pela empresa Tuper S/A a fim de estudar o comportamento mecânico destes tubos de aço.

As principais conclusões da Seção 5, onde a análise dos dados selecionados da RAP foi realizada, são:

i) a média de cada elemento da composição química encontrada nos dados foi coerente com a Norma J403 grau SAE 1012, sendo que os valores se assemelham às outras referências.

ii) o comportamento das propriedades mecânicas, Limite de Escoamento (*LE*), Limite de Resistência à Tração (*LRT*) e Alongamento (*AL*) demonstra que os resultados não seguem uma lei de tendência em função da espessura e do diâmetro de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados.

iii) quando comparados com normas específicas de tubos de aço, as propriedades mecânicas, LE e LRT encontradas nos dados brutos da planilha RAP, em sua grande maioria, atendem as normas.

iv) nos dados tratados de LE , LRT e AL foram encontrados valores de médias populacionais (μ) e limites superiores ($\mu + 3\sigma$) e limites inferiores ($\mu - 3\sigma$) com um intervalo de confiança para 99,7%. Os intervalos de confiança para 99,7%, calculados para as propriedades mecânicas de tubos de aço da classe SAE 1012 soldados foram de $LE = [373,45 \pm 97,76]$ MPa, $LRT = [431,67 \pm 59,18]$ MPa e $AL = [34,76 \pm 12,77]$ %.

v) em comparativo com as pesquisas selecionadas por RSL, pode-se concluir que os valores encontrados de média e os intervalos de confiança se assemelham com alguns valores encontrados nas pesquisas da literatura.

vi) o aumento da razão t / D tem influência nas propriedades mecânicas LE , LRT e AL . Enquanto LE , LRT aumentam em função do aumento da razão t / D , o AL decresce. Este efeito é decorrente do encruamento ocorrido nos tubos de pequeno diâmetro.

vii) algumas pesquisas selecionadas por RSL também apresentaram este aumento de LE e LRT e decréscimo de AL em função do aumento da razão t / D .

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, Rogéria Fernandes; OHIRA, Maria Lourdes Blatt. Base de dados: Metodologia para seleção e coleta de documentos. **ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina**. Florianópolis, v. 5, n. 5, p. 131-144, 2000.

AMERICAN PETROLEUM INTITUTE. **API SPECIFICATION 5CT**. 10. ed. Washington, 2018.

AMERICAN PETROLEUM INTITUTE. **API SPECIFICATION 5L**. 46. ed. Washington, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A178/A178M**: Standard specification for electric-resistance-welded carbon steel and carbon-manganese steel boiler and superheater tubes. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A214/A214M**: Standard specification for electric-resistance-welded carbon steel heat-exchanger and condenser tubes. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2016a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36/A36M**: Standard specification for carbon structural steel. West Conshohocken, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370**: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. New York, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A500/A500M**: Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A572/572M**: Standard specification for high-strength low alloy columbium-vanadium structural steel. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A751**: Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel products. West Conshohocken, 2014a.

ANDRADE, Fernando Augusto; AL-QURESHI, Hazim Ali. Modelamento para previsão de propriedades mecânicas no processo de trefilação aplicado a tubos de aço com costura. **Exata**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 229-240, 2009.

APARICIO, Fabian Avila; RAMIREZ, Jorge A. Cortes; LEZAMA, Luis Leduc. Energy based phenomenological model for optimizing the shearededge in the trimming of steels. **Journal of manufacturing processes**, Mexico, v.16, p. 356-362, 2014.

ARAÚJO, Willy Jorge Prudente de; MELLO, Carlos Henrique Pereira. Uma revisão sistemática de literatura para a terceirização de pesquisa & desenvolvimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS, n. 9, 2013, Natal.

ASHBY, Michael F. **Materials selection in mechanical design**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2005.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5580**: Tubos de aço-carbono para usos comuns na condução de fluidos – especificação. 4. ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5590**: Tubos de aço carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados – especificação. 4. ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261**: Tubos de aço carbono, formados a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. 2. ed. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**: materiais metálicos - ensaio de tração. parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. 1. ed. Rio de Janeiro, 2015.

BRAGA, Flávio. Tubos de aço soldados até 8": Solda ERW e Annealing. In: CONTUBO - CONGRESSO INTERNACIONAL DE TUBOS, CONEXÕES, VÁLVULAS E COMPONENTES, 2003, São Paulo.

CALLISTER, Willian D.; **Material science and engineering: an introduction**. 7.th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis da; Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, n. 8, 2011, Porto Alegre.

DAS, Mousumi; PAL, Tapan Kumar; DAS, Goutam. Use of portable automated ball indentation system to evaluate mechanical properties of steel pipes. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, India, v.65, p. 197-203, 2012.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10002-1**: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at ambient temperature. Bruxelas, 2001.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10268**: Cold rolled steel flat products with high strength for cold forming – technical delivery conditions. Bruxelas, 2013.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10305-2**: Steel tubes for precision applications - technical delivery conditions. Part 2: Welded cold drawn tubes. Bruxelas, 2016.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10305-3**: Steel tubes for precision applications - technical delivery conditions. Part 3: Welded cold sized tubes. Bruxelas, 2016.

FREDIANI, Marcus. O aço entra em campo. **Siderurgia Brasil**, São Paulo, v.104, p. 6-14, jul., 2014.

GALHARDI, Caio Henrique. **Projeto, construção e avaliação do comportamento mecânico de um atenuador de impacto de um veículo fórmula SAE**. 2017. 74 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Automotiva - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GUINCHAT, Claire, MENOUE, Michel. Introdução geral às ciências e técnicas da informação e documentação. Trad. de Miriam Vieira da Cunha. Brasília: MCT/CNPq/IBICT, 1994, 540 p.

HALMOS, George T.; **Roll Forming Handbook**. Toronto: Taylor & Francis Group, 2006.

HAN, Z. W.; LIU, C.; LU, W. P.; REN, L. Q.; TONG, J. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, China, v.145, p. 311-316, 2004.

HAUS, Siedro Augusto. **Influência do efeito de Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

INCASE. **Feixe tubular caldeira**. Apresenta aplicações e vantagens do feixe tubular em caldeiras. Disponível em: <<https://www.incase.com.br/feixe-tubular-caldeira>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

JIAO, Hui; ZHAO, Xiao-Ling. Material ductility of very high strength (VHS) circular steel tubes in tension. **Thin-Walled Structures**, Australia, v.39, p.887-906, 2001.

JO, M. C.; LEE, S. G.; SOHN, S. S.; KIM, K. S.; KIM, W. K.; LEE, C. S.; LEE, S. Effect of coiling temperature and pipe-forming strain on yield strength variation after ERW pipe forming of API X70 and X80 linepipe steels. **Material Science & Engineering A**, Coréia do Sul, v. 682, p. 304-311, 2017.

JOHN DEERE. **Catálogo Pulverizador Autopropelido 4730**.

Apresenta os principais componentes do pulverizador agrícola.

Disponível em:

<<https://www.deere.com.br/pt/magazines/publication.html?id=719d33e7#2>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

KALVALA, Prasad Rao; AKRAM, Javed; MISRA, Mano. Friction assisted solid state lap seam welding and additive manufacturing method. **Defense Technology**, Salt Lake City, v. 12, p. 16-24, 2016.

KRISHNADEV M.; LAROUCHE, M; LAKSHMANAN, I.; SRIDHAR, R. Metallurgical failure analysis of a Guy rope assembly. **Engineering Failure Analysis**, Canada, v. 15, p. 894-902, 2008.

LEE, J.; KIM, D.; QUAGLIATO, L.; KANG, S.; KIM, N. Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect. **Journal of material processing technology**, Korea, v. 244, p. 304-313, 2017.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

MARQUES, Ivan Dias. Piscina olímpica do Rio já tem local pra ficar em Salvador: Praça Wilson Lins. **Correio 24 horas**, Salvador, 13 março 2017. Disponível em: <<https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/piscina-olimpica-do-rio-ja-tem-local-para-ficar-em-salvador-praca-wilson-lins/>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 295p.

MATIAS. Aeroporto de Natal é o 2º melhor do país na categoria até 5 milhões de passageiros. **Terra Potiguar**, Natal, 31 julho 2018. Disponível em: < <https://terrapotiguar.com.br/aeroporto-de-natal-e-o-2o-melhor-do-pais-na-categoria-ate-5-milhoes-de-passageiros/>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

MONDENESI, Paulo; MARQUES, Paulo Villani; **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2006.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MORAES, Roberto. **Blog do Roberto Moraes**. 30 maio 2018. Disponível em: < <http://www.robertomoraes.com.br/2018/05/aumento-da-producao-de-petroleo-nos-eua.html>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

MORAIS, W. A.; BORGES, H. C.; DEMARIA, C. A. S. CAMPOS JÚNIOR, M. D.; Variação nas propriedades mecânicas de chapa-tubo para aços estruturais. **Siderurgia Brasil**, São Paulo, 77. ed., 2011.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C.A.S.; TAKANO, C.; QUITES, E.E.C.; GENTILE, E.F.; SILVA, G.F.B.L.; BOLOTA, J.R.; GONÇALVES, M.; FACO, R.J. **Introdução à metalurgia**. 1.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011. 428p.

NICHOLS, Robert K.; **High frequency welding: The process and applications**. Thermatool Corporation, 1999.

PREETHI, M., MURTY, B. S.; RAMAN, S. G. S.; NATARAJAN, R. Control of UFG Microstructure in Welded Carbon Steel Tubes by Cold Drawing and Annealing. **Metallurgy Materials Engineering**, Índia, v.67, p.681-690, 2014.

RIGZONE. **How does artificial lift work?** Apresenta os principais componentes de um poço de extração de petróleo. Disponível em: <

https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=315&c_id=>. Acesso em: 12 janeiro 2019.

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M.; REINKE, T. UMMENHOFER, T. Analysis of variance of tensile tests from spiral welded carbon steel tubes. **Construction and Building Materials**, Alemanha, v.75, p.208-212, 2015.

SAE INTERNATIONAL. **J403**: Chemical composition of SAE carbon steel. Warrendale, 2014.

SILVA FILHO, Condemir; BETFUER, Luiran N.; Formação de Tubos. In: ACADEMIA DO CONHECIMENTO TUPER, 2012, São Bento do Sul.

SOEIRO JUNIOR, Jaime Casanova; ROCHA, David Bellentani; BRANDI, Sérgio Duarte. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 176-195, abr./jun., 2013.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1986.

TUPER. **Soluções Automotivas: Peças e Componentes Automotivos**. Apresenta a aplicação de tubos de aço em peças automotivas. Disponível em: <<http://www.tuper.com.br/produtos-e-servicos/solucoes-automotivas/pecas-e-componentes-automotivos/>>. Acesso em: 27 maio 2018.

TUPER. **Soluções Tubulares: Tubos Estruturais e Industriais**. Apresenta a aplicação de tubos de aço em aplicações estruturais e industriais. Disponível em: <<http://www.tuper.com.br/produtos-e-servicos/solucoes-tubulares/tubos-estruturais-e-industriais/>>. Acesso em: 23 setembro 2016.

VIEIRA, D. M. M.; DOS SANTOS, B. P.; HAAG, J. COSTA, V. M.; DOS SANTOS, A. I.; LEMOS, G. V. B.; STROHAECKER, T. R. Estudo comparativo das propriedades mecânicas através de ensaio de tração em corpos de prova normalizados e em componentes. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 68, 2013, Belo Horizonte.

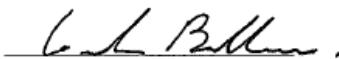
VOESTALPINE. **What are Oil Country Tubular Goods?** Apresenta breve resumo de tubulações para extração e distribuição de petróleo. Disponível em: < <https://www.voestalpine.com/blog/pt/energy/what-are-oil-country-tubular-goods/>>. Acesso em 12 de janeiro de 2019.

ZHANG, Wenlong; DING, Dongyan; GU, Mingyan. A Model for predicting the yield strength difference between pipe and plate of low-carbon microalloyed steel. **Metallurgical and materials transactions A**. China, v. 43A; p.5308-5315; dez. 2012.

APÊNDICE A – AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA TUPER S/A PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS DA EMPRESA

DECLARAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO

Declaramos, para os devidos fins, que a empresa TUPER S/A inscrita sob CNPJ 81.315.426/0001-36 autoriza a colaboradora Karilen Endler, inscrita sob CPF 041.724.039-21 a utilização de dados e valores de composição química e propriedades mecânicas contidos na planilha RAP dos referidos anos de 2013 a 2015 para a confecção da Dissertação de Mestrado intitulada “ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE AÇO COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL” ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina, bem como a publicação de resultados da pesquisa em periódicos especializados.



Gustavo Bollmann – Diretor Industrial

Gustavo Bollmann
Diretor Industrial - COO
Tuper S.A.
CPF 004.535.589-41

São Bento do Sul, 02 de maio de 2019.