



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Rodrigo Müller

**TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE PERCENTUAIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS
E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PREVISTAS EM NORMAS DE GRAUS DE
TUBOS DE AÇOS CARBONO: ESTUDO DE CASO**

Joinville - SC

2022

Rodrigo Müller

**TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE PERCENTUAIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS
E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PREVISTAS EM NORMAS DE GRAUS DE
TUBOS DE AÇOS CARBONO: ESTUDO DE CASO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Alexandre Mikowski, Dr.
Coorientador: Prof. Hazim Ali Al Qureshi, Dr.

Joinville - SC

2022

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

Müller, Rodrigo

Tratamento estatístico de percentuais de elementos químicos e das propriedades mecânicas previstas em normas de graus de tubos de aço carbono: estudo de caso / Rodrigo Müller ; orientador, Alexandre Mikowski, coorientador, Hazim Ali Al Qureshi, 2022.

75 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Composição química . 3. Propriedades mecânicas. 4. Ensaio mecânico de tração. 5. Tubos de aço carbono. I. Mikowski, Alexandre . II. Ali Al Qureshi, Hazim . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Rodrigo Müller

**TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE PERCENTUAIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS
E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PREVISTAS EM NORMAS DE GRAUS DE
TUBOS DE AÇOS CARBONO: ESTUDO DE CASO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por uma banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Paulo César Soares Jr, Dr.

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Orientador

Joinville, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus pais Álvaro e Marli e minha esposa Kalinca, que esteve ao meu lado me apoiando e compreendendo os momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, aos meus pais Álvaro João Müller e Marli Schögl Müller e minha esposa Kalinca Weiss Müller, por desde o início desta jornada estarem presentes, me apoiando e incentivando para que seguisse em frente e realizasse este grandioso sonho e ao meu irmão Ricardo, por toda a amizade.

Agradeço à empresa em que trabalho, pela oportunidade de adquirir mais conhecimentos.

Ao meu orientador e coorientador, pela confiança, apoio e dedicação depositados em mim.

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

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços
repetidos dia após dia.”
(Robert Collier)*

RESUMO

A aplicação de tubos de aço carbono possui uma ampla variedade de produtos que engloba diversos segmentos, sendo para o mercado da construção civil: andaimes, estruturas, pontes, telhados, entre outros; detendo também um percentual representativo no segmento automotivo: chassi, buchas, eixos de suspensão, barras de proteção, estruturas de bancos, sistema de exaustão, suporte de painéis, entre outras finalidades. O segmento de óleo e gás também chama a atenção na demanda, que se desmembra em: tubos de aço carbono para condução de gás e petróleo. Devido as suas diversas aplicações, este mercado exige um alto grau de segurança e para assegurar que estes tubos irão resistir o esforço mecânico o qual será aplicado, os mesmos devem ser ensaiados. O ensaio mecânico de tração é o mais utilizado para informar os resultados necessários, podendo ser ensaiado em corpos de prova do próprio tubo, ou por meio de um corpo de prova retirado do tubo, isso depende do diâmetro do tubo que acaba sendo uma restrição. Este ensaio informa as propriedades mecânicas, sendo as de maior importância nos tubos de aço carbono: o limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LR*) e alongamento (*AL*). Entretanto, tubos de aço soldados longitudinalmente podem ser fabricados em diferentes espessuras, materiais e dimensões distintas, em que determinados percentuais de tubos não atendem as especificações normativas inicialmente programadas, para a produção de acordo com o especificado pelo cliente. O estudo tem como proposta verificar se as normas de graus de aço TUPER S/A (Grau J55), SAE J403 (Grau SAE 1021) e TUPER S/A (Grau TUP L80B) atendem às normas de graus de tubos de aço carbono utilizando 6034 dados experimentais de composição química e propriedade mecânica *LE*, *LR* e *AL* oriundos de um banco de dados da empresa Tuper S/A. E além da análise do atendimento das normas de graus de aço, será realizado o desenvolvimento de um estudo para avaliar a relação dos elementos da composição química em relação às propriedades mecânicas, tendo como objetivo compreender suas influências. Os 6034 dados foram utilizados para calcular os percentuais de atendimento das 3 (três) normas de graus de aço para as normas de graus de tubos de aço carbono para os elementos químicos carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S) e para as propriedades mecânicas *LE*, *LR* e *AL*. Os resultados evidenciam o atendimento total da composição química para a norma de grau de aço SAE 1021 e parcial para os graus de aço J55 e TUP L80B, sendo que para propriedade mecânica, o grau de aço J55 atendeu a todas as normas de graus de tubos de aço carbono, porém o grau de aço SAE 1021 atendeu parcialmente e o TUP L80B somente não atendeu a uma norma de grau de tubo de aço carbono. Outra análise efetuada foi referente ao coeficiente de variação dos 4 (quatro) elementos químicos e para as 4 (quatro) propriedades mecânicas (incluindo o módulo de tenacidade, *MT*), sendo que para os elementos químicos na maioria dos casos foi de alta homogeneidade e para as propriedades mecânicas todos os resultados apresentaram alta homogeneidade. Na outra análise, obteve-se a relação da variação dos elementos químicos carbono (C) e manganês (Mn), conforme ocorre o acréscimo dos elementos químicos observou-se um aumento de *LE* e *LR*. Finalizando o estudo, avaliou-se a correlação das propriedades mecânicas *LE* e *LR* em função do alongamento *AL*, e conforme ocorre o acréscimo de *LE* e *LR*, um decréscimo ocorre nos valores de *AL*, reduzindo a ductilidade.

Palavras-chave: Composição química. Propriedades mecânicas. Ensaio mecânico de tração. Tubos de aço carbono.

ABSTRACT

The application of carbon steel tubes has a wide variety of products that encompasses several segments, being for the civil construction market: scaffolding, structures, bridges, roofs, among others; also holding a representative percentage in the automotive segment: chassis, bushings, suspension axles, protection bars, seat structures, exhaust system, panel support, among other purposes. The oil and gas segment also draws attention in terms of demand, which is broken down into: carbon steel tubes for transporting gas and oil. Due to its diverse applications, this market demands a high degree of safety and to ensure that these tubes will withstand the mechanical stress to which they will be applied, they must be tested. The mechanical tensile test is the most used to inform the necessary results, and can be tested on specimens of the tube itself, or by means of a specimen removed from the tube, this depends on the diameter of the tube that ends up being a restriction. This test informs the mechanical properties, being the most important in carbon steel tubes: the yield point (*LE*), tensile strength limit (*LR*) and elongation (*AL*). However, longitudinally welded steel tubes can be manufactured in different thicknesses, materials and different dimensions, in which certain percentages of tubes do not meet the normative specifications initially programmed, for production as specified by the customer. The study aims to verify if the standards of steel grades TUPER S/A (Grade J55), SAE J403 (Grade SAE 1021) and TUPER S/A (Grade TUP L80B) meet the standards of grades of carbon steel tubes using 6034 experimental data of chemical composition and mechanical properties *LE*, *LR* and *AL* from a database of the company Tuper S/A. And in addition to the analysis of compliance with the standards of steel grades, a study will be carried out to evaluate the relationship of the elements of the chemical composition in relation to the mechanical properties, aiming to understand their influences. The 6034 data were used to calculate the percentages of compliance with the 3 (three) steel grade standards for the carbon steel tube grade standards for the chemical elements carbon (C), manganese (Mn), phosphorus (P) and sulfur (S) and for the mechanical properties *LE*, *LR* and *AL*. The results show the total compliance of the chemical composition for the steel grade standard SAE 1021 and partial for the steel grades J55 and TUP L80B, and for mechanical property, the steel grade J55 met all the tube grade standards carbon steel, however the SAE 1021 steel grade partially met and the TUP L80B only did not meet a carbon steel tube grade standard. Another analysis carried out was referring to the coefficient of variation of the 4 (four) chemical elements and for the 4 (four) mechanical properties (including the tenacity module, MT), and for the chemical elements in most cases it was of high homogeneity and for mechanical properties, all results showed high homogeneity. In the other analysis, the ratio of the variation of the chemical elements carbon (C) and manganese (Mn) was obtained, as the addition of chemical elements occurs, an increase in *LE* and *LR* was observed. At the end of the study, the correlation of the mechanical properties *LE* and *LR* as a function of the *AL* elongation was evaluated, and as the *LE* and *LR* increase occurs, a decrease occurs in the *AL* values, reducing the ductility.

Keywords: Chemical composition. Mechanical properties. Mechanical tensile test. Carbon steel tubes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Fluxograma de produção de tubos de aço carbono soldados e com costura..... | 22 |
| Figura 2 – Região de corte do corpo de prova retirado do tubo..... | 29 |
| Figura 3 – Corpo de prova retirado de um tubo a partir de corte e usinagem..... | 29 |
| Figura 4 – Representação esquemática da curva da tensão-deformação para metais..... | 31 |
| Figura 5 – Máquina Universal para realizar ensaios mecânico de tração modelo EMIC..... | 42 |
| Figura 6 – 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 após ensaio..... | 42 |
| Figura 7 – Tipos de corpos de prova (CP) para ensaio mecânico de tração. a) CP tubo retirado de tubo, b) CP tubo e já ensaiado..... | 43 |
| Figura 8 – Planilha RAP..... | 45 |
| Figura 9 – Comportamento do Limite de Escoamento (<i>LE</i>) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B..... | 57 |
| Figura 10 – Comportamento do Limite de Resistência à Tração (<i>LR</i>) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B..... | 58 |
| Figura 11 – Comportamento do Alongamento (<i>AL</i>) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B..... | 59 |
| Figura 12 – Comportamento mecânico do Limite de Escoamento (<i>LE</i>) em (a) e do Limite de Resistência à Tração (<i>LR</i>) em (b) em função do Alongamento (<i>AL</i>) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B..... | 62 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Graus de aços, normas para atendimento de graus de aços e os principais percentuais em peso de elementos químicos que constituem a composição química dos aços J55, TUP L80b e SAE 1021..... | 27 |
| Quadro 2 – Graus de tubos de aços, normas para atendimento de graus de tubos de aços e os principais percentuais em peso dos elementos químicos que constituem a composição química de aços..... | 28 |
| Quadro 3 – Graus de tubos de aços, normas para atendimento de graus de tubos de aços e os valores mínimos ou intervalo das propriedades mecânicas <i>LE</i> , <i>LR</i> e <i>AL</i> de aços..... | 33 |
| Quadro 4 – Valores médios de <i>LE</i> , <i>LR</i> e <i>AL</i> em corpos de prova de tubo inteiro e retirados do tubo..... | 33 |
| Quadro 5 – Pesquisa bibliográfica na biblioteca online Scopus. *O total para documentos selecionados desconsidera os documentos repetidos para os 4 conjuntos de palavras chave..... | 36 |
| Quadro 6 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química do aço carbono..... | 36 |
| Quadro 7 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química de ligas de aço carbono..... | 37 |
| Quadro 8 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química dos aços carbono..... | 38 |
| Quadro 9 – Quantitativo da seleção de dados efetuada na planilha RAP original..... | 46 |
| Quadro 10 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o C..... | 48 |
| Quadro 11 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o Mn..... | 48 |
| Quadro 12 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o P..... | 49 |
| Quadro 13 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para S..... | 49 |
| Quadro 14 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o <i>LE</i> | 50 |
| Quadro 15 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o <i>LR</i> | 51 |

| | |
|--|----|
| Quadro 16 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o <i>AL</i> | 51 |
| Quadro 17 – Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando os quatro elementos químicos..... | 52 |
| Quadro 18 – Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando as três propriedades mecânicas..... | 52 |
| Quadro 19 – Normas e graus de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando os quatro elementos químicos e as três propriedades mecânicas..... | 53 |
| Quadro 20 – Média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e coeficiente de variação dos aços carbono de graus (J55, SAE 1021 e TUP L80B) para os quatro elementos químicos..... | 55 |
| Quadro 21 – Média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e coeficiente de variação dos aços carbono de graus (J55, SAE 1021 e TUP L80B) para as quatro propriedades mecânicas..... | 55 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| <i>AL</i> | Alongamento |
| API | American Petroleum Institute |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| C | Carbono |
| CP | Corpo de Prova |
| Cr | Cromo |
| Cu | Cobre |
| CV | Coefficiente de Variação |
| D | Diâmetro |
| DP | Desvio Padrão |
| DIN | Deutsches Institut Für Normung |
| EN | European Standard |
| EQ | Elementos Químicos |
| HFIW | High Frequency Induction Welding |
| ISO | Organization for Standardization |
| <i>LE</i> | Limite de escoamento |
| <i>LR</i> | Limite de Resistência à Tração |
| ME | Média |
| Mn | Manganês |
| Mo | Molibdênio |
| <i>MT</i> | Módulo de Tenacidade |
| NBR | Norma Brasileira |
| Ni | Níquel |
| OES | Espectrometria de Emissão Óptica |

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| P | Fósforo |
| <i>PA</i> | Percentual de Atendimento |
| PM | Propriedade Mecânica |
| RAP | Relatório de Análise de Produto |
| RSL | Revisão Sistemática da Literatura |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| S | Enxofre |
| Si | Silício |
| Ti | Titânio |
| V _{mín} | Valor Mínimo |
| V _{máx} | Valor Máximo |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2 | ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 21 |
| 2.1 | TUBOS DE AÇO CARBONO..... | 21 |
| 2.2 | COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO CARBONO | 24 |
| 2.3 | PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO CARBONO | 28 |
| 2.4 | REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA | 34 |
| 2.4.1 | Pesquisa bibliográfica realizada pela aplicação da RSL | 35 |
| 2.4.2 | Síntese de estudos relacionados com aplicação da RSL..... | 36 |
| 2.5 | SÍNTESE INTEGRADORA | 38 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 40 |
| 3.1 | BOBINAS DE AÇO CARBONO E SEU PROCESSAMENTO..... | 40 |
| 3.2 | ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO | 41 |
| 3.3 | RELATÓRIO DE ANÁLISE DE PRODUTO (RAP) | 43 |
| 3.4 | SELEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DA PLANILHA RAP | 44 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 4.1 | PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO DE NORMAS | 47 |
| 4.1.1 | Composição química | 48 |
| 4.1.2 | Propriedades mecânicas..... | 50 |
| 4.1.3 | Composição química e propriedades mecânicas | 52 |
| 4.2 | ANÁLISE DE DADOS DA PLANILHA RAP | 54 |
| 4.3 | RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DA PLANILHA RAP | 56 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.1 | Relação entre propriedade mecânica e percentuais do carbono e manganês | 56 |
| 4.3.2 | Relação entre as propriedades mecânicas..... | 60 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |
| | APÊNDICE A – INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS | 69 |
| | APÊNDICE B – AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA TUPER S/A PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS DA EMPRESA | 75 |

1 – INTRODUÇÃO

O mercado do aço cresce exponencialmente a cada dia com novas aplicações, requerendo competitividade, robustez, qualidade e padronização. Neste ambiente de negócios, produtos são comercializados por indústrias do setor metal mecânico. Nesse trabalho o foco está voltado para produtos tubulares obtidos da conformação mecânica de chapas de aço carbono. No segmento de tubos, as aplicações são variadas, por exemplo: i) tubos de condução de água; ii) tubos para óleo e gás; iii) tubos para indústria automotiva.

É de suma importância que as especificações técnicas para produtos industriais sejam normatizadas. Com especificações apropriadas e com requisitos normativos atendidos de composição química e propriedades mecânicas, por exemplo, estes direcionam a redução de custo, tanto pela parte dos compradores, quanto dos fornecedores, diminuição do prazo de entrega e, principalmente, se torna inteligível a relação entre cliente e fornecedor (SILVA; MEI, 2010; SOUZA, 2019).

Em projetos de engenharia, o conhecimento das propriedades mecânicas de aços empregados em produtos é fundamental. No processo de aplicação do material, este estará sendo submetido às forças ou cargas, podendo acarretar possíveis deformações até a ruptura. Portanto, as propriedades mecânicas do material devem ser determinadas previamente, com a realização de ensaios mecânicos destrutivos em laboratório, de acordo com procedimentos normatizados e padronizados (SOUZA, 1986; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

Dentre a diversidade de estudos científicos e tecnológicos envolvendo aços carbonos, no escopo desse trabalho, para aplicações de produtos já conformados mecanicamente, como os tubos de aço (VIEIRA et al., 2013; ENDLER, 2019), destacam a importância do conhecimento dos elementos de liga na seleção de materiais adequados; assim sendo possível prever estimativas das propriedades mecânicas do aço por ensaio mecânico de tração (SOUZA, 1986; CHIAVERINI, 2008; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008; SILVA; MEI, 2010; SOUZA, 2019), previamente à sua conformação mecânica.

Atualmente, uma das formas de seleção dos materiais que as indústrias utilizam a avaliação das propriedades mecânicas iniciais em bobinas de aço para a seleção do material a ser utilizado, mas isso se aplica somente para alguns aços específicos em virtude de poucos aços apresentarem essa informação no certificado da bobina adquirida da siderúrgica (TUPER S/A, 2022).

O trabalho desenvolvido nessa dissertação consiste na análise e tratamento de dados de composição química e propriedades mecânicas de tubos de aço carbono com costura para 3

(três) normas de grau de aço, TUPER S/A – Grau J55, a SAE J403 – Grau SAE 1021 e TUPER S/A – Grau TUP L80B.

Os dados a serem analisados e tratados estatisticamente foram obtidos da planilha denominada “Relatório de Análise de Produto” (RAP), obtida a partir da exportação de percentuais dos elementos químicos e propriedades mecânicas de um banco de dados da indústria.

No Relatório de Análise de Produto, os dados dos percentuais dos elementos químicos carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S) são oriundos de certificados de bobinas dos aços adquiridos pela indústria da siderúrgica. Os dados das propriedades mecânicas de limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LR*) e alongamento (*AL*) foram previamente adquiridos em âmbito laboratorial na indústria através de ensaios mecânicos de tração de corpos de prova retirados de tubos.

Com os valores obtidos dos percentuais de composição química e propriedades mecânicas dos três aços, uma análise de atendimento de normas de grau de tubo de aço por normas de grau de aço foi realizado, assim como um tratamento estatístico e relações e/ou correlações dos dados por meio de quadros e gráficos (apresentados nas figuras).

Dentro do exposto, esta pesquisa se caracteriza como um estudo de caso, pois segundo Menezes et al. (2019, p. 44), o estudo de caso “é o tipo de pesquisa cujo procedimento volta-se para um caso específico com o objetivo de conhecer suas causas de modo abrangente e completo”. Face à utilização do método do estudo de caso, Yin (2010, p.32) relata como:

[...] uma investigação científica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos; enfrenta uma situação tecnicamente única em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados e, como resultado, baseia-se em várias fontes de evidência.

Ainda segundo o mesmo autor, a investigação ocorrida no estudo de caso, como nessa dissertação, “enfrenta uma situação tecnicamente única em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados, e, como resultado, beneficia-se do desenvolvimento prévio de proposições teóricas para conduzir a coleta e análise dos dados.” (YIN, 2010, p. 33).

Não podendo ser considerado apenas um método, o estudo de caso compõe uma estratégia de pesquisa (MARTINS, 2008).

As informações para realizar o estudo de caso foram obtidas através da empresa Tuper S/A, localizada na cidade de São Bento do Sul em Santa Catarina, sendo uma das maiores processadoras de aço do Brasil. Para garantir os requisitos de qualidade, de acordo com as

normas, se faz necessário à realização de ensaios mecânicos de tração, efetuados em corpos de prova retirados dos tubos de aço carbono, sendo esses resultados dos ensaios a linha mestre da dissertação para a análise de dados.

Na aplicação dos tubos com costura, a composição química informada na bobina de aço pode ser levada em consideração, visto que as mesmas não são afetadas durante o processo de formação do tubo, tornando-se possível relacioná-la com as propriedades mecânicas de tubos. Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se em verificar o percentual de atendimento de normas de grau de tubo de aço por normas de grau de aço, além de analisar, relacionar e correlacionar dados de composição química de aço carbono com as propriedades mecânicas de tubos de aço carbono e assim compreender a influência da variação dos elementos químicos nas propriedades mecânicas do tubo de aço carbono, baseando-se na análise de dados empíricos de ensaios mecânicos de tração em tubos de aço previamente realizados.

Esse trabalho delimitou-se a realizar uma proposta de verificar o percentual de atendimento de normas de graus de tubos de aço carbono para normas de graus de aço carbono, atrelados aos dados dos elementos químicos oriundos da composição química do aço informado no certificado da bobina, e das propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*) obtidas através dos ensaios mecânicos de tração, após o processo de formação de um tubo de aço carbono com costura. Efetuando o tratamento estatístico e relações e/ou correlações entre propriedades mecânicas e os principais elementos químicos obtidos.

1.1 – OBJETIVOS

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os específicos deste estudo.

1.1.1 – Objetivo Geral

Verificar normas de graus de aço carbono que atendem as normas de graus de tubos de aço carbono para 4 (quatro) elementos químicos e 3 (três) propriedades mecânicas.

1.1.2 – Objetivos Específicos

- i. Selecionar os dados para os 4 (quatro) elementos químicos e para as 3 (três) propriedades mecânicas a partir do Relatório de Análise de Produto (RAP) da empresa Tuper S/A para os aços normativos de graus de aço TUPER S/A (Grau J55), SAE J403

(Grau SAE 1021) e TUPER S/A (Grau TUP L80B) sendo estes os aços carbono de maior volume de produção na empresa Tuper S/A;

- ii. Determinar os percentuais de atendimento das normas de graus de tubos de aço carbono atendidas pelas 3 (três) normas de graus de aço para o carbono (C), o manganês (Mn), o fósforo (P) e o enxofre (S);
- iii. Determinar os percentuais de atendimento das normas de graus de tubos de aço carbono atendidas pelas 3 (três) normas de graus de aço para o limite de escoamento (*LE*), o limite de resistência à tração (*LR*) e o alongamento (*AL*);
- iv. Tratar estatisticamente os dados para os 4 (quatro) elementos químicos e para as 3 (três) propriedades mecânicas por meio de cálculos da média, desvio padrão, valores mínimo e máximo, e coeficiente de variação para as 3 (três) normas de graus de aço;
- v. Calcular o módulo de tenacidade (*MT*) a partir dos dados de *LE*, *LR* e *AL*, além de realizar cálculos estatísticos da média, do desvio padrão, dos valores mínimo e máximo e do coeficiente de variação para as 3 (três) normas de graus de aço;
- vi. Relacionar graficamente os dados das propriedades mecânicas de *LE*, *LR* e *AL* em função dos elementos químicos carbono (C) e manganês (Mn) para as 3 (três) normas de graus de aço;
- vii. Correlacionar graficamente o comportamento dos dados das propriedades mecânicas de *LE* e *LR* em função do alongamento (*AL*) e manganês (Mn) para as 3 (três) normas de graus de aço.

1.2 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: Introdução da temática ao leitor, tendo como objetivo integrar o mesmo a pesquisa e às etapas subsequentes para a sua elaboração.

Capítulo 2: Apresentação do fluxograma e do processo de formação de tubos de aço carbono, seguindo com a explanação da composição química de aço carbono, continuando com as propriedades mecânicas dos tubos de aço carbono, finalizando o capítulo com os estudos relacionados ao tema, aplicando a ferramenta da revisão sistemática da literatura.

Capítulo 3: Metodologia para seleção dos dados e contextualização numa planilha RAP dos valores percentuais dos quatro elementos químicos (C, Mn, P e S) e das propriedades mecânicas (*LE*, *LRT* e *AL*) dos graus de aços J55, SAE 1021 e TUP L80B.

Capítulo 4: Discussão dos resultados obtidos através da análise e tratamento dos dados, além de discutir os resultados com base em normas e alguns trabalhos.

Capítulo 5: Determinação das conclusões oriundas do trabalho e proposição de sugestões de estudos para trabalhos futuros.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos teóricos de tubos de aço carbono, composição química, propriedades mecânicas, assim como estudos recentes relacionados, serão abordados.

2.1 – TUBOS DE AÇO CARBONO

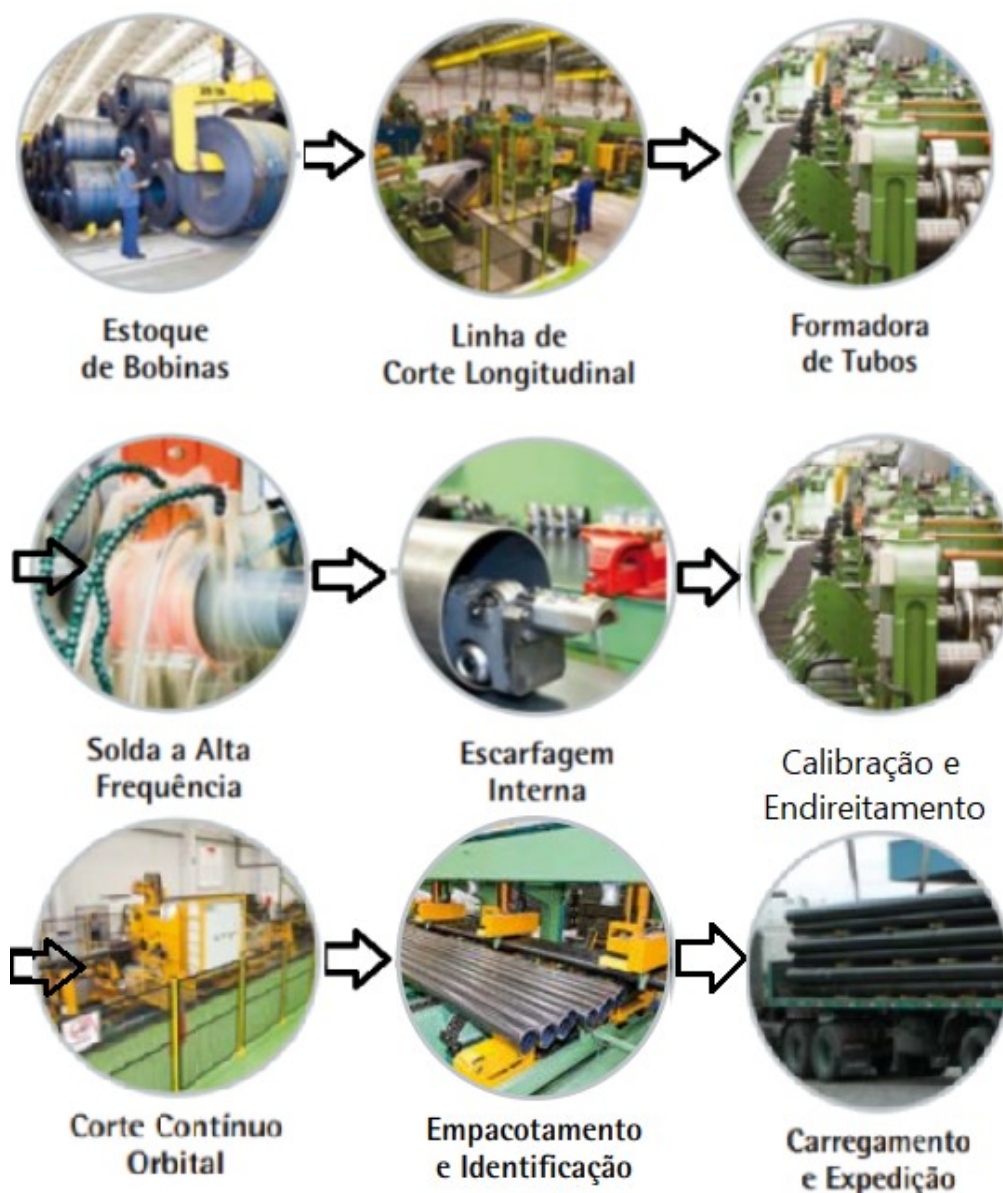
Os tubos de aço carbono são obtidos através de uma fita laminada oriunda de uma bobina, a qual é desbobinada e cortada em fitas, ou também denominadas de tiras. As fitas são conformadas mecanicamente e soldadas, e a largura destas fitas determinarão os perímetros e os formatos finais dos tubos, os quais podem apresentar geometrias nos formatos redondo, quadrado, retangular, e ainda especial.

Endler (2019) realizou uma ampla revisão bibliográfica e documental acerca do processo de fabricação de tubos de aço carbono, bem como as aplicações para tubos de pequenos e grandes diâmetros. Essa revisão pode ser consultada na seção 2 da Dissertação de Endler (2019), intitulada “Processo de Fabricação e Aplicações de Tubos de Aço”.

De uma maneira simplificada, as principais etapas do processo de fabricação de tubos de aço carbono soldados e com costura serão explanadas, conforme fluxograma ilustrado com fotografias, apresentado na Figura 1. O detalhamento de cada uma das 8 (oito) etapas do processo de fabricação de tubos de aço carbono soldados e com costura, realizados na empresa Tuper S/A, serão apresentados na sequência (NICHOLS, 1999; ENDLER, 2019; TUPER, 2019):

- i. Estoque de Bobinas: recebimento e inspeção da matéria-prima, ou seja, a bobina de aço carbono, que consiste na primeira etapa do processo de produção. Inicialmente é avaliado o dimensional da bobina, sendo a espessura aferida por um paquímetro e a largura da bobina por uma trena, com a finalidade de conferência da matéria-prima adquirida pela empresa. A composição química do aço carbono (matéria-prima, na forma de bobina) é informada no certificado de qualidade da bobina adquirida da siderúrgica, e os percentuais dos elementos químicos são registrados no sistema TOTVS de armazenamento e gerenciamento de informações qualitativas e quantitativas, para que na sequência os dados possam ser obtidos via sistema por meio de um Relatório de Análise de Produto (RAP), conhecido como planilha RAP da empresa Tuper S/A.

Figura 1 – Fluxograma de produção de tubos de aço carbono soldados e com costura



Fonte: Adaptado de Tabela Técnica de Produtos, Tuper (2019, p. 16).

- ii. Linha de Corte Longitudinal: na segunda etapa é realizado o corte das bobinas no sentido longitudinal, ou seja, a bobina é “fatiada” e essas fatias são cadastradas como fitas ou tiras. Esta operação ocorre através do cisalhamento da chapa, e de acordo com a largura destas fitas, origina-se aproximadamente o diâmetro do tubo especificado.
- iii. Formadora de Tubos: a terceira etapa consiste no processo de formação do tubo, iniciando pela passagem da fita através de matrizes (rolos para conformação mecânica), onde para cada avanço da sequência de matrizes, obtém-se um perfil mais próximo de um tubo. No momento em que as duas extremidades da chapa se encontram, ocorre à

soldagem pelo processo de indução por resistência elétrica de alta frequência, HFIW (*High Frequency Induction Welding*), objeto de discussão da próxima etapa.

- iv. Solda a Alta Frequência: no processo de indução por resistência elétrica de alta frequência (HFIW), o calor é gerado pela resistência pela passagem da corrente elétrica alternada de alta frequência, sendo auxiliado pela aplicação rápida de pressão das matrizes. Sua concepção parte da criação de um ângulo em V, onde as duas extremidades da chapa a serem soldadas são unidas através do aquecimento pela corrente de alta frequência, que flui nestas extremidades da região próxima ao ângulo V. Conforme ocorre a aproximação, obtém-se maior concentração de corrente elétrica, gerando mais calor até que no ápice do ângulo em V, o aço carbono das bordas é fundido, e assim, o tubo de aço carbono soldado com costura é formado.
- v. Escarfagem Interna: posteriormente ao processo de soldagem, o tubo passa pelo processo de rebarbamento externo e interno, tendo como objetivo remover o excesso de metal expulso da solda.
- vi. Calibração e Endireitamento: a etapa subsequente é a calibração e endireitamento, em que o tubo é calibrado para atender as tolerâncias dimensionais desejadas, ou pode ocorrer a migração para um perfil retangular, quadrado ou especial.
- vii. Corte Contínuo Orbital: o corte orbital tem como objetivo cortar o tubo no comprimento de acordo com o dimensional desejado pelo cliente. O tubo é fixado por 3 castanhas e essa célula da máquina corta o tubo através de uma serra, e no mesmo momento que o corte se inicia, toda a estrutura se desloca na mesma velocidade de toda a formadora, desde a formação do tubo.
- viii. Empacotamento e Identificação: na penúltima etapa é efetuado o empacotamento e identificação, nesta operação se realiza a montagem dos fardos de acordo com o diâmetro, espessura e comprimento. Para cada tamanho de fardo é aplicada uma quantidade diferente de fitas (empacotamento), pois caso o tubo tenha uma massa inferior, essa quantidade de fitas é reduzida. Nesta operação de empacotamento e embalagem, o fardo de tubos recebe uma identificação, sendo informado o dimensional, material, plano de corte, código de cadastro do item, pesagem, número da RAP, informações para rastreabilidade e data de produção. A composição química da bobina de aço carbono empregada na produção do tubo e as propriedades mecânicas dos tubos, obtidas por ensaio mecânico de tração na empresa Tuper S/A, podem ser rastreadas e obtidas pelo número da RAP.

- ix. Carregamento e Expedição: a última etapa consiste na logística e transporte dos produtos produzidos, ou seja, no carregamento e expedição dos tubos de aço carbono soldados com costura no caminhão para serem enviados para os clientes.

2.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO CARBONO

O aço é definido como uma liga de ferro-carbono que possui concentrações de outros elementos de liga. O teor de carbono na composição química do aço, que normalmente é inferior a 1%, altera significativamente as propriedades mecânicas de aços carbono, avaliados por ensaio mecânico de tração (CALLISTER, 2008).

O aço é classificado como uma liga metálica que tem sua composição composta principalmente pelo ferro e carbono. Segundo Chiaverini (2008, p. 22), o “aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”.

De todos os aços produzidos mundialmente, as maiores quantidades são os que se classificam em aços de baixo-carbono. E na grande maioria dos casos, possuem menos de 0,25% em peso de carbono. Em virtude disso, estas ligas possuem baixa dureza, conseguindo se destacar com uma boa tenacidade, ductilidade, soldabilidade e usinagem (CALLISTER, 1991).

Os aços carbono são classificados, principalmente, em termos do percentual do carbono, sendo: i) aço doce contém menos de 0,3% de carbono; ii) aço médio carbono contém 0,3% a 0,8% de carbono; iii) aço de alto carbono contém de 0,8% a 1,2% de carbono. À medida que o teor de carbono aumenta, teremos um acréscimo na resistência mecânica, enquanto que a ductilidade será reduzida (JHA, 2017).

Conforme Jha (2017), os elementos químicos utilizados para projetar a composição química de ligas de aço carbono são: i) Carbono (C): é eficaz no reforço dos aços, mas degrada a soldabilidade, indispensável para a montagem de carrocerias; ii) Manganês (Mn): é eficaz para fortalecer o aço através de sólidos endurecidos por solução e endurecimento por transformação, mas degrada a soldabilidade por pontos e a galvanização.

A composição química do aço corresponde a um fator de bastante representatividade, ou seja, precisa apresentar resistência mecânica compatível com a sua respectiva aplicação, e conforme Souza (2019, p. 2) “as propriedades desse aço devem garantir que ele está sendo usado de modo a se ter plena confiança e que desempenhará corretamente suas funções desejadas.”

Nos aços e ligas especiais, os elementos de liga não envolvem somente mudanças nas fases ou constituintes presentes em equilíbrio, mas também acabam por alterar a forma e a rapidez nas quais cada fase se forma. De maneira natural, a alteração das próprias características de fases presentes pode ocorrer na presença de elementos de liga (SILVA; MEI, 2010).

Os elementos de liga podem influenciar as características mecânicas de aços de maneira geral. Chiaverini (2008, p. 171), afirma que o efeito da introdução dos elementos de liga nos aços-carbono tem como ação obter um ou diversos efeitos pontuados:

- a) aumentar a dureza e a resistência mecânica;
- b) conferir resistência uniforme através de toda a secção em peças de grandes dimensões;
- c) diminuir o peso (consequência do aumento da resistência) de modo a reduzir a inércia de uma parte em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou numa estrutura;
- d) conferir resistência à corrosão;
- e) aumentar a resistência ao calor;
- f) aumentar a resistência ao desgaste;
- g) aumentar a capacidade de corte;
- h) melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Para os três primeiros pontos citados, os elementos de liga aumentam a resistência mecânica da ferrita, e também formam outros carbonetos além do Fe_3C , que ajudam a aumentar a resistência mecânica do aço, principalmente naquelas partes onde a resistência dificilmente mudaria se fosse aço carbono comum (CHIAVERINI, 2008).

Normalmente, esse aumento na resistência mecânica é obtido pela adição de um ou mais níveis relativamente baixos de elementos de liga, até 5% combinados. Nessas condições, a justificativa para o tratamento térmico permanece, pois a transformação da austenita e a microestrutura resultante são as mesmas que ocorrem nos aços carbono, embora a presença de novos elementos de liga exija ajuste da temperatura de tratamento (CHIAVERINI, 2008).

Em relação à obtenção das demais características, se faz necessária a introdução de níveis mais elevados de elementos de liga, que, além de produzirem carbonetos mais complexos, também produzem alterações mais profundas na ferrita. Neste caso, o tratamento térmico também deve ser alterado para promover frequentemente a formação de carbonetos especiais. Esses aços de alta liga são de fabricação e de tratamentos térmicos de maior complexidade, por isso são muito caros, especialmente porque alguns dos elementos de liga usados são relativamente raros (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Souza (2019, p. 26-27), os elementos de liga, no que tange a composição química, podem causar alterações gerais nos aços, como:

- 1) Podem formar soluções sólidas ou compostas.
- 2) Podem alterar a temperatura de ocorrência de transformação de fase. Exemplo: manganês e silício abaixam a temperatura do eutetóide; titânio, molibdênio, silício, tungstênio e cromo elevam.
- 3) Podem alterar a solubilidade do carbono no ferro *gama* e no ferro *alfa*. Exemplo: abaixam o teor de carbono do eutetóide (níquel, cromo, manganês, silício, tungstênio, titânio, molibdênio).
- 4) Podem alterar a velocidade de reação de transformação (decomposição) da austenita.
- 5) Podem alterar a velocidade de solubilização da cementita na austenita durante o aquecimento do aço.
- 6) Podem diminuir o amolecimento causado pelo revenimento. Exemplo: elementos fornecedores de carbonetos.
- 7) Podem intensificar a ação do teor crescente de carbono no aumento da resistência mecânica do aço.
- 8) Dissolvem-se na ferrita em vários graus, conforme o elemento de liga: os elementos com tendência à formação de carbonetos o fazem, quando o carbono estiver presente em teores suficientes, e dissolvem-se muito pouco na ferrita endurecendo-a, porém a maior parte fica na forma de carboneto. Os elementos não formadores de carbonetos são mais efetivos no aumento da resistência da ferrita por solução sólida. A potência de alguns elementos no aumento da resistência mecânica da ferrita é a seguinte: C (mais efetivo), P, Mo, Mn, Si, Cu, Cr e Ni (menos efetivo).
- 9) Alguns elementos presentes formam compostos (principalmente com elementos não-metálicos) que se localizam na estrutura como inclusões.

Cada elemento de liga pode influenciar de maneira significativa as propriedades de aços carbono (SOUZA, 2019). Informações adicionais da influência dos elementos químicos Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S) em aços estão descritos no Apêndice A.

De acordo com Endler (2019, p. 84), nas usinas siderúrgicas o ensaio experimental para a medição de composição química é denominado *Cast Analysis* ou Análise de Panela, pois tem sua realização feita diretamente no aço líquido. Após o recebimento da bobina de aço nas indústrias de transformação mecânica, por exemplo, como é o caso da Tuper S/A, existe a possibilidade de efetuar ensaios experimentais no intuito de concluir se a bobina de aço adquirida possui sua composição química em conformidade com o certificado da usina. Na maior parte das vezes, a *Cast Analysis* acaba sendo considerada, e o ensaio de contraprova é realizado apenas em casos específicos, quando solicitado pelos clientes ou mesmo quando as propriedades mecânicas verificadas são ‘suspeitas’, ou seja, fora de intervalos de confiança previstos pelo controle estatístico de qualidade do processo.

Um dos métodos empregados para determinar a composição química de aços em seu estado sólido, como contraprova, é a Espectrometria de Emissão Óptica (OES). Galhardi baseou-se no trabalho de Thomsen para descrever sobre a técnica OES (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. Neste 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.

Para exemplificar, no Quadro 1 são apresentados os valores percentuais dos principais elementos químicos Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S) que constituem a composição química de aços carbono para os graus J55, SAE 1021 e TUP L80B, assim como as respectivas normas para atendimento de grau de aço.

Quadro 1 – Graus de aços, normas para atendimento de graus de aços e os principais percentuais em peso de elementos químicos que constituem a composição química dos aços J55, TUP L80b e SAE 1021

| Norma | Grau de aço | %C | %Mn | %P | %S |
|--------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| TUPER S/A | J55 | 0,12 máx. | 1,35 máx. | 0,02 máx. | 0,007 máx. |
| SAE J403 | SAE 1021 | 0,18 – 0,23 | 0,60 – 0,90 | 0,03 máx. | 0,035 máx. |
| TUPER S/A | TUP L80B | 0,20 – 0,26 | 1,20 – 1,50 | 0,02 máx. | 0,005 máx. |

Fonte: Dados obtidos das normas TUPER S/A (2022) e SAE J403 (2014, p. 3).

Os aços carbonos especificados em termos da composição química no Quadro 1 são objetos de estudo deste trabalho. Os aços carbono com os graus J55 e TUP L80B (TUPER S/A, 2022) são customizados em termos da composição química, de acordo com a solicitação da Tuper S/A para a siderúrgica fornecedora da matéria-prima (bobina de aço), para atendimento de normas de grau de tubo. Esta é uma situação comumente empregada nas indústrias de conformação mecânica de metais, especificamente para atendimento de normas API de grau de tubo de aço. Já o aço carbono SAE 1021 é adquirido da indústria siderúrgica conforme especificação na norma SAE J403 (2014), na forma de bobina de aço.

No Quadro 2 são apresentados os valores percentuais dos principais elementos químicos C, Mn, P e S que constituem a composição química de tubos de aço carbono para as normas ASTM A500 (graus A, B e C), NBR 5590 (graus A e B), NBR 8261 (graus A, B e C) e API 5CT (grau J55).

Quadro 2 – Graus de tubos de aços, normas para atendimento de graus de tubos de aços e os principais percentuais em peso dos elementos químicos que constituem a composição química de aços

| Grau de tubo de aço | Norma | %C | %Mn | %P | %S |
|---------------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| A | ASTM A500 | 0,26 máx. | 1,35 máx. | 0,035 máx. | 0,035 máx. |
| B | ASTM A500 | 0,26 máx. | 1,35 máx. | 0,035 máx. | 0,035 máx. |
| C | ASTM A500 | 0, 23 máx. | 1,35 máx. | 0,035 máx. | 0,035 máx. |
| A | NBR 5590 | 0,25 máx. | 0,95 máx. | 0,05 máx. | 0,045 máx. |
| B | NBR 5590 | 0,30 máx. | 1,20 máx. | 0,05 máx. | 0,045 máx. |
| A | NBR 8261 | 0, 23 máx. | 1,35 máx. | 0,05 máx. | 0,05 máx. |
| B | NBR 8261 | 0,23 máx. | 1,35 máx. | 0,04 máx. | 0,05 máx. |
| C | NBR 8261 | 0, 26 máx. | 1,35 máx. | 0,04 máx. | 0,05 máx. |
| J55 | API 5CT | -----* | -----* | 0,03 máx. | 0,03 máx. |

Fonte: Dados obtidos das normas ASTM A500 (2018, p. 2), NBR 5590 (2015, p. 16), NBR 8261 (2019, p. 12-13) e API 5CT (2018, p. 92). * valores não especificados pela norma.

Na próxima seção, os conceitos teóricos de propriedades mecânicas de aço carbono obtidas por ensaio mecânico de tração de corpos de prova retirados de tubos serão apresentados, bem como os valores destas propriedades previstas pelas mesmas normas (segunda coluna, Quadro 2) de grau de tubos de aço.

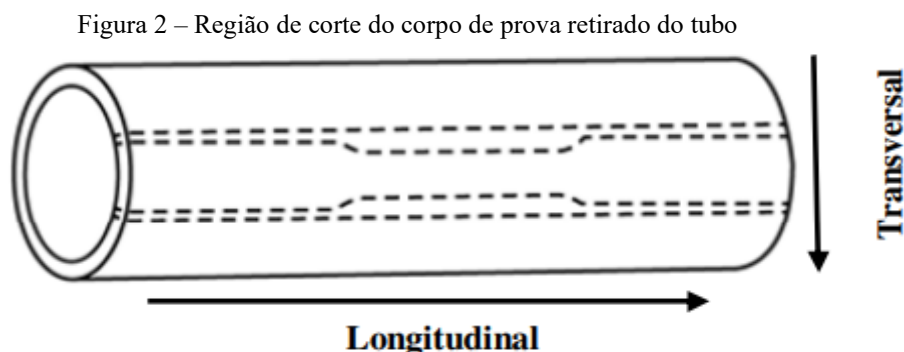
2.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO CARBONO

O aço carbono é um dos materiais de engenharia mais importantes e significativamente utilizados em aplicações industriais, tais como em estruturas metálicas na construção civil, no setor automotivo nas montadoras de veículos, nas indústrias de peças automotivas e em usinas hidrelétrica, térmica, solar, eólica e nuclear, por exemplo, para a produção de energia elétrica. Nestas diferentes aplicações de engenharia, o aço carbono pode possuir a forma de vigas, hastes, placas, tubos e chapas.

No transporte de petróleo e gás, ou seja, em oleodutos e gasodutos, os aços carbono têm sido amplamente utilizados na fabricação de tubos de grande diâmetro. Conforme Endler (2019), a partir de 4” (polegadas) ou 101,60 mm de diâmetro (D), os tubos de aço são considerados como tubos de grande diâmetro, sendo produzidos conforme requisitos das Normas Americanas API (American Petroleum Institute).

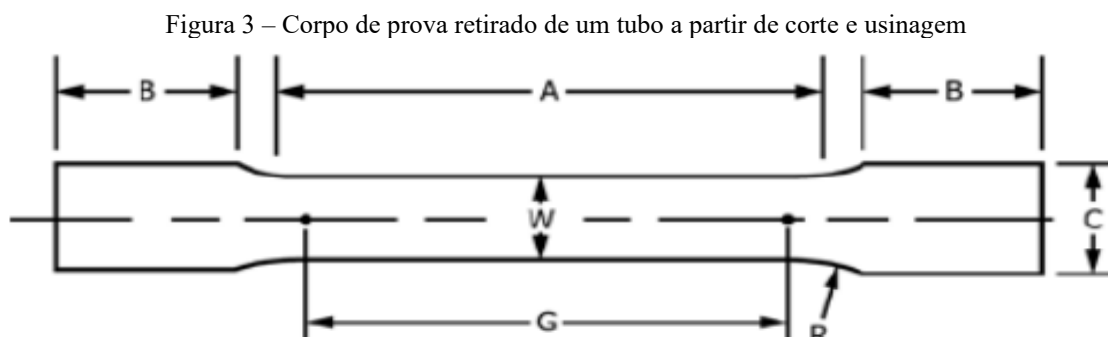
Para o estudo de propriedades mecânicas de tubos de aço carbono, o ensaio mecânico de tração é amplamente empregado (SOUZA, 1986). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da região de corte no sentido longitudinal de uma seção de tubo, em que uma tira

é retirada (linhas tracejadas), para que posteriormente um corpo de prova seja confeccionado para a realização de ensaio mecânico de tração.



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

Com a realização de uma usinagem a partir da tira retirada do tubo (Figura 2), o corpo de prova é obtido no formato de gravata (Figura 3). Os dimensionais **A**, **B**, **C**, **G**, **W** e **R** são especificados conforme normas a serem atendidas, sendo algumas delas: norma Americana ASTM E8/E8M (2016a), norma Europeia EN 10002-1 (2001) ou norma Brasileira ABNT NBR ISO 6892-1 (2015).



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

Na Figura 3, as grandezas dimensionais representam (ASTM E8/E8M, 2016a): **A** o comprimento do corpo de prova com redução da área de seção transversal; **B** o comprimento da região de fixação em que o corpo de prova é fixado nas garras da máquina de tração, **C** a largura da cabeça do corpo de prova de fixação nas garras da máquina de teste de tração; **G** o comprimento útil e de posicionamento do extensômetro; **W** a largura do corpo de prova com redução da área de seção transversal; **R** o raio de concordância.

Ressalta-se que para o atendimento da norma ASTM E8/E8M (2016a) é necessário que a garra da máquina de teste de tração seja curva, com o objetivo de se moldar a curvatura do corpo de prova (região do corte, Figura 2), pois se trata de corpo de prova retirado do tubo.

Com essa metodologia teórica evita-se que essa região seja achatada, pois caso sofresse uma deformação a frio, poderia ocorrer a alteração das propriedades mecânicas antes de iniciar o ensaio em função de uma conformação mecânica inicial.

A próxima etapa, após a obtenção de corpos de prova, consiste na realização do ensaio mecânico de tração, em que uma curva tensão-deformação de engenharia (ou convencional) é obtida. A Figura 4 (próxima página) apresenta uma representação esquemática desta curva para materiais metálicos.

A tensão de engenharia ou convencional (σ) atuando no corpo de prova é definida por (CALLISTER, 2007; GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008, p.8):

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

em que F é a força de tração uniaxial aplicada, e A_0 é a área de seção transversal na região do comprimento útil (distância entre os pontos **G**, Figura 3).

Para um corpo de prova retirado de um tubo no formato de gravata com curvatura (conforme Figura 2), o cálculo da área de seção transversal inicial (A_0) é dado pela Equação (2), sendo válido para o caso $D/W \leq 6$ (ASTM E8/E8M, 2016a).

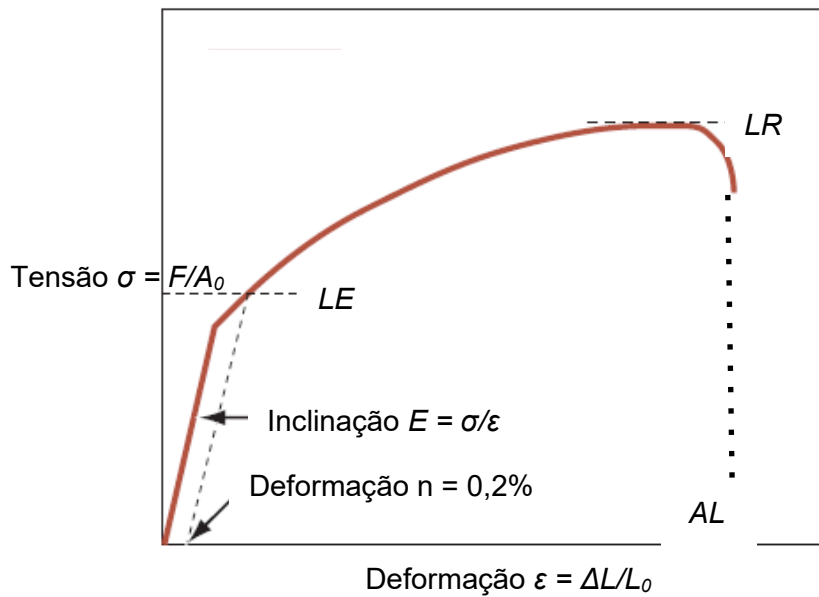
$$A_0 = \left[\left(\frac{W}{4} \right) \sqrt{(D^2 - W^2)} \right] + \left[\left(\frac{D^2}{4} \right) \text{arc sen} \left(\frac{W}{D} \right) \right] - \left[\left(\frac{W}{4} \right) \sqrt{(D - 2t)^2 - W^2} \right] - \left[\left(\frac{D - 2t}{2} \right)^2 \text{arc sen} \left(\frac{W}{D - 2t} \right)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

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, sendo igual a espessura da tira retirada da bobina de aço.

Quando a razão $D/W > 6$, a área inicial (A_0) é calculada por (ASTM E8/E8M, 2016a).

$$A_0 = Wt \quad (3)$$

Figura 4 – Representação esquemática da curva da tensão-deformação para metais



Fonte: Adaptado de Ashby (2005) apud Endler (2019, p 46).

Com a aplicação de força sobre o corpo de prova no sentido longitudinal, pela célula de carga da máquina de tração, o material deforma-se elasticamente de forma linear e na sequência não linear (ver Figura 4, até atingir a primeira linha tracejada na horizontal). Na sequência, a tensão imposta sobre o corpo de prova atinge um valor de tensão em que se inicia a deformação plástica, sendo conhecido por Limite de Escoamento e que também é chamado por tensão de escoamento ($LE = \sigma_{ys}$).

Costa e Mei (2010, p. 600) definem o limite de escoamento como “o ponto em que se inicia a deformação plástica sendo chamado de limite de escoamento”. 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 entre os regimes de comportamento mecânico elástico e plástico.

E também, Endler (2019, p. 47; apud GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008) relata que “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 $n = 0,2\%$ ”, sendo este o procedimento para interceptar a linha tracejada e paralela à região linear na curva tensão-deformação até a tensão de escoamento. Neste contexto, o limite de escoamento (ou tensão de escoamento, f_{ys}) é calculado pela razão entre a força atingida no escoamento (F_{ys}) com a área inicial (A_0), e é definido por (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008, p. 8):

$$LE = \sigma_{ys} = \frac{F_{ys}}{A_0} \quad (4)$$

Segundo Souza (1982, p. 24) "Quando um projeto requer um metal dúctil, onde a deformação plástica deva ser evitada, o limite de escoamento é o critério adotado para a resistência do material". Nesta situação é desejável efetuar a seleção de aços que possuem elevados valores de LE , e conseqüentemente, valores elevados de LR (limite de resistência à tração), o qual será definido a seguir.

Retornando para a Figura 4, após a tensão aplicada atingir a tensão de escoamento, com o acréscimo na força imposta ao corpo de prova pela célula de carga da máquina de tração, a força máxima ($F_{máx}$) é atingida, em que a razão entre esta força com a área inicial (A_0), define o limite de resistência à tração (ou tensão de escoamento, $\sigma_{máx}$), matematicamente definido por (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008, p. 8):

$$LR = \sigma_{máx} = \frac{F_{máx}}{A_0} \quad (5)$$

A deformação de engenharia ou convencional (Σ), grandeza adimensional do eixo da horizontal da curva tensão-deformação da Figura 4, é definida por (CALLISTER, 2007; GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008, p. 9):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (6)$$

em que ΔL é o alongamento, ou seja, a variação do comprimento útil final após a ruptura (L_f) em relação ao comprimento útil inicial do corpo de prova antes do ensaio (L_0) (medida pelo monitoramento dos pontos **G** da Figura 3 por extensômetro).

Callister (2007, p. 135) relata que "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". O alongamento específico, ou convencionalmente alongamento ($AL = \Sigma$), quando é representado em termos percentuais, logo após a ruptura do corpo de prova, AL é definido em norma por (ABNT NBR ISO 6892-1, 2015):

$$AL = \varepsilon_f = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \cdot 100 (\%) \quad (7)$$

Segundo Souza (1986, p. 38), "o alongamento dá uma medida comparativa da ductilidade de dois materiais. Quanto maior for o alongamento, mais dúctil será o material".

A fim de exemplificar valores normativos das propriedades mecânicas (LE , LR e AL) para tubos de aço carbono, no Quadro 3 são apresentados os valores para atendimento de requisitos de aprovação de tubos pelas normas ASTM A500 (graus A, B e C), NBR 5590 (graus A e B), NBR 8261 (graus A, B e C) e API 5CT (graus J55).

Quadro 3 – Graus de tubos de aços, normas para atendimento de graus de tubos de aços e os valores mínimos ou intervalo das propriedades mecânicas *LE*, *LR* e *AL* de aços

| Grau de tubo de aço | Norma | <i>LE</i> [MPa] | <i>LR</i> [MPa] | <i>AL</i> [%] |
|---------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|
| A | ASTM A500 | 230 mín. | 310 mín. | 25 mín. |
| B | ASTM A500 | 290 mín. | 400 mín. | 23 mín. |
| C | ASTM A500 | 315 mín. | 425 mín. | 21 mín. |
| A | NBR 5590 | 205 mín. | 330 mín. | -----* |
| B | NBR 5590 | 240 mín. | 415 mín. | -----* |
| A | NBR 8261 | 228 mín. | 310 mín. | 25 mín. |
| B | NBR 8261 | 290 mín. | 400 mín. | 23 mín. |
| C | NBR 8261 | 317 mín. | 427 mín. | 21 mín. |
| J55 | API 5CT | 379 a 552 | 517 mín. | -----* |

Fonte: Dados obtidos das normas ASTM A500 (2018, p. 2), NBR 5590 (2015, p. 16), NBR 8261 (2019, p. 12-13) e API 5CT (2018, p. 94). * valores estabelecidos por tabelas e requisitos nas normas.

Vieira *et al.* (2013) realizaram ensaios mecânicos de tração em corpos de prova tubo inteiro e em corpos de prova retirados do tubo, com o objetivo de identificar a existência de possíveis diferenças nos valores das propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*). O Quadro 4 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas investigadas nesse estudo. Com base nos valores apresentados no Quadro 4, observa-se que as propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*) para corpos de prova de tubo inteiro submetidos ao ensaio mecânico de tração, são superiores quando comparadas com as propriedades obtidas com corpos de prova retirados do tubo.

Quadro 4 – Valores médios de *LE*, *LR* e *AL* em corpos de prova de tubo inteiro e retirados do tubo

| Tipo de corpo de prova (CP) | <i>LE</i> [MPa] | <i>LR</i> [MPa] | <i>AL</i> [%] |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| CP retirado do tubo | 411 | 439 | 8 |
| CP tubo inteiro | 506 | 519 | 22 |

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2013, p. 2362).

De acordo com 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, infelizmente existem limitações nas máquinas de tração tornando inviável a realização em tubos com grandes diâmetros. No entanto, Vieira *et al.* (2013, p. 2365) relata que “essencialmente três mecanismos influenciaram, principalmente, nas diferenças obtidas entre os ensaios dos tubos e corpos de prova, são eles: usinagem dos corpos de provas, tubos com costura e maior quantidade de estrição nos tubos”.

Com o trabalho de Vieira *et al.* (2013) pôde-se constatar que as amostras ensaiadas em corpos de prova retirados de tubos fornecem valores de propriedades mecânicas com um fator

de segurança em relação aos ensaios realizados em tubos inteiros, sendo 23% para LE e 18% para LR . Nesta linha de raciocínio, a análise das propriedades mecânicas LE , LR e AL faz com que o engenheiro projetista seja capaz de definir o diâmetro, espessura e tipo de aço a ser utilizado de forma eficiente para uma determinada aplicação.

As normas NBR 5590 (2015), NBR 8261 (2010), ASTM A500 (2018) e EN 10305-3 (2016), por exemplo, definem exatamente como deverão ser dimensionados os corpos de prova retirados de tubos de grande diâmetro para o ensaio mecânico de tração, e as correspondentes especificações mínimas de LE , LR e AL que os tubos de aço deverão atender.

Outra propriedade mecânica que caracteriza a ductilidade, porém pouco investigada, é o módulo de tenacidade (ou tenacidade, $MT = U_t$), que corresponde à energia absorvida pelo corpo de prova até o momento de sua ruptura. Matematicamente, conforme Garcia, Spim e Santos (2008, p 28), a expressão convencionalmente internacionalmente para calcular o módulo de tenacidade é dada por:

$$MT = U_t = \left(\frac{LE+LR}{2} \right) \cdot AL \quad (8)$$

em que o cálculo de MT fornece uma estimativa da energia abaixo da curva tensão-deformação de engenharia, dispensando cálculos por integração numérica, sendo calculada com os valores de LE , LR e AL .

Além dos requisitos em termos de composição química e propriedades mecânicas previstas em normas, uma revisão da literatura será apresentada para o levantamento de informações qualitativas e quantitativas de resultados de pesquisas científicas.

2.4 – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Os estudos recentes publicados e relacionados em relação às propriedades mecânicas de tubos metálicos e sua composição química serão selecionados e contextualizados nesta seção por meio da realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Inicialmente, será apresentado o procedimento da RSL empregado para a pesquisa bibliográfica. Na sequência, após a seleção de artigos científicos publicados em periódicos, uma síntese desses trabalhos será apresentada.

2.4.1 – Pesquisa bibliográfica realizada pela aplicação da RSL

A RSL é um procedimento metodológico sistemático com a finalidade de se realizar uma pesquisa bibliográfica, que de acordo com Marconi e Lakatos (2013, p. 57) busca “colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências”.

Higgins e Green (2008, apud ARAÚJO; MELLO, 2013) afirmam que a RSL trata-se de um método padrão que objetiva encontrar respostas para questões de pesquisa bem específicas, nas quais os critérios de elegibilidade devem ser definidos previamente. É necessário elencar a principal questão a ser pesquisada, assim como o estabelecimento de palavras-chave e dos critérios de pesquisa para coletar informações, e posteriormente efetuar uma análise dos dados (ARAÚJO; MELLO, 2013).

Conforto *et al.* (2011) sugerem que a pesquisa bibliográfica (artigos científicos, neste caso) se faça por um procedimento iterativo que contém 7 (sete) etapas, sumarizadas por: 1^a) busca por periódicos em base de dados; 2^a) filtro 1 – leitura do título, resumo e palavras-chave; 3^a) filtro 2 – leitura da introdução e das conclusões; 4^a) filtro 3 – leitura completa e seleção de artigos; 5^a) busca cruzada, ou seja, indicações nas referências do artigo ou reiniciando o ciclo de pesquisa; 6^a) busca por novos periódicos em outras bases de dados e aplicação das etapas 2 a 5, se necessário; 7^a) catalogação de artigos científicos.

Nesse trabalho, a biblioteca online Scopus foi selecionada como a base de dados para a realização da pesquisa bibliográfica. Um total de 4 (quatro) conjuntos de palavras-chave em inglês (strings para a busca) foram propostos, os quais abrangem “aço carbono”, “elementos de liga” e “propriedades mecânicas”, conforme Quadro 5. Com a finalidade da pesquisa bibliográfica não se tornar muito específica, dessa forma ampliando o universo do tema em estudo, não foi considerada a opção de busca para “tubos de aço carbono”, e sim somente para “aço carbono”. Como um dos resultados desta pesquisa bibliográfica, o Quadro 5 apresenta o quantitativo do total de documentos encontrados para os strings propostos, o quantitativo de documentos disponíveis para download na instituição e o quantitativo de documentos selecionados conforme a metodologia RSL.

Os resultados apresentados no Quadro 5 foram atualizados no período de 09 a 11 de junho de 2022. De um total de 38 (trinta e oito) artigos científicos, um total de 10 (dez) foram inicialmente selecionados para leitura, em que se constatou a duplicidade de 5 (cinco) documentos, sendo 5 (cinco) artigos científicos efetivamente selecionados para a leitura por completo.

Quadro 5 – Pesquisa bibliográfica na biblioteca online Scopus. *O total para documentos selecionados desconsidera os documentos repetidos para os 4 conjuntos de palavras-chave

| Conjunto de Palavras-chave | Total de Documentos | Documentos Disponíveis | Documentos Selecionados |
|---|---------------------|------------------------|-------------------------|
| i) "alloy elements" AND "mechanical properties" AND "carbon steel" | 37 | 19 | 3 |
| ii) "alloy elements" AND "yield stress" OR "yield limit" AND "carbon steel" | 5 | 2 | 1 |
| iii) "alloy elements" AND "maximum stress" OR "tensile strength limit" OR "tensile strength" AND "carbon steel" | 14 | 11 | 2 |
| iv) "alloy elements" AND "stretching" OR "elongation at break" OR "elongation" AND "carbon steel" | 10 | 6 | 4 |
| Total | 66 | 38 | 5* |

Fonte: Autor (2022).

A seguir, a síntese dos estudos relacionados com esse trabalho por ordem cronológica será apresentada, com o objetivo de apontar quais as principais contribuições de cada pesquisa, em relação às propriedades mecânicas de tubos de aço carbono e sua composição química.

2.4.2 – Síntese de estudos relacionados com aplicação da RSL

Yi *et al.* (2006) utilizaram um aço de baixo carbono com o objetivo de aumentar a tensão de escoamento pela adição do elemento de liga titânio. As propriedades mecânicas de limite de escoamento (*LE*) e limite de resistência à tração (*LR*) foram obtidas a partir da análise da curva tensão-deformação com a utilização das equações (4) e (5). Os ensaios mecânicos foram realizados com a utilização de uma máquina de tração em temperatura ambiente, com corpos de prova laminados, seguindo a norma ASTM E810. No Quadro 6 são apresentados os percentuais dos principais elementos químicos que constituem a composição química do aço carbono, sendo o carbono (C), silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S) e titânio (Ti). As propriedades mecânicas obtidas neste estudo, para um percentual de 10% de bainita, foram de 510 MPa para *LE* e 590 MPa para o *LR*.

Quadro 6 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química do aço carbono

| %C | %Si | %Mn | %P | %S | %Ti |
|-------|-----|------|---------|---------|------|
| 0,081 | 0,1 | 1,74 | < 0,015 | < 0,015 | 0,18 |

Fonte: Retirado e adaptado de Yi *et al.* (2006, p. 754).

Jha (2017) realizou um estudo da influência da adição de várias ligas ao aço e os efeitos que ocorrem na resistência à tração, dureza e microestrutura. O ensaio mecânico de tração foi realizado em corpos de prova padrão em temperatura ambiente, com uma máquina de tração universal GUNT, utilizando três materiais distintos de diferentes composições químicas. O Quadro 7 apresenta os percentuais dos principais elementos químicos que constituem a composição química do aço carbono, sendo o carbono (C), manganês (Mn), silício (Si), enxofre (S), fósforo (P), cromo (Cr) e níquel (Ni).

Quadro 7 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química de ligas de aço carbono

| Nome das ligas | %C | %Mn | %Si | %S | %P | %Cr | %Ni |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carbon Steel | 0,120 | 0,980 | 0,05 | 0,280 | 0,050 | ----- | ----- |
| EN-8 Steel | 0,452 | 0,780 | 0,230 | 0,011 | 0,024 | 0,010 | 0,001 |
| Mild Steel | 0,182 | 0,717 | 0,228 | 0,010 | 0,031 | 0,007 | 0,002 |

Fonte: Retirado e adaptado de Jha (2017, p. 4.318).

Após realizar os testes de tração, os resultados mostraram que o aço EN 8 obteve maior limite de resistência à tração (*LR*) de 882 MPa, seguido pelo aço macio de 666 MPa e o aço carbono teve o menor valor de 420 MPa. Para o alongamento (*AL*), o maior percentual foi para o aço carbono de 38%, seguido pelo aço EN 8 com 13,8% e o aço macio apresentou o menor valor com 4,8%. O aumento do teor de Mn em mais de 0,23% reduziu a capacidade de alongamento das ligas de aço EN 8 e aço macio, reduzindo a ductilidade.

Wang *et al.* (2018) realizaram uma correlação de vários materiais metálicos, incluindo aços carbono, a partir de um gráfico do limite de resistência à tração (*LR*) em função do alongamento (*AL*). Pode-se constatar pela análise do gráfico deste estudo, na forma de mapa de pontos (*AL*, *LR*), um comportamento mecânico decrescente de *LR* no intervalo de 625 a 1375 MPa em função de *AL* para o intervalo de 7,50 a 36,25%. Elevados valores de limite de resistência à tração estão relacionados com menores valores de alongamento, menos dúctil será o material metálico. Com o decréscimo do limite de resistência à tração, um acréscimo no alongamento foi obtido, indicando um acréscimo na ductilidade.

Lin *et al.* (2020) analisaram o efeito da camada intermediária de níquel (Ni) nos aços Q235 e SUS314, realizando a alteração da espessura desta camada. Os percentuais dos principais elementos químicos que constituem a composição química dos aços estão

apresentados no Quadro 8, sendo o cromo (Cr), níquel (Ni), carbono (C), manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S).

Quadro 8 – Percentual em peso dos elementos químicos que constituem a composição química dos aços carbono

| Aço | %Cr | %Ni | %C | %Mn | %Si | %P | %S |
|--------|-------|-------|------|-----|-----|-------|------|
| Q235 | ----- | ----- | 0,18 | 0,5 | 0,3 | 0,045 | 0,05 |
| SUS314 | 24 | 20 | 0,23 | 1,8 | 2,0 | 0,040 | 0,02 |

Fonte: Retirado e adaptado de Lin *et al* (2020).

A tensão de cisalhamento das placas de aço inoxidável laminadas a quente, com as camadas intermediárias de Ni de 0, 100 e 200 micrômetros, foram de 360, 393 e 387 MPa, respectivamente. Neste trabalho é apresentado o estudo de Wang *et al.* (2020, apud LIN *et al.*, 2020) que desenvolveram uma placa de aço SUS316/Q235 com camada intermediária de Ni, com valores da tensão de cisalhamento de 331 MPa, da tensão máxima de 567 MPa (ou limite de resistência à tração, *LR*) e do alongamento na fratura (*AL*) de 49,63%.

Gong *et al.* (2022) recomendam a utilização de valores percentuais de composição química próximos de 0,42% de carbono e 0,53% de manganês para um melhor atendimento de tenacidade (capacidade de absorver energia) e rendimento (resistência mecânica) exigida em tubos do aço carbono 45. Para os elementos químicos fósforo e enxofre foram obtidos os percentuais de 0,007 para ambos. Foram realizados ensaios mecânicos de tração em tubos de aço carbono, com comprimento de 250 mm, de 45 mm para o diâmetro interno do tubo e 5 mm para a espessura da parede do tubo, em que obtiveram o valor médio para a força de ruptura de 255 kN e alongamento na ruptura de 10,5%.

2.5 – SÍNTESE INTEGRADORA

Nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 foram apresentados os conceitos teóricos já estabelecidos em alguns livros e normas relacionados com tubos de aço carbono, composição química de aço carbono e propriedades mecânicas de tubos de aço carbono, respectivamente. Já na seção 2.4, com a síntese dos artigos científicos selecionados com a utilização da RSL, constatou-se que os trabalhos estão relacionados com a composição química e propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*) de aços carbono obtidas por ensaios mecânicos de tração.

A maioria dos estudos consistiu em avaliar chapas metálicas, sendo que os testes de tração relatados foram realizados em corpos de prova do formato gravata, e não foi mencionado

se os corpos de prova foram retirados de tubos. A exceção é o trabalho de Gong *et al.* (2022) que realizaram ensaios mecânicos de tração em corpos de prova no formato de tubo (pequeno diâmetro). Previamente a RSL, na seção 2.3, sabe-se com o trabalho de Vieira *et al.* (2013), que as amostras ensaiadas em corpos de prova retirados de tubos fornecem valores de propriedades mecânicas com um fator de segurança em relação aos ensaios realizados em tubos inteiros. Nenhum estudo relacionou as propriedades mecânicas com a composição química. No entanto, Wang *et al.* (2018) correlacionaram a resistência mecânica em função do alongamento. Alguns estudos relataram a importância da ductilidade e da tenacidade, sendo os trabalhos de Jha (2017), Wang *et al.* (2018) e Gong *et al.* (2022), entretanto o módulo de tenacidade (*MT*) não foi avaliado por nenhum destes estudos.

Dentro do contexto abordado nesta fundamentação teórica, o objetivo geral e os objetivos específicos apresentados na introdução foram estabelecidos para essa pesquisa, na perspectiva de uma pesquisa científica e tecnológica, em que dados de composição química e de propriedades mecânicas são utilizados para obter informações científicas, oriundos de produtos industriais (tubos de aço carbono), num contexto de tecnologia e inovação.

3 – METODOLOGIA

Nesta seção será delineada a metodologia aplicada nesse estudo de caso para a seleção de dados dos valores percentuais dos elementos químicos (C, Mn, P e S) e das propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*) dos aços carbono J55, SAE 1021 e TUP L80B, obtidos com o “Relatório de Análise de Produto”, denominado de planilha RAP da empresa Tuper S/A, que se localiza no norte de Santa Catarina, na cidade de São Bento do Sul.

3.1 – BOBINAS DE AÇO CARBONO E SEU PROCESSAMENTO

As bobinas de aço carbono são adquiridas pela empresa Tuper S/A de usinas siderúrgicas com uma composição química pré-estabelecida por normas, sendo nesse estudo de caso as normas de grau de aço TUPER S/A grau J55, SAE J403 grau SAE 1021 e TUPER S/A grau TUP L80B. De posse das bobinas de aço carbono na empresa, essas são cortadas e conformadas mecanicamente até a formação de tubos, conforme abordado na seção 2.1. Um estudo realizado na mesma empresa por Endler (2019, p.71), menciona que:

[...] 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 a 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.

A composição química final da bobina de aço carbono é definida na aciaria da usina siderúrgica, e após esta definição, a mesma não altera e permanece até o produto final (bobina). Todas as bobinas de aço carbono possuem o certificado da composição química fornecido pelas usinas siderúrgicas. A composição química que determinará como será classificado o aço, juntamente com as propriedades mecânicas, se enquadra em classes: i) API (*American Petroleum Institute*); ou ii) ASTM (*American Society for Testing and Materials*); ou iii) DIN (*Deutsches Institut Für Normung*); ou iv) NBR (Norma Brasileira); ou v) SAE (*Society of Automotive Engineers*); ou ainda vi) normas de empresas como a Tuper S/A (2022).

Após o recebimento da bobina na Tuper S/A, os valores da composição química são registrados no sistema TOTVS 12, em que os dados exportados deste sistema denominam-se “Relatório de Análise de Produto”, conhecido como planilha RAP.

O início do processo de conformação mecânica dá-se com o corte longitudinal, transformando-se em subprodutos denominados fitas ou tiras. A largura das fitas é definida de acordo com o diâmetro externo do tubo, ou seja, para cada diâmetro de tubo, uma largura de fita específica é estabelecida (TUPER S/A, 2019).

Essa fita é inserida na formadora de tubos, iniciando pelo equipamento chamado acumulador, que tem como função realizar a liberação da fita aos poucos. Na sequência, a fita passa por diversas matrizes e a cada estágio, um formato mais próximo de um tubo é preparado para ser soldado. O processo de soldagem realizado é por alta frequência (HFIW) que utiliza indutor tipo bobina. A etapa seguinte é o processo de calibração, e tem como objetivo condicionar os tubos nas tolerâncias dimensionais exigidas, conforme a norma de grau de tubo de aço solicitada pelo cliente. Isto permite que o tubo seja alterado para uma geometria quadrada, retangular ou especial. A última etapa consiste na identificação para rastreabilidade e embalagem também conhecida como enfiamento.

3.2 - ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Após a formação do tubo, é retirado uma amostra de 300mm do fardo de tubos, para que seja realizado o ensaio mecânico de tração. Essa amostra é chamada de corpo de prova e pode ser classificada em dois tipos, sendo: 1) um corpo de prova retirado do tubo, que se aplica para diâmetros maiores em função da limitação do equipamento; ou 2) corpo de prova realizado no tubo inteiro.

O ensaio mecânico de tração é realizado na empresa Tuper S/A em uma máquina universal de ensaios modelo EMIC, conforme ilustra a fotografia desta máquina, Figura 5. A capacidade máxima de força da célula de carga é de 600 kN (60.000 kgf), em que o ensaio mecânico de tração e o corpo de prova seguirão parâmetros de acordo com a norma informada pelo cliente (API, ou ASTM, ou ainda NBR).

Com o objetivo de elucidar, de forma ilustrativa por fotografia com a Figura 6 (ENDLER, 2019), os tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos de tração são: a Figura 6 (parte a) apresenta a seção do tubo em que foi retirado o corpo de prova; a Figura 6 (parte b) se determina no corpo retirado do tubo já usinado nos dimensionais normativos para o ensaio mecânico de tração; e a Figura 6 (parte c) se refere ao corpo de prova após a ruptura.

Figura 5 – Máquina universal para realizar ensaios mecânicos de tração modelo EMIC



Fonte: O autor (2022).

Figura 6 – Corpo 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 após ensaio



Fonte: Endler (2019, p. 74).

Na Figura 7, uma fotografia de um corpo de prova (CP) do próprio tubo utilizado em ensaio mecânico de tração, ou seja, o ensaio é realizado no tubo inteiro, podendo ser chamado de CP tubo. A Figura 7 (parte a) ilustra uma seção do tubo que é o próprio corpo de prova; a Figura 7 (parte b) se refere ao corpo de prova após o ensaio (ENDLER, 2019).

Figura 7 – Tipos de corpos de prova (CP) para ensaio mecânico de tração. a) CP tubo retirado de tubo, b) CP tubo após o ensaio



Fonte: Endler (2019, p. 74).

Com a realização do ensaio mecânico de tração uniaxial obtém-se uma curva da tensão em função da deformação de engenharia, conforme relatado no Capítulo 2 de Fundamentação Teórica, seção 2.3 (Propriedades Mecânicas de Tubos de Aço Carbono). Os cálculos das propriedades mecânicas de limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LR) e alongamento (AL) são realizados com as equações 4, 5 e 7, com dados da curva tensão-deformação. Em um programa de computador, que faz o controle da máquina de ensaios, o técnico do laboratório da empresa indica na curva tensão-deformação os pontos em que serão realizados os cálculos das tensões (escoamento e máxima) e deformação final, de forma automatizada. Na sequência os dados são inseridos e registrados no sistema TOTVS 12, e com a exportação dos dados desse sistema, um “Relatório de Análise de Produto” é gerado, ou seja, a planilha RAP.

3.3 - RELATÓRIO DE ANÁLISE DE PRODUTO (RAP)

A Tuper S/A contém um banco de dados de resultados dos ensaios mecânicos de tração, aplicados em suas peças tubulares metálicas, iniciado em 2005. Este banco de dados está integrado no sistema TOTVS 12 da empresa Tuper S/A, sendo alimentado para os resultados das análises experimentais de controle de processos de produtos tubulares. Após as exportações dos dados, as informações são dispostas em uma planilha na extensão do xls (Microsoft Excel), denominada internamente na empresa como planilha RAP. Utiliza-se essa planilha como histórico de resultados oriundos de ensaios mecânicos de tração em tubos de aço.

A planilha RAP detém as informações, conforme Figura 8, descritas abaixo:

- I. Material, espessura e diâmetro expresso em milímetros;
- II. Descritivo do tubo informando o diâmetro, espessura, comprimento, norma do tubo e informações auxiliares;

- III. Plano de corte, lote da bobina, corrida da bobina, que são informações relacionadas à rastreabilidade ao aço empregado;
- IV. Propriedades mecânicas ensaiadas nos tubos detalhando o limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LR*) e alongamento (*AL*);
- V. Composição química informando os teores em percentuais de Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S), além de outros;
- VI. Norma do grau de tubo de aço a ser atendida conforme solicitação do cliente;
- VII. Nome do cliente e número da RAP, que são informações relacionadas à rastreabilidade do cliente ao aço empregado.

O estudo de caso foi realizado neste trabalho por uma análise de dados em 3 (três) aços carbonos distintos, sendo eles: J55, SAE 1021 e TUP L80B. Inicialmente, a planilha RAP usada nesse estudo continha 14.350 conjuntos de dados, incluindo resultados das composições químicas e propriedades mecânicas no período de janeiro de 2017 a dezembro de 2020. As informações são exibidas numa imagem retirada da planilha RAP (Figura 8).

3.4 – SELEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DA PLANILHA RAP

Com o objetivo de efetuar a análise de dados e tratamento estatístico de dados experimentais previamente realizados, uma seleção dos dados foi realizada com o objetivo de selecionar somente valores factíveis para o estudo em questão. Para a composição química, os elementos químicos selecionados foram o carbono (C), manganês (Mn), fósforo (F) e enxofre (S), em que esses dados foram inseridos no sistema com base nas informações do certificado da bobina de aço carbono. Para as propriedades mecânicas foram o *LE*, o *LR* e o *AL*, em que esses dados foram inseridos no sistema com base nas informações dos ensaios mecânicos de tração dos corpos de provas retirados de tubos de aço carbono.

Figura 8 – Planilha RAP

| Grau tubo | Esp | Diâmetro | Item | Plano | Bob | Cor | LR | LE | AL | C | Mn | P | S | Grau aço | Cliente | Nr Rap |
|-----------|------|----------|-------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|------------------|-----------|--------|
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.110 | F306189 | 1189069 | 583,10 | 523,70 | 33,00 | 0,0700 | 1,3100 | 0,0150 | 0,0026 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 264.963 | F306506 | 1189173 | 576,40 | 506,90 | 34,00 | 0,0800 | 1,2700 | 0,0160 | 0,0023 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.111 | F306510 | 2161947 | 576,40 | 483,80 | 35,00 | 0,0800 | 1,3100 | 0,0180 | 0,0030 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.125 | F310367 | 2163512 | 596,40 | 515,60 | 32,00 | 0,0800 | 1,3000 | 0,0180 | 0,0038 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.089 | F306190 | 3584358 | 582,40 | 494,20 | 32,00 | 0,0900 | 1,3000 | 0,0150 | 0,0036 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.066 | F306241 | 3584374 | 575,40 | 447,30 | 33,00 | 0,0800 | 1,2700 | 0,0160 | 0,0024 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.240 | F306500 | 3584433 | 583,30 | 477,80 | 32,00 | 0,0800 | 1,2800 | 0,0170 | 0,0032 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 265.247 | F306502 | 3584446 | 572,80 | 493,00 | 34,00 | 0,0800 | 1,2500 | 0,0190 | 0,0041 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 156952 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x45ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.306 | F404958 | 1195161 | 567,60 | 490,50 | 36,00 | 0,0800 | 1,2500 | 0,0150 | 0,0021 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159256 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x45ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.295 | F407101 | 1195174 | 585,90 | 488,10 | 38,00 | 0,0800 | 1,2900 | 0,0100 | 0,0017 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159256 |
| J55 PSL1 | 9,80 | 273,00 | 10-3/4x0.400x45ft-API5CT-J55 PSL-1 | 267.765 | F409694 | 1197039 | 552,50 | 469,50 | 35,00 | 0,0800 | 1,3300 | 0,0140 | 0,0026 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159262 |
| J55 PSL1 | 9,80 | 273,00 | 10-3/4x0.400x45ft-API5CT-J55 PSL-1 | 268.067 | F504868 | 2171654 | 564,70 | 423,30 | 36,00 | 0,0700 | 1,3000 | 0,0150 | 0,0027 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159262 |
| J55 PSL1 | 9,80 | 273,00 | 10-3/4x0.400x45ft-API5CT-J55 PSL-1 | 267.967 | F407236 | 3591563 | 579,10 | 482,60 | 28,00 | 0,0700 | 1,2700 | 0,0180 | 0,0050 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159262 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.518 | F406471 | 1195800 | 563,40 | 487,90 | 39,00 | 0,0800 | 1,2800 | 0,0160 | 0,0032 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159519 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.439 | F405439 | 3590795 | 587,80 | 476,30 | 36,00 | 0,0800 | 1,2700 | 0,0190 | 0,0032 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159519 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.436 | F405677 | 3590825 | 570,90 | 485,30 | 36,00 | 0,0700 | 1,2900 | 0,0170 | 0,0036 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159519 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.469 | F405686 | 3590838 | 590,50 | 485,70 | 36,00 | 0,0800 | 1,3000 | 0,0200 | 0,0026 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 159519 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 266.844 | F409043 | 1195376 | 564,20 | 482,80 | 35,00 | 0,0800 | 1,2700 | 0,0170 | 0,0031 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160220 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.121 | F406482 | 1195767 | 579,50 | 492,40 | 33,00 | 0,0800 | 1,3200 | 0,0140 | 0,0046 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160220 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.035 | F409040 | 1195796 | 586,90 | 498,80 | 35,00 | 0,0800 | 1,2500 | 0,0170 | 0,0035 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160220 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.037 | F405676 | 1590838 | 585,70 | 496,10 | 38,00 | 0,0800 | 1,3000 | 0,0200 | 0,0026 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160220 |
| J55 PSL1 | 9,68 | 244,48 | 9-5/8x0.395x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.242 | F405422 | 3590779 | 594,50 | 501,00 | 33,00 | 0,0700 | 1,2700 | 0,0180 | 0,0042 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160220 |
| J55 PSL1 | 8,63 | 244,48 | 9-5/8x0.352x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.427 | F409051 | 1195813 | 616,70 | 499,10 | 32,00 | 0,0800 | 1,2700 | 0,0140 | 0,0036 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160607 |
| J55 PSL1 | 8,63 | 244,48 | 9-5/8x0.352x42ft-API5CT-J55 PSL-1 F | 267.421 | F409722 | 1197215 | 622,70 | 545,70 | 30,00 | 0,0800 | 1,3200 | 0,0130 | 0,0060 | API 5CT J55 PSL1 | ATLAS USA | 160607 |

Fonte: Cortesia Tuper S/A (2022).

A seguir, a descrição dos filtros de seleção:

Primeiro filtro: para a seleção dos dados foi realizada a retirada dos resultados de propriedades mecânicas que estavam zeradas. Existem situações em que a norma informada pelo cliente não exige a realização do ensaio.

Segundo filtro: foi efetuada a seleção dos 3 (três) aços elencados para o estudo, sendo os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B. A planilha inicial foi segmentada em três planilhas auxiliares para simplificar a análise de dados para cada grau de aço carbono.

Terceiro filtro: foram retirados os tubos com a forma geométrica quadrada ou retangular, tendo como objetivo somente os tubos no formato redondo, pois os tubos nos formatos quadrados e retangulares sofrem conformações mecânicas diferentes em relação aos redondos.

Quarto filtro: como este estudo analisa a composição química e seu impacto em relação às propriedades mecânicas, as corridas em duplicidade foram retiradas. Pois uma corrida que equivale a 300 toneladas de aço, possui o mesmo valor de composição química, conhecida como a produção de uma “panela” na usina siderúrgica e realizando um cálculo simples, somando os dados dos três aços do Quadro 9 temos o total de 862 dados, multiplicando esse valor por 300 toneladas que representa o valor de um dado, temos um montante de 258.000 toneladas de aço sendo analisadas no estudo.

Após a aplicação dos 4 (quatro) filtros, o conjunto de dados dos 4 (quatro) elementos químicos da composição química e das 3 (três) propriedades mecânicas dos aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B a serem analisados, foram obtidos por 3 (três) planilhas RAP, oriundas da planilha RAP original, exportada do sistema TOTVS 12. Os tamanhos das populações (quantitativo) da seleção de dados são mostrados no Quadro 9, para cada uma das 7 (sete) grandezas, sendo 4 (quatro) elementos químicos e 3 (três) propriedades mecânicas, para cada grau de aço.

Quadro 9 – Quantitativo da seleção de dados efetuada na planilha RAP original

| Grau do aço carbono | J55 | SAE 1021 | TUP L80b |
|--|-----|----------|----------|
| Quantidade de conjunto de dados selecionados | 412 | 303 | 147 |

Fonte: O autor (2022).

A etapa de análise e tratamento de dados foi realizada com a comparação de dados com requisitos normas API, ASTM e NBR, além de cálculos pela estatística descritiva.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

No contexto de composição química e propriedades mecânicas de tubos de aço carbono, os resultados dos percentuais para as normas de grau de tubos de aço carbono atendidas por normas de grau de aço carbono, o tratamento estatístico dos dados da RAP (Relatório de Análise de Produtos) de composição química e de propriedades mecânicas, e por fim correlações entre as propriedades mecânicas serão apresentados.

4.1 – PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO DE NORMAS

Os resultados dos percentuais para as normas de grau de tubos de aço carbono atendidas por normas de grau de aço carbono, serão apresentados para os principais elementos químicos em estudo que compõem a composição química e para as propriedades mecânicas, tendo como objetivo verificar qual norma de grau de aço atende totalmente ou parcialmente as normas de graus de tubos de aço.

Nos Quadros 10 a 16, os quais serão apresentados nas seções seguintes, os percentuais de atendimento PA [%], ou probabilidade percentual, de normas de grau de tubo de aço carbono por normas de grau de aço carbono foram calculados por:

$$PA = \frac{n}{N} \cdot 100\% \quad (9)$$

em que n é o número de eventos ou observações de valores de percentuais de elementos químicos ou de propriedade mecânica da norma de grau de aço que satisfazem a norma de grau de tubo de aço, N é o espaço amostral ou número total de valores, sendo igual a 412, 303 e 147, respectivamente para as normas de grau de aço TUPER S/A grau J55, SAE J403 grau SAE 1021 e TUPER S/A grau TUP L80B.

Para analisar o percentual de atendimento PA [%] de normas de grau de tubo de aço carbono por normas de grau de aço carbono, o postulado é proposto:

- i) $PA = 100\%$, atendimento integral elevado da norma - cor azul,
- ii) $90\% \leq PA < 100\%$, atendimento elevado da norma - cor verde,
- iii) $0,0\% \leq PA < 90\%$, atendimento baixo da norma - cor vermelha,

em que os intervalos indicam os níveis de PA (equação 9), conforme Quadros 10 a 16.

4.1.1 – Composição química

Os Quadros 10 a 13 apresentam os percentuais de atendimento PA [%] para os 4 elementos químicos carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), respectivamente, sendo um total de 108 cálculos realizados com a Equação (9).

Quadro 10 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o C

| Normas – Grau de tubo de aço | %C | PA [%] J55 | PA [%] SAE 1021 | PA [%] TUP L80B |
|------------------------------|-----------|-----------------|----------------------|----------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 0,26 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 0,26 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 0,23 máx. | 100 | 100 | 59,86 |
| NBR 5590 – Grau A | 0,25 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau B | 0,30 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau A | 0,23 máx. | 100 | 100 | 59,86 |
| NBR 8261 – Grau B | 0,23 máx. | 100 | 100 | 59,86 |
| NBR 8261 – Grau C | 0,26 máx. | 100 | 100 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | -----* | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autor (2022).

Quadro 11 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o Mn

| Normas – Grau de tubo de aço | %Mn | PA [%] J55 | PA [%] SAE 1021 | PA [%] TUP L80B |
|------------------------------|-----------|-----------------|----------------------|----------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| ASTM A500 – Grau B | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| ASTM A500 – Grau C | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| NBR 5590 – Grau A | 0,95 máx. | 0,0 | 100 | 0,0 |
| NBR 5590 – Grau B | 1,20 máx. | 0,24 | 100 | 0,0 |
| NBR 8261 – Grau A | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| NBR 8261 – Grau B | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| NBR 8261 – Grau C | 1,35 máx. | 100 | 100 | 99,32 |
| API 5CT – Grau J55 | -----* | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autor (2022).

Os valores percentuais máximos previstos em normas para os elementos químicos (%C, %Mn, %P e %S) foram obtidos das normas ASTM A500 (2018, p. 2), NBR 5590 (2015, p. 16), NBR 8261 (2019, p. 12-13) e API 5CT (2018, p. 92). Nos Quadros 10 e 11, a simbologia “-----*” indica que os valores não estão especificados pela norma. Os atendimentos de normas de graus de tubos de aço carbono por normas de graus de aços carbono estão relacionados com os dados de percentuais de elementos químicos da planilha RAP.

Quadro 12 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o P

| Normas – Grau de tubo de aço | %P | PA [%] J55 | PA [%] SAE 1021 | PA [%] TUP L80B |
|-------------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau A | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau B | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau A | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau B | 0,04 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau C | 0,04 máx. | 100 | 100 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | 0,03 máx. | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autor (2022).

Quadro 13 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para S

| Normas – Grau de tubo de aço | %S | PA [%] J55 | PA [%] SAE 1021 | PA [%] TUP L80B |
|-------------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 0,035 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau A | 0,045 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau B | 0,045 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau A | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau B | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau C | 0,05 máx. | 100 | 100 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | 0,03 máx. | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autor (2022).

Conforme evidenciado no Quadro 10, o elemento químico Carbono (C) para o grau de aço TUP L80B atendeu somente 59,86% para as normas de grau de tubo de aço ASTM A500 Grau C, NBR 8261 Grau A e NBR 8261 Grau B. Isso ocorre devido ao grau de aço TUP L80B permitir variação de 0,20% a 0,26% para este elemento químico, conforme norma interna da empresa TUPER S/A (2022), sendo este intervalo superior aos das normas de grau de tubo de aço relatadas. Para os aços de graus J55 e SAE 1021, o atendimento das normas de graus de tubos de aço foi integral, ou seja, 100% (Quadro 10).

Segundo Chiaverini (2008), com o aumento do teor do percentual do aço carbono, uma elevação nos valores das propriedades mecânicas *LE* e *LR* é observada, porém ocorre a redução do *AL*, e com isso a perda de ductilidade do material. Caso a aplicação do tubo exija uma conformação mecânica, haverá um aumento na probabilidade de cisalhamento do material antes de finalizar o processo.

No Quadro 11, para o elemento químico Manganês (Mn), as normas de grau de tubo de aço NBR 5590 (Graus A e B) não foram atendidas pelas normas graus de aço carbono J55 e TUP L80B. Para as normas de graus de tubos de aço carbono ASTM A500 (Graus A, B e C), NBR 8261 (Graus A, B e C) obteve-se um atendimento dessas, de 99,32% pela norma de grau de aço carbono TUP L80B.

Nos Quadros 12 e 13, tratando-se dos elementos químicos Fósforo (P) e Enxofre (S), as normas de graus de aço carbono J55, SAE 1021 e TUP L80B atenderam em 100% as 4 (quatro) normas de graus de tubos de aço carbono.

4.1.2 – Propriedades mecânicas

Os Quadros 14 a 16 apresentam os percentuais de atendimento PA [%] para as 3 propriedades mecânicas, sendo o limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LR) e o alongamento (AL), respectivamente, sendo um total de 72 cálculos realizados com a Equação (9). Os valores percentuais mínimos previstos em normas para as propriedades mecânicas (LE , LR e AL) foram obtidos das normas ASTM A500 (2018, p. 2), NBR 5590 (2015, p. 16), NBR 8261 (2019, p. 12-13) e API 5CT (2018, p. 94).

No Quadro 16, a simbologia “-----*” indica que os valores não estão especificados pela norma, enquanto que a simbologia “-----**” indica que os percentuais de atendimento não foram calculados por depender de outras variáveis e cálculos previstos em norma, ou seja, não é um valor fixo para o grau do aço carbono. Os atendimentos de normas de graus de tubos de aço carbono por normas de graus de aços carbono estão relacionados com os dados de propriedades mecânicas (LE , LR e AL) da planilha RAP.

Quadro 14 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o LE

| Normas – Grau de tubo de aço | LE [MPa] | PA [%] J55 | PA [%] SAE 1021 | PA [%] TUP L80B |
|------------------------------|------------|--------------|-------------------|-------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 230 mín. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 290 mín. | 100 | 94,39 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 315 mín. | 100 | 70,30 | 100 |
| NBR 5590 – Grau A | 205 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau B | 240 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau A | 228 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau B | 290 mín. | 100 | 94,39 | 100 |
| NBR 8261 – Grau C | 317 mín. | 100 | 69,98 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | 379 a 552 | 100 | 11,55 | 99,67 |

Fonte: Autor (2022).

Quadro 15 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o *LR*

| Normas – Grau de tubo de aço | <i>LR</i> [MPa] | <i>PA</i> [%] J55 | <i>PA</i> [%] SAE 1021 | <i>PA</i> [%] TUP L80B |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 310 mín. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 400 mín. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 425 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau A | 330 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau B | 415 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau A | 310 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau B | 400 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau C | 427 mín. | 100 | 100 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | 517 mín. | 100 | 4,29 | 98,64 |

Fonte: Autor (2022).

Após análise dos Quadros 14 e 15, no que se refere ao limite de escoamento (*LE*) e limite de resistência à tração (*LR*), as normas de graus de aço carbono J55 e TUP L80B atenderam acima de 98% (maior parte em 100%) as 4 (quatro) normas de grau de tubos de aço carbono.

Já a norma de grau de aço carbono SAE 1021 atende em baixo percentual (Quadro 14) os requisitos previstos para os valores de *LE* para as normas ASTM A500 (Grau C) e NBR 8261 (Grau C); e ainda não atende (Quadros 14 e 15) os requisitos previstos pela norma de grau de tubo de aço carbono API 5CT (Grau J55) para o *LE* e *LR*. Constatou-se que a probabilidade de utilização do aço carbono de grau SAE 1021 para atendimento do grau de tubo de aço da norma API 5CT grau J55 é mínima.

Quadro 16 – Normas de grau de tubos de aço atendidas por normas de grau de aço para o *AL*

| Normas – Grau de tubo de aço | <i>AL</i> [%] | <i>PA</i> [%] J55 | <i>PA</i> [%] SAE 1021 | <i>PA</i> [%] TUP L80B |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ASTM A500 – Grau A | 25 mín. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau B | 23 mín. | 100 | 100 | 100 |
| ASTM A500 – Grau C | 21 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 5590 – Grau A | -----* | -----** | -----** | -----** |
| NBR 5590 – Grau B | -----* | -----** | -----** | -----** |
| NBR 8261 – Grau A | 25 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau B | 23 mín. | 100 | 100 | 100 |
| NBR 8261 – Grau C | 21 mín. | 100 | 100 | 100 |
| API 5CT – Grau J55 | -----* | -----** | -----** | -----** |

Fonte: Autor (2022).

Para o alongamento (*AL*), Quadro 16, o atendimento das normas de grau de tubos de aço carbono analisadas foi de 100% pelas normas de grau de aço carbono.

4.1.3 – Composição química e propriedades mecânicas

Com base nas informações dos Quadros 10 a 13 e dos Quadros 14 a 16, as normas de grau de tubos de aço carbono com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço carbono considerando os quatro elementos químicos e as três propriedades mecânicas são indicadas, respectivamente, nos Quadros 17 e 18.

Quadro 17 – Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando os quatro elementos químicos

| Normas – Grau de aço | Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento acumulado |
|-----------------------------|---|
| TUPER S/A – J55 | NBR 5590 – Graus A e B |
| SAE J403 – SAE 1021 | Nenhuma |
| TUPER S/A – TUP L80B | ASTM A500 – Grau C; NBR 8261 – Graus A e B; NBR 5590 – Graus A e B |

Fonte: Autor (2022).

Quadro 18 – Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando as três propriedades mecânicas

| Normas – Grau de aço | Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento acumulado |
|-----------------------------|---|
| TUPER S/A – J55 | Nenhuma |
| SAE J403 – SAE 1021 | ASTM A500 – Grau C; NBR 8261 – Grau C; API 5CT – Grau J55 |
| TUPER S/A – TUP L80B | Nenhuma |

Fonte: Autor (2022).

O Quadro 17 evidencia o atendimento total das normas de grau de tubos de aço carbono para os quatro elementos químicos (C, Mn, P e S) pela norma SAE J403 de grau de aço SAE 1021, porém em propriedade mecânica, este grau de aço acaba sendo o único que atende com baixíssimo (não atende API 5CT – Grau J55) e baixo (ASTM A500 – Grau C; NBR 8261 – Grau C) percentuais os valores de *LE* e *LR*.

Para a norma TUPER S/A de grau de aço J55 temos o atendimento total (100%) para os elementos químicos carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S), independentemente da norma de grau de tubos de aço carbono. A exceção se dá para o elemento químico manganês (Mn) nas normas de grau de tubo de aço carbono NBR 5590 (Graus A e B), em que não houve atendimento, porém no quesito de propriedade mecânica temos o atendimento total neste grau de aço carbono.

O grau de aço carbono TUP L80B atendeu em 100% os percentuais dos elementos químicos fósforo (P) e enxofre (S) em todas as normas de grau de tubos de aço carbono. Porém,

esse grau de aço carbono possui baixo atendimento (normas ASTM A500 – Grau C e NBR 8261 – Graus A e B) para o elemento químico carbono (C) e não atende (norma NBR 5590 – Graus A e B) para manganês (Mn). No entanto, esse grau de aço não ocasiona problemas de não atendimento das propriedades mecânicas para todas as normas de grau de tubos de aço carbono.

O Quadro 19 apresenta a união das informações contidas nos Quadros 17 e 18, a fim de fornecer a contextualização final desse estudo, com relação às indicações das normas de grau de tubos de aço carbono com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço carbono.

Quadro 19 – Normas e graus de tubos de aço com baixo percentual de atendimento pelas normas de grau de aço considerando os quatro elementos químicos e as três propriedades mecânicas

| Normas – Grau de aço | Normas de grau de tubos de aço com baixo percentual de atendimento acumulado |
|-----------------------------|---|
| TUPER S/A – J55 | NBR 5590 – Graus A e B |
| SAE J403 – SAE 1021 | ASTM A500 – Grau C; NBR 8261 – Grau C; API 5CT – Grau J55 |
| TUPER S/A – TUP L80B | ASTM A500 – Grau C; NBR 8261 – Graus A e B; NBR 5590 – Graus A e B |

Fonte: Autor (2022).

Neste Quadro 19 pode-se constatar, que a norma de aço TUPER S/A grau J55 possui um amplo atendimento (exceto para a norma NBR 5590 – Graus A e B) nos requisitos de composição química, quanto em propriedades mecânica, em relação às normas de grau de aço SAE J403 (Grau SAE 1021) e TUPER S/A (Grau TUP L80B); atendendo totalmente os requisitos das normas de grau de tubos de aço carbono para as propriedades mecânicas *LE*, *LR* e *AL*.

Se compararmos os percentuais dos elementos químicos da norma TUPER S/A de grau aço J55 com a norma SAE J403 de grau de aço SAE 1021, os valores percentuais para o carbono no grau de aço SAE 1021 são inferiores em relação aos percentuais no grau de aço J55. Entretanto, o percentual de manganês é superior, sendo que para valores percentuais de manganês de até 1,5%, este elemento tende a aumentar a tenacidade do aço, atuando também no aumento da resistência mecânica (SOUZA, 2019).

4.2 – ANÁLISE DE DADOS DA PLANILHA RAP

O Quadro 20 apresenta os cálculos estatísticos da média (ME), desvio padrão (DP), valor mínimo (V_{mín.}), valor máximo (V_{máx.}) e coeficiente de variação (CV) a partir dos dados da planilha RAP, realizados para os percentuais dos Elementos Químicos (EQ), sendo o Carbono (C), o Manganês (Mn), o Fósforo (P) e o Enxofre (S) para os três graus de aço investigados nesse estudo (J55, SAE 1021 e TUP L80B).

Nos Quadros 20 e 21, o coeficiente de variação (CV) foi calculado por (FÁVERO *et al.*, 2009; apud CERQUEIRA; NEDER, 2017) como:

$$CV = \frac{DP}{ME} \cdot 100\% \quad (10)$$

o qual indica o nível de homogeneidade do conjunto de dados dos elementos químicos (EQ) e das propriedades mecânicas (PM), para cada grau de aço, nesse trabalho.

De acordo com Fávero *et al.* (2009, apud CERQUEIRA; NEDER, 2017, p. 139), CV é interpretado por:

- i) $CV > 30\%$, conjunto de dados é classificado como heterogêneo,
- ii) $CV < 30\%$, conjunto de dados é classificado como homogêneo.

Com base no intervalo de homogeneidade de CV definido acima, nesse estudo propõe-se a classificação:

- i) $CV > 30\%$, o conjunto de dados é heterogêneo,
- ii) $20\% < CV < 30\%$, o conjunto de dados é homogêneo - nível baixo - cor vermelha,
- iii) $10\% < CV \leq 20\%$, o conjunto de dados é homogêneo - nível médio - cor verde,
- iv) $0\% < CV \leq 10\%$, o conjunto de dados é homogêneo - nível alto - cor azul,

para analisar os valores calculados de CV nos Quadros 20 e 21.

O Quadro 20 apresenta valores inferiores a 10 % de CV para o elemento químico carbono e 3,5% para o manganês, para os três graus de aço carbono. Diante desses resultados, os mesmos apresentam alta homogeneidade, sendo uma informação extremamente importante para o estudo, pois como informado no Apêndice A, os elementos carbono e manganês possuem elevada participação no aço carbono, podendo influenciar de forma representativa nas propriedades mecânicas quando estes elementos químicos são variados.

Quadro 20 – Média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e coeficiente de variação dos aços carbono de graus (J55, SAE 1021 e TUP L80B) para os quatro elementos químicos

| Grau do Aço | EQ | ME | DP | Vmín. | Vmáx. | CV [%] |
|-------------|-----|---------|---------|--------|--------|--------|
| J55 | %C | 0,07317 | 0,00699 | 0,05 | 0,09 | 9,55 |
| | %Mn | 1,27264 | 0,02637 | 1,20 | 1,35 | 2,07 |
| | %P | 0,01556 | 0,00223 | 0,00 | 0,02 | 14,33 |
| | %S | 0,00343 | 0,00081 | 0,0015 | 0,0067 | 23,76 |
| SAE 1021 | %C | 0,19356 | 0,00656 | 0,18 | 0,21 | 3,39 |
| | %Mn | 0,72875 | 0,02422 | 0,68 | 0,84 | 3,32 |
| | %P | 0,01488 | 0,00205 | 0,010 | 0,018 | 13,80 |
| | %S | 0,00352 | 0,00088 | 0,0014 | 0,0074 | 25,13 |
| TUP L80B | %C | 0,23343 | 0,00857 | 0,21 | 0,25 | 3,67 |
| | %Mn | 1,28014 | 0,02469 | 1,23 | 1,37 | 1,93 |
| | %P | 0,01520 | 0,00152 | 0,011 | 0,018 | 10,03 |
| | %S | 0,00184 | 0,00054 | 0,0006 | 0,004 | 29,62 |

Fonte: Autor (2022).

Em termos de propriedades mecânicas (PM), o Quadro 21 apresenta os mesmos cálculos estatísticos do Quadro 20, sendo o limite de escoamento (*LE*), o limite de resistência à tração (*LR*), o alongamento (*AL*) e o módulo de tenacidade (*MT*) para os três graus de aço investigados nesse estudo (J55, SAE 1021 e TUP L80B). Ressalta-se que *MT* foi calculado nesse trabalho a partir dos valores de *LE*, *LR* e *AL*.

Quadro 21 – Média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e coeficiente de variação dos aços carbono de graus (J55, SAE 1021 e TUP L80B) para as quatro propriedades mecânicas

| Grau do Aço | PM | ME | DP | Vmín. | Vmáx. | CV [%] |
|-------------|---------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| J55 | <i>LE</i> [MPa] | 479,32 | 24,86 | 408,90 | 545,70 | 5,19 |
| | <i>LR</i> [MPa] | 572,59 | 17,30 | 517,70 | 622,70 | 3,02 |
| | <i>AL</i> [%] | 35,31 | 2,38 | 28,00 | 42,00 | 6,73 |
| | <i>MT</i> [MJ/m ³] | 185,49 | 10,73 | 148,64 | 208,55 | 5,78 |
| SAE 1021 | <i>LE</i> [MPa] | 337,64 | 33,66 | 264,50 | 423,20 | 9,97 |
| | <i>LR</i> [MPa] | 489,55 | 15,62 | 445,50 | 552,20 | 3,19 |
| | <i>AL</i> [%] | 39,94 | 2,55 | 30,00 | 47,00 | 6,39 |
| | <i>MT</i> [MJ/m ³] | 165,05 | 11,63 | 133,66 | 195,43 | 7,05 |
| TUP L80B | <i>LE</i> [MPa] | 433,48 | 22,15 | 378,40 | 492,20 | 5,11 |
| | <i>LR</i> [MPa] | 534,71 | 14,59 | 507,80 | 586,00 | 2,73 |
| | <i>AL</i> [%] | 36,04 | 2,34 | 28,00 | 46,00 | 6,49 |
| | <i>MT</i> [MJ/m ³] | 174,35 | 11,11 | 147,53 | 217,83 | 6,37 |

Fonte: Autor (2022).

Já para o elemento fósforo, Quadro 20, obtiveram-se valores médios de *CV*, sendo que para o enxofre dispõe-se de altos valores de *CV*, mas ainda sendo classificados como

homogêneos. entretanto estes dois elementos são considerados impurezas (verificar Apêndice A), devido ao seu baixo percentual de representatividade no aço.

O Quadro 21 reporta poucas oscilações das propriedades mecânicas *LE*, *LR*, *AL* e *MT* dentro dos *CV*, sendo o menor com 2,73% e o maior com 9,97%, apresentando alto nível de homogeneidade. Os três menores *CV* são 2,73% (grau de aço TUPL80B), 3,02% (grau de aço J55) e 3,19% (grau de aço SAE 1021), sendo todos para o *LR*, demonstrando pouca variabilidade dos dados.

De acordo com Jha (2017), para percentuais para os elementos químicos (%C = 0,12, %Mn = 0,980, %P = 0,05 e %S = 0,28) do aço carbono, o limite de resistência à tração determinado foi de *LR* = 420 MPa, sendo da mesma ordem de grandeza dos valores do Quadro 21, porém inferior, devido o elevado percentual de enxofre.

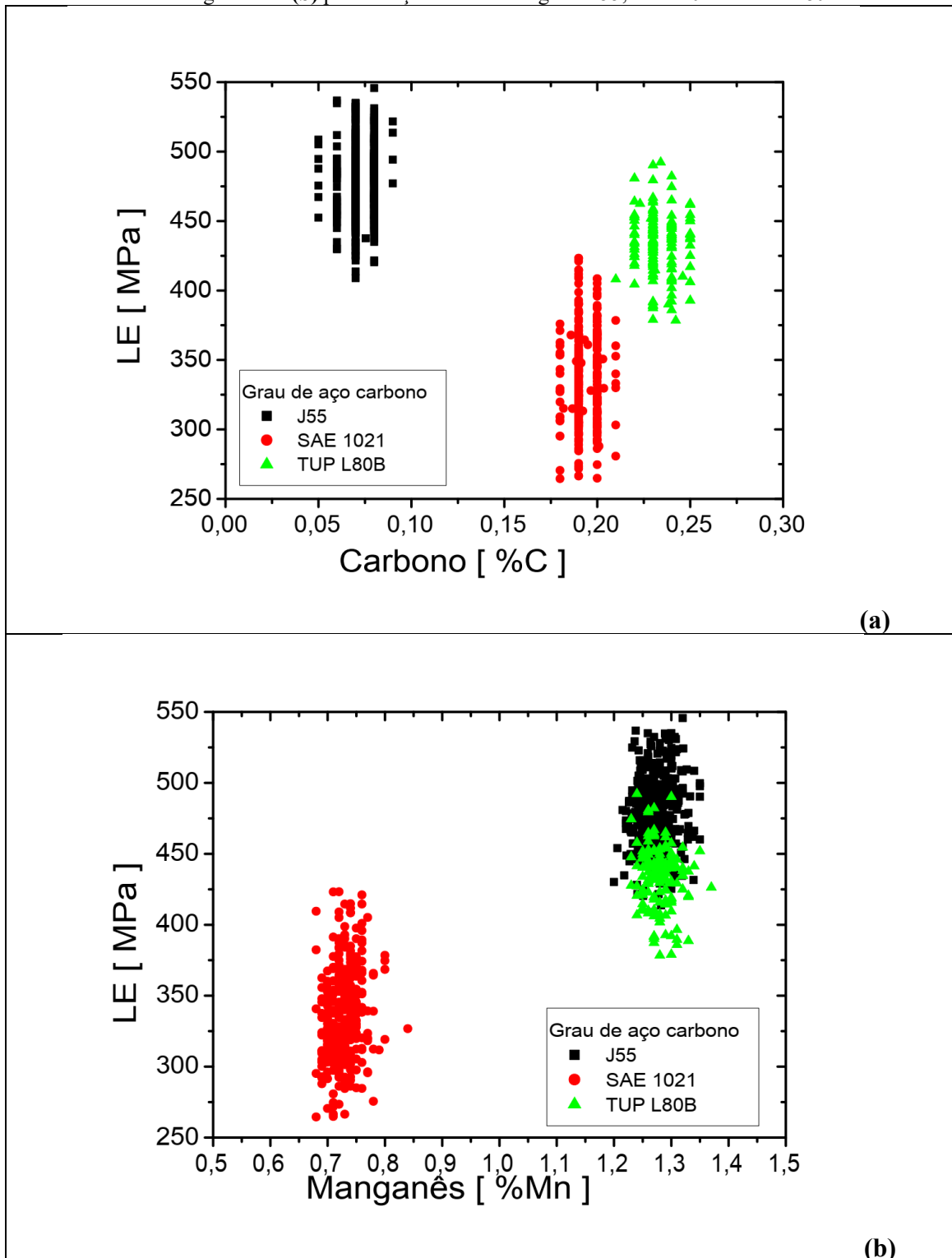
4.3 – RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DA PLANILHA RAP

As relações investigadas entre propriedade mecânica e composição química, assim como relação entre as propriedades mecânicas serão apresentadas.

4.3.1 – Relação entre propriedade mecânica e percentuais do carbono e manganês

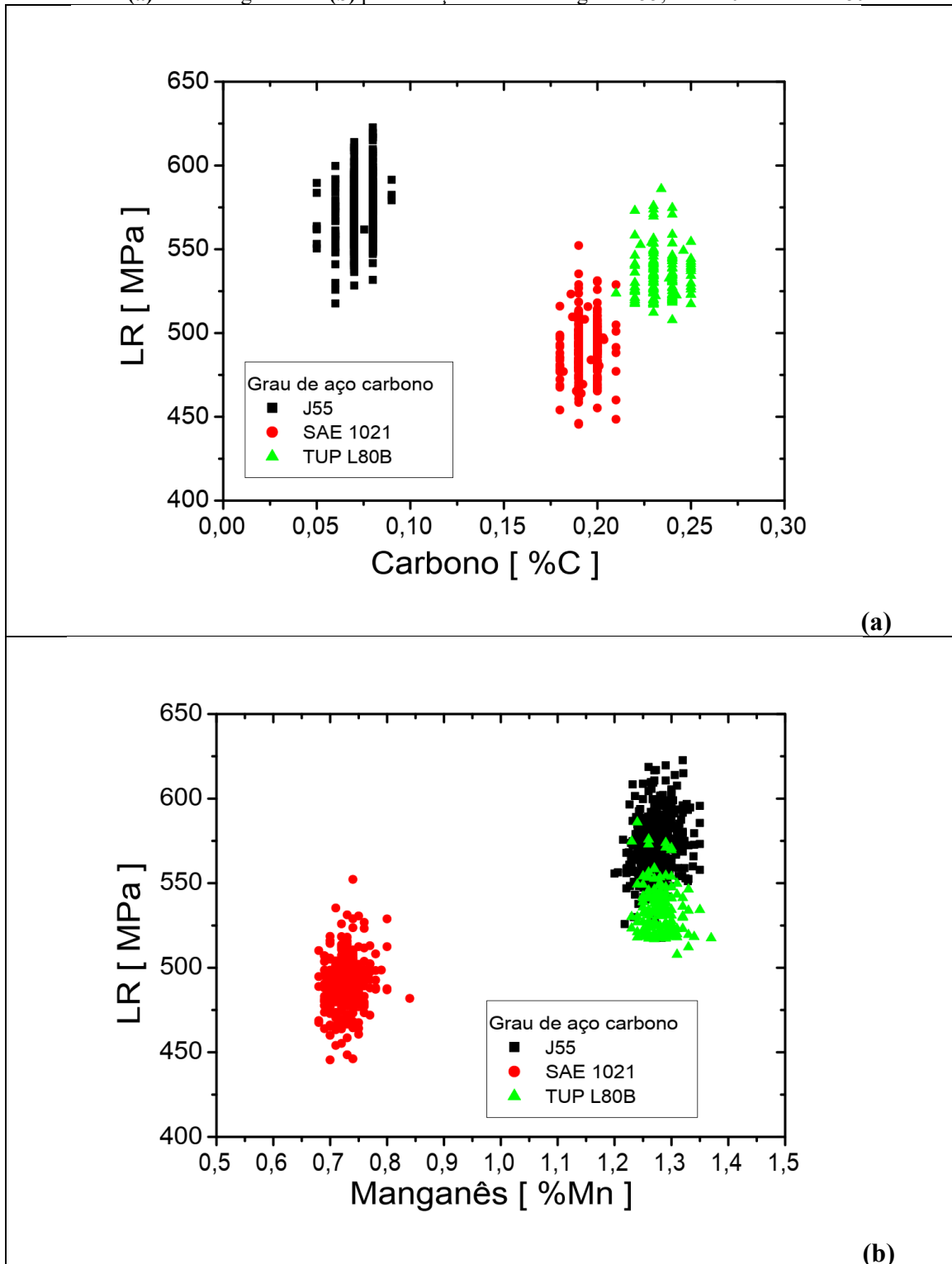
As Figuras 9 a 11 apresentam os gráficos confeccionados a partir dos dados da planilha RAP para os comportamentos das propriedades mecânicas em função dos percentuais de Carbono (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55 (símbolo na cor preta), SAE 1021 (símbolo na cor vermelha) e TUP L80B (símbolo na cor verde). Os comportamentos para o Limite de escoamento (*LE*), Limite de Resistência à Tração (*LR*) e Alongamento (*AL*) são, respectivamente, apresentados nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Comportamento do Limite de Escoamento (LE) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B



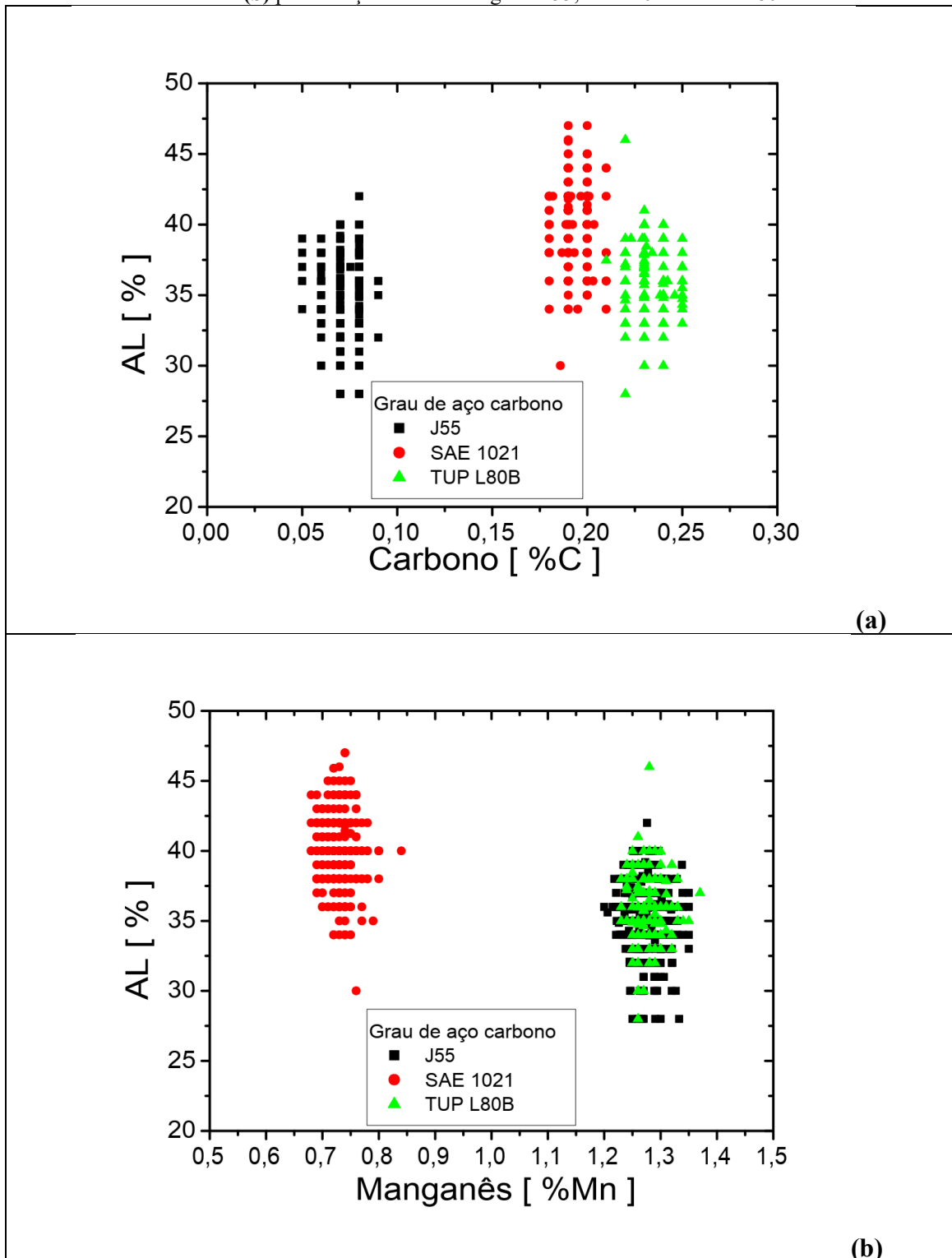
Fonte: Autor (2022).

Figura 10 – Comportamento do Limite de Resistência à Tração (LR) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B



Fonte: Autor (2022).

Figura 11 – Comportamento do Alongamento (AL) em função dos percentuais de Carbono em (a) e de Manganês em (b) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B



Fonte: Autor (2022).

Nota-se na Figura 9(a) a ocorrência do aumento no LE para os valores percentuais na média de 0,23% do elemento químico carbono para o grau de aço TUP L80B. Já no grau de aço J55, ocorre a redução do carbono e o aumento de LE . Isso se justifica com o elevado percentual de manganês evidenciado na Figura 9(b), esta variação pode ser esclarecida no Apêndice A.

Os resultados identificados para o LE seguem o mesmo comportamento para o LR (Figura 10), tanto para o elemento químico carbono (Figura 10(a)) quanto para o manganês (Figura 10(b)), nas três normas de grau de aço carbono.

Na Figura 11, os valores de AL (Figura 11) não crescem ou decrescem em relação aos aumentos nos percentuais dos elementos químicos carbono e manganês. Ressalta-se que para obter um comportamento mais assertivo, diferentes aços carbono devem ser avaliados e incluídos nos mapas de pontos das Figuras 9 a 11, em estudos futuros.

Gráficos das propriedades mecânicas LE , LR e AL em função dos percentuais dos elementos químicos fósforo (P) e enxofre (S) não apresentaram uma tendência representativa, a fim de justificar a inclusão de outros 3 (três) gráficos nesta seção.

4.3.2 – Relação entre as propriedades mecânicas

A Figura 12 apresenta o comportamento mecânico do Limite de Escoamento (LE) na parte (a) e do Limite de Resistência à Tração (LR) na parte (b) em função do Alongamento (AL) para ambos os gráficos, respectivamente, para os aços carbono de graus J55 (símbolo na cor preta), SAE 1021 (símbolo na cor vermelha) e TUP L80B (símbolo na cor verde).

No canto superior direito de ambos os gráficos de pontos, os valores médios dos dados das propriedades mecânicas, para os três graus de aços carbono, foram ajustados pela regressão linear, em que as expressões foram obtidas:

$$LE = 1484,28 - 28,82 AL \quad (11)$$

$$LR = 1098,44 - 15,30 AL \quad (12)$$

as quais indicam um comportamento mecânico decrescente de LE e LR [MPa] em função de AL [%], ou seja, com as tensões de escoamento e máxima decrescem com o acréscimo do alongamento.

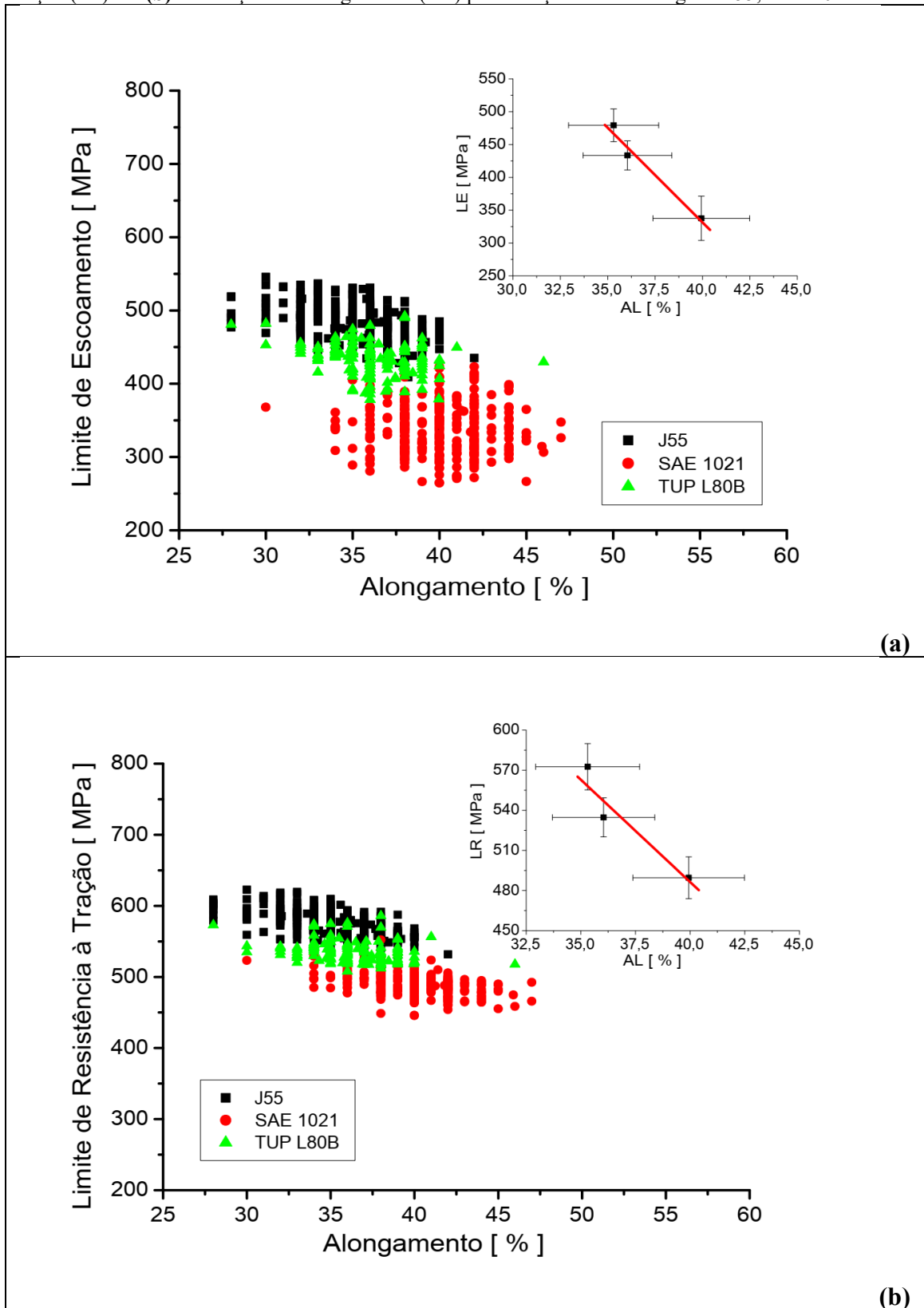
O coeficiente de correlação (R) indica o grau de aderência do modelo linear aos pontos (AL , LE) e (AL , LR) dos gráficos da Figura 12, em que os valores obtidos foram $R = 0,9745$ para o gráfico LE versus AL , e $R = 0,94301$ para o gráfico LR versus AL . Esses resultados dos coeficientes de correlação corroboram com os cálculos dos coeficientes de variação das

propriedades mecânicas apresentados no Quadro 21, assim como pelo critério de homogeneidade dos dados apresentados por Fávero *et al.* (2009, apud CERQUEIRA; NEDER, 2017, p. 139).

A correlação de redução de LR com o aumento de AL foi evidenciada na seção 2.4.2 pelo estudo de Wang *et al.* (2018), em que um comportamento mecânico decrescente de LR no intervalo de 625 a 1375 MPa em função de AL para o intervalo de 7,50 a 36,25% foi observado.

Nesse estudo, Figura 12(b) e dados do Quadro 21, o comportamento mecânico de LR no intervalo de 445,5 a 622,7 MPa em função de AL para o intervalo de 28 a 47% foi observado. Elevados valores de limite de escoamento e limite de resistência à tração estão relacionados com menores valores de alongamento, indicando um decréscimo na ductilidade e baixos valores do módulo de tenacidade.

Figura 12 – Comportamento mecânico do Limite de Escoamento (LE) em (a) e do Limite de Resistência à Tração (LR) em (b) em função do Alongamento (AL) para os aços carbono de graus J55, SAE 1021 e TUP L80B



Fonte: Autor (2022).

5 – CONCLUSÕES

Este trabalho de uma forma geral consistiu em uma análise de dados dos percentuais dos elementos químicos carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), obtidos dos certificados das bobinas de aço carbono; e das propriedades mecânicas de limite de escoamento (*LE*), limite de resistência à tração (*LR*) e alongamento (*AL*), obtidos a partir dos ensaios mecânicos de tração de corpos de prova retirados de tubos de aço carbono.

Os requisitos de atendimento (valor mínimo ou máximo, conforme o caso) para as normas de grau de tubo de aço carbono foram avaliados a partir de cálculos de percentuais de atendimento, com o objetivo de verificar quais normas de graus de aço carbono que atendem as normas de graus de tubo de aço carbono. Esta análise foi aplicada para os 4 (quatro) percentuais de elementos químicos (EQ) e para as 3 (três) propriedades mecânicas (PM), considerando em ambas as análises, os dados dos EQ e das PM informados na planilha RAP para os aços Tuper S/A grau J55, SAE J403 grau SAE 1021 e Tuper S/A grau TUP L80B.

Foi evidenciado que o grau de aço SAE 1021 atendeu todas as normas de graus de tubos de aço carbono para os percentuais de elementos químicos, já o grau de aço J55 não conseguiu atender a especificação do manganês para as normas de grau de tubo de aço NBR 5590 grau A, e para a norma NBR 5590 grau B o atendimento foi parcial. Para o grau de aço carbono TUP L80B o atendimento foi parcial no elemento químico carbono para as normas de graus de tubos de aço carbono ASTM A500 grau B, NBR 8261 graus A e B, e no elemento químico manganês não ocorreu atendimento para a norma de graus de tubos de aço carbono NBR 5590 graus A e B.

O grau de aço carbono J55 atendeu a especificação de PM de *LE*, *LR* e *AL* para todas as normas de grau de tubo de aço carbono, entretanto o grau de aço carbono SAE 1021 obteve um atendimento parcial para o *LE* nas normas ASTM A500 (Graus A e B) e NBR 8261 (Grau B), e por fim, obteve um baixo atendimento para a norma API 5CT (Grau J55) para *LE* e *LR*. O grau de aço carbono TUP L80B somente não atendeu na totalidade, devido a um pequeno percentual de não atendimento na norma de grau de tubo de aço carbono API 5CT (Grau J55).

Além disso, o estudo em questão apresentou a análise do coeficiente de variação para os 4 (quatro) elementos químicos e para as 4 (quatro) propriedades mecânicas (*LE*, *LR*, *AL* e *MT*) dos aços carbono de graus (J55, SAE 1021 e TUP L80B), sendo separados por faixas de intervalo de homogeneidade em nível alto, médio e baixo. Os resultados obtidos para os *CV* dos percentuais dos elementos químicos, na maior parte dos casos, foram de alta homogeneidade. Já para os *CV* das propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*), todos os resultados ficaram abaixo

de 10% em relação aos graus de aço carbono (J55, SAE 1021 e TUP L80B), demonstrando uma alta homogeneidade.

Após análise da relação entre as propriedades mecânicas (*LE* e *LR*) e a composição química com os elementos carbono (C) e manganês (Mn), foi evidenciado com os dados representados graficamente, que conforme ocorre o aumento do carbono e manganês, um aumento de *LE* e *LR* é observado. Já os valores de *AL* não crescem ou decrescem em relação aos aumentos nos percentuais dos elementos químicos carbono e manganês, mantendo-se aproximadamente com comportamento constante.

A correlação entre os dados de propriedades mecânicas de *LE* e *LR* em função do *AL*, para as 3 (três) normas de graus de aço carbono, apresenta de acordo com valores elevados de limite de escoamento e limite de resistência à tração estão relacionados com menores valores de alongamento, indicando uma redução na ductilidade e baixos valores do módulo de tenacidade.

Com esse estudo uma metodologia foi desenvolvida a partir da análise de dados dos percentuais de elementos químicos (C, Mn, P e S) e das propriedades mecânicas (*LE*, *LR* e *AL*) para as normas de grau de aço TUPER S/A grau J55, SAE J403 grau SAE 1021 e TUPER S/A grau TUP L80B obtidos do Relatório de Análise de Produto (RAP); em que a principal contribuição acadêmica para a indústria Tuper S/A foi a verificação dos percentuais de atendimento de normas de grau de aço carbono que satisfazem normas de grau de tubo de aço carbono.

Como propostas para trabalhos futuros à execução, utilizando a mesma metodologia, a sugestão será realizar uma amostragem de maior amplitude de aços ao estudo efetuado, para os graus de aço carbono em relação ao atendimento aos graus de tubos de aço carbono. O universo de aços comercializados no mundo é expressivo e apresenta as mais variadas flutuações de valores percentuais dos elementos químicos, dessa forma, se tornando uma riqueza científica e tecnológica sem precedentes de informações e resultados tanto em âmbito acadêmico quanto industrial.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API 5CT**: Casing and Tubing Specification. Washington, 2018.

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

ARAÚJO, W. J. P.; MELLO, C. H. P. Uma revisão sistemática de literatura para a terceirização de pesquisa & desenvolvimento. In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 9, 2013, Natal. **Anais do 9º CBGDP – Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Natal: UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013, p. 1-10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5590**: Tubos de aço-carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8261**: Tubos de aço-carbono, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro, 2019.

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

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2008.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**: an introduction. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 1991.

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

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, n. 8, 2011, Porto Alegre. **Anais do 8º CBGDP – Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Porto Alegre: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, p. 1-12.

ENDLER, K. **Análise do comportamento mecânico de tubos de aço com variação dimensional**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville (SC), 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/220048/PPCM0042-D.pdf?sequence=%201%20&%20isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2021.

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

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

GALHARDI, C. H. **Projeto, construção e avaliação do comportamento mecânico de um atenuador de impacto de um veículo fórmula SAE**. 74 f. Trabalho de Graduação (Bacharel em Engenharia Automotiva) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/177530>. Acesso em: 19 ago. 2021.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 1ª Edição em 2000 e Reimpressão em 2008. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2008.

GONG, Y.; LI, J.; ZHAO, S. P.; SUN, W. L.; LI, R. F.; WANG, G. H. Design and processing optimization of hollow grouted bolt for failure prevention. **Engineering Failure Analysis**, Amsterdam, v. 132, n. 1, p. 1-7, 105879, nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630721007408?via%3Dihub>. Acesso em: 19 abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105879>.

JHA, S. K. Investigation of micro-structure and mechanical properties of three steel alloys. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, Pekan, v. 14, n. 2, p. 4315-4331, jun. 2017. Disponível em: https://ijame.ump.edu.my/images/Volume%2014%20Issue%202%20June%202017/15_%20Jha.pdf. Acesso em: 09 mar. 2022. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.2.2017.15.0344>.

LIN, Z.; WANG, S.; HE, J.; LIU, B.; CHEN, C.; FENG, J.; ZHANG, X.; FANG, W.; YIN, F. The effect of Ni interlayer on the hot-rolled and quenched stainless steel clad plate. **Materials**, Basileia, v. 13, n. 23, p. 1-15, 5455, nov. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/23/5455>. Acesso em: 29 mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma13235455>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 7ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2013.

MARTINS, G. A. Estudo de Caso: uma reflexão sobre a aplicabilidade em pesquisas no Brasil. **RCO – Revista de Contabilidade e Organizações**, v. 2, n. 2, p. 9-18, abr. 2008. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rco/article/view/34702>. Acesso em: 22 jun. 2021. <https://doi.org/10.11606/rco.v2i2.34702>

MENEZES, A. H. N.; DUARTE, F. R.; CARVALHO, L. O. R.; SOUZA, T. E. S. **Metodologia Científica Teoria e Aplicação na Educação a Distância**. Petrolina: Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2019. E-book. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/noticias/univasf-publica-livro-digital-sobre-metodologia-cientifica-voltada-para-educacao-a-distancia/livro-de-metodologia-cientifica.pdf/view>. Acesso em: 22 jun. 2021. ISBN: 978-85-60382-91-0.

NICHOLS, R K. High frequency welding: The process and applications. A Thermatool Corp. Publication. East Haven, 1999. Disponível em: <https://www.thermatool.com/resources/technical-papers/>. Acesso em: 19 ago. 2021.

CERQUEIRA, C. A.; NEDER, H. D. Referencial Metodológico para Demarcação Homogênea de um Território. In: ORTEGA, A. C.; PIRES, M. J. S. de (Ed). **As Políticas Territoriais Rurais e a Articulação Governo Federal e Estadual: um estudo de caso da Bahia**. Brasília: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. p. 135-150. E-book. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=30545. Acesso em: 15 mar. 2022.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE INTERNATIONAL). **SAE J403**: Chemical composition of SAE carbon steel. Warrendale, 2014.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2010.

SOUZA, S. A. **Composição química dos aços**. 1ª Edição em 1989 e 6ª Reimpressão em 2019. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2019.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1986.

TUPER S/A. **Especificação Técnica de Bobinas ArcelorMittal S. A. para Tubos API**. São Bento do Sul, 2022.

TUPER S/A. Tabela Técnica de Produtos. São Bento do Sul, 2019. Disponível em: <https://tuper-prd.s3.sa-east-1.amazonaws.com/uploads/2021/08/Tabela-Tecnica-de-Produtos-Tuper-2022.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

VIEIRA, D. M. M.; SANTOS, B. P.; HAAG, J.; COSTA, V. M.; 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, p. 245-252. In: 13º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, vol. 13, número 13, 2013, São Paulo. ISSN: 2594-4711. DOI: 10.5151/2594-4711-23238. **ABM Proceedings**. São Paulo: 68º Congresso Anual da ABM, 2013, p. 2358-2365. Disponível em:

<https://abmproceedings.com.br/en/article/estudo-comparativo-das-propriedades-mecnicas-atravs-de-ensaio-de-trao-em-corpos-de-prova-normalizados-e-em-componentes>. Acesso em: 19 ago. 2021.

WANG, Y.; SUN, J.; JIANG, T.; SUN, Y.; GUO, S.; LIU, Y. A low-alloy high-carbon martensite steel with 2.6 GPa tensile strength and good ductility. **Acta Materialia**, Cambridge, v. 148, n. 1, p. 247-256, jul. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418306001?via%3Dihub>.

Acesso em: 25 mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.060>.

YI, H. L.; DU, L. X.; WANG, G. D.; LIU, X. H. Development of a Hot-rolled Low Carbon Steel with High Yield Strength. **ISIJ International**, Tokyo, v.46, n. 5, p. 754-758, fev. 2006. Disponível em:

https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/46/5/46_5_754/_article.

Acesso em: 15 mar. 2022. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.754>.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 4ª Edição. Porto Alegre: Bookman Editora, 2010.

APÊNDICE A – INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

A1. CARBONO

O Carbono representa o elemento que possui mais influência nos aços de todo tipo de resistência (baixa, alta e média resistência) e atua de diversas maneiras na composição química deste tipo de material.

Chiaverini (2008, apud ENDLER, 2019) denota que o carbono é o elemento predominante nos aços carbono esfriados normalmente, onde ocorre a transformação total da austenita, e com o aumento do teor do elemento (C), as propriedades mecânicas *LE* e *LR* aumentam, mas *AL* diminui (CHIAVERINI, 2008).

Souza (2019, p. 51), afirma que aumentar o teor de carbono para 0,8% nos aços-carbono normalizados aumenta a temperatura de transição tenacidade-fragilidade e diminui a tenacidade do material.

Na microestrutura dos aços, os efeitos do carbono são diversos. Nos aços com 0,03% de Carbono (C) ou menos que isso em sua composição, é possível observar a pequena presença de nódulos de perlita, que tem um efeito quase nulo em relação a tenacidade do material. Quando o teor de carbono do material é aumentado, observa-se que a “perlita já começa a influir no decréscimo de ductilidade e de tenacidade, principalmente na posição da curva de transição dúctil-frágil”. O crescimento no teor de perlita gera endurecimento e aumenta a resistência mecânica do aço. Este aumento da resistência mecânica do aço acontece em função de, por exemplo, o carbono reduzir a temperatura de transformação austenita-ferrita, fazendo com que o tamanho do grão de ferrita seja reduzido, quando mais é aumentada a velocidade em que ocorre o resfriamento da austenita (SOUZA, 2019).

A razão para a baixa soldabilidade dos aços de alto carbono é a formação de carbonetos (Fe_3C) e martensita em aços temperáveis, que são componentes duros e frágeis que tendem a formar trincas durante a solda. Aços com até 0,30% de carbono podem ser soldados por qualquer método de solda, no entanto, aços carbono com teor de carbono acima de 0,30% e alto teor de manganês só podem ser soldados por técnicas especiais (SOUZA, 2019).

De acordo com Souza (2019), o aumento no percentual de carbono da composição do aço torna este menos usinável, assim, quanto maior o teor de carbono, menor é a usinabilidade do aço e, para que esta condição seja revertida, são necessários tratamentos térmicos bem controlados.

A austenita retida após a têmpera ocorre apenas quando o carbono está presente em aços de baixa liga (acima de 0,4% C). Portanto, “a reação de decomposição da austenita retida deve ser considerada apenas em aços de médio e alto carbono” (SOUZA, 2019).

A propriedade máxima relacionada a dureza que pode ser obtida em aços temperados formados no todo a partir de martensita depende do teor de carbono e não do teor do elemento de liga, visto que os elementos de liga apenas aumentam, enfraquecem ou neutralizam o efeito do carbono (SOUZA, 2019).

O carbono representa o elemento que possui o maior efeito na temperabilidade, principalmente quando está presente como elemento de liga para atingir a dureza máxima. No entanto, quanto maior o teor de carbono, mais a fragilidade do material aumenta. Além disso, à medida que a dureza aumenta, aumenta também a resistência ao desgaste, dificultando a usabilidade e também o trabalho mecânico a frio, há também o risco de superaquecimento durante o trabalho mecânico a quente, e também é provável que ocorram trincas e deformações durante o tratamento térmico. Portanto, acima de 0,60% C, é dificilmente utilizado em aços de alta resistência, exceto para molas (SOUZA, 2019).

Em geral, a forma menos custosa de aumentar a temperabilidade de um aço carbono em uma certa porcentagem de C, é buscar o aumento no teor de manganês deste. O carbono tem uma moderada tendência a segregar, e por ser o principal elemento para obtenção das propriedades mecânicas do aço, sua segregação é bastante relevante, mesmo sendo o elemento que tem maior efeito na temperabilidade do aço (SOUZA, 2019).

A2. MANGANÊS

Chiaverini (2008, apud ENDLER, 2019) denota que o manganês também atua no aço para aumentar a resistência mecânica, mas o excesso desse elemento pode levar a inclusões não metálicas (CHIAVERINI, 2008, p. 180).

O teor de manganês está na faixa que permite a formação de MnS ao invés de FeS, o que é prejudicial à ductilidade do material, principalmente no que se refere ao trabalho mecânico do aço. Pode-se afirmar que o Mn não causa fragilidade no aço, e se o teor de manganês for alto, mas dentro da faixa permitida, o manganês restante (não combinado com enxofre) é usado para aumentar a força da solução sólida na ferrita (SOUZA, 2019).

Quando o manganês é dissolvido em ferrita, aumenta muito sua dureza e resistência mecânica, mas reduz muito pouco sua ductilidade. Portanto, este elemento de liga pode ser usado para aumentar a resistência de aços doces (SOUZA, 2019).

Usa-se o manganês para controlar os efeitos negativos do enxofre, formar inclusões de Mn e atuar como desoxidante (COSTA; MEI, 2010).

A principal função do manganês é combinar com o enxofre para formar sulfeto de manganês (MnS), evitando a formação de sulfeto de ferro (Fes), que pode enfraquecer o aço, especialmente em temperaturas mais altas. O sulfeto de manganês não causa fragilização, portanto, o metal pode ser trabalhado a quente sem que ocorram problemas relacionados a fragilização. O teor de manganês habitualmente verificado nos aços (0,5% Mn) é suficiente para esta finalidade (SOUZA, 2019).

O manganês geralmente não é usado para desoxidação do aço porque existem outros elementos mais eficazes para esta finalidade (SOUZA, 2019).

Quando o teor de manganês é maior, a tenacidade do aço carbono também pode ser melhorada reduzindo a temperatura de transformação da austenita, para refinar os grãos de perlita no aço de baixo carbono (SOUZA, 2019).

De acordo com Souza (2019, p. 51), “o manganês até 1,5%, reduz a temperatura de transição dúctil-frágil e aumenta a tenacidade do aço”.

O manganês estando presente como elemento de liga, além de aumentar a resistência do aço, também aumenta a ductilidade frente a tensões estáticas e dinâmicas. Nos aços de baixo carbono (cerca de 0,05%) que sejam recozidos ou normalizados, o efeito do manganês é reduzir a tendência de formar filmes de cementita nos contornos de grão, fazendo com que a tenacidade do material aumente (SOUZA, 2019).

No aço tratado termicamente, o manganês afeta a temperabilidade da austenita, reduzindo a temperatura eutetóide, além de reduzir a porcentagem de carbono no aço eutetóide. Assim, as propriedades mecânicas alcançadas em aços carbono eutetóides podem ser alcançadas com menor teor de carbono em aços com maior teor de manganês e com adições de níquel. O mesmo pode ser dito para o uso de uma temperatura de revenimento mais baixa do que a utilizada para o aço carbono. O manganês é um refinador fraco de grãos de austenita (SOUZA, 2019).

O manganês é um dos elementos mais eficazes para diminuir a temperatura de transformação da bainita devido à sua alta solubilidade em austenita em aços de baixo carbono. Quando apresenta um teor de aproximadamente 1%, o manganês favorece a formação de bainita após o resfriamento do estado austenítico (SOUZA, 2019).

Na têmpera, o manganês se comporta de forma parecida com o carbono, mas diminui a velocidade do amolecimento da estrutura temperada, resultando em um material com maior dureza e resistência. Quando o manganês é classificado com teor de 1% ou mais, pode ser

considerado um elemento de liga, tornando a martensita revenida mais dura do que os graus residuais, como o aço carbono (até 0,30%), porém, o manganês faz aumentar a austenita retida após a têmpera com uso do resfriamento em óleo (SOUZA, 2019).

O manganês entre 1% e 1,35% proporciona boas propriedades de impacto e reduz a temperatura de transição dúctil-frágil do aço, permitindo que o material seja utilizado em temperaturas mais baixas. Este elemento ainda aumenta a suscetibilidade a trincas das juntas soldadas, especialmente quando o teor de carbono do aço é alto (SOUZA, 2019).

Finalmente, o manganês ajuda a aumentar a resistência à corrosão atmosférica e ácida, embora não seja adicionado para esse fim, pois o aumento não é representativo (SOUZA, 2019).

A3. FÓSFORO

De acordo com Souza (2019, p. 42) “o fósforo não é considerado um elemento de liga, embora esteja sempre presente nos aços como elemento residual”. O mesmo autor ainda afirma que o fósforo trata-se de um estabilizador de ferrita, que gera seu endurecimento por entrar em solução nela em aços de baixo carbono. Em função disso, o fósforo acaba enfraquecendo consideravelmente o material, mesmo assim, em teores baixos pode-se admitir o fósforo, especialmente com teores de manganês também baixos, visando melhorar a estampabilidade profunda de chapas de baixo carbono acalmado com alumínio, fazendo com que o efeito negativo do manganês seja eliminado nesse caso (SOUZA, 2019).

Chiaverini (2008, apud ENDLER, 2019) denota que o fósforo trata-se de um elemento considerado prejudicial ao aço por torná-lo quebradiço a frio, mas menos prejudicial para aços com baixo carbono (CHIAVERINI, 2008, p.178).

De acordo com Souza (2019) o fósforo é responsável por diminuir a tenacidade dos aços carbono.

Quando o fósforo se dissolve na ferrita ocorre o seu endurecimento fazendo com que ocorra a fragilização à frio, que está relacionada a uma baixa resistência ao choque e também uma baixa tenacidade, fatores que podem ser acentuados por meio do aumento do percentual de carbono na composição do aço. O fósforo também se trata de um dos responsáveis pelos fenômenos de fragilidade de revenido. Em função disso, o teor máximo desse elemento no aço é rigorosamente controlado, entre 0,005 e 0,1%, em acordo com a qualidade desejada e da aplicação pretendida do aço (COSTA; MEI, 2010).

Para facilitar a soldagem do aço, devem ser utilizados aços estruturais com menor teor de carbono (cerca de 0,15%) e maior teor de fósforo, chamados aços refosforados, mas, ainda

assim, a soma do teor de C+P deve ser inferior a 0,25% para que não ocorra a perda de ductilidade (SOUZA, 2019).

O fósforo também é adicionado aos aços refosforados na forma de enxofre porque se dissolve em ferrita, gerando seu endurecimento, facilitando a operação de corte. O teor de 0,12% de fósforo é o máximo usado, visando evitar que o aço se torne muito frágil (SOUZA, 2019).

Souza (2019, p. 53) afirma que “o fósforo aumenta fracamente a temperabilidade da austenita, além de aumentar a possibilidade de fragilidade ao revenido”. Além disso, em teores de até 0,15% de fósforo, quando o cobre está presente, aumenta-se a resistência do aço estrutural à corrosão atmosférica e ambientes ácidos. A fragilização apresentada pelo fósforo é a principal razão para mantê-lo em níveis residuais no aço, uma vez que o maior teor de fósforo exacerba a fragilização devido à formação excessiva de fosfeto de ferro. Níveis mais altos de fósforo são permitidos quando os aços precisam ter maior usinabilidade (SOUZA, 2019).

Mesmo que o fósforo apresente algumas vantagens como elemento de liga nos aços carbono, como maior resistência à corrosão e ao desgaste, melhor usinabilidade dos aços de corte rápido e até mesmo uma melhora na resistência mecânica, o elemento tem na sua maioria efeitos nocivos ao aço, sendo assim, considerado uma impureza (COSTA; MEI, 2010)

A4. ENXOFRE

A presença de enxofre no aço é comum como um elemento residual em teores baixos. O elemento (S) é considerado como um elemento que prejudica as propriedades mecânicas dos aços, visto que ele pode causar fragilidade a frio e a quente, ou seja, baixa resistência ao impacto, baixa ductilidade e baixa resistência à fadiga, em função da formação do sulfeto de ferro, que ocorre nos contornos dos grãos de ferrita e perlita (SOUZA, 2019).

Chiaverini (2008, apud ENDLER, 2019) denota que o enxofre é um elemento considerado extremamente nocivo no aço pois ele reduz a soldabilidade, além de desfavorecer a tenacidade e ductilidade do aço, em função disso, a maior parte das normas designam valores baixos como considerados aceitáveis.

De acordo com Souza (2019), em teores que não ultrapassem 0,040%, o enxofre não afeta a tenacidade do aço processado.

A dessulfuração do aço é realizada principalmente pelo manganês, que forma o sulfeto de manganês, que é distribuído uniformemente por toda a estrutura. O sulfeto de manganês tem baixo ponto de fusão e alta plasticidade, e a remoção do sulfeto de ferro não causará danos em

questão. A dessulfuração também pode ser realizada por metais constituintes de cálcio e terras raras, que também são desoxidantes. Os sulfetos de metais como o cério (pertencente ao grupo das terras raras) são pouco maleáveis e permanecem solidificados esferoidalmente durante a laminação a quente, reduzindo a anisotropia nas propriedades mecânicas do aço (SOUZA, 2019).

A anisotropia é prejudicial à ductilidade perpendicular à direção de laminação. Visto que o cálcio e os metais de terras raras também são desoxidantes, o teor de oxigênio no aço deve ser baixo para que o desempenho de dessulfuração seja satisfatório. O teor de enxofre no aço não deve ultrapassar 0,030%, mantendo-se sempre baixo (SOUZA, 2019).

Como o enxofre ajuda a melhorar a usinabilidade dos aços carbono, níveis mais altos desse elemento são permitidos em aços resulfurados (SOUZA, 2019).

Quando a estampabilidade do aço baixo carbono precisa ser melhorada, um certo teor de enxofre livre é deixado, reduzindo o teor de manganês no aço. Ainda, quando existe enxofre na forma de sulfeto, melhora-se a usinabilidade e a resistência à fadiga dos aços para mancais (SOUZA, 2019).


O enxofre melhora a usinabilidade porque o sulfeto de manganês é formado em esferóides ou alongado por trabalho mecânico (SOUZA, 2019).

O enxofre (S) ainda aumenta ligeiramente a resistência à corrosão do aço em ambiente ácido, porém, devido ao seu alto grau de segregação na forma livre, reduz sua soldabilidade e prejudica a qualidade superficial do aço (SOUZA, 2019).

**APÊNDICE B - 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 o colaborador Rodrigo Müller, inscrito sob CPF 079.660.399-51 a utilização de dados e valores de composição química e propriedades mecânicas contidos na planilha RAP dos referidos anos de 2017 a 2021 para a confecção da Dissertação de Mestrado intitulada “ESTUDO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO CARBONO: UMA ANÁLISE DE DADOS” ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina, bem como a publicação dos resultados da pesquisa em periódicos especializados.



Jailson Rodrigo Planca
Diretor Comercial Cooperativo
Tuper S/A
CPF 720.200.599-91

Jailson Rodrigo Planca - Diretor Industrial

São Bento do Sul, 11 de julho de 2022.