



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Departamento Acadêmico de Sistemas, Processos e Controles Industriais

Engenharia Mecânica

DEISIANE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE SEQUÊNCIAS TERMOMECÂNICAS NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ARBL API 5L X80**

Recife

2023

DEISIANE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE SEQUÊNCIAS TERMOMECÂNICAS NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ARBL API 5L X80**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento Acadêmico de Sistemas, Processos e Controles Industriais em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino

Recife

2023

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

O48e  
2023

Oliveira, Deisiane Santos de

Estudo da influência de sequências termomecânicas nas propriedades mecânicas do aço arbl api 5l x80. / Deisiane Santos de Oliveira. -- Recife: A autora, 2023.

51f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

Inclui Referências e Glossário.

Orientador: Professor Dr. Tiago de Sousa Antonino.

1. Aço ARBL API 5L X80. 2. Propriedades mecânicas. 3. Sequências termomecânicas. I. Título. II. Antonino, Tiago de Sousa (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

DEISIANE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE SEQUÊNCIAS TERMOMECÂNICAS NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ARBL API 5L X80**

Trabalho aprovado. Recife, 14 / 02 / 2023.

---

Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino  
Professor Orientador

---

Prof. Dr. Pablo Batista Guimarães  
Avaliador Interno

---

Prof. Me. Éverton Fernandes da Silva  
Avaliador Externo

Recife

2023

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram durante esta trajetória  
e contribuíram de alguma forma para minha evolução  
acadêmica, pessoal e profissional.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me sustentar perante todos os desafios que apareceram e permitir que eu chegasse até aqui.

A toda a minha família, em especial aos meus pais, Adilma e Daniel, por apoiaram minhas escolhas e por me proporcionaram a oportunidade de seguir com os estudos durante minha trajetória, e aos meus irmãos, Daiane e Diêgo, por todo o apoio e por me encorajarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou durante a graduação.

Aos professores do GMA&SC, em especial ao meu orientador: prof<sup>o</sup> Dr. Tiago de Sousa Antonino, por ter me dado a oportunidade de entrar no âmbito da pesquisa (através das IC's), por ter se dedicado, me orientado durante a elaboração dos projetos, pelas conversas, por tudo, principalmente por acreditar no meu potencial!

A todos os professores e professoras que contribuíram com a minha formação acadêmica, por dividirem seus ensinamentos e experiências.

A Alisson, Edilson, Everton e aos técnicos Elinaldo e Josiel, por terem me dado suporte na parte experimental do projeto.

Aos meus colegas de curso que compartilharam de incontáveis desafios, descobertas e aprendizados durante essa jornada.

A todos os meus amigos, obrigada por deixarem meus dias mais leves e compartilharem seus conhecimentos comigo.

A Assuero Rafael de Miranda Mastroianni, meu chefe de estágio na M. Dias Branco (Vitarella), por ter me dado a oportunidade de ter meu primeiro contato com o meio industrial enquanto ainda estava na graduação, e por toda contribuição para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Agradeço também a todos com quem convivi na empresa e que contribuíram de alguma forma para minha evolução.

Ao IFPE, *Campus* Recife, por todas as oportunidades dadas durante o percurso e por, junto à UFPE, ter disponibilizado seus laboratórios para o desenvolvimento deste TCC.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pelo fomento às pesquisas realizadas por mim desde o curso técnico de Mecânica Industrial até a graduação de Engenharia Mecânica.

A todos, o meu muito obrigada.

*Seja a mudança que você quer ver no mundo - Mahatma Gandhi*

## RESUMO

Com a necessidade de se projetar novos aços para uso em sistemas dutoviários, surgiu o desenvolvimento dos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), onde, entre eles, temos o API 5L X80, um aço amplamente utilizado na fabricação de tubulações para linhas de transmissão de petróleo e gás natural no Brasil. Neste trabalho, foi estudado o efeito de sequências termomecânicas nas propriedades mecânicas deste aço. Para isto, amostras foram cortadas e, com elas, foram realizadas três rotas termomecânicas (aquecimento → laminação → resfriamento em água). Após aquecimento até 950 °C para austenitização do aço e permanência nesta temperatura durante 15 minutos, as amostras foram laminadas, alcançando redução de espessura de 10%, 15% e 20%. Em seguida, as amostras foram resfriadas bruscamente em água à temperatura ambiente, realizando, assim, o tratamento de têmpera. Após isso, foram fabricados os corpos de prova para realização de ensaio de tração nas amostras das 3 rotas termomecânicas e do material na condição de “como recebido”. Depois do tratamento dos dados, observou-se que, dentre as três rotas, a Rota 1 foi a que apresentou maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência. Já a Rota 3, dentre as três rotas realizadas, foi a que apresentou um maior valor de deformação específica. No geral, as amostras de todas as rotas realizadas apresentaram melhorias em suas propriedades mecânicas se comparadas às amostras do material como recebido. Assim, as sequências termomecânicas realizadas se mostraram como um bom caminho para a modificação/melhoria de propriedades mecânicas do aço API 5L X80.

Palavras-chave: Aço API 5L X80; propriedades mecânicas; rotas termomecânicas.



## ABSTRACT

With the need to design new steels for use in pipeline systems, the development of High Strength Low Alloy (HSLA) arose, where, among them, we have API 5L X80, a steel widely used in the manufacture of pipelines for oil and natural gas transmission lines in Brazil. In this work, the effect of thermomechanical sequences on the mechanical properties of this steel was studied. For this, samples were cut and, with them, three thermomechanical routes were carried out (heating → lamination → cooling in water). After heating up to 950 °C to austenitize the steel and remaining at this temperature for 15 minutes, the samples were laminated, achieving a reduction of thickness of 10%, 15% and 20%. Then, the samples were abruptly cooled in water at room temperature, thus carrying out the tempering treatment. After that, the specimens were manufactured to carry out tensile tests on the samples from the 3 thermomechanical routes and the material in the condition of “as received.” After processing the data, it was observed that, among the three routes, Route 1 was the one that presented the highest values of yield strength and resistance limit. Route 3, on the other hand, among the three routes performed, was the one that presented the highest specific deformation value. In general, the samples of all routes performed showed improvements in their mechanical properties when compared to the samples of the material as received. Thus, the thermomechanical sequences performed proved to be a good way to modify/improve the mechanical properties of API 5L X80 steel.

Keywords: Steel API 5L X80; mechanical properties; thermomechanical routes.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1. Propriedades Mecânicas para que o aço tenha classificação X80, X90 ou X100.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2. Composição química do aço API 5L X80 utilizado neste trabalho (% massa).....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 3. Rotas termomecânicas utilizadas nos experimentos. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 4. Resultados das propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração. ....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Malha de duto de gás natural.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2. Limite de escoamento de alguns aços API 5L de acordo com suas classes.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3. Desenvolvimento dos aços ARBL.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 4. Serra utilizada para realizar o corte do material para fabricação das amostras.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5. Centro de Usinagem CNC utilizado para fresar o material para confecção das amostras.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 6. Uma das amostras fabricadas para utilização nos tratamentos termomecânicos.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7. Forno utilizado nos experimentos.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 8. Sequência dos processos utilizados para realização dos tratamentos termomecânicos. (a) Amostras dentro do forno; (b) amostra sendo retirada do forno; (c) amostra entrando no laminador; (d) amostra saindo do laminador.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 9. (a) Laboratório de Tornearia do IFPE, Campus Recife; (b) Corpo de prova sendo usinado no torno mecânico.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 10. Dimensões médias do corpo de prova fabricado para posterior ensaio de tração.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11. Um dos corpos de prova fabricados.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 12. Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-200.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 13. Micrografia do aço API 5L X80 na condição de “como recebido”.</b>	<b>43</b>
<b>Figura 14. Micrografia do corpo de prova austenitizado durante 15 min, laminado com uma redução de 15% e temperado (aumento de 2.000X).</b>	<b>44</b>
<b>Figura 15. Micrografia do corpo de prova austenitizado durante 15 min, laminado com uma redução de 15% e temperado (aumento de 20.000X).</b>	<b>45</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material como recebido (C.R.).</b> .....	<b>35</b>
<b>Gráfico 2. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 1.</b> .....	<b>36</b>
<b>Gráfico 3. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 2.</b> .....	<b>37</b>
<b>Gráfico 4. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 3.</b> .....	<b>38</b>
<b>Gráfico 5. Gráfico do Limite de escoamento obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.</b> .....	<b>39</b>
<b>Gráfico 6. Gráfico do Limite de resistência obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.</b> .....	<b>39</b>
<b>Gráfico 7. Gráfico da Deformação específica obtida no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limite inferior especificado pela API 5L para o grau X80.</b> .....	<b>40</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AAC – Resfriamento Acelerado

Al – Alumínio

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API – *American Petroleum Institute*

API 5L – *Specification for Line Pipe*

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

B – Boro

C – Carbono

Ca – Cálcio

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CP – Corpo de Prova

Cr – Cromo

Cu - Cobre

IC – Iniciação Científica

IFPE – Instituto Federal de Pernambuco

GMA&SC – Grupo de Materiais Aplicados & Simulações Computacionais

HSLA – *High Strength Low Alloy*

ksi – Unidade de pressão no sistema inglês, vale 1000 psi

LC – Laminação Controlada

MA – Martensita + Austenita retida

Máx. – Máximo

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mín. – Mínimo

mm – Milímetros

Mn – Manganês

MO – Microscopia Óptica

Mo – Molibdênio

MPa – Megapascal

N – Nitrogênio

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

P – Fósforo

PIBIC – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

psi – Pound square inch (libras por polegadas ao quadrado)

S – Enxofre

Si – Silício

TCC – Tese de Conclusão de Curso

Ti – Titânio

TMRC – Laminação Termomecânica Controlada

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

V – Vanádio

X52 – Aço API 5L X52

X70 – Aço API 5L X70

X80 – Aço API 5L X80

X90 – Aço API 5L X90

X100 – Aço API 5L X100

°C – Grau Centígrado

” – Polegadas

% – Porcentagem

$\sigma_e$  (ou LE) – Limite de Escoamento

$\sigma_R$  – Limite de Resistência

$\epsilon_T$  – Deformação Específica

$\Delta\sigma_e$  – Desvio Padrão do Limite de Escoamento

$\Delta\sigma_R$  – Desvio Padrão do Limite de Resistência

$\Delta\epsilon_T$  – Desvio Padrão da Deformação Específica

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1 PETRÓLEO E GÁS NATURAL	19
2.2 AÇOS PARA SISTEMAS DUTOVIÁRIOS	19
2.2.1 <i>SISTEMAS DUTOVIÁRIOS</i>	19
2.2.2 <i>AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)</i>	21
2.2.3 <i>NORMA API 5L</i>	22
2.2.4 <i>AÇO API 5L X80</i>	23
2.3 LAMINAÇÃO	24
2.4 ENSAIOS MECÂNICOS	26
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
3.1 AMOSTRAS PARA OS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS	27
3.2 TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS	29
3.3 FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	31
3.4 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO	33
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISE</b>	<b>35</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>
<b>GLOSSÁRIO</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1950, graus de aço de baixa liga foram utilizados para cumprir as exigências impostas pelos campos *offshore* na costa brasileira. No entanto, para os campos do Pré-sal no Brasil, que são na sua maioria localizados em grandes profundidades (cerca de 2000 metros) e envolvem longas distâncias para o escoamento e transporte do petróleo produzido, surgiu a necessidade de graus de aço com maior resistência (PAULA, 2018).

Dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), indicam que o consumo de gás natural mundial já obteve um aumento de 1,41 trilhões de metros cúbicos entre os anos de 2000 e 2020. A demanda pela indústria de gás natural obteve um aumento nos últimos anos, ocasionado pelo aumento da capacidade energética necessária para suportar todos os setores da sociedade (ANP, 2020). Assim, existe uma demanda do transporte de petróleo e gás em maiores pressões de operação, permitindo, dessa forma, o aumento da capacidade, através da utilização de aços de alta resistência (YSHII; CHIODO, 2007).

A adição de carbono ao ferro provê certas características ao material como, por exemplo, resistência à tração, compressão e flexão, tenacidade e resistência ao impacto aliada a uma maior dureza, tudo isso em um único material com uma espessura e massa do produto final menor do que se comparado a outros que apresentam as mesmas ou somente algumas das características mencionadas, reduzindo significativamente o peso e o custo do produto final (ANTONINO, 2014; SEIDEL, 2015).

Segundo Júnior (2008), a produção de petróleo e gás no Brasil e o consumo de derivados estão crescendo cada vez mais. Para atender esta demanda, torna-se necessário que os novos gasodutos e oleodutos tenham maiores diâmetros e operem com pressões mais elevadas, resultando em um aumento na espessura de parede dos dutos ou na aplicação de aços com melhores propriedades mecânicas.

De acordo com Hillenbrand *et al.* (2005), melhorar as propriedades mecânicas dos aços significa evitar o uso de espessuras muito elevadas e, conseqüentemente, traz uma redução da quantidade de aço utilizado, o que implica em menor peso por metro de duto, maior facilidade no transporte e instalação,



redução nos insumos de soldagem, bem como o menor consumo de energia na fabricação da chapa. Tudo isto representa a diminuição dos custos por tonelada de tubulação para o transporte de petróleo e gás.

O desenvolvimento dos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) viabilizou a operação de dutos com pressões maiores do que aquelas utilizadas anteriormente, resultando em um maior volume de gás ou petróleo transportado. O aumento da resistência do material permite a diminuição na espessura da parede do duto, assim, gastos são reduzidos (YSHII; CHIODO, 2007).

Os aços ARBL com o uso de aditivos tem características especiais para o uso em sistemas dutoviários e são classificados segundo a American Petroleum Institute (API), organização comercial que representa aspectos da indústria de petróleo e gás natural da América (SEIDEL, 2015; API, 2022). Com a introdução do resfriamento acelerado após a laminação à quente, foram produzidos aços com altos níveis de resistência mecânica, mantendo a tenacidade, como é o caso do aço microligado para tubos API 5L X80 (SILVA, 2010; PEDROSA, 2012).

Dutos de transporte de petróleo e gás é uma aplicação clássica dos aços ARBL, e uma das primeiras aplicações envolveram o uso de aços com microestrutura de ferrita acicular para oleodutos localizados em regiões frias. Esta aplicação exige uma combinação de alta resistência mecânica, alta tenacidade e boa soldabilidade (GUILHERME, 2015). Outro exemplo de aplicação dos aços ARBL são os dutos que conduzem o petróleo do fundo do mar para as plataformas na superfície, dutos estes denominados de *risers*.

Segundo Silva *et al.* (2009), os aços utilizados na fabricação dos *risers* devem possuir propriedades como elevada resistência mecânica para suportar as pressões e o próprio peso, elevada resistência à corrosão para resistir ao ambiente marinho, alta resistência à fadiga para resistir aos vórtices devido ao movimento das marés, boa soldabilidade, entre outras.

O material utilizado neste trabalho foi o aço API 5L X80, muito empregado na fabricação de dutos responsáveis pelo transporte de petróleo e gás natural no Brasil.

## 1.1 Justificativa

O derramamento de petróleo nos oceanos resulta em uma catástrofe ambiental, visto que os impactos causados por ele, seja na sociedade, na economia ou no meio ambiente, são imensuráveis. A mancha de petróleo quando se espalha pelo mar, não só contamina a água como também mata milhares de aves, peixes e corais. Assim, é muito importante que não haja falha, por exemplo, nos *risers* – dutos que transportam petróleo do fundo do mar para as plataformas na superfície.

Ocasionado pelo aumento da capacidade energética necessária para suportar todos os setores da sociedade, houve um aumento na demanda pela indústria de gás natural, tornando necessário o transporte de petróleo e gás em maiores pressões de operação, permitindo, assim, o aumento da capacidade, exigindo a utilização de aços de alta resistência.

Por ser um aço amplamente utilizado na fabricação de tubos para linhas de transmissão de petróleo e gás no Brasil, o aço API 5L X80 (que apresenta um limite de escoamento mínimo de 80 ksi – aproximadamente 555 MPa) foi escolhido para a realização deste estudo, visando a obtenção de modificações em suas propriedades mecânicas através da realização de tratamentos termomecânicos.

A aplicação do aço API 5L X80 na construção do primeiro gasoduto da empresa alemã *Ruhrgas*, instalado em 1993 entre as cidades de *Schltichtem* e *Werne*, na Alemanha, levou a uma economia de material de aproximadamente 20000 toneladas, em comparação com gasodutos de aço API 5L X70 (FERREIRA, 2021).

O estudo justifica-se pela importância ambiental e econômica que o uso dos aços provoca no país, visto os desastres que podem ocorrer quando se dá uma falha no produto.

A partir do trabalho realizado, espera-se contribuir para o desenvolvimento de novos materiais aplicados à indústria do petróleo, mostrando a importância dos estudos voltados a estes tipos de aço, visto o impacto que os mesmos podem causar ao meio ambiente e à economia.

Espera-se, também, contribuir neste campo de conhecimento, estimulando a realização de pesquisas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) e em outras instituições de ensino.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver sequências termomecânicas para avaliar a influência delas nas propriedades mecânicas do aço ARBL API 5L X80.

Segue os objetivos específicos:

- Determinar as sequências termomecânicas que serão aplicadas em corpos de prova do aço API 5L X80;
- Fabricar as amostras e realizar as rotas termomecânicas;
- Fabricar os corpos de prova para realização do ensaio de tração;
- Avaliar a influência das sequências termomecânicas nas propriedades de tração (limite de escoamento, limite de resistência e ductilidade).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Petróleo e Gás Natural

O óleo e o gás natural – substâncias orgânicas formadas pela combinação de moléculas de carbono e hidrogênio em níveis variáveis – formam o petróleo (que, no latim, significa óleo de pedra). Ele é o resultado de um longo processo natural, decorrente, em grande parte, da decomposição dos restos de seres vivos, sendo uma complexa mistura de compostos químicos, principalmente de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos (GAUTO, 2016).

Encontrado a profundidades variáveis (tanto no subsolo terrestre como no marítimo), o petróleo é um componente básico para a produção de milhares de produtos de forma indireta. Dele se produz gasolina, combustível de aviação, gás de cozinha, lubrificantes, borrachas, plásticos, tecidos sintéticos, tintas e até mesmo energia elétrica (GAUTO, 2016).

Com relação à produção de petróleo e gás no Brasil, os dados disponibilizados pela ANP (2020), referentes ao período 2015-2019, mostram um crescimento contínuo da produção de petróleo e gás natural no período citado (VIANA, 2020). Nesse contexto, a indústria petroquímica vem se adequando às novas tecnologias quanto ao emprego de dutos, por ser a maneira mais utilizada em todo o mundo para o transporte de petróleo e gás natural, devido ao seu baixo custo e grande capacidade de escoamento (LIRA, 2012).

### 2.2 Aços para Sistemas Dutoviários

#### 2.2.1 *Sistemas Dutoviários*

O transporte dutoviário (**Figura 1**) é o modo de transporte onde se utiliza um sistema de dutos, formando uma linha chamada de dutovia ou via composta por dutos, onde se movimentam produtos de um ponto a outro por meio de pressão ou arraste destes por meio de um elemento transportador. Os transportes dutoviários podem ser classificados em Terrestres e Submarinos (MURTA, 2003; FRANCISCO, 2009).

**Figura 1. Malha de duto de gás natural.**



Fonte: MARINHO, 2022.

O transporte dutoviário surgiu inicialmente para o suprimento do abastecimento de água. Com o passar do tempo, descobriu-se o petróleo e o transporte dutoviário passou a transportar também este mineral de grande importância na economia mundial, entre os campos de extração e as estações processadoras, surgindo, assim, os chamados oleodutos. A construção de gasodutos para transporte de gás natural, por sua vez, teve uma grande demanda na década de 80, ampliando o aproveitamento do gás natural produzido no Espírito Santo e no litoral do Rio de Janeiro (FRANCISCO, 2009).

Apesar do investimento inicial elevado, o modal dutoviário é um dos modais mais econômicos para o transporte de grandes volumes, apresentando baixo custo operacional e segurança, permitindo que grandes quantidades de cargas sejam deslocadas de um ponto para o outro com certa facilidade, diminuindo o tráfego de substâncias perigosas por caminhões, trens ou por navios e, por consequência, diminuindo os riscos de acidentes ambientais (BRASIL, 2022; MARINHO, 2022).

Com o crescimento do consumo de energia, novas fontes de óleo e gás passaram a ser exploradas, muitas vezes em regiões com condições climáticas adversas e em regiões remotas. A necessidade de se transportar quantidades crescentes destes recursos tornou comum o uso de dutos de grandes diâmetros e

espessuras de paredes grossas, operando sob altas pressões. Assim sendo, houve um aumento de demanda por aços estruturais de alta resistência e boa tenacidade a baixas temperaturas, como os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) de classificação API (SILVA, 1986; FRANCISCO, 2009).

### 2.2.2 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

A adição de carbono ao ferro provê certas características ao material como, por exemplo, resistência à tração, compressão e flexão, tenacidade e resistência ao impacto aliada a uma maior dureza, tudo isso em um único material com uma espessura e massa do produto final menor do que se comparado a outros que apresentam as mesmas ou somente algumas das características mencionadas, reduzindo significativamente o custo do produto final (SEIDEL, 2015).

Sistemas dutoviários transportam petróleo e gases de acidez elevada, em severas condições ambientais e condições de uso como temperatura, pressão, atrito, ambientes corrosivos, entre outras. Isso tornou urgente a necessidade de se projetar novos aços com alta resistência mecânica, boa tenacidade e melhor soldabilidade. Assim, surgiu o desenvolvimento dos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) – High Strength Low Alloy (HSLA) – que, na sua forma original mais simples, apresentam uma microestrutura ferrítica - perlítica e possuem baixo teor de carbono (fazendo com que a soldabilidade e a tenacidade sejam melhoradas), o qual é compensado com a adição de pequenas quantidades de elementos microligantes que melhoram a resistência mecânica (RAMÍREZ, 2008; ANTONINO, 2014).

O aumento da resistência do aço permite uma redução significativa na espessura da parede da tubulação, reduzindo assim a quantidade de matéria-prima empregada na sua fabricação, seu peso e, conseqüentemente, os custos com transporte e montagem (SHANMUGAM *et al*, 2008).

Os aços ARBL devem possuir características como elevada resistência mecânica para suportar a pressão, elevada resistência à corrosão para resistir ao ambiente marinho, alta resistência à fadiga para resistir aos vórtices devido aos movimentos das marés, boa soldabilidade, dentre outras. O aumento da resistência do material permite a diminuição na espessura da parede do duto, assim, gastos são

reduzidos. Com a introdução do resfriamento acelerado após a laminação à quente, foram produzidos aços com altos níveis de resistência mecânica, mantendo a tenacidade, como é o caso do aço microligado para tubos API 5L X80 (SILVA, 2010; PEDROSA, 2012; SEIDEL, 2015).

### 2.2.3 Norma API 5L

Com a necessidade cada vez maior de explorar águas ultra profundas, veio também a necessidade de melhorias nas propriedades dos materiais dos dutos que conduzem o petróleo do fundo do mar para as plataformas na superfície, dutos estes denominados de *risers*.

A atividade de perfuração em águas profundas usa uma coluna tubular, chamada de coluna de *risers*, que interliga o direcionador de fluxo (*Diverter*) localizado na mesa de perfuração ao *Blow Out Preventer* (BOP) assentado na cabeça do poço. Em seu espaço anular passa a coluna de perfuração e todos os equipamentos usados na perfuração do poço (NARIÑO, 2014).

Os aços ARBL com o uso de aditivos tem características especiais para o uso em *risers* e são classificados segundo a *American Petroleum Institute* (API) – Instituto Americano de Petróleo, organização comercial que representa aspectos da indústria de petróleo e gás natural da América (SEIDEL, 2015; API, 2018).

O Instituto Americano de Petróleo apresenta a norma API 5L – *Specification for Line Pipe* (API, 2007). Nela, adota requisitos que devem ser seguidos para a fabricação de tubos, como o limite de escoamento, limite de resistência, composição química, tecnologia de fabricação do aço e dos dutos, etc (API, 2007; RAMÍREZ, 2008).

A classificação dos aços que seguem a norma API 5L é feita através das letras A, B e X, onde os dois números após as letras representam o limite de escoamento mínimo em ksi, sendo que quando precedido pela letra X, o aço apresenta uma maior resistência (RAMÍREZ, 2008).

Os aços microligados ARBL, da classe de aços para tubulações, classificados como grau X80 conforme norma API 5L, vem sendo utilizados na fabricação dos *risers*, para atender as condições adversas na perfuração de poços para produção

no Pré-sal, apresentando alta resistência mecânica e boa tenacidade, além de uma boa soldabilidade (importante no processo de fabricação) (SICILIANO *et al.*, 2011).

O aço API 5L X80 (que apresenta um limite de escoamento mínimo de 80 ksi – aproximadamente 555 MPa) foi escolhido para a realização deste estudo, por ser um aço amplamente utilizado na fabricação de tubos para linhas de transmissão no Brasil.

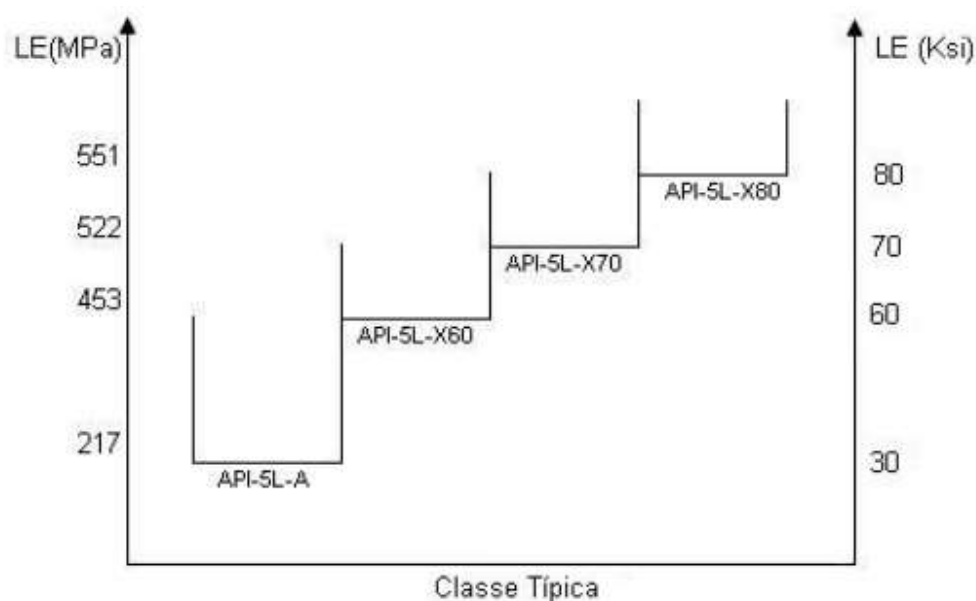
#### 2.2.4 Aço API 5L X80

De acordo com a literatura, são várias as alternativas metalúrgicas para a fabricação dos aços de classificação API 5L X80, as quais são muito relacionadas às composições químicas e ao processo de laminação.

Visto que a norma API 5L (2007) não faz uma restrição severa em relação aos elementos de liga, haverá várias opções para fabricação deste aço. Para ser classificado como API 5L X80, há alguns valores que o aço precisa atender em relação às propriedades mecânicas.

A **Figura 2** apresenta o limite de escoamento ( $LE = \sigma_e$ ), em MPa e ksi, de alguns aços que seguem a norma API 5L, de acordo com suas classes.

**Figura 2. Limite de escoamento de alguns aços API 5L de acordo com suas classes.**



Fonte: ROCHA, 2010.



Para atingir a classificação X80, a norma API 5L (2007) especifica que o aço possua as propriedades mecânicas apresentadas na **Tabela 1**.

**Tabela 1. Propriedades Mecânicas para que o aço tenha classificação X80, X90 ou X100.**

	X80		X90		X100	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
$\sigma_e$ [MPa]	555	705	625	775	690	840
$\sigma_r$ [MPa]	625	825	695	915	760	990

Fonte: AUTORA, 2023 (baseado em API, 2007).

### 2.3 Laminação

Os processos termomecânicos têm seu desenvolvimento ligado aos aços ARBL, e, principalmente, aos aços classificados pela norma API 5L. Um tratamento termomecânico tem o objetivo principal de aliar o refinamento microestrutural (tamanho de grão) a um tipo de microestrutura que aumente o valor do limite de escoamento, do limite de resistência, da tenacidade e da dureza (SILVA, 2010).

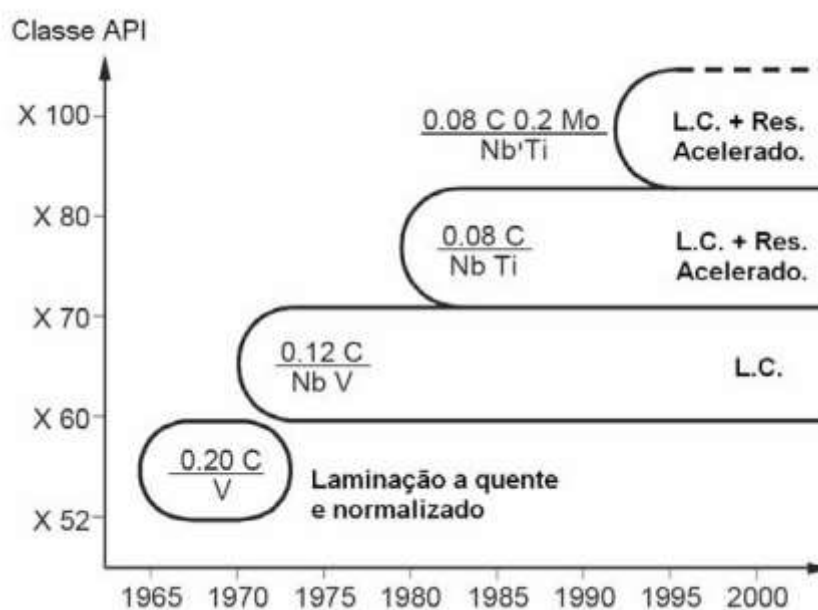
No campo de aplicações estruturais, navais e petrolíferas, o desenvolvimento dos aços microligados deve-se, basicamente, às melhores características de tenacidade desses materiais para níveis relativamente altos de resistência mecânica e boa soldabilidade. Visto que suas características mecânicas finais são conseguidas diretamente pelo processo de laminação, seu preço é menor em comparação aos materiais tratados termicamente (GORNI; MEI, 2003; FERNANDES, 2011).

Nos anos 70, a laminação – que proporciona a estes materiais um maior limite de escoamento (com a obtenção de tamanho de grão reduzido) – seguida pela normalização foram substituídas pelo processo de Laminação Termomecânica Controlada (TMRC). Um processo melhorado, que consiste na laminação controlada seguido de resfriamento acelerado, emergiu nos anos 80, impulsionando um avanço no desenvolvimento dos aços ARBL (**Figura 3**). Por este método, tornou-se possível produzir materiais com resistência mais elevada (como, por exemplo, o aço API 5L

X80), tendo um índice reduzido de carbono e excelente soldabilidade em campo (YSHII; CHIODO, 2007).

Combinações diversas entre temperatura e deformação durante o processo de laminação, que refinam o grão e precipitam carbonetos e nitretos dos elementos microligantes, os quais impedem a recristalização, garantem, assim, as propriedades citadas anteriormente. Com a introdução do resfriamento acelerado (ACC) após a laminação à quente, foram produzidos aços com altos níveis de resistência mecânica, mantendo a tenacidade, além de boa soldabilidade devido ao seu baixo teor de carbono, como é o caso do aço microligado para tubos API 5L X80 (RAMÍREZ, 2008; SILVA, 2010; PEDROSA, 2012; SEIDEL, 2015).

**Figura 3. Desenvolvimento dos aços ARBL.**



Fonte: YSHII; CHIODO, 2007.

A **Figura 3** mostra a evolução dos aços grau API para a fabricação de tubos com grande diâmetro ao longo dos últimos 40 anos. Pode-se observar que a adição de elementos de liga e o uso de Laminação Controlada (LC), a qual depois foi complementada com resfriamento acelerado, permitiu uma considerável redução do teor de Carbono, ao mesmo tempo em que a resistência mecânica do material se elevou do grau X52 para X100.

## 2.4 Ensaio Mecânicos

Para a seleção de um tipo de material para um projeto, são avaliadas suas propriedades mecânicas e seu comportamento mecânico. Algumas das propriedades dos materiais só podem ser obtidas através da realização de ensaios mecânicos, denominação dada a procedimentos padronizados por normas técnicas que simulam esforços reais ao qual o material será exposto (BAYER, 2007; ZOLIN, 2011).

Para existir uma uniformização entre os resultados, todos os ensaios possuem normas técnicas e procedimentos padronizados a serem seguidos. De acordo com o procedimento empregado, o ensaio pode ser classificado em: (1) não destrutivo, são aqueles que nem deixam marcas na peça e nem a inutiliza, e (2) destrutivos, são os tipos que durante sua realização deixam alguma marca na peça, podendo inutilizá-la ou não (BAYER, 2007; ZOLIN, 2011).

Como exemplo de um ensaio destrutivo muito utilizado, temos o ensaio de tração. A aplicação de uma força em um corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço. No ensaio de tração, o corpo de prova (CP) é fixado em uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes, axialmente, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o CP é levado até a sua ruptura. Há uma relação entre tensão aplicada (carga sobre área da seção transversal da peça) e a deformação resultante (ZOLIN, 2011; PEDROSA, 2012).

### 3. METODOLOGIA

O material utilizado neste estudo foi retirado de um tubo de aço API 5L X80 com espessura de 19 mm e diâmetro nominal de 864 mm (34"), doado pela siderúrgica USIMINAS. A composição química (% massa) do mesmo, de acordo com a USIMINAS, está apresentada na **Tabela 2**.

**Tabela 2. Composição química do aço API 5L X80 utilizado neste trabalho (% massa), dada pela USIMINAS.**

C	S	N	Al	Si	P	Ti	V
0,03	0,003	0,0054	0,027	0,21	0,013	0,017	0,023
Cr	Mn	Ni	Cu	Nb	Mo	B	Ca
0,158	1,78	0,013	0,008	0,071	0,183	0,0001	0,0032

A execução das atividades necessárias para a conclusão deste trabalho ocorreu tanto no IFPE, *campus* Recife, quanto na UFPE. A metodologia utilizada para executá-las será descrita a seguir.

#### 3.1 Amostras para os tratamentos termomecânicos

As amostras utilizadas nos tratamentos termomecânicos foram fabricadas mediante duas operações de usinagem: serramento e fresamento.

Utilizando uma serra de fita horizontal, foram cortadas as amostras na direção longitudinal do tubo (**Figura 4**) que, devido à sua geometria, não possuíam as faces planas. Desta forma, foi utilizado um Centro de Usinagem CNC (**Figura 5**) para fresar as amostras, de modo que as mesmas apresentassem faces planas e perpendiculares, com as dimensões médias de 10x13x180 [mm] (**Figura 6**). Tanto a serra de fita horizontal como o Centro de Usinagem CNC utilizados, pertenciam aos laboratórios de Mecânica do IFPE – *Campus* Recife.

**Figura 4. Serra utilizada para realizar o corte do material para fabricação das amostras.**



Fonte: AUTORA, 2020.

**Figura 5. Centro de Usinagem CNC utilizado para fresar o material para confecção das amostras.**



Fonte: AUTORA, 2023.

**Figura 6. Uma das amostras fabricadas para utilização nos tratamentos termomecânicos.**



Fonte: AUTORA, 2020.

### **3.2 Tratamentos termomecânicos**

Após as amostras serem fabricadas, elas foram submetidas a sequências termomecânicas com o objetivo de obter-se microestruturas que resultassem em propriedades mecânicas superiores tanto em resistência mecânica (limite de escoamento, limite de resistência e dureza) quanto em ductilidade.

Assim, foram realizadas 3 rotas de tratamentos com etapas de aquecimento iguais e resfriamento em água, mas que envolveram diferentes taxas de deformações. As amostras foram inicialmente aquecidas a 950°C e mantidas nesta temperatura por 15 minutos, onde a temperatura foi selecionada no diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C para um aço com 0,03% de carbono e com um acréscimo de 50°C para garantir sua completa austenitização.

Para esta etapa foi utilizado um forno do tipo mufla da marca QUIMIS de modelo 318 M24 (**Figura 7**), localizado na UFPE. Antes da realização dos experimentos, o forno foi mantido por 2 horas na temperatura de 950°C para uniformização da mesma dentro dele.

**Figura 7. Forno utilizado nos experimentos.**



Fonte: AUTORA, 2020.

Nas 3 rotas termomecânicas as amostras passaram por um laminador, após o aquecimento das mesmas, realizando assim o processo de laminação à quente, porém a deformação causada pelo laminador foi diferente para cada rota. A **Tabela 3** define as rotas termomecânicas utilizadas neste trabalho.

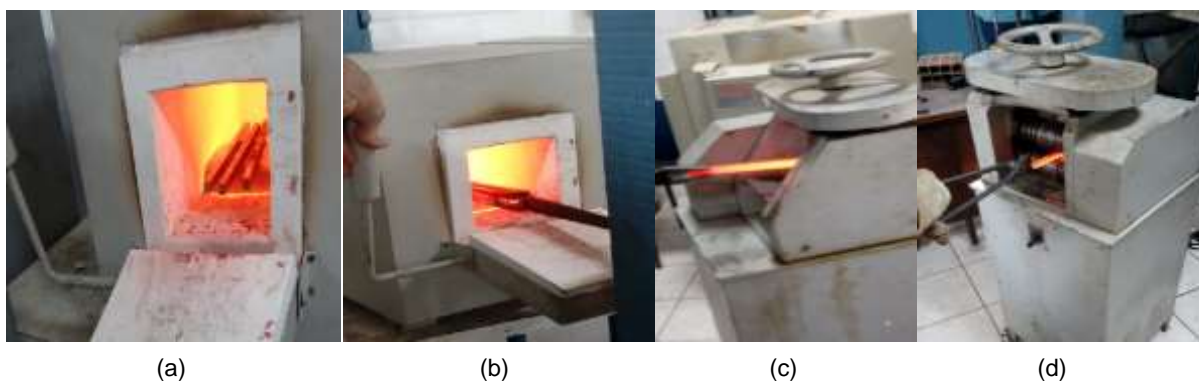
**Tabela 3. Rotas termomecânicas utilizadas nos experimentos.**

Rota	Descrição
1	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de <b>10%</b> no laminador e, na sequência, resfriamento brusco em água à temperatura ambiente.
2	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de <b>15%</b> no laminador e, na sequência, resfriamento brusco em água à temperatura ambiente.
3	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de <b>20%</b> no laminador e, na sequência, resfriamento brusco em água à temperatura ambiente.

Fonte: AUTORA, 2023.

A **Figura 8** apresenta a sequência dos processos utilizados para realização dos tratamentos termomecânicos, após o aquecimento do forno à 950°C.

**Figura 8. Sequência dos processos utilizados para realização dos tratamentos termomecânicos. (a) Amostras dentro do forno; (b) amostra sendo retirada do forno; (c) amostra entrando no laminador; (d) amostra saindo do laminador.**



Fonte: AUTORA, 2020.

Após a sequência apresentada na **Figura 8**, cada amostra foi rapidamente colocada em um recipiente com água, realizando, assim, o processo de resfriamento por têmpera.

### 3.3 Fabricação de corpos de prova para ensaio de tração

Para avaliar a influência dos tratamentos termomecânicos no comportamento mecânico do aço API 5L X80, foram realizados ensaios de tração. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram fabricados utilizando o Laboratório de Tornearia (**Figura 9**) do IFPE, *Campus Recife*.

**Figura 9. (a) Laboratório de Tornearia do IFPE, Campus Recife; (b) Corpo de prova sendo usinado no torno mecânico.**



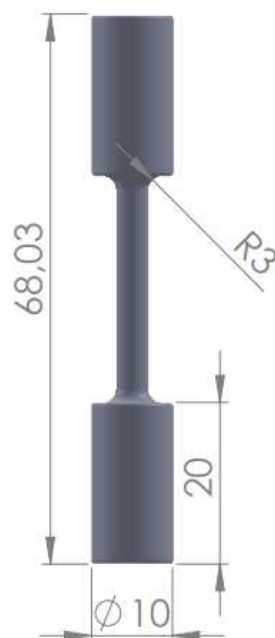
Fonte: AUTORA, 2020.



Foram fabricados 3 corpos de prova, mediante uso da proporcionalidade conforme a norma ASTM A370, para cada rota termomecânica realizada, além de 3 corpos de prova para a condição do material como recebido. Assim, no total 12 CP's foram fabricados utilizando o torno mecânico.

A **Figura 10** apresenta as dimensões médias dos corpos de prova e a **Figura 11** mostra um dos doze corpos de prova fabricados.

**Figura 10. Dimensões médias do corpo de prova fabricado para posterior ensaio de tração.**



Fonte: AUTORA, 2023.

**Figura 11. Um dos corpos de prova fabricados.**



Fonte: AUTORA, 2020.

### 3.4 Realização do ensaio de tração

No Laboratório de Ensaios Mecânicos, localizado no IFPE - *campus* Recife, foi realizado o ensaio destrutivo de tração dos corpos de prova de cada rota termomecânica e dos corpos de prova do material como recebido, para avaliar a influência das sequências termomecânicas nas propriedades de tração (limite de escoamento, limite de resistência e ductilidade) do aço API 5L X80.

O ensaio consistiu em fixar o corpo de prova na Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-100 (**Figura 12**) que provocou, a uma taxa constante, uma força axial de modo a aumentar comprimento do corpo de prova, reduzindo sua seção transversal até a ruptura.

**Figura 12. Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-200.**



Fonte: AUTORA, 2023.

Os resultados dos ensaios foram registrados computacionalmente pelo próprio *software* do equipamento (Tesc versão 4.00), onde o gráfico “Tensão [MPa] X Deformação [mm]” é criado simultaneamente de acordo com a carga aplicada.

No tópico 4 (Resultados e Análises) serão apresentados os resultados obtidos das propriedades mecânicas dos corpos de prova do material como recebido e dos que passaram por cada uma das três sequências termomecânicas realizadas.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

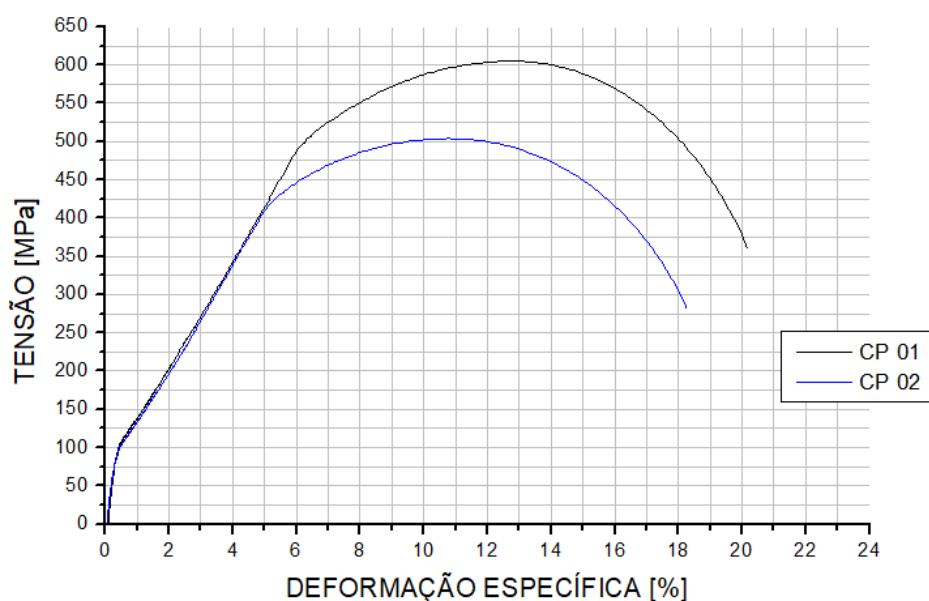
A seguir serão apresentados os gráficos “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]”, produzidos através do *software* ORIGIN com os dados obtidos dos ensaios de tração realizados em cada corpo de prova. Vale salientar que foi realizado o teste para identificação de *outliers*, utilizando o *software* ANALYSIS (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2012), que realiza o teste de Grubbs, Dixon e Chauvenet, com um nível de confiança de 95%.

- MATERIAL NA CONDIÇÃO DE “COMO RECEBIDO”

Após realização do ensaio de tração e tratamento dos dados, um dos corpos de prova feito com o material na condição de “como recebido” foi desconsiderado, após sua identificação como um *outlier* ao realizar o teste utilizando o *software* ANALYSIS (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2012).

O gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]”, feito no ORIGIN para os CP's do material na condição de “como recebido”, desconsiderando o CP identificado como *outlier*, pode ser visto no **Gráfico 1**.

**Gráfico 1. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material como recebido (C.R.).**



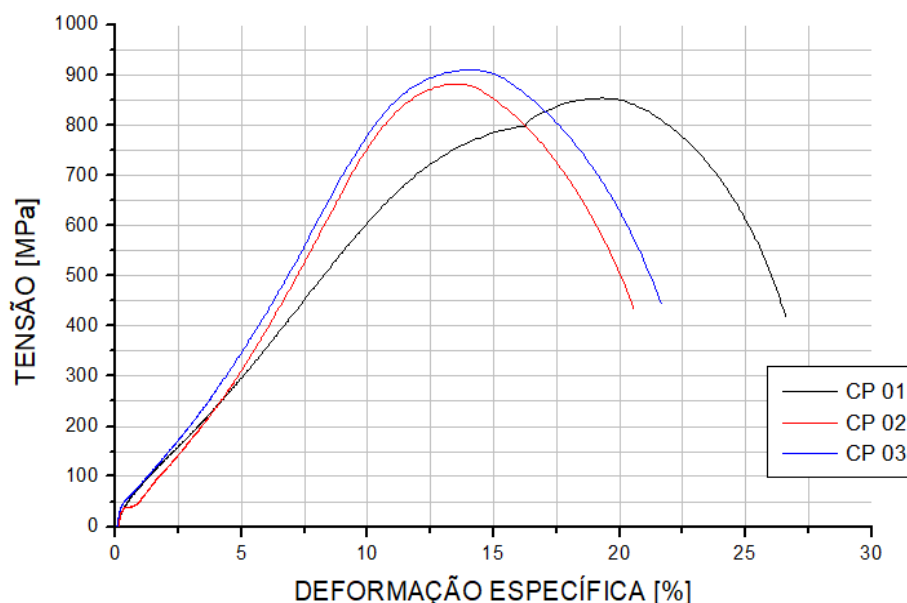
Fonte: AUTORA, 2023.

- ROTA 01 (aquecimento → laminação: deformação de 10% → têmpera em água)

O gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]”, feito no ORIGIN para os CP's das amostras que passaram pela Rota Termomecânica 1, está apresentado no **Gráfico 2**.

Nenhum dos CP's das amostras que passaram pela rota 1 foi reprovado ao realizarmos o teste para identificação de *outliers* pelo *software* ANALYSIS (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2012).

**Gráfico 2. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 1.**



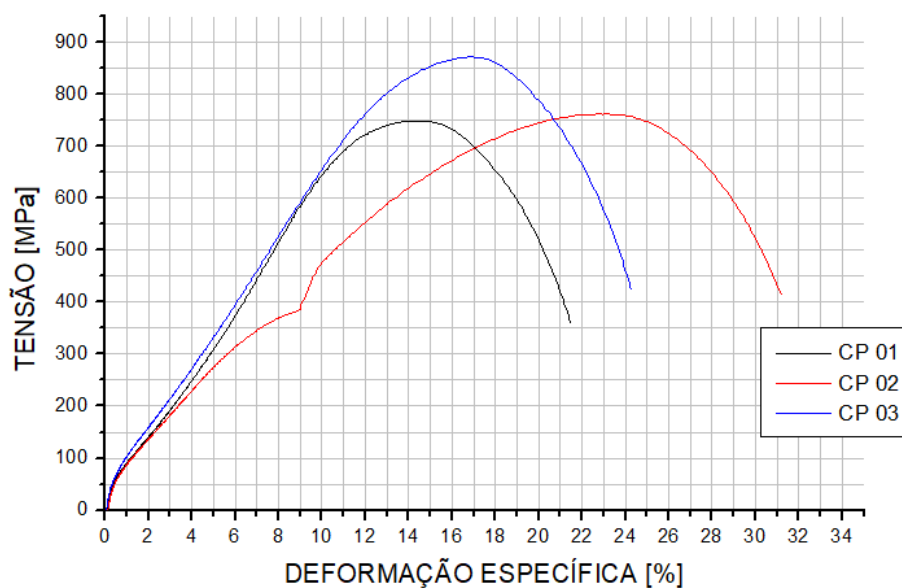
Fonte: AUTORA, 2023.

- ROTA 2 (aquecimento → laminação: deformação de 15% → têmpera em água)

O gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]”, feito no ORIGIN para os CP's das amostras que passaram pela Rota Termomecânica 2, pode ser visualizado no **Gráfico 3**.

Nenhum dos CP's das amostras que passaram pela rota 2 foi reprovado ao realizarmos o teste para identificação de *outliers* pelo *software* ANALYSIS (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2012).

**Gráfico 3. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 2.**



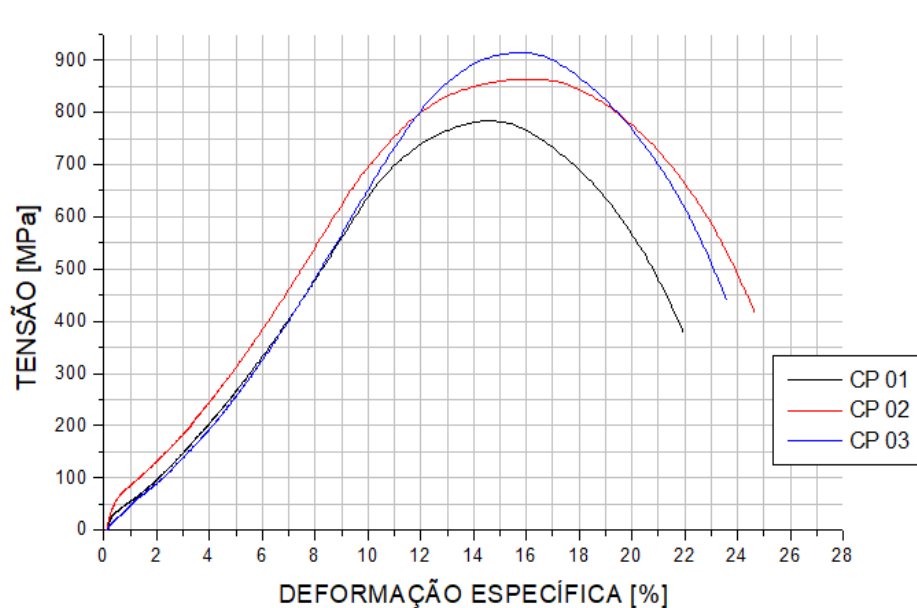
Fonte: AUTORA, 2023.

- ROTA 3 (aquecimento → laminação: deformação de 20% → têmpera em água)

O gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]”, feito no ORIGIN para os CP’s das amostras que passaram pela Rota Termomecânica 3, pode ser visualizado no **Gráfico 4**.

Nenhum dos CP’s que passaram pela rota 3 foi reprovado ao realizarmos o teste para identificação de *outliers* pelo *software* ANALYSIS (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2012).

**Gráfico 4. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 3.**

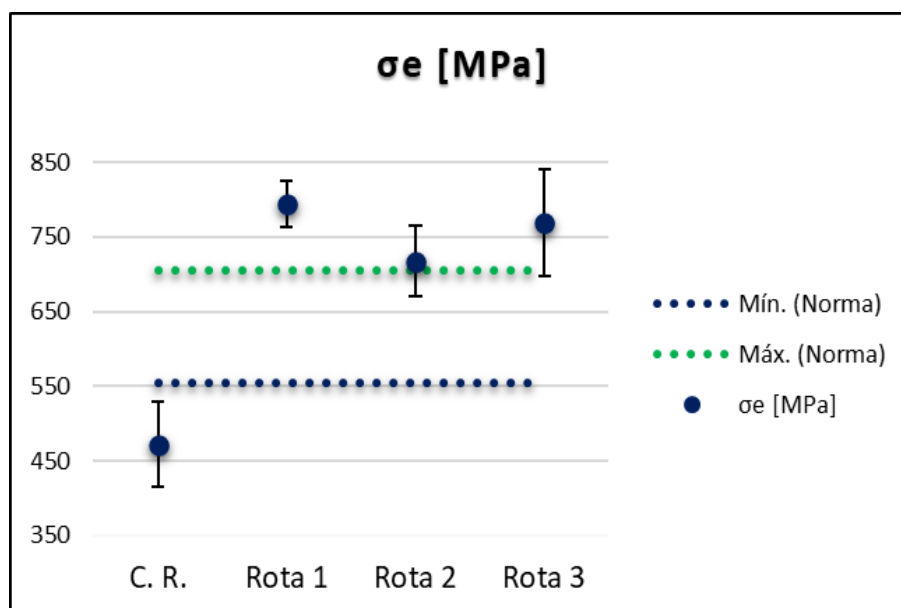


Fonte: AUTORA, 2023.

Através do tratamento dos dados foram determinados o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), o limite de resistência ( $\sigma_r$ ) e a deformação específica ( $\epsilon_t$ ), a partir da média aritmética dos valores individuais destas propriedades nos corpos de prova do material como recebido e de cada uma das rotas termomecânicas, onde também foram calculados os respectivos desvios padrão ( $\Delta\sigma_e$ ,  $\Delta\sigma_r$  e  $\Delta\epsilon_t$ ), utilizando o *software* ANALYSIS (OLIVEIRA e GUIMARÃES, 2012). Estes resultados estão apresentados na **Tabela 4** e nos **Gráficos 5, 6 e 7**.

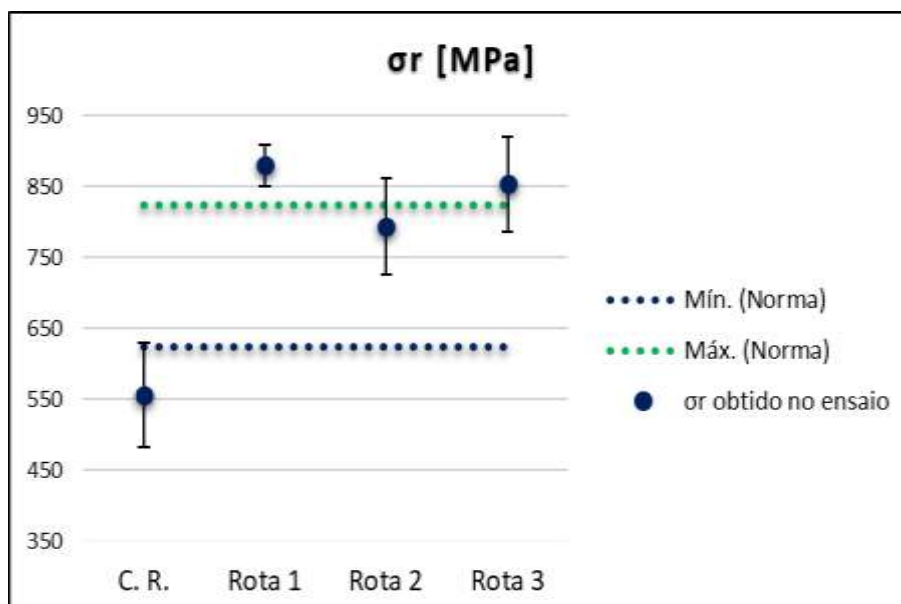
Para uma melhor visualização dos resultados, foram adicionados os valores mínimos e máximos (das propriedades mecânicas em questão) exigidos pela norma API 5L para que o aço seja classificado com a classe X80.

**Gráfico 5. Gráfico do Limite de escoamento obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.**



Fonte: AUTORA, 2023.

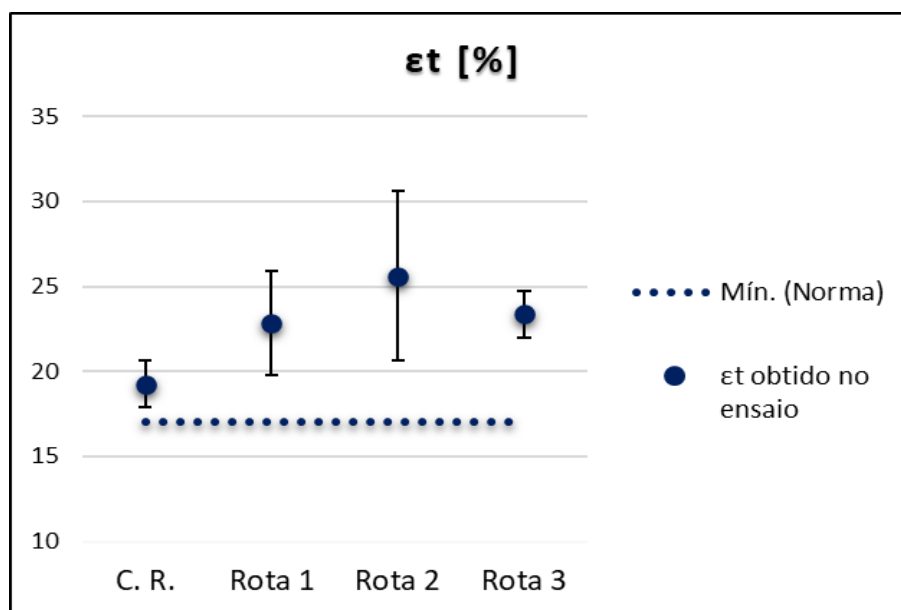
**Gráfico 6. Gráfico do Limite de resistência (σr) obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.**



Fonte: AUTORA, 2023.



**Gráfico 7. Gráfico da Deformação específica obtida no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão, e limite inferior especificado pela API 5L para o grau X80.**



Fonte: AUTORA, 2023.

**Tabela 4. Resultados das propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração.**

	$\sigma_e$ [MPa]	$\Delta\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\Delta\sigma_r$ [MPa]	$\epsilon_t$ [%]	$\Delta\epsilon_t$ [%]
<b>C. R.</b>	472,34	56,81	556,24	73,07	19,24	1,37
<b>Rota 1</b>	794,17	31,42	880,15	29,32	22,86	3,06
<b>Rota 2</b>	717,5	47,12	793,29	67,95	25,63	4,98
<b>Rota 3</b>	768,38	71,48	854,24	67,02	23,37	1,38

Fonte: AUTORA, 2023.

Através de normas conhecidas para os ensaios mecânicos de metais, entre elas a ASTM 370, sabemos que as amostras para os ensaios de tração devem possuir superfícies isentas de riscos, falhas e fabricadas com a menor rugosidade superficial possível (SILVA, 2010).

Como dito anteriormente, os corpos de prova para o ensaio de tração foram produzidos mediante o processo de tornearia e as amostras das quais os CP's foram fabricados, haviam passado por processos de corte, usinagem CNC e laminação. Logo, as superfícies podem ter apresentado pequenas ranhuras, porém, isto foi propagado a todos os corpos de prova, visto que eles foram fabricados utilizando o

mesmo processo. Sendo assim, não tivemos problemas para realização das análises, visto que o objetivo deste trabalho está na comparação das propriedades mecânicas entre as diferentes rotas termomecânicas com as propriedades mecânicas do material na condição de “como recebido”.

Nos **Gráficos 5 e 6**, assim como na **Tabela 4**, pode-se observar que tanto o valor do limite de escoamento quanto o valor do limite de resistência do material como recebido (C.R.) não atende ao valor mínimo exigido pela norma API 5L (2007) para o aço API 5L X80, que é de 555 MPa e 625 MPa, respectivamente. Entretanto, como dito anteriormente, o foco deste trabalho está no comportamento mecânico proporcionado pelas sequências termomecânicas. Então, visto que todos os corpos de prova foram fabricados nas mesmas condições, é correto fazer comparações entre os valores das propriedades mecânicas obtidas.

Através dos **Gráficos 5, 6 e 7** e da **Tabela 4**, podemos verificar que todas as rotas proporcionaram um limite de escoamento e um limite de resistência maior em relação ao obtido no material na condição de “como recebido”. O mesmo comportamento aconteceu com a deformação específica, indicando que a ductilidade do X80 após passar pelas sequências termomecânicas também aumentou.

Comparando o valor de limite de escoamento (**Gráfico 5**) obtido nas três rotas termomecânicas com o valor obtido para o material na condição de “como recebido”, podemos ver que as rotas 1, 2 e 3 apresentaram, respectivamente, um aumento de 68,14%, 51,90% e 62,68% em seu limite de escoamento.

A rota 1 apresentou um valor de limite de escoamento 43,09% acima do exigido para o X80 pela norma API 5L (2007), enquanto que na rota 2 o valor do limite de escoamento ficou 29,28% acima do exigido e a rota 3 ficou 38,45% acima. O valor do limite de escoamento obtido em cada rota termomecânica, sem considerar o desvio padrão, superou até mesmo o valor mínimo exigido ao aço API 5L X100 pela norma API 5L (2007), que é de 690 MPa.

Se considerarmos a subtração do desvio padrão do limite de escoamento em cada sequência termomecânica ( $\sigma_e - \Delta\sigma_e$ ), apenas a rota 2 não atingiria o valor de limite de escoamento mínimo do X100. Ela apresentaria um valor de 670,38 MPa em seu limite de escoamento, ficando cerca de 2,84% menor que o valor exigido para o aço API 5L X100, mas, ainda assim, superando em 7,26% o valor de limite de escoamento exigido para o aço API 5L X90, que é de aproximadamente 625 MPa.

Assim, sem considerar o desvio padrão no valor do limite de escoamento obtido em cada rota, as amostras que passaram por cada sequência já não seriam mais classificadas como API 5L X80 (se fosse observado apenas seu valor de limite de escoamento), visto que o valor máximo de limite de escoamento para que o aço ainda seja classificado como X80 é de 705 MPa (**Tabela 1**) e em todas as rotas alcançou-se um valor acima disso, conforme apresentado no **Gráfico 5** e na **Tabela 4**.

Comparando o valor de limite de resistência (**Gráfico 6**) obtido nas três rotas termomecânicas com o valor obtido para o material na condição de “como recebido”, podemos ver que as rotas 1, 2 e 3 apresentaram, respectivamente, um aumento de 58,23%, 42,62% e 53,57% em seu limite de resistência.

A rota 1 apresentou um valor de limite de resistência 40,82% acima do limite de resistência exigido pela norma API 5L (2007) para o X80, que é de 625 MPa, enquanto que na rota 2 o valor do limite de escoamento ficou 26,93% acima do exigido e a rota 3 ficou 36,68% acima. O valor do limite de resistência obtido em cada sequência termomecânica superou o valor mínimo exigido ao aço API 5L X90, que é de 695 MPa. As rotas 1 e 3 superaram até mesmo o valor mínimo de resistência exigido ao aço API 5L X100 pela norma API 5L (2007), que é de 760 MPa.

Assim, sem considerar o desvio padrão no valor do limite de resistência obtido em cada rota, as amostras que passaram pelas sequências 1 e 3 já não seriam mais classificadas como API 5L X80 (se fosse observado apenas seu valor de limite de resistência), visto que o valor máximo de limite de resistência para que o aço ainda seja classificado como X80 é de 825 MPa (**Tabela 1**) e nas duas rotas (1 e 3) alcançou-se um valor acima disto, conforme apresentado no **Gráfico 6** e na **Tabela 4**.

Comparando o valor de deformação específica (**Gráfico 7**) obtido nas três rotas termomecânicas com o valor obtido para o material na condição de “como recebido”, podemos ver que as rotas 1, 2 e 3 apresentaram, respectivamente, um aumento de 18,81%, 33,21% e 21,47% em sua deformação específica. Assim, podemos dizer que houve um aumento também na ductilidade do material.

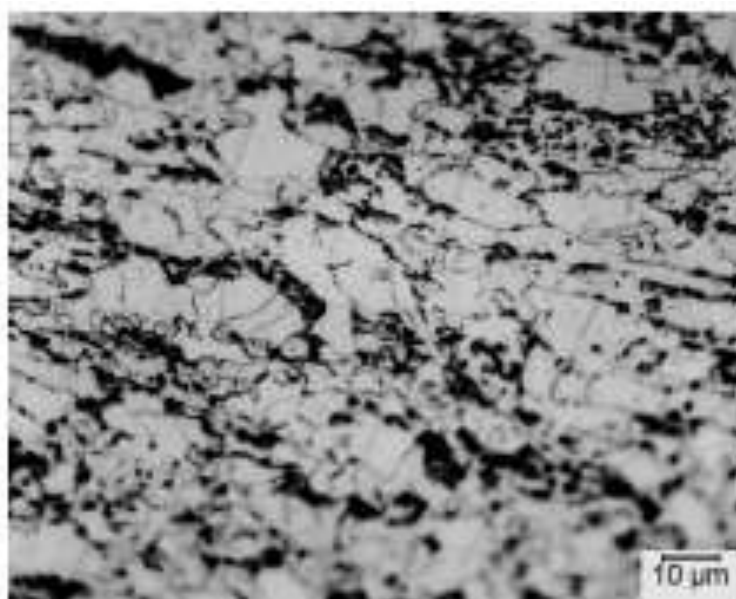
A rota 1 apresentou um valor de deformação específica 34,47% acima do exigido pela norma API 5L (2007) para o X80, que é de 17%, enquanto que na rota 2

o valor da deformação específica ficou 50,76% acima do exigido e a rota 3 ficou 37,47% acima.

O efeito da microestrutura sobre as propriedades físicas e mecânicas dos aços torna a metalografia uma ferramenta importante para estabelecer correlações entre estes parâmetros. A metalografia é o ramo da metalurgia física que examina e determina a constituição e a estrutura subjacente dos constituintes em metais, ligas e materiais (ASM, 2004). O conhecimento da microestrutura e seus microconstituintes é de extrema importância para prever o comportamento do material em determinadas aplicações, garantindo o seu desempenho (LIMA FILHO, 2013).

Na tese “Aspectos Microestruturais e Cristalográficos da Ferrita Acicular Obtida por Meio de Sequencias Termomecânicas em Aço API 5L X-80”, desenvolvida por Castro (2012) e no trabalho realizado por Pedrosa (2012) em sua tese “Estudo das Transformações de Fase no Aço API 5L X80 Visando o Aumento da Tenacidade à Fratura” foi utilizado o aço API 5L X80. Em ambas as teses, o aço API 5L X80 na condição “como recebido” apresentou microestrutura predominante de ferrita poligonal (regiões claras) e perlita (regiões escuras), como pode ser visto na **Figura 13**, que apresenta uma micrografia obtida por Castro (2012) através de Microscopia Óptica (MO).

**Figura 13. Micrografia do aço API 5L X80 na condição de “como recebido”.**

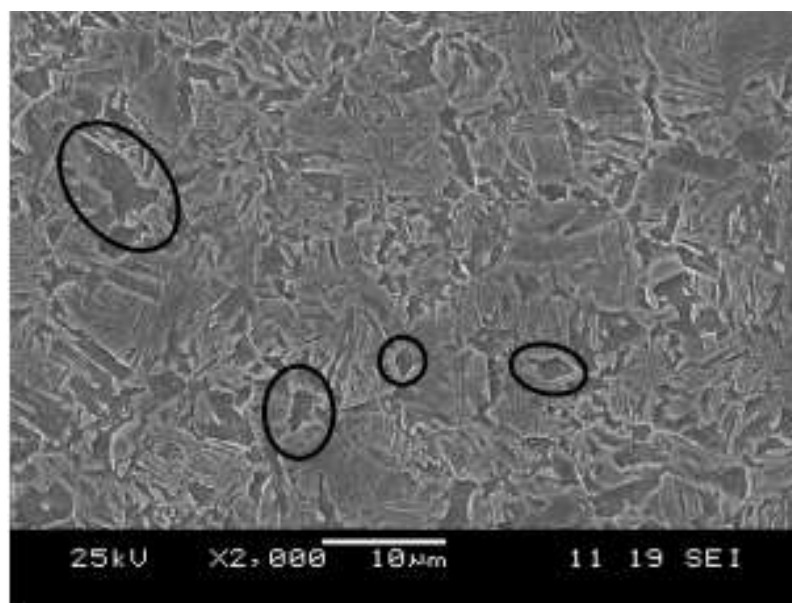


Fonte: CASTRO, 2012.

O trabalho de Pedrosa (2012) apresenta micrografias, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), do aço API 5L X80 após passar por sequências termomecânicas, onde revelam a presença dos constituintes ferrita acicular (predominantemente), ferrita poligonal, ferrita granular, austenita retida e ilhas do constituinte MA.

A **Figura 14** mostra a micrografia, com aumento de 2000X, que Pedrosa (2012) obteve de um corpo de prova que passou por uma rota termomecânica muito semelhante à rota 2 (aquecimento → laminação: deformação de 15% → têmpera em água) realizada neste trabalho. A partir desta figura, é possível observar a presença de ferrita poligonal (elipses pretas) e ripas de ferrita não paralelas entrelaçadas, caracterizando a ferrita acicular.

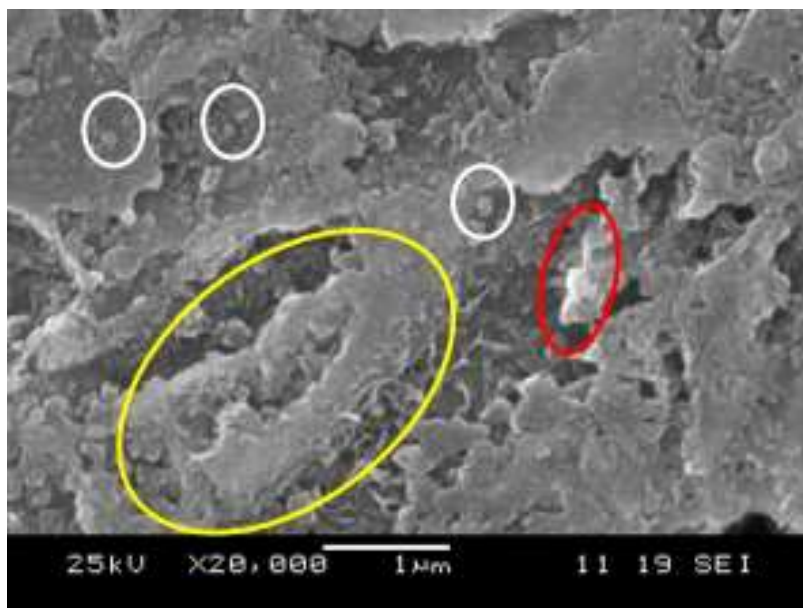
**Figura 14. Micrografia do corpo de prova austenitizado durante 15 min, laminado com uma redução de 15% e temperado (aumento de 2.000X).**



Fonte: PEDROSA, 2012.

A **Figura 15** mostra uma micrografia do mesmo corpo de prova que foi utilizado para se obter a **Figura 14**, porém com aumento de 20000X, que Pedrosa (2012) obteve em sua tese. Observando a **Figura 15**, é possível identificar a presença de outros constituintes: austenita retida (elipse amarela), ilhas do constituinte MA (elipse vermelha) e ferrita granular (elipses brancas).

**Figura 15. Micrografia do corpo de prova austenitizado durante 15 min, laminado com uma redução de 15% e temperado (aumento de 20.000X).**



Fonte: PEDROSA, 2012.

Microestruturas com uma proporção significativa de ferrita acicular (FA) têm uma combinação otimizada de propriedades mecânicas em aços para oleodutos Nb-Ti se comparadas às ligas com estruturas predominantemente bainíticas. A FA tem sido conhecida como a microestrutura ideal, com uma excelente combinação de alta resistência e boa tenacidade em baixas temperaturas em soldas de aço (PEDROSA, 2012).

Wang *et al* (2009) estudou os aços de alta resistência para tubulação e comparou as propriedades mecânicas do aço com microestrutura predominantemente acicular a outro ferrítico poligonal, onde constatou-se maiores valores de resistência e dureza no aço com ferrita acicular e tal resultado foi atribuído à granulometria mais fina e maior densidade de discordâncias contidas nesse tipo de microestrutura.

Assim, com base no que encontramos na literatura, as melhorias das propriedades do aço API 5L X80 em relação ao material como recebido, após passar por sequências termomecânicas, se justifica por conta da formação de novas microestruturas – principalmente a Ferrita Acicular, que apresenta uma excelente combinação de alta resistência e boa tenacidade.

## 5. CONSIDERAÇÕES

Todas as três rotas termomecânicas realizadas proporcionaram um limite de escoamento, um limite de resistência e uma ductilidade maior ao X80 em relação ao material como recebido.

O valor do limite de escoamento obtido em cada sequência termomecânica superou até mesmo o valor mínimo exigido ao aço API 5L X100, que é de 690 MPa. O valor do limite de resistência obtido em cada rota termomecânica superou o valor mínimo exigido ao aço API 5L X90 que é de 695 MPa. As rotas 1 (aquecimento → laminação: deformação de 10% → têmpera em água) e 3 (aquecimento → laminação: deformação de 20% → têmpera em água) superaram o valor mínimo de resistência exigido ao aço API 5L X100, que é de 760 MPa.

Sem considerar o valor do desvio padrão, as amostras que passaram pelas rotas termomecânicas já não seriam mais classificadas como X80, levando em conta que algumas propriedades mecânicas superaram o valor máximo exigido pela norma API 5L para que o aço seja classificado como tal.

As melhorias das propriedades do aço API 5L X80 em relação ao material como recebido, após passar por sequências termomecânicas, se justifica por conta da formação de novas microestruturas, como a Ferrita Acicular. A rota 1 apresentou maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência. A rota 2, por sua vez, apresentou um aumento maior na ductilidade do material. Já a rota 3, ao compararmos com as outras duas rotas termomecânicas realizadas, podemos notar que apresentou valores intermediários nas suas propriedades mecânicas. Assim, vemos que a utilização de rotas diferentes, por sua vez, trará também variação nas propriedades mecânicas melhoradas. A depender da rota utilizada, pode-se aumentar mais determinada propriedade mecânica.

Os resultados obtidos neste TCC possibilitam concluir que a melhoria das propriedades mecânicas do aço API 5L X80 pode ser obtida de forma satisfatória por meio de sequências termomecânicas.

## REFERÊNCIAS

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2020.

ANTONINO, T. de S.. **ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE UMA JUNTA SOLDADA DO AÇO API 5L X80**. 2014.116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

API, American Petroleum Institute. **API Careers Overview**. Disponível em: [http://www.api.org/careers#tab\\_what-we-do](http://www.api.org/careers#tab_what-we-do). Acesso em: 04 dez. 2022.

API, American Petroleum Institute. **Specification for Line Pipe**. 44. Ed., 2007. 153 p.

ASM. (2004). **Metallography and Microstructures**, v. 9. ASM international.

BAYER, P. S. **ENSAIO DE TRAÇÃO**. Ensaios dos Materiais. Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007. p. 8–20.

BRASIL, D.. **Modal dutoviário**. 2022. Disponível em: <https://www.hivecloud.com.br/post/modal-dutoviario/#:~:text=Em%20s%C3%ADntese%2C%20quando%20comparado%20com%20os%20modais%20ferrovi%C3%A1rio,agilidade%2C%20seguran%C3%A7a%2C%20baixa%20flexibilidade%20e%20capacidade%20de%20fluxo>. Acesso em: 17 dez. 2022.

CASTRO, R. S. de. **ASPECTOS MICROESTRUTURAIS E CRISTALOGRAFICOS DA FERRITA ACICULAR OBTIDA POR MEIO DE SEQUENCIAS TERMOMECAÑICAS EM AÇO API 5L X-80**. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

FERREIRA, L. H. R.. **APLICAÇÃO DE AÇOS API 5L X100 E X120 NA CONSTRUÇÃO DE GASODUTOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**. 2021. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

FERNANDES, P. E. A.. **Avaliação da tenacidade à fratura da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço API 5L X80 soldado pelos processos SMAW e FCAW**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRANCISCO, J. C. de S.. **Avaliação da tenacidade à fratura de aço API 5I X70 utilizado na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo**. 2009. 192 f.



Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo (Usp), São Carlos, 2009.

GAUTO, M. A. *et al.* **Petróleo e Gás: Princípios de Exploração, Produção e Refino**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

GORNI, A. A. e MEI, P. R.. Aços alternativos ao HY-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido. Rem: **Revista Escola de Minas** [online]. 2003, v. 56, n. 4, p. 287-293. Epub 28 Abr 2004.

LIMA FILHO, H. M. R.. **ANÁLISE DE ATAQUES QUÍMICOS PARA REVELAÇÃO DE MICROESTRUTURA DE SOLDAS DISSIMILARES DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS E FERRÍTICOS**. 77 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LIRA, H. M. de. **SIMULAÇÃO DA CURVA DE RESFRIAMENTO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DO AÇO API 5L X80 SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR AUTO PROTEGIDO**. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MARINHO, F.. **Desinvestimentos da Petrobras no segmento de dutos, Pré-sal e a Nova Lei do Gás Natural geram oportunidades, atrai investimentos e crescimento do setor dutoviário no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/desinvestimentos-da-petrobras-no-segmen-to-de-dutos-pre-sal-e-a-nova-lei-do-gas-natural-geram-oportunidades-atrai-investimentos-e-crescimento-do-setor-dutoviario-no-brasil/>. Acesso em: 17 dez. 2022.

MURTA, A. L. S.. **Subsídios Para O Desenvolvimento De Estudos De Impactos Ambientais Para Projetos De Transporte Dutoviário**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.

MUTERLLE, P. V.. **Métodos Experimentais para Análise de Materiais**. [20-?]. 70 slides, color. Disponível em: [https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/86347/mod\\_resource/content/1/Metodos\\_Experimentais/Metodos\\_Experimentais\\_na\\_Engenharia\\_de\\_Materiais.pdf](https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/86347/mod_resource/content/1/Metodos_Experimentais/Metodos_Experimentais_na_Engenharia_de_Materiais.pdf). Acesso em: 16 set. 2020.

NARIÑO, G. A. R.. **Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos**. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OLIVEIRA, J. E. F. DE; GUIMARÃES, P. B. **ANALYSIS SOFTWARE PARA DETECÇÃO DE OUTLIERS VERSÃO 1.0**. Disponível em: <https://sites.google.com/site/analysisoutliers/> . Acesso em: 12 set. 2020.

PAULA, M. P. M. de. **Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de uma Junta Soldada de Tubos Sem Costura API X70QS para Aplicações Linepipe Sour Service**. 2018. 107 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

PEDROSA, I. R. V.. **ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASE NO AÇO API 5L X80 VISANDO O AUMENTO DA TENACIDADE À FRATURA**. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

RAMÍREZ, M. F. G.. **Estudo da Transformação Durante o Resfriamento Contínuo e da Microestrutura do Aço Microligado X80 Utilizado na Construção de Tubos para Transporte de Gás Natural e Petróleo**. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROCHA, D. B.. **ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO TUBO API 5L X80 UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM: MAG COM TRANSFERÊNCIA CONTROLADA E ELETRODO TUBULAR**. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010.

SEIDEL, L. G.. **O AÇO API 5L X-80 NO USO EM TUBULAÇÕES**. 2015. Disponível em:  
<https://www.webartigos.com/storage/app/uploads/public/588/4ce/9b9/5884ce9b90287025260157.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

SHANMUGAM, S *et al.* Microstructure and High Strength–Toughness Combination of a New 700MPa Nb-Microalloyed Pipeline Steel. Elsevier. **Materials Science and Engineering A**, v.478, p. 26–37, 2008.

SICILIANO, F. *et al.* **Aços para a Indústria de Petróleo e Gás Resistentes ao Serviço Ácido: Desafios e Perspectivas**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., 2011.

SILVA, C. N. P. da. **Efeitos das separações na tenacidade de um aço microligado produzido por laminação controlada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

SILVA, M. de C. **Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada do aço API 5L X80**. 114 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânico, SP, 2009.

SILVA, R. J. F. da. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS NO CONJUNTO RESISTÊNCIA MECÂNICA-TENACIDADE A FRATURA DO AÇO API 5L X70**. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

VASCONCELOS, G. M. de. **Estudo do efeito Bauschinger em tubos de aço API 5L X70 aplicados no transporte de petróleo e gás**. 68 f. Guaratinguetá - SP, 2015.

VIANA, F. L. E.. **PETRÓLEO E GÁS NATURAL**. 2020. Banco do Nordeste. Caderno Setorial ETENE. Ano 5, n. 145. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/496/1/2020\\_CDS\\_145.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/496/1/2020_CDS_145.pdf). Acesso em: 27 nov. 2022.

WANG W. *et al.* **Study of high strength pipeline steels with different microstructures**, Materials Science and Engineering A, 502.: p. 38-44, 2009.

YSHII, L. N. E CHIODO, M. S. G. **APLICAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM DUTOS DE TRANSPORTE DE ÓLEO E GÁS: IMPLICAÇÕES SOBRE O PROJETO E CONSTRUÇÃO**. São Paulo, p. 1-10, fev. 2007.

ZOLIN, I.. Curso técnico em automação industrial: **Ensaio mecânicos e análises de falhas**. 3 ed. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. 102 p.

## GLOSSÁRIO

*Abstract*: resumo (em inglês) do trabalho.

*Austenitização*: Processo importante para formar a austenita, fase sólida do aço, não magnética e essencial para o início de vários tratamentos térmicos, em especial para a têmpera.

*Deformação Específica*: Alongamento do corpo de prova expresso em percentual.

*Ductilidade*: Capacidade de um material ser alongado em tensão. Os materiais dúcteis apresentam uma grande deformação (alongamento) antes da fratura.

*Risers*: Trechos suspensos das tubulações que interligam as linhas de produção submarinas às plataformas. Os *risers* podem ser rígidos ou flexíveis e também podem ser utilizados para conduzir fluidos da superfície até o leito marinho, como os *risers* de injeção e de exportação.

*Limite de escoamento*: Tensão que marca a transição da deformação elástica para a deformação plástica.

*Limite de Resistência*: Tensão máxima suportada pelo material.

*Offshore*: O petróleo pode ser encontrado em poros existentes nas rochas, em terra ou sob o mar. *Offshore* é o termo utilizado para toda atividade afastada da costa.