



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**ERIC FORTUNATO SOARES LIMA**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE**  
**AÇOS-CARBONOS APLICADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS:**  
**UMA REVISÃO DE LITERATURA**

**FORTALEZA**

**2022**

ERIC FORTUNATO SOARES LIMA

PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE  
AÇOS-CARBONOS APLICADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS:  
UMA REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L697p Lima, Eric Fortunato Soares.  
Propriedades mecânicas e resistência à corrosão de aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás: uma revisão de literatura / Eric Fortunato Soares Lima. – 2022.  
67 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
1. Aços-carbono. 2. Indústria de petróleo e gás. 3. Revisão de literatura. I. Título.

CDD 669

---

ERIC FORTUNATO SOARES LIMA

PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE  
AÇOS-CARBONOS APLICADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS:  
UMA REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre incentivar o meu desenvolvimento profissional, principalmente meus pais, Gislandia Fortunato e Wanderlan Soares, e minha irmã Maria Clara.

Ao professor Dr. Marcelo José Gomes da Silva, pela excelente orientação.

Aos demais professores participantes da banca examinadora, Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu e Dr. Jorge Luiz Cardoso, pelo tempo e pelas valiosas sugestões.

A Robson Martins, pelo apoio diário.

Aos meus amigos, André Castro, Beatriz Brito, Brena Amorim, Bruna Gabriela, João Victor Miranda e Rayane Mendes, por todo o incentivo.

Aos meus colegas de curso, Beatriz Sousa, Karine Pereira, Bruno Ribeiro e Gilvânia Kátia, por todas as experiências compartilhadas durante a graduação.

Ao professor Dr. Enio Pontes de Deus, pela orientação em todo meu período como bolsista de iniciação científica no Laboratório de Mecânica da Fratura e da Fadiga (LAMEFF).

Ao professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda e à Rafaella Silva por todo o aprendizado construído ao longo do período em que fui bolsista no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS).

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.” (MARCEL PROUST).

## RESUMO

Os aços-carbono são amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás, para fins de extração e transporte de petróleo e gás natural. Esses aços também são aplicados em outros componentes de etapas subsequentes na obtenção de produtos derivados do petróleo. Todavia, os aços-carbonos possuem limitações quanto à sua utilização neste setor, principalmente devido à sua baixa resistência à corrosão. Sabe-se que a indústria do petróleo gera grandes prejuízos por conta da alta corrosividade dos meios aos quais seus equipamentos estão expostos; em todas as etapas, desde a extração até o refino e posterior armazenamento de produtos derivados do petróleo, os materiais aplicados nessa indústria são submetidos a situações rigorosas, como exposição a fluidos corrosivos, alta pressão e altas temperaturas. Assim sendo, o presente trabalho trata-se de uma pesquisa bibliográfica desenvolvida a partir de estudos exploratórios da literatura disponível a respeito da aplicação de aços-carbono na indústria de petróleo e gás, com o objetivo de sumarizar as informações gerais mais relevantes acerca desse tema. Após a análise dos estudos citados durante a elaboração deste trabalho, identificaram-se as principais normas que regulamentam a aplicação dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás e, também, as ligas mais utilizadas neste setor. Ainda discutiu-se sobre os mecanismos de desgaste aos quais os aços-carbono estão submetidos na indústria de petróleo e gás, o desgaste corrosivo e o desgaste mecânico, bem como algumas formas de mitigação destes processos danosos, tais como os revestimentos de ligas metálicas resistentes à corrosão, os revestimentos não-metálicos e os inibidores de corrosão. Portanto, concluiu-se que foi possível sintetizar diversas informações a respeito do tema, fazendo da presente pesquisa uma boa leitura introdutória nesta área de estudo.

**Palavras-chave:** Aços-carbono; indústria de petróleo e gás; revisão de literatura.



## ABSTRACT

Carbon steels are widely used in the oil and gas industry for the purpose of extracting and transporting oil and natural gas. These steels are also applied in other components of subsequent steps in obtaining petroleum products. However, carbon steels have limitations on their use in this sector, mainly due to their low corrosion resistance. It is known that the oil industry has great losses because of the high corrosiveness of the environments which the equipments are exposed; at all stages, from extraction to refining and subsequent storage of petroleum products, the materials applied in this industry are subjected to rigorous situations, such as exposure to corrosive fluids, high pressure and high temperatures. Thus, the present work is a bibliographic research developed from exploratory studies of the available literature on the application of carbon steels in the oil and gas industry, with the objective of summing up the most relevant general information about this theme. After analyzing the studies cited during the preparation of this study, the main standards that regulate the application of carbon steel in the oil and gas industry were identified, as well as the most used alloys in this sector. It was also discussed about the wear mechanisms which carbon steels are subjected to in the oil and gas industry, corrosive wear and mechanical wear, along with some forms of mitigation of these harmful processes, such as corrosion-resistant metal alloy coatings, non-metallic coatings and corrosion inhibitors. Therefore, it was concluded that it was possible to synthesize several information about the theme, making this research a good introductory reading in this area of study.

**Keywords:** Carbon steels; oil and gas industry; literature review.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação esquemática das transformações alotrópicas do ferro .....	16
Figura 2	– Diagrama de Fases ferro-carbeto de ferro .....	18
Figura 3	– Microestrutura de um aço de composição hipoeutetóide resfriado lentamente (ataque químico com Nital) .....	24
Figura 4	– Microestrutura de um aço de composição eutetóide resfriado lentamente (ataque químico com Nital) .....	24
Figura 5	– Microestrutura de um aço de composição hipereutetóide resfriado lentamente (ataque químico com Picrato de Sódio) .....	25
Figura 6	– Torre de Destilação para separação de derivados do petróleo bruto .....	34
Figura 7	– Micrografias do material austenitizado por 15 minutos, temperado em água e envelhecido na temperatura de a) 673K, b) 773K, c) 823K, d) 873K, e e) por 30 minutos .....	42
Figura 8	– Valores de tenacidade do aço-carbono API 5L X80 sob diferentes tratamentos térmicos .....	43
Figura 9	– Imagens de MEV da espessura dos filmes dos produtos de corrosão: a), b), c) em CO <sub>2</sub> supercrítico úmido dos aços encruado, recozido e temperado e revenido, respectivamente d), e), f) em água saturada com CO <sub>2</sub> dos aços encruado, recozido e temperado e revenido, respectivamente .....	44
Figura 10	– Taxa de corrosão em aços-carbono em função da temperatura e razão CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S.....	48
Figura 11	– Imagens de MEV do topo dos filmes de produtos de corrosão .....	50
Figura 12	– Esquemático de projeto para técnicas de controle de corrosão de aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás .....	53
Figura 13	– Tubulação de aço-carbono com revestimento interno de fibra de vidro.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades mecânicas dos aços-carbono resfriados lentamente em função do teor de carbono .....	22
Tabela 2	– Propriedades mecânicas dos aços-carbono AISI 1020 e AISI 1080 em função dos tratamentos térmicos de normalização e recozimento .....	28
Tabela 3	– Algumas aplicações dos aços-carbono .....	29
Tabela 4	– Especificações dos aços API 5L PSL 1 .....	36
Tabela 5	– Especificações dos aços API 5L PSL 2 .....	36
Tabela 6	– Especificações de composição química dos aços via norma ASTM A106..	37
Tabela 7	– Especificações de propriedades mecânicas dos aços via norma ASTM A106 .....	37
Tabela 8	– Composição química dos aços ASTM A234 .....	38
Tabela 9	– Composição química do aço AISI/SAE 1020 .....	39
Tabela 10	– Composição química do aço AISI/SAE 1045 .....	40
Tabela 11	– Taxa de Corrosão do aço SAE 1045 em diferentes estados .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
DRX	Difração de Raios-X
HB	Dureza Brinell
HRB	Dureza Rockwell B
ISO	International Organization of Standardization
FEA	Fator de Empacotamento Atômico
FPSO	Floating, Production, Storage and Offloading
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	Society of Automotive Engineers
TAN	Total Acid Number
TTPS	Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ferrita
$\gamma$	Austenita
$\delta$	Ferrita $\delta$
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	14
<b>3.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>3.1</b>	<b>Aços</b> .....	15
<b>3.1.1</b>	<b>Aços-carbono</b> .....	20
<b>3.1.1.1</b>	<i>Classificações dos aços-carbono</i> .....	21
<b>3.1.1.2</b>	<i>Propriedades dos aços-carbono</i> .....	22
<b>3.1.1.3</b>	<i>Aplicações dos aços-carbono</i> .....	28
<b>3.1.1.3.1</b>	Utilização dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás .....	30
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	31
<b>4.1</b>	<b>Tipo de estudo</b> .....	31
<b>4.2</b>	<b>Materiais de estudo</b> .....	31
<b>4.3</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	31
<b>4.4</b>	<b>Análise dos dados coletados</b> .....	32
<b>4.5</b>	<b>Aspectos éticos</b> .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
<b>5.1</b>	<b>A indústria de petróleo e gás</b> .....	33
<b>5.2</b>	<b>A utilização de aços-carbono na indústria de petróleo e gás</b> .....	35
<b>5.2.1</b>	<i>Normas ISO 3183 e API 5L</i> .....	35
<b>5.2.2</b>	<i>Norma ASTM A106/A106M</i> .....	37
<b>5.2.3</b>	<i>Norma ASTM A53/A53M</i> .....	37
<b>5.2.4</b>	<i>Norma ASTM A234/A234M</i> .....	38
<b>5.2.5</b>	<i>Norma ASTM A216/A216M</i> .....	38
<b>5.3</b>	<b>Principais aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás</b> .....	39
<b>5.4</b>	<b>Relação entre a microestrutura e as propriedades dos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás</b> .....	41

<b>5.5</b>	<b>Desgastes sofridos pelos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás .....</b>	<b>45</b>
<b>5.5.1</b>	<b><i>Corrosão dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás .....</i></b>	<b>45</b>
<b>5.5.2</b>	<b><i>Desgaste mecânico dos aços-carbono .....</i></b>	<b>51</b>
<b>5.6</b>	<b>Mitigação dos desgastes sofridos pelos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás .....</b>	<b>52</b>
<b>5.6.1</b>	<b><i>Revestimentos com ligas metálicas resistentes à corrosão .....</i></b>	<b>54</b>
<b>5.6.2</b>	<b><i>Revestimentos com materiais não-metálicos .....</i></b>	<b>55</b>
<b>5.6.3</b>	<b><i>Tratamentos químicos .....</i></b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>58</b>
	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços-carbono são o tipo de aço mais produzido no mundo, representando cerca de 80% da produção mundial de aço. Em geral, são definidos como ligas de ferro que contém um teor de manganês menor que 1,65%, um teor de silício menor que 0,6% e um teor total de outros elementos que não ultrapassa 2% (TSCHIPTSCHIN, 2019).

Os aços-carbono são amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás, em oleodutos para fins de extração e transporte desses combustíveis. Isto se deve, principalmente, ao seu baixo custo de produção, o que torna possível variar significativamente suas propriedades com pequenas modificações em sua composição química (SANTOS, SOUZA, BEZERRA, 2019).

Em todas as etapas, desde a extração até o refino e posterior armazenamento de produtos derivados do petróleo, os materiais que compõem os equipamentos necessários são submetidos a situações rigorosas: exposição a fluidos corrosivos, alta pressão e exposição a altas temperaturas. Sendo assim, os materiais utilizados para esta aplicação devem possuir propriedades específicas, como alta resistência à corrosão, alta tenacidade e resistência ao desgaste (SANTOS, SOUZA, BEZERRA, 2019).

Contudo, o aço-carbono possui limitações quanto à sua utilização neste setor, principalmente devido a sua baixa resistência à corrosão (MELO, FILHO, 2015). À vista disso, são realizadas inúmeras pesquisas em engenharia de materiais com o intuito de desenvolver combinações de aços-carbono com outras ligas ou aditivos e propriedades adequadas, a fim de mitigar os processos de desgaste corrosivo e mecânico que esses materiais sofrem ao serem utilizados para fabricação de equipamentos operantes na produção de óleo e derivados.

Diante de toda a literatura disponível a respeito da aplicação de aços-carbono na indústria de petróleo e gás, o presente trabalho visa sintetizar as conclusões de uma série de estudos sobre esse tema, categorizando os tópicos de forma lógica e subsequente. Dessa forma, será possível destacar as informações introdutórias e essenciais.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Elaborar uma revisão de literatura a respeito da aplicação de diversos produtos de aços-carbono na indústria de petróleo e gás, em busca de sumarizar as informações gerais mais relevantes acerca desse tema, fazendo da presente pesquisa uma boa leitura introdutória nesta área de estudo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar quais são as classes de aço-carbono mais utilizadas na indústria de petróleo e gás, bem como as normas que regulamentam suas respectivas propriedades mecânicas e composição química;
- Estudar os principais tipos de desgastes sofridos pelos aços-carbono quando aplicados na indústria de petróleo e gás, além das suas formas de mitigação;
- Discutir sobre os desgastes que os aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás sofrem, além de discorrer a respeito dos respectivos possíveis processos de mitigação destes desgastes.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, serão apresentados os conceitos fundamentais para compreensão do tema do presente estudo. Assim, serão discutidos os conhecimentos acerca dos aços-carbono, incluindo suas propriedades, classificações e aplicações. A utilização destes aços na indústria de petróleo e gás também será abordada previamente, de forma a introduzir as discussões posteriores.

#### 3.1 Aços

Os aços são ligas cuja definição pode não ser tão simples, visto que os aços comerciais geralmente são ligas não-binárias. Isso ocorre porque, apesar dos seus principais elementos de liga geralmente serem o ferro e o carbono, os aços contêm algumas quantidades de elementos secundários, inseridos em sua composição devido aos processos de fabricação. A presença desses elementos pode ser proposital, quando, por exemplo, deseja-se aprimorar uma propriedade do produto final. Contudo, alguns elementos quase sempre presentes no aço podem ser considerados impurezas no material, por causa dos impactos negativos que proporcionam; tem-se o enxofre, fósforo, silício e manganês como exemplos mais comuns (CHIAVERINI, 2015).

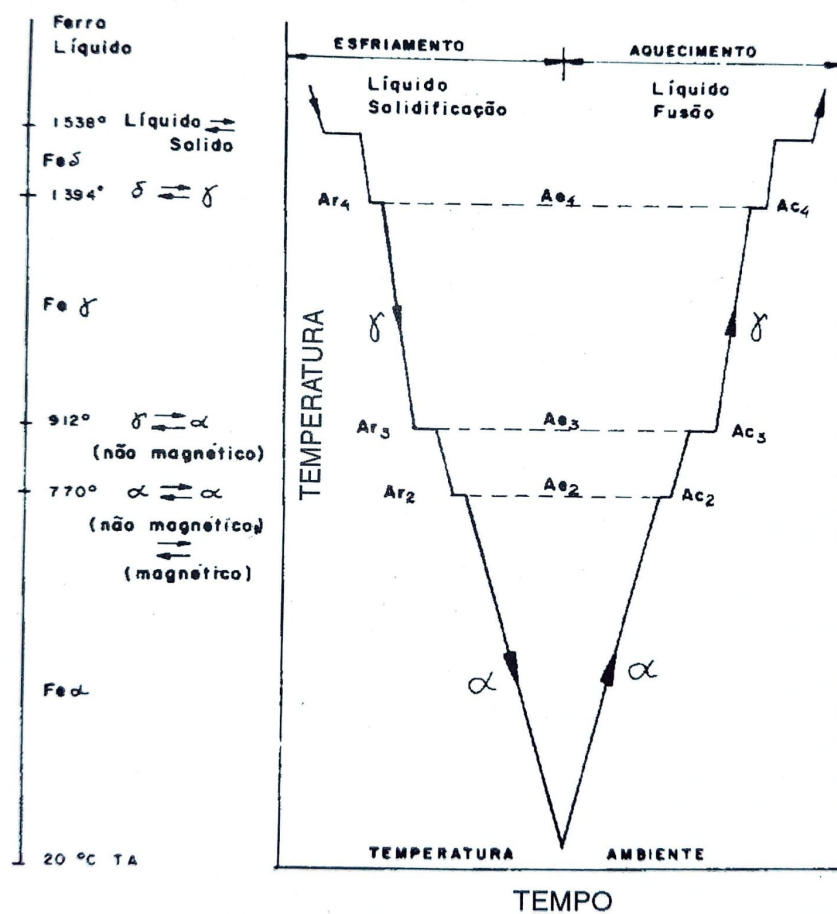
Chiaverini (2015) define aço como uma liga ferro-carbono cuja composição química contém de 0,008%pC a 2,11%pC, aproximadamente, além da presença de outros elementos residuais devido ao processo de fabricação.

Para abordar os limites de composição que caracterizam os aços, é necessário compreender as transformações alotrópicas que o ferro, principal constituinte deste material, sofre no aquecimento e no resfriamento. Na temperatura ambiente, o ferro é estável na forma da fase ferrita, de estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC), e pode ser denominado ferro  $\alpha$ . Durante o aquecimento, a 912 °C, o ferro sofre uma transformação polimórfica da fase ferrita para a fase austenita, também chamada de ferro  $\gamma$ , que possui uma estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC). Com o aumento da temperatura, esta

austenita é mantida até a temperatura de 1394 °C, onde é revertida novamente em uma fase CCC chamada de ferrita  $\delta$  (CALLISTER, 2012).

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática destas transformações.

Figura 1 — Representação esquemática das transformações alotrópicas do ferro



Fonte: Chiaverini (2015, p. 23).

Dado que o carbono é uma impureza intersticial do ferro, sua solubilidade é limitada pela forma e pelo tamanho dos sítios intersticiais que acomodam seus átomos. Sendo assim, na definição de aço, o limite inferior de composição do carbono corresponde à máxima solubilidade do carbono na ferrita. Ou seja, em temperatura ambiente, a partir de 0,008%, o

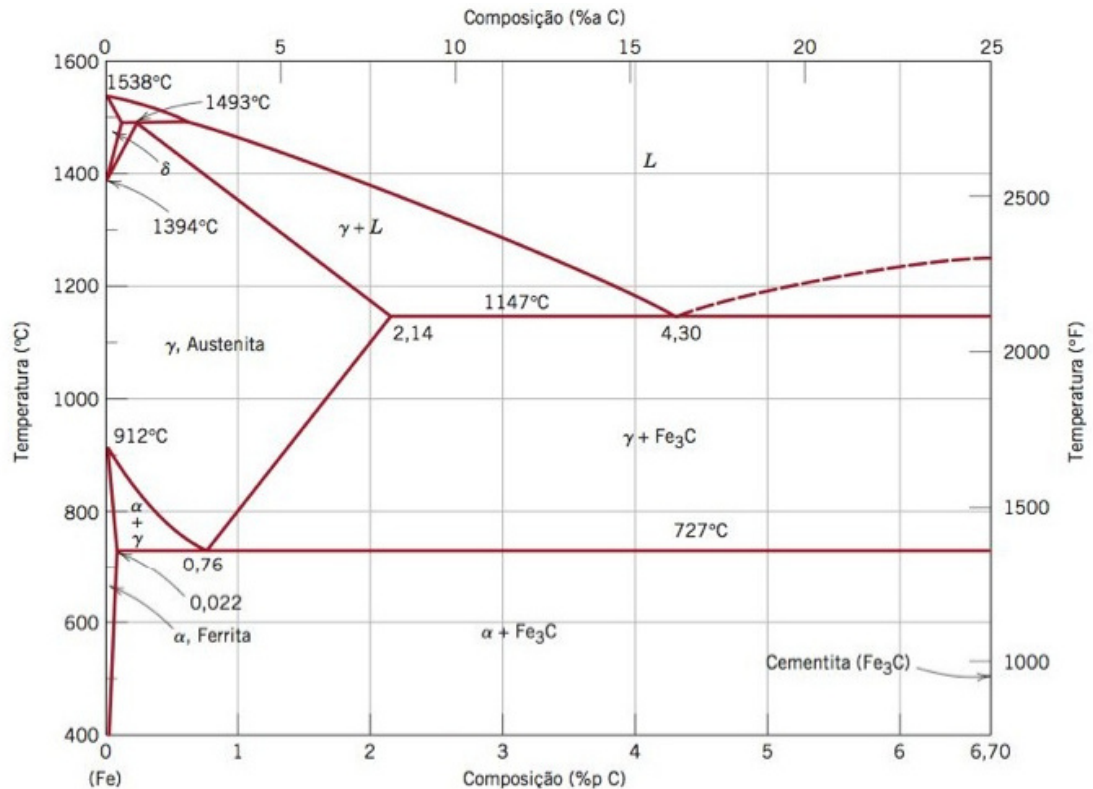
carbono passa a precipitar na matriz de ferro. É válido ressaltar que, exatamente a 727 °C, temperatura do ponto eutetóide, quando uma mistura de frações de ferrita e a austenita transformam-se em uma mistura de ferrita e da fase cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), a solubilidade do carbono na ferrita é de 0,022%pC (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2015).

Por sua vez, o limite superior de composição de carbono dos aços de 2,11%pC é a quantidade máxima de carbono capaz de se dissolver na fase austenita, na temperatura de 1147 °C. A solubilidade do carbono na austenita é muito maior do que na ferrita devido aos seus maiores sítios intersticiais (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2015).

É sabido que, na verdade, esse teor depende de outros fatores, como da presença ou não de outros elementos de liga ou da presença de elementos residuais (quando em teores acima dos considerados normais para os aços). Outro fato importante em relação ao limite superior de teor de carbono em aços é: a partir dele, é adotada a separação teórica dos aços e dos ferros fundidos, que são ligas Fe-C-Si com composição de carbono acima de 2,11%, quantidade maior do que a capaz de ser retida em solução sólida na fase ferro  $\gamma$  (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2015).

A Figura 2 mostra o diagrama de fases do sistema binário ferro-carbeto de ferro, onde se pode observar o explanado anteriormente. O diagrama apresenta as fases em equilíbrio da liga binária de acordo com a composição de carbono e variação da temperatura para teores de até 6,70%pC (CALLISTER, 2012).

Figura 2 — Diagrama de Fases ferro-carbeto de ferro



Fonte: Callister (2012, p. 272).

De acordo com o ponto eutetóide observado no diagrama da Figura 2, cujas coordenadas são a composição de 0,77% de carbono e a temperatura de 727 °C, torna-se válido evidenciar que os aços podem ser classificados de três formas: aços eutetóides, com teor de carbono de 0,77%; aços hipoeutetóides, com composição menor que 0,77%pC, e aços hipereutetóides, com teor de carbono entre 0,77% e 2,11% (CHIAVERINI, 2015).

Para melhor compreensão das propriedades tratadas ao longo do presente trabalho, as fases mostradas na Figura 2 serão descritas mais detalhadamente a seguir, de acordo com as definições de Silva e Mei (1988):

- **Ferrita (ferro  $\alpha$ ):** solução sólida de carbono em ferro de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), presente até a temperatura de 912 °C, quando é transformada em austenita. A solubilidade do carbono no ferro nesta fase é muito baixa, sendo 0,008% na temperatura ambiente e chegando ao

máximo de 0,022% a 727 °C. O produto siderúrgico composto 100% pela fase ferrita é chamado ferro comercialmente puro;

- **Austenita (ferro  $\gamma$ ):** solução sólida de carbono em ferro de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). É uma fase existente na faixa de temperaturas de 912 °C a 1495 °C, com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% na temperatura de 1148 °C — embora o fator de empacotamento atômico (FEA), que corresponde à fração do volume preenchido da célula unitária, seja maior para estruturas CFC do que para estruturas CCC, a solubilidade do carbono na austenita é muito maior do que na ferrita por causa dos maiores sítios intersticiais. Ressalta-se que existem elementos de liga que podem ser adicionados com o intuito de estabilizar essa fase à temperatura ambiente, porém abordar esse assunto não faz parte do presente estudo;
- **Ferrita  $\delta$ :** solução sólida de carbono em ferro cúbico de corpo centrado, estável até o ponto de fusão do ferro, em 1538°. Essa fase é originada com pequenos teores de carbono e uma temperatura acima de 1394 °C. A solubilidade do carbono na ferrita  $\delta$  é maior do que na ferrita  $\alpha$ , sendo 0,09%, isso porque a dissolução do carbono é favorecida com a agitação térmica que, por sua vez, é maior em altas temperaturas;
- **Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):** carbeto de ferro com estrutura cristalina ortorrômbica, que possui elevada dureza. Quando a temperatura de transformação da austenita remanescente em ferrita (727 °C) é atingida, a mudança de fases ocorre de forma brusca, de modo que os constituintes que resultam dela, ferrita ou austenita de um lado e carbono na forma de cementita do outro, não possuem tempo suficiente para assumir posições perfeitamente distintas. É assim que a cementita dá origem ao microconstituente denominado de perlita, que consiste em uma mistura de duas fases, a ferrita e a cementita, dispostas na forma de lamelas delgadas e paralelas, distribuídas alternadamente e muito próximas.

A utilização do aço para fabricação de diversos produtos se popularizou no mundo há bastante tempo, e tem sido cada vez mais aperfeiçoada conforme o ser humano domina os processos de fabricação. O uso do aço se difundiu pela excelente relação custo/benefício, justificada pelo seu preço relativamente baixo de fabricação e pelas excelentes propriedades capazes de serem obtidas e versatilidade, dada sua boa resistência mecânica e conformabilidade; é claro que estas propriedades e outras propriedades dependem diretamente da composição química e procedimentos aos quais o aço é submetido, sendo distintas para diferentes tipos de aço (TSCHIPTSCHIN, 2019).

De forma geral, os aços são materiais usados abundantemente em todos os ramos produtivos, tendo destaque nas indústrias de construção civil, aeroespacial, naval e de energia. São aplicados, por exemplo, em hidrelétricas, termelétricas, usinas nucleares, plataformas, tubulações e na fabricação de equipamentos de prospecção e extração de petróleo, sendo fundamentais na produção e distribuição de energia no Brasil e no mundo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

### ***3.1.1 Aços-carbono***

Os aços-carbono são o tipo de aço mais produzido no mundo, representando cerca de 80% da produção mundial de aço, e empregados de forma mais intensiva em numerosas aplicações. Em geral, são ligas de ferro que contém um teor de manganês menor que 1,65%, um teor de silício menor que 0,6% e um teor total de outros elementos que não ultrapassa 2%; esses elementos residuais são inseridos na composição química dos aços-carbono durante o processo de fabricação (TSCHIPTSCHIN, 2019).

A norma 6006 da ABNT ainda destaca que os aços-carbono podem conter um teor máximo de alumínio de 0,1%, teor mínimo de boro de 0,0005%, teor máximo de cobre de 0,3% e um teor máximo de chumbo de 0,35%. E os aços com essas características permanecem sendo considerados aços-carbono mesmo com a adição de outros elementos em sua composição química visando melhorar a usinabilidade, tais como selênio, telúrio, bismuto e nióbio (apud CHIAVERINI, 2015).

### 3.1.1.1 Classificações dos aços-carbono

Chiaverini (2015) afirma que, em relação ao teor de carbono, os aços-carbono podem ser subdivididos em três grupos:

- Aços de baixo teor de carbono, que contém teores de C inferiores a 0,2%;
- Aços de médio teor de carbono, com %pC entre 0,2% e 0,5%;
- Aços de alto teor de carbono, com uma composição de acima de 0,5%pC a 2,11%pC, aproximadamente.

Cada um desses grupos possui propriedades e aplicações distintas, e isso será abordado com mais detalhes nos próximos tópicos do presente estudo.

Quanto à nomenclatura, o American Iron and Steel Institute (AISI) e a Society of Automotive Engineers (SAE) denominaram os aços-carbono e os demais aços utilizando quatro dígitos, isto é, no formato XXXX, onde os primeiros dois dígitos indicam os elementos de liga presentes e seus respectivos teores e os dois últimos se referem ao teor de carbono. A American Society for Testing Materials (ASTM) aprimorou as nomenclaturas do AISI e da SAE, adicionando às denominações dos aços letras que correspondem a especificações do seu tipo e/ou produção, além de alterar o número de dígitos para cinco. Para aços-carbono e aços ligados, adicionou-se a letra “G” no início. Dessa forma, o aço AISI 1020 é equivalente ao aço G10200 (KALPAKJIAN, 2009).

Aços-carbono contendo enxofre e fósforo são denominados, respectivamente, de aços-carbono resulfurizados (série 11XX) e aços-carbono refosforizados (série 12XX). Assim, por exemplo, o aço-carbono 1112 é um aço resulfurizado que contém aproximadamente 0,12%pC (KALPAKJIAN, 2009).



### 3.1.1.2 Propriedades dos aços-carbono

Segundo Chiaverini (2015), as propriedades dos aços-carbono são afetadas principalmente por dois fatores: a composição química e a microestrutura.

A presença de carbono influencia as propriedades destes materiais, de forma que, em aços-carbono resfriados lentamente (ou seja, em condições em que a austenita é capaz de se transformar completamente), melhora a temperabilidade, a resistência mecânica, a dureza e a resistência ao desgaste, e também reduz a ductilidade, a soldabilidade e a tenacidade (CHIAVERINI, 2015; KALPAKJIAN, 2009).

Na Tabela 1, é possível verificar a variação das propriedades mecânicas dos aços-carbono resfriados lentamente em função do teor de carbono. Através da análise dos dados da tabela, conclui-se que, à medida que se aumenta o teor de carbono, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração (LRT) e a dureza tendem a aumentar.

Tabela 1 — Propriedades mecânicas de aços-carbono resfriados lentamente em função do teor de carbono

<b>Carbono (%p)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento em 2” (%)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>
0,01	125	275	47	90
0,20	250	405	37	115
0,40	300	515	30	145
0,60	340	660	23	190
0,80	355	785	15	220
1,00	355	745	22	195
1,20	350	705	24	200
1,40	340	685	19	215

Fonte: Chiaverini (2015, p. 34, com adaptações).

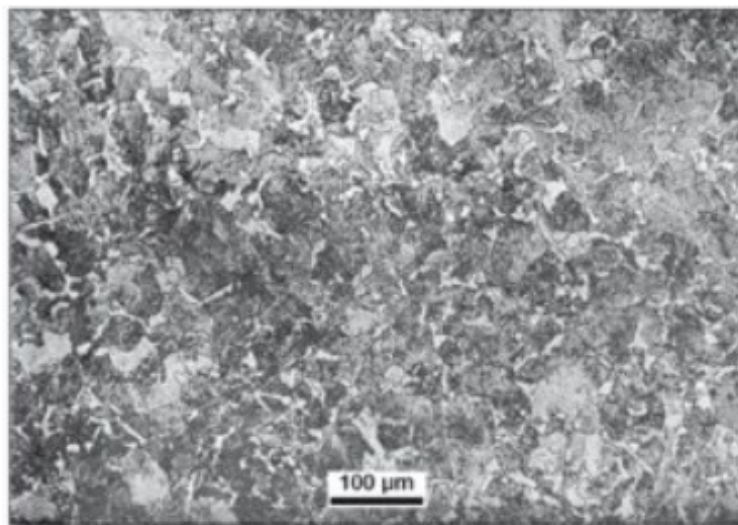
Os teores dos elementos residuais, como enxofre, fósforo, silício, manganês e alumínio, também alteram as características do aço-carbono, principalmente devido a formação de inclusões não-metálicas — que são produtos das reações destes elementos entre si e/ou com o oxigênio e o nitrogênio formados, em sua maioria, na fase de desoxidação dos aços. Dependendo do tipo de inclusão, os aços-carbono podem apresentar uma piora (o que é mais o caso mais comum de ocorrer) ou uma melhora em suas propriedades (CHIAVERINI, 2015).

Baseado na composição química, os aços-carbono apresentam diferentes propriedades (CHIAVERINI, 2015; CALLISTER, 2012). Veja algumas destas a seguir:

- Aços de baixo teor de carbono: possuem alta tenacidade e ductilidade, baixa resistência e dureza, adequada usinabilidade e soldabilidade. Possuem maior resistência à corrosão em relação aos demais aços-carbono. Normalmente, estes aços não são tratados termicamente;
- Aços de médio teor de carbono: em comparação aos de baixo teor de carbono, têm maior resistência, maior dureza, menor tenacidade e menor ductilidade. Possuem ainda um teor de carbono adequado para a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento;
- Aços de alto teor carbono: apresentam as maiores resistência mecânica e dureza e menor ductilidade entre os aços-carbono. Em geral, produtos fabricados a partir destes aços passam pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para melhorar suas propriedades mecânicas.

Segundo Silva e Mei (1988), em relação à microestrutura, sabe-se que, em aços hipoeutetóides, tem-se a presença da fase ferrita e do microconstituente perlita, assim como mostra a Figura 3, cujas partes claras correspondem à fase ferrita e as partes mais escuras são aquelas onde há a presença de perlita.

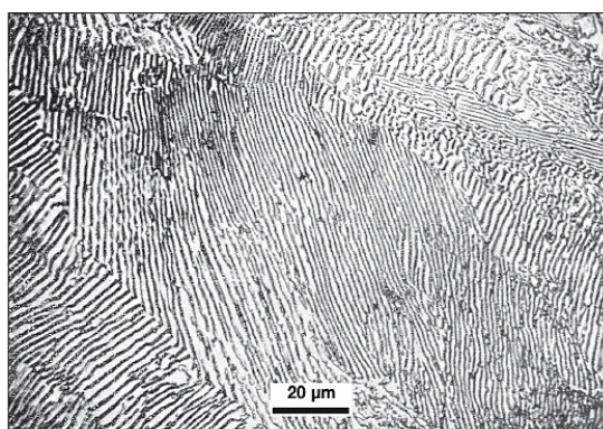
Figura 3 — Microestrutura de um aço de composição hipoeutetóide resfriado lentamente (ataque químico com Nital)



Fonte: Colpaert (2008, com adaptações).

A Figura 4 apresenta a microestrutura característica de aços eutetóides, a qual, assim como descrita por Costa e Mei (1988), contém somente o microconstituente perlita. É possível verificar as lamelas de cementita (escuras) e as lamelas de ferrita (claras).

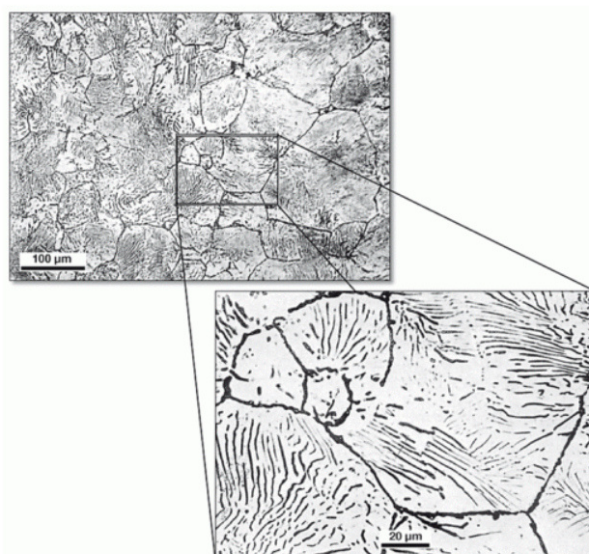
Figura 4 — Microestrutura de um aço de composição eutetóide resfriado lentamente (ataque químico com Nital)



Fonte: Colpaert (2008).

Na Figura 5, mostra-se a microestrutura dos aços hipereutetóides, caracterizada pela existência do microconstituente perlita e da fase cementita (SILVA, MEI, 1988). Na ampliação da microestrutura, observa-se a cementita pró-eutetóide e as lamelas de cementita da perlita, que aparecem pretas.

Figura 5 — Microestrutura de um aço de composição hipereutetóide (ataque químico com Picrato de Sódio)



Fonte: Colpaert (2008).

A microestrutura dos aços depende também do processo de fabricação, o qual pode proporcionar muitas alterações. Como implicam em características cruciais, torna-se necessário estudar a forma com a qual os materiais de aço-carbono são produzidos, e, no que se refere a isso, Chiaverini (2015) sumariza os principais efeitos de cada tipo de processo de fabricação, de forma que:

- Se o aço é fundido, normalmente apresenta grãos mais grosseiros em sua microestrutura, que será do tipo dendrítica, dado que o resfriamento no interior dos moldes é, em geral, mais lento;
- Se o aço passa por um trabalho a quente, como laminação ou forjamento, que são processos de conformação mecânica, ocorrem: a homogeneização de sua

microestrutura, uma destruição da estrutura dendrítica e uma recristalização influenciada pelo tamanho dos grãos. Assim, as propriedades mecânicas de um produto de aço-carbono trabalhado a quente podem ser melhores do que aquelas verificadas para materiais de aço-carbono fundidos;

- Caso o aço-carbono seja trabalhado a frio, isto é, encruado, há um aumento da resistência mecânica e da dureza, e uma diminuição da ductilidade e da tenacidade. Esse processo é utilizado comumente para produção de fios, fitas e chapas.

Outro fator que influencia as propriedades dos aços-carbono são os tratamentos térmicos, que são um conjunto de operações ao qual os aços podem ser submetidos a fim de se alterar determinadas características. Essas operações são realizadas sob condições controladas, com um controle rigoroso da temperatura, tempo, atmosfera e, principalmente, da velocidade de resfriamento (CHIAVERINI, 2008).

É necessário entender como as propriedades mecânicas dos aços-carbono também são afetadas pelos tratamentos térmicos, porque estes modificam as características microestruturais. À vista disso, a seguir apresentam-se, segundo Callister (2012), breves descrições dos principais tratamentos térmicos realizados nos aços-carbono, bem como de seus objetivos e efeitos:

- **Recozimento:** é o aquecimento e permanência de um material a uma temperatura bem definida — a qual, para aços-carbono, é bem próxima ou acima da temperatura eutetóide —, seguido de um resfriamento lento. Desta forma, é possível proporcionar um alívio de tensões, induzindo um aumento da ductilidade e da tenacidade. Em termos metalúrgicos, outro objetivo do recozimento, é obter uma microestrutura específica, geralmente de equilíbrio do material em questão (prevista no diagrama de fases), dadas as condições de resfriamento;
- **Normalização:** consiste em aquecer um determinado material por volta de 40-60 °C acima de sua temperatura crítica superior, a fim de promover sua

completa austenitização, e, em seguida, resfriá-lo ao ar. Geralmente, este tratamento térmico é aplicado, em aços antes deformados, os quais possuem uma microestrutura irregular e variante, com o objetivo de obter uma microestrutura final homogênea e refinada, promovendo um aumento na tenacidade;

- **Têmpera:** neste tratamento térmico, o material passa por uma austenitização e, então, sofre um resfriamento abrupto, em um meio como água, óleo ou salmoura. Visa-se criar uma microestrutura martensítica e/ou bainítica, o que pode aumentar drasticamente as propriedades de dureza e resistência mecânica dos aço-carbono. A formação da fase martensita depende do teor de carbono e de outros elementos de liga, do meio de resfriamento e da geometria da amostra. É válido ressaltar que, normalmente, aços que passam por esse processo apresentam uma diminuição de tenacidade e de ductilidade;
- **Revenimento:** geralmente, é um processo realizado após o tratamento térmico de têmpera, com o objetivo de aliviar as tensões induzidas por este processo, dada a formação de martensita, e também de formar uma microestrutura definida como martensita revenida, a qual consiste em uma matriz ferrítica com partículas muito pequenas e homogêneas de cementita. Assim, a ductilidade e a tenacidade dos aços são melhoradas, sendo possível manter níveis relativamente altos de resistência e dureza.

Embora muitos dos aços-carbono de baixo e de médio teor de carbono sejam utilizados nas condições típicas de fabricação por meio de trabalho a quente, nos estados forjado e laminado, os produtos de aços-carbono de alto teor de carbono quase sempre são submetidos a tratamentos térmicos antes de serem aplicados (CHIAVERINI, 2008).

A critério de exemplificar essas mudanças, a Tabela 2 apresenta como algumas propriedades mecânicas dos aços-carbono AISI 1020 e AISI 1080 se comportam diante dos tratamentos térmicos de normalização e recozimento, onde se percebe que acentuadas mudanças no limite de resistência à tração e na dureza.

Tabela 2 — Propriedades mecânicas dos aços-carbono AISI 1020 e AISI 1080 em função dos tratamentos térmicos de normalização e recozimento

<b>Aço-carbono</b>	<b>Condição</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Elongação em 50mm (%)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>
AISI 1020	Como laminado	346	448	36	143
	Normalizado	330	441	35	131
	Recozido	294	393	36	111
AISI 1080	Como laminado	586	1010	12	293
	Normalizado	524	965	11	293
	Recozido	374	615	24	174

Fonte: Kalpakjian (2009, p. 139, com adaptações).

### 3.1.1.3 Aplicações dos aços-carbono

Os três tipos aços-carbono possuem aplicações distintas: os aços de baixo teor de carbono são comumente empregados na fabricação de chapas automobilísticas, produção de tubos, folhas de flandres, vigas, canaletas e utensílios domésticos da linha branca; os aços médio teor de carbono são usados, por exemplo, em placas de aços estruturais empregados na indústria de construção civil e da construção mecânica, virabrequins e rodas, e, por sua vez, uma das aplicações mais conhecidas dos aços de alto teor de carbono é a produção de trilhos e arames de alta resistência (TSCIPTSCHIN, 2019; KALPAKJIAN, 2009; CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2015).

A Tabela 3 apresenta algumas aplicações dos aços-carbono de acordo com a classificação do AISI.

Tabela 3 — Algumas aplicações dos aços-carbono

<b>Aço-carbono (AISI)</b>	<b>Produtos</b>
1010	Chapas automobilísticas
1020	Cames
1035	Parafusos
1040	Eixos, cames, varas de conexão, tubos
1045	Virabrequins (forjados), arames
1055	Arames
1060	Arruelas de bloqueio
1080	Trilhos ferroviários e rodas
1085	Arames (cordas musicais), molas (folhas)
1095	Molas (bobinas)
1145	Virabrequins (forjados)

Fonte: Kalpakjian (2009, p. 137, com adaptações).

É válido ressaltar que a utilização de aços-carbono ainda é limitada por alguns fatores, tais como sua resistência à corrosão, o que pode restringir seu uso em ambientes mais agressivos, resistência ao calor, resistência ao desgaste e tenacidade, além de suas características elétricas e magnéticas. Contudo, estas características podem ser otimizadas de várias formas (CHIAVERINI, 2015).

Inclusive, os aços-carbonos já são aplicados em condições de trabalho mais severas, e existem diversos estudos que discorrem sobre esse assunto, estudos estes que serão abordados posteriormente no presente trabalho.



### 3.1.1.3.1 Utilização de aço-carbono na indústria de petróleo e gás

Os aço-carbono são amplamente utilizados em oleodutos, para fins de extração e transporte de petróleo e gás natural. Estes materiais também são aplicados em outros componentes de etapas subsequentes de obtenção de produtos derivados. Isto se deve, principalmente, ao seu baixo custo de produção, sendo possível variar significativamente suas propriedades com pequenas modificações em sua composição química (SANTOS, SOUZA, BEZERRA, 2019).

Todavia, o aço-carbono possui limitações quanto à sua utilização neste setor. As propriedades de resistência à corrosão, sob ação do calor e consequente resistência ao desgaste são baixas (SANTOS, SOUZA, BEZERRA, 2019). Um dado importante a ser mencionado é que cerca de 20% da produção total de aço-carbono é destinada apenas para substituição de componentes corroídos. A indústria do petróleo tem grandes prejuízos por conta da alta corrosividade de seu sistema de produção (MELO, FILHO, 2015).

Tubos de aço-carbono e tubulações são suscetíveis ao desgaste corrosivo devido à natureza erosiva e corrosiva do fluido ou gás produzido na indústria de petróleo e gás (MUTAHHAR *et al.*, 2017).

À vista disso, são realizadas inúmeras pesquisas de engenharia de materiais, com o intuito de desenvolver combinações de aço-carbono com outras ligas ou aditivos e propriedades adequadas, assim mitigando o processo corrosivo destes materiais nas diversas etapas de produção de óleo e derivados, mantendo-se um baixo custo.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Tipo de estudo**

O presente trabalho é uma pesquisa bibliográfica desenvolvida a partir de estudos exploratórios da literatura disponível a respeito de sua temática escolhida. Assim como define Gil (2008), esse tipo de estudo é constituído principalmente da análise de livros e artigos científicos, tendo sua argumentação inteiramente embasada em fontes bibliográficas.

### **4.2 Materiais de estudo**

Na apresentação do tema e explicações iniciais, este trabalho referencia livros conceituados na área de engenharia geral e engenharia metalúrgica, que abordam definições essenciais para a compreensão do assunto. Para a construção da argumentação acerca da aplicação dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás, foram utilizados como material bibliográfico, principalmente, diversos livros, artigos científicos, em sua maioria disponíveis no site do ScienceDirect e na base de busca do Google Acadêmico, e sites de fabricantes.

O estudo foi complementado com a análise de algumas normas técnicas e, além disso, de monografias, dissertações e teses acessadas através dos repositórios das universidades.

### **4.3 Coleta de dados**

Na seleção de materiais para leitura, usou-se como critério de inclusão a compatibilidade com o tema de interesse, muitas vezes verificada pelas palavras-chave e resumos dos artigos e demais trabalhos acadêmicos. Assim, foram escolhidos aqueles trabalhos que abordavam a aplicação de algum produto de aço-carbono na indústria de petróleo e gás, com os devidos dados de estudos sobre as suas respectivas propriedades mecânicas, processos de fabricação e resistência à corrosão.

Após coletados, realizou-se uma leitura inicial dos materiais e, em seguida, uma leitura focada no aprofundamento nos tópicos mais pertinentes e cabíveis ao presente estudo.

#### **4.4 Análise dos dados coletados**

Através de uma leitura analítica e crítica, a fim de sumarizar as informações encontradas, as informações mais relevantes de cada trabalho foram selecionadas e organizadas de forma direta, e a argumentação foi realizada de forma a destacar os pontos convergentes, divergentes e complementares de cada estudo.

#### **4.5 Aspectos Éticos**

Durante todo o processo de elaboração e execução desta pesquisa exploratória, houve total responsabilidade em relação à quebra de direitos autorais. Todas as referências bibliográficas de textos, citações diretas e indiretas, figuras, gráficos e tabelas foram devidamente elaboradas seguindo a regente norma ABNT NBR 6023. Registraram-se os nomes dos autores, ano de publicação e demais informações de publicação; todas estas informações constam organizadas nas referências deste trabalho. Dessa forma, reforça-se que todos os dados coletados foram utilizados exclusivamente para fins científicos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente tópico, serão apresentadas todas as pesquisas e demais materiais utilizados como objeto de estudo deste trabalho. Para melhorar a compreensão dos temas abordados, subdividiu-se a discussão em subtópicos.

### 5.1 A indústria de petróleo e gás

O setor de petróleo e gás representa, atualmente, uma das maiores parcelas de fonte econômica e desenvolvimento do país. Segundo dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), esse setor concentra cerca de 13% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, assim como metade da oferta de energia nacional. Por se tratar de um combustível relativamente barato e de alta eficiência, a exploração do petróleo é dominante, mesmo com o crescimento recente de outras fontes de energia (LASEBIKAN *et al.*, 2011).

Ao longo dos anos, buscaram-se soluções em relação à exploração de petróleo e gás natural, que são combustíveis fósseis, uma vez que a produção e pesquisa em terra se tornaram escassas, tornando assim necessária a busca destes fluidos em ambientes considerados mais severos.

Um exemplo é o pré-sal brasileiro, na Bacia de Santos, que consiste em reservatórios de rochas carbonáticas localizados em águas profundas e ultraprofundas, sob uma espessa camada de sal que se estende desde o Espírito Santo até Santa Catarina, indo até quatro quilômetros abaixo do fundo marinho (RICCOMINI, SANT'ANNA, TASSINARI, 2012). Os componentes utilizados em equipamentos para exploração de petróleo no pré-sal brasileiro são submetidos a altas pressões de operação, por volta de 550 bar (FARIAS, FILHO, PAYÃO, 2018).

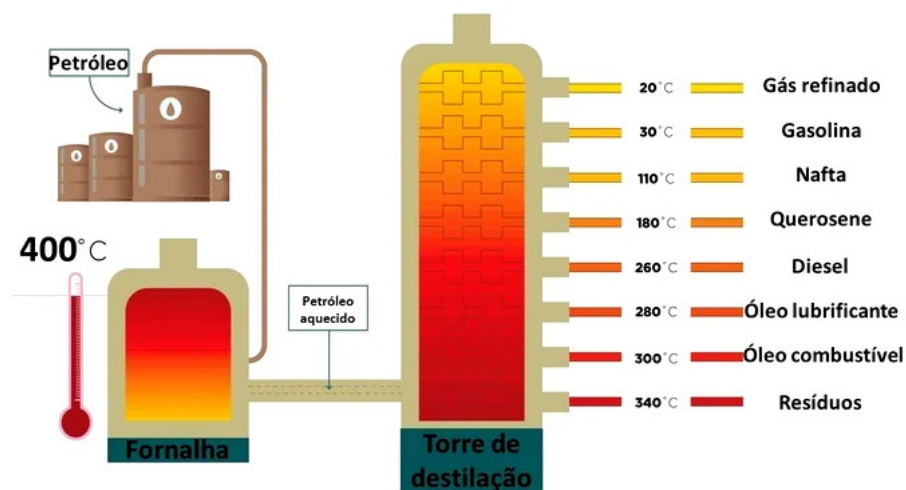
É válido mencionar que, além de petróleo e gás natural, são encontrados, em reservatórios, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contaminantes como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e água. O CO<sub>2</sub> pode ser tratado e reinjetado nos reservatórios como forma de melhora na

eficiência de produção. Os contaminantes e água também são tratados de forma devida, sendo alguns passíveis de reutilização (FARIAS, FILHO, PAYÃO, 2018).

Após a extração, o petróleo é transportado através de oleodutos ou Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Transferência — do inglês *Floating, Production, Storage and Offloading* (FPSO) — para refinarias. Estas realizam tratamentos de separação, conversão e tratamento dos diversos hidrocarbonetos existentes no óleo para produzir combustíveis, lubrificantes e matérias-primas (PETROBRAS, 2002).

A Figura 6 ilustra o processo de destilação para separação dos componentes do óleo, feito através do aquecimento deste em um forno. A destilação ocorre por diferença de ponto de ebulição. À medida que um determinado hidrocarboneto evapora, a torre de destilação o separa dos demais por diferença de densidade (PETROBRAS, 2002).

Figura 6 — Torre de Destilação para separação de derivados do petróleo bruto



Fonte: Batista (2021).

Nota-se que, em todas as etapas, desde a extração até o refino e posterior armazenamento de produtos derivados do petróleo, os materiais que compõem os equipamentos necessários são submetidos a situações rigorosas: exposição a fluidos corrosivos, alta pressão e exposição a altas temperaturas. Sendo assim, os materiais utilizados para esta aplicação devem

possuir propriedades específicas, como alta resistência à corrosão, alta tenacidade e resistência ao desgaste (SANTOS, SOUZA, BEZERRA, 2019).

## **5.2 A utilização de aços-carbono na indústria de petróleo de gás**

Os aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás devem cumprir uma série de requisitos a respeito de sua composição química e propriedades, a fim de satisfazerem suas funções de forma adequada. Estas exigências são normatizadas de acordo com diversas instituições, como a American Petroleum Institute (API), American Society for Testing and Materials (ASTM), International Organization for Standardization (ISO) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A seguir, apresentam-se algumas das principais normas aplicadas à indústria de petróleo e gás, com breves descrições sobre os dados das propriedades dos materiais regulamentados. Contudo, a priori, é válido ressaltar que as classificações de aços-carbono AISI/SAE mencionadas no subtópico 3.1.1.1 deste trabalho também são válidas, sendo os aços mais utilizados aqueles da categoria 10XX.

### **5.2.1 Normas ISO 3183 e API 5L**

As normas ISO 3183 e API 5L são normas que regulamentam padrões para dutos aplicados em transporte de óleo, gás e água na indústria de petróleo e gás. Aos aços-carbono incluídos neste documento, geralmente são atribuídas nomenclaturas de acordo com a forma “API 5L XYY”, onde cada letra “Y” representa dois números, ou “API 5L Gr. X”, onde a letra “X” representa uma letra (SHARMA, MAHESHWARI, 2016).

Os aços API são produzidos de acordo com duas categorias: a PSL 1 e a PSL 2. A diferença entre estas especificações é que a PSL 2 possui requisitos mínimos de carbono equivalente (cuja fórmula é apresentada na Equação 1), tenacidade ao impacto, tensão de escoamento e limite de resistência à tração do aço; enquanto isso, a especificação PSL 1 exige

apenas uma mínima tenacidade ao impacto, mínima tensão de escoamento e mínimo limite de resistência à tração (SHARMA, MAHESHWARI, 2016).

$$\%C_e = \%C + \frac{(\%Mn + \%Si)}{6} \quad (\text{Equação 1})$$

As Tabela 4 e 5 contêm as principais especificações dos aços API 5L PSL 1 e PSL 2, respectivamente, em termos da composição química e de algumas propriedades mecânicas.

Tabela 4 — Especificações dos aços API 5L PSL 1

Especificação API 5L PSL 1	Composição Química (%)				Propriedades Mecânicas	
	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	LRT (MPa, mín)	Tensão de Escoamento (MPa, mín)
API 5L A25	0,21	0,60	0,03	0,03	310	172
API 5L Gr. A	0,22	0,90	0,03	0,03	331	207
API 5L Gr. B	0,26	1,20	0,03	0,03	414	241
API 5L X42	0,26	1,30	0,03	0,03	414	290
API 5L X46	0,26	1,40	0,03	0,03	434	317
API 5L X52	0,26	1,40	0,03	0,03	455	359
API 5L X56	0,26	1,40	0,03	0,03	490	386
API 5L X60	0,26	1,40	0,03	0,03	517	414
API 5L X65	0,26	1,45	0,03	0,03	531	448
API 5L X70	0,26	1,65	0,03	0,03	565	483

Fonte: Project Materials (2017).

Tabela 5 — Especificações dos aços API 5L PSL 2

Especificação API 5L PSL 2	Composição Química (%)				Propriedades Mecânicas	
	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	LRT (MPa, mín)	Tensão de Escoamento (MPa, mín)
API 5L Gr. B	0,22	1,20	0,025	0,015	414-758	241-448
API 5L X42	0,22	1,30	0,025	0,015	414-758	290-496
API 5L X46	0,22	1,40	0,025	0,015	434-758	317-524
API 5L X52	0,22	1,40	0,025	0,015	455-758	359-531
API 5L X56	0,22	1,40	0,025	0,015	490-758	386-544
API 5L X60	0,22	1,40	0,025	0,015	517-758	414-565
API 5L X65	0,22	1,45	0,025	0,015	531-758	448-565
API 5L X70	0,22	1,65	0,025	0,015	565-758	483-565
API 5L X80	0,22	1,9	0,025	0,015	621-827	552-705

Fonte: Project Materials (2017).

### 5.2.2 Norma ASTM A106/A106M

A norma ASTM A106/A106M especifica os requisitos de composição química e propriedades de aços-carbono para dutos sem costura (não soldados) operantes em temperaturas elevadas. Esta norma possui três categorias, denominadas de Grau A, Grau B e Grau C (ASTM, 2008).

Abaixo, nas Tabelas 6 e 7, seguem as especificações de composição química e propriedades mecânicas, respectivamente, das três categorias.



Tabela 6 — Especificações de composição química dos aços via norma ASTM A106

<b>Composição Química (%)</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Grau A</b>	<b>Grau B</b>	<b>Grau C</b>
Carbono	0,25	0,30	0,35
Manganês	0,27-0,93	0,29-1,06	0,29-1,06
Fósforo (máx.)	0,035	0,035	0,035
Enxofre	0,035	0,035	0,035
Silício (mín.)	0,10	0,10	0,10
Cromo (máx.)	0,40	0,40	0,40
Cobre (máx.)	0,40	0,40	0,40
Molibdênio (máx.)	0,15	0,15	0,15
Níquel (máx.)	0,40	0,40	0,40
Vanádio (máx.)	0,08	0,08	0,08

Fonte: ASTM, 2008.

Tabela 7 — Especificações de propriedades mecânicas dos aços via norma ASTM A106

<b>Propriedade Mecânica</b>	<b>Grau A</b>	<b>Grau B</b>	<b>Grau C</b>
Limite de Resistência (MPa)	330	415	485
Tensão de Escoamento (MPa)	205	240	275

Fonte: ASTM, 2008.

### 5.2.3 Norma ASTM A53/A53M

A norma ASTM A53/A53M regulamenta as propriedades para dutos de aço-carbono fabricados sob diferentes condições, como sem costura, soldados, galvanizados a quente ou por deposição de zinco, entre outras. Em termos de composição química e propriedades mecânicas dos aços, esta norma é considerada equivalente à ASTM A106 (ASTM, 2012).

### 5.2.4 Norma ASTM A234/A234M

A norma ASTM A234/234M especifica as propriedades requeridas para aços-carbono e aços-liga forjados utilizados em conexões de tubos, operantes em temperaturas moderadas ou altas (ASTM, 2002). A composição química dos aços-carbono englobados nesta

norma é considerada equivalente às mencionadas anteriormente, com adição de teores limitados dos elementos cromo e molibdênio. Uma informação importante é a nomenclatura destes materiais, cuja divisão é feita em duas categorias de aços-carbono, ASTM A234 WPB e ASTM A234 WPC, cujas respectivas composições químicas são mostradas na Tabela 8 (ASTM, 2002).

Tabela 8 — Composição química dos aços ASTM A234

<b>Composição Química (%)</b>							
<b>ASTM A234 WPB</b>	<b>Carbono</b>	<b>Manganês</b>	<b>Fósforo (máx.)</b>	<b>Enxofre (máx.)</b>	<b>Silício (mín.)</b>	<b>Cromo (máx)</b>	<b>Molibdênio (máx)</b>
	0,30	0,29-1,06	0,05	0,058	0,10	0,40	0,15
<b>ASTM A234 WPC</b>	0,30	0,29-1,06	0,05	0,058	0,10	0,40	0,15

Fonte: ASTM (2002).

### **5.2.5 Norma ASTM A216/A216M**

Nesta norma, encontram-se as especificações de composição química e propriedades mecânicas dos aços-carbono fabricados por meio do processo de fundição e utilizados em válvulas na indústria de petróleo e gás, operantes em alta temperatura. Aqui, os aços possuem teores um pouco mais elevados de cromo e molibdênio em relação aos aços ASTM A234 (ASTM, 2021).

De acordo com esta norma, a nomenclatura dos aços, correspondente à composição química, pode ser do tipo WCA, que trata de ligas com 0,5%p de Cromo e 0,2%p de Molibdênio, ou WCB, que são ligas com 0,5%p de Cromo e 0,3%p de Molibdênio; ainda há a presença de outros elementos, como carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre, em teores equivalente aos das normas discutidas anteriormente (ASTM, 2021).

### 5.3 Principais aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás

Neste tópico, serão apresentados, de acordo com a literatura utilizada para o estudo em questão, alguns exemplos de aços-carbono aplicados em diversos setores da indústria de petróleo e gás.

Silva (2016) menciona a utilização do aço AISI/SAE 1020 em muitas linhas de processo do petróleo. Segundo a autora, este material possui alta estabilidade térmica e alto ponto de fusão. Contudo, é bastante susceptível à corrosão, mesmo com presença de inibidores ou em condição soldada. Shen *et al.* (2020) também enfatizam a utilização da liga AISI/SAE 1020. Em seu trabalho, os autores avaliaram a influência dos teores de S, Cl, H<sub>2</sub>O e número total de ácido na taxa de corrosão do aço. Os resultados deste estudo serão comentados posteriormente no presente trabalho.

A respeito de suas propriedades, sabe-se que, na condição laminado/normalizado, o aço AISI/SAE 1020 possui uma dureza de, aproximadamente, entre 121 HB, que equivale a 68 HRB (GERDAU, 2003). Na Tabela 9, encontram-se as informações sobre a composição química deste aço.

Tabela 9 — Composição química do aço AISI/SAE 1020

Composição Química (%)				
AISI/SAE	Carbono	Manganês	Fósforo (máx.)	Enxofre (máx.)
<b>1020</b>	0,18-0,23	0,30-0,60	0,04	0,05

Fonte: ABNT (2004).

Outro aço-carbono que possui ampla aplicação tanto em oleodutos para transporte de óleo e gás, quanto em componentes do sistema de refino, é o aço AISI/SAE 1045. Essa liga é bastante utilizada em conexões em separadores óleo-gás de unidades dessalinizadoras de refinarias (AZEVEDO, 2002; NASIRPOURI, 2014). A dureza do aço AISI/SAE 1045, na condição laminado/normalizado, é de, aproximadamente, 163 HB, que equivale a 84 HRB (GERDAU, 2003).

A Tabela 10 mostra os teores dos elementos de liga que compõem o aço AISI/SAE 1045.

Tabela 10 — Composição química do aço AISI/SAE 1045

Composição Química (%)				
AISI/SAE	Carbono	Manganês	Fósforo (máx.)	Enxofre (máx.)
<b>1045</b>	0,43-0,50	0,60-0,90	0,04	0,05

Fonte: ABNT (2004).

Abreu *et al.* (2019) menciona a utilização do aço API 5L Gr. B em oleodutos, gasodutos e dutos para transporte de água, em seu estudo de caso sobre a corrosão de tubulações do sistema STU-85 de uma base de pesquisa da Petrobras em Urucu-AM.

Ballesteros, Gomes e Bott (2015) citam que o aço API 5L X80 é usado para a confecção de oleodutos, em sua pesquisa a respeito da resistência à corrosão da liga em meios contendo sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S).

Bueno *et al.* (2017) relata em sua pesquisa o uso do aço API 5L X65 em componentes como válvulas de controle de segurança, pistões e bombas de sistemas de produção de petróleo.

As especificações de composição química e propriedades mecânicas dos aços API 5L Gr. B, API 5L X80 e API 5L X65 foram mencionadas anteriormente no presente trabalho, nas Tabelas 4 e 5.

O estudo de Panossian *et al.* (2012) trata sobre a corrosão do aço-carbono fundido ASTM A216 Gr. WCB, o qual atua como sede de válvulas, gavetas e tubulações de refinaria.

Em sua pesquisa, Gomes (2011) menciona a utilização do aço-carbono ASTM A106 Gr. B em fornos de refinarias de petróleo, mais especificamente no componente serpentina. Inclusive, em suas conclusões, afirma que há uma grande deterioração devido à corrosão em altas temperaturas.

#### 5.4 Relação entre a microestrutura e as propriedades dos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás

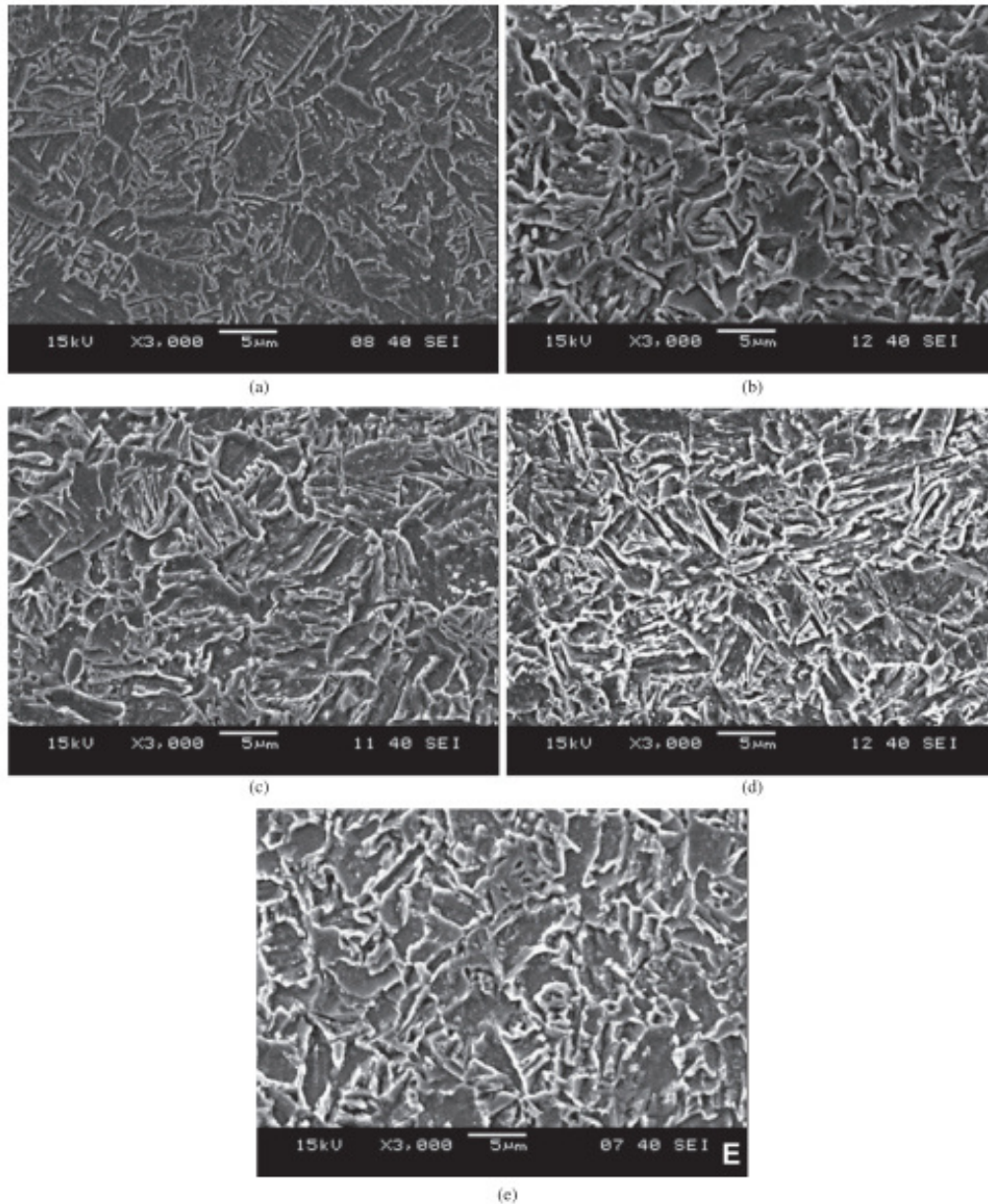
A microestrutura de um aço-carbono pode fornecer informações essenciais a respeito de suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão para avaliar determinada aplicação dentro da indústria de petróleo e gás. Fatores como composição química e tratamentos térmicos são responsáveis por obter a microestrutura desejada de um componente.

Pedrosa *et al.* (2013) estudou as transformações de fases provenientes de tratamentos térmicos realizados no aço API 5L X80 com o intuito de melhorar sua tenacidade ao impacto. As condições às quais a liga foi submetida são as seguintes:

- Como recebido;
- Austenitização (15 min.), laminado (15%) e temperado;
- Austenitização durante 15 e 60 minutos, seguida de têmpera;
- Austenitização por 15 minutos, têmpera e envelhecimento a diferentes temperaturas (603K, 673K, 723K, 773K, 823K e 873K) por 30 minutos.

De acordo com os autores, o tratamento térmico de envelhecimento provocou a formação das fases ferrita acicular e ferrita granular, além do enriquecimento de soluto nos contornos das ripas das fases. Deste modo, a tenacidade aumenta. A Figura 7 mostra micrografias do API 5L X80 envelhecido nas diferentes temperaturas.

Figura 7 — Micrografias do material austenitizado por 15 minutos, temperado em água e envelhecido na temperatura de a) 673K, b) 773 K, c) 823 K, d) 873K, e e) por 30 minutos

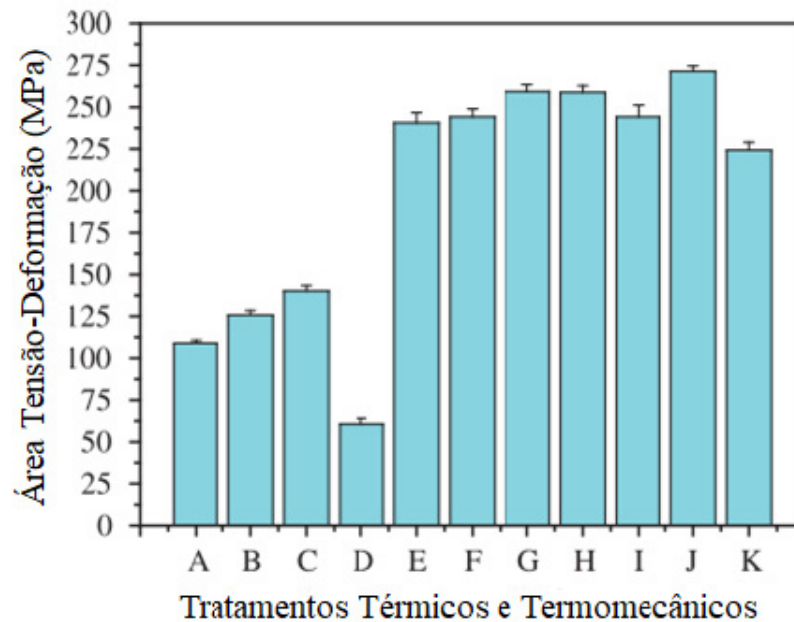


Fonte: Pedrosa *et al.* (2013, p. 493).

Os resultados de tenacidade da pesquisa de Pedrosa (2013) são mostrados na Figura 8. É possível observar melhora na tenacidade na maioria dos casos em relação ao estado “como recebido”, correspondente à amostra (A). O melhor caso em relação a esta propriedade é a condição austenitizada, temperada e envelhecida à temperatura de 823K por 30 minutos -

amostra (J). A condição temperada (D) apresenta os valores mais baixos de tenacidade, devido à formação de ilhas de martensita.

Figura 8 — Valores de tenacidade do aço-carbono API 5L X80 sob diferentes tratamentos térmicos



Fonte: Pedrosa *et al.* (2013, p. 494).

Vidor (2014), ao estudar o aço-carbono SAE 1045 nos estados encruado, temperado e revenido e recozido em meio a CO<sub>2</sub> no estado supercrítico e em meio a água saturada com CO<sub>2</sub>, relata que há uma diferença na taxa de corrosão em água saturada com dióxido de carbono. O aço nos estados encruado e temperado e revenido apresenta maior taxa de corrosão devido a maior quantidade de tensões internas induzidas, fornecendo um nível energético favorável ao processo. As informações presentes na Tabela 11 destacam essa diferença. É válido mencionar que, em meio ao CO<sub>2</sub> supercrítico, não existem diferenças significantes.

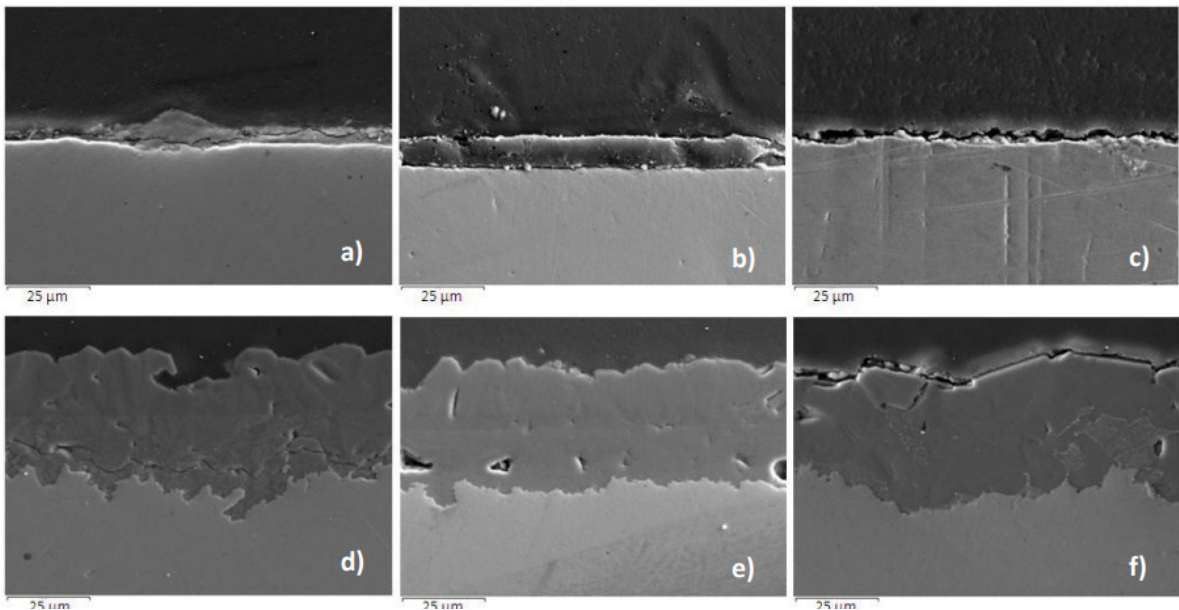
Tabela 11 — Taxa de Corrosão do aço SAE 1045 em diferentes estados

SAE 1045	CO <sub>2</sub> supercrítico úmido	Água saturada com CO <sub>2</sub>
Encruado	0,063 mm/ano	1,016 mm/ano
Temperado e Revenido	0,068 mm/ano	0,930 mm/ano
Recozido	0,072 mm/ano	0,389 mm/ano

Fonte: Vidor (2014).

A Figura 9 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura dos produtos de corrosão formados nas diferentes situações.

Figura 9 — Imagens de MEV da espessura dos filmes de produtos de corrosão: a), b), c) em CO<sub>2</sub> supercrítico úmido dos aços encruado, recozido e temperado e revenido, respectivamente; d), e), f) em água saturada com CO<sub>2</sub> dos aços encruado, recozido e temperado e revenido, respectivamente



Fonte: Vidor (2014).

Percebe-se que, exposto ao CO<sub>2</sub> no estado supercrítico, não existe diferença significativa na espessura do carbonato de ferro formado como produto de corrosão entre os três estados analisados (as imagens obtidas através de microscopia de varredura mostram a



seção transversal das amostras). Esta espessura é, de acordo com medições, de menos de 10 microns. Na situação de água saturada com CO<sub>2</sub>, também não há discrepância entre o aço-carbono encruado, temperado e revenido e recozido. Porém, a espessura em relação à situação anterior é muito maior, chegando a 34 microns. Acredita-se que a água possua oxigênio dissolvido, fato que acelera o processo corrosivo (VIDOR, 2014).

Apesar de possuir a menor taxa de corrosão em ambas as situações, o aço-carbono SAE 1045 no estado recozido, de acordo com o autor, não apresenta as melhores condições de atuar em ambientes relativamente severos, pois este apresentou potencial de corrosão mais negativo, significando que a película de carbonato de ferro apresenta características menos protetoras que aqueles formados nos aços tratados mecanicamente e termicamente. Afirma-se, também, que o produto de corrosão não é compacto suficiente para se aderir ao substrato e conferir proteção adequada (VIDOR, 2014).

## **5.5 Desgastes sofridos pelos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás**

No presente tópico, serão discutidos os principais desgastes sofridos pelos aços-carbono quando utilizados na indústria de petróleo e gás, tais como o desgaste corrosivo e o desgaste mecânico. Serão apresentados diversos estudos em relação aos mecanismos de desgaste, bem como suas respectivas conclusões.

### ***5.5.1 Corrosão dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás***

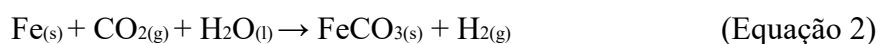
É sabido que os fluidos petrolíferos possuem teores de contaminantes que podem contribuir para aceleração de processos corrosivos. Dentre eles, podem ser destacados o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S).

Pesquisas realizadas desde a década de 40 mostram que a presença de H<sub>2</sub>S altera consideravelmente a velocidade de deterioração de tubulações de aços-carbono; e, embora a maioria dos trabalhos afirme que o sulfeto de hidrogênio amplifica o processo corrosivo, alguns

pesquisadores mostram que, a depender da situação, o contaminante pode apresentar consequências benéficas às propriedades do equipamento utilizado (SMITH, JOOSTEN, 2006).

Da década de 50 em diante, investigações têm sido feitas visando entender os efeitos do CO<sub>2</sub> na corrosão de aços-carbono, assim como a presença de sulfeto de hidrogênio, variando certos parâmetros do sistema. Fatores como temperatura, pH, presença de bicarbonatos, velocidade do fluido e tempo de exposição são continuamente estudados. Além disso, diversas pesquisas discutem sobre produtos de corrosão formados a partir da interação destes contaminantes com o substrato (SMITH, JOOSTEN, 2006).

As reações dos contaminantes CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S com o substrato de aço-carbono são mostradas abaixo, através das Equações 2 e 3, respectivamente:



De acordo com o estudo de Smith e Joosten (2006), o produto de corrosão de aços-carbono em ambientes contendo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S pode ser carbonato de ferro (FeCO<sub>3</sub>) ou sulfeto de ferro (FeS), variando de acordo com os parâmetros do sistema, principalmente com a temperatura.

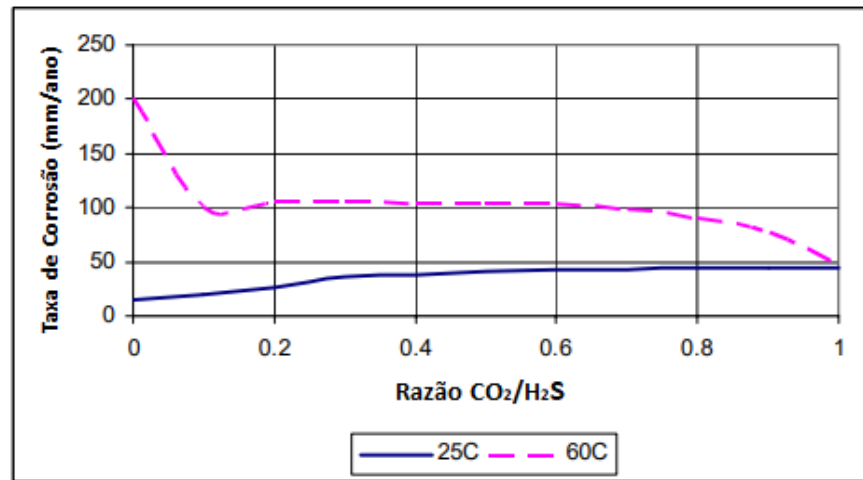
Meyer *et al.* (1958) realizaram estudos a respeito dos produtos de corrosão formados em aços baixo-carbono em ambientes contendo H<sub>2</sub>S, utilizando os ensaios de Perda de Massa e Difração de Raios-X (DRX). Os ambientes testados foram H<sub>2</sub>S + H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S + NaCl+H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>S + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O, com ensaios de duração de até 127 dias. Foi observada a presença de sulfeto de ferro em diferentes morfologias, tais como: troilita, pirita, marcassita, entre outras. A principal conclusão desta pesquisa foi que as características do ambiente no qual o aço é submetido, como a concentração de NaCl, de dióxido de carbono, enxofre e hidrogênio, influencia a formação de diferentes produtos.

Shannon (1959) investigou os fatores tempo, concentração de NaCl, concentração de H<sub>2</sub>S, tempo e tipos de hidrocarbonetos na taxa de corrosão de dutos de aço-carbono, a fim de avaliar inibidores de corrosão desenvolvidos. Através dos resultados, concluiu-se que a taxa de corrosão em ambientes contendo misturas de água, óleo e H<sub>2</sub>S é dependente da concentração de sulfeto. Porém, após certo tempo, cerca de 24 horas após o início do ensaio, o processo corrosivo possui sua taxa diminuída devido a formação de uma película de FeS que controla a difusão de elementos. A uma concentração maior de H<sub>2</sub>S, a taxa de corrosão diminui a um menor tempo, pois a película de FeS se torna mais espessa, controlando melhor a difusão.

Thomason (1978) apresentou resultados a respeito de ensaios realizados em aços baixo-carbono submetidos a uma atmosfera contendo H<sub>2</sub>S, a 1 atm, com períodos entre 2 a 7 dias e temperaturas em um intervalo entre 30 e 90 °C. O autor especulava que, a temperaturas acima de 65 °C, a formação de um filme passivo de FeS diminuiria as ocorrências de fratura por corrosão sob tensão. Em temperaturas maiores, a película de sulfeto teve sua aparência mudada. Contudo, não houve quaisquer evidências de que essa mudança acarretaria em proteção contra corrosão sob tensão.

Murata *et al.* (1979) avaliou a taxa de corrosão em aços em função da pressão parcial e temperatura do H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>. A pesquisa apresenta gráficos da taxa de corrosão em função da temperatura e composição do gás. Assim como é possível observar no gráfico presente na Figura 10, os resultados mostram que a deterioração de aço-carbono é menor em misturas gasosas com maior teor de H<sub>2</sub>S do que gases com maior quantidade de CO<sub>2</sub>, a uma temperatura de 60 °C. A uma temperatura de 25 °C, o inverso ocorre: quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub>, maior a taxa de corrosão.

Figura 10 — Taxa de Corrosão em aços-carbono em função da temperatura e razão  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$



Fonte: Murata *et al.* (1979, p. 25, com adaptações).

Milliams e Kroese (1979) estudaram o efeito da concentração de cloreto de sódio na corrosão por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , com variação de temperatura. Os autores afirmam que, à temperatura ambiente, o  $\text{NaCl}$  impede a formação de camadas protetivas que protegem contra futuros ataques corrosivos. Em temperaturas mais altas, por volta de  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , mesmo com concentrações mais altas de  $\text{NaCl}$ , ocorre a existência de películas de  $\text{FeS}$ . Também foi mencionado pelos pesquisadores que, caso uma tubulação tenha pites, suas atividades são perdidas pela ação dos produtos de corrosão formados depois de um tempo.

Rogne (1982) avalia, em seu estudo, a influência da temperatura, a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $60\text{ }^\circ\text{C}$  e  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , e a variação da concentração de  $\text{H}_2\text{S}$ , de 0,03 até 4%, na corrosão de aços-carbono em ambientes contendo solução 5%  $\text{NaCl}$ . O autor afirma que, nas temperaturas de 60 e  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , a taxa de corrosão diminui para 1/10 da taxa inicial. Isso se deve à maior formação de filmes de  $\text{FeS}$ , que protegem o substrato. É válido mencionar que, a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , um filme protetivo também foi observado, porém, a diminuição não se mostrou tão eficiente.

Rogne (1982) também comparou diferentes misturas no sistema, sendo  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{S}/\text{N}_2$ . A primeira mistura gasosa se mostrou mais danosa às amostras de aço-carbono. Além

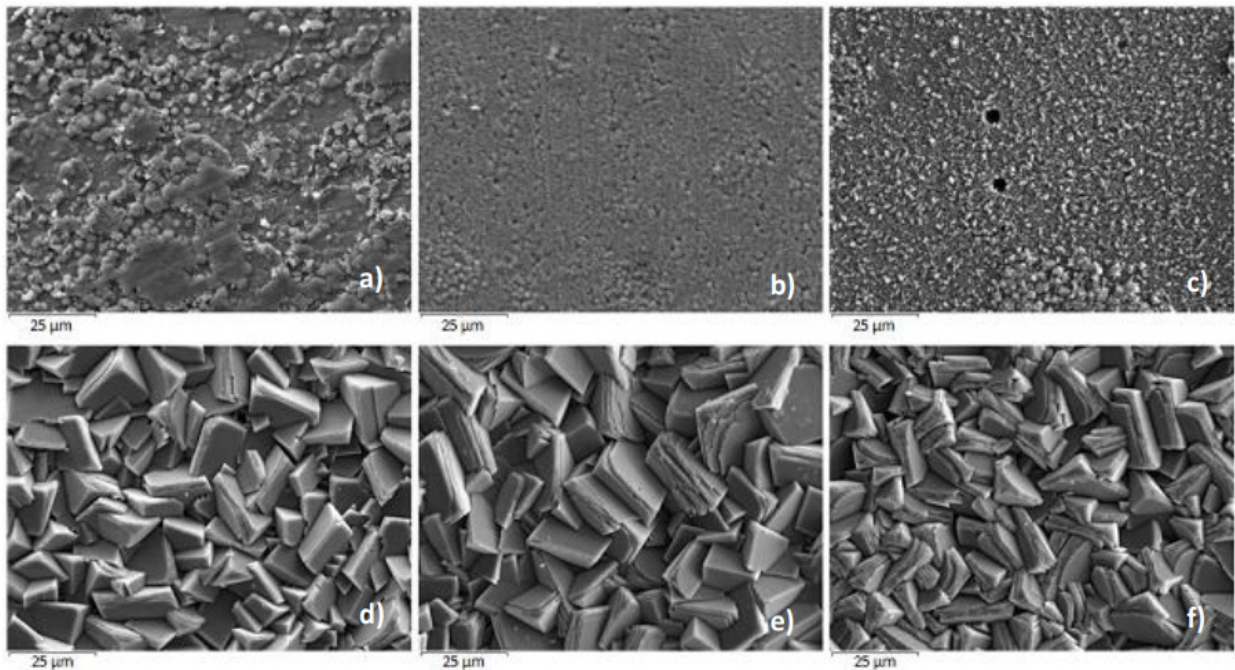
disso, foi possível perceber que o aumento na concentração de H<sub>2</sub>S proporciona um efeito “inibidor” em relação à corrosão por CO<sub>2</sub>.

Muitos estudos avaliam a aplicação de inibidores de corrosão em sistemas de extração e transporte de petróleo e gás. Todavia, em algumas situações, dadas as condições de pressão, temperatura, seu efeito pode ser anulado.

Hamby (1979) relatou, em sua pesquisa, problemas voltados à corrosão de tubulações de aço-carbono, no fundo de poços de produção de gás. As condições de trabalho eram: 28 a 46% de H<sub>2</sub>S, 3 a 8% de CO<sub>2</sub>, temperaturas de 185 a 195 °C e pressões entre 120 e 152 MPa. As falhas ocorreram em menos de seis meses de produção. O diagnóstico das falhas foi a vaporização no inibidor de corrosão utilizado, devido às condições impostas. O gás produzido passava pela tubulação sem qualquer inibição.

Vidor (2014) estudou a influência da microestrutura do aço SAE 1045 na resistência à corrosão por CO<sub>2</sub>, em meio ao CO<sub>2</sub> supercrítico e água saturada com CO<sub>2</sub>. Afirma-se, neste trabalho, que, em meios onde o dióxido de carbono é predominante, com poucas concentrações de H<sub>2</sub>S, o produto de corrosão formado é carbonato de ferro (FeCO<sub>3</sub>). Este pode proteger ou não a tubulação fabricada a partir do 1045, dependendo de como é formado. A Figura 11 mostra a formação do carbonato formado em amostras de SAE 1045, onde a), b) e c) mostram os filmes de produtos de corrosão em CO<sub>2</sub> supercrítico úmido dos aços encruado, recozido e temperado e revenido, respectivamente, e d), e), f) em água saturada com CO<sub>2</sub> dos aços encruado, recozido e temperado e revenido.

Figura 11 — Imagens de MEV do topo dos filmes de produtos de corrosão



Fonte: Vidor *et al.* (2014, p. 5704).

De acordo com os resultados obtidos, Vidor (2014) afirma que, em meio à água saturada com  $\text{CO}_2$ , os cristais de  $\text{FeCO}_3$  formados são bem maiores que aqueles precipitados em meio ao dióxido de carbono no estado supercrítico.

Através do método Taguchi, o qual é uma análise estatística que analisa um fenômeno ou processo que depende de mais de duas variáveis, Shen *et al.* (2020) determinaram os fatores mais agressivos ao aço AISI/SAE 1020, sendo estes: concentrações de cloro, enxofre, água e número ácido total (Total Acid Number - TAN). Até um período específico (336h), a ordem de maior para menor influência foi:  $\text{Cl} > \text{S} > \text{TAN} > \text{H}_2\text{O}$ . Após este determinado tempo, a sequência muda para  $\text{Cl} > \text{S} > \text{H}_2\text{O} > \text{TAN}$ . Não existe explicação para a mudança de corrosividade causada pela água após 336h horas, porém, os autores afirmam que os elementos cloro e enxofre potencializam a taxa de corrosão do aço-carbono em ambientes ácidos. Todavia, caso haja produtos de corrosão formados previamente, o processo de corrosão é freado parcialmente.

### 5.5.2 *Desgaste mecânico dos aços-carbono*

O desgaste mecânico é considerado uma parcela responsável pela perda de massa total de um aço, e possui sinergia com o processo de corrosão. Esta relação é regida pela Equação 4, onde  $W_{total}$  representa a perda total de massa de um material,  $W_{corr}$  e  $W_{desgaste}$  são as perdas de massa por corrosão e desgaste mecânico, respectivamente, e  $\Delta W$  é a parcela de perda de massa correspondente à sinergia entre os dois fenômenos anteriormente citados (HUANG, JIANG, LI, 2000).

$$W_{total} = W_{corr} + W_{desgaste} + \Delta W \quad (\text{Equação 4})$$

O fenômeno de desgaste mecânico sofre influência de parâmetros do aço e do sistema ao qual o material está submetido. Fatores como composição química, propriedades mecânicas e área de contato podem ser referenciadas a respeito do material. Além disso, a composição do fluido, a taxa de deslizamento e a carga atuante no fluido afetam o desgaste mecânico sofrido (HU, DUAN, JIANG, 2015; HUANG, JIANG, LI, 2000).

Huang, Jiang e Li (2000) estudaram a perda por desgaste mecânico no desgaste corrosivo de três materiais, incluindo o aço-carbono AISI/SAE 1045, em meio corrosivo contendo ácido clorídrico (HCl) e o inibidor iodeto de potássio (KI), comparando com meios contendo apenas ar e, também, em meio a água destilada. Os outros materiais analisados foram ferro puro (99,9% de pureza) e o aço inoxidável AISI 321.

É válido mencionar que os experimentos de Huang, Jiang e Li (2000) foram realizados utilizando um aparelho que provoca desgaste corrosivo, e que as três amostras diferentes também foram analisadas sob proteção catódica, a fim de eliminar o fator de perda de massa por corrosão da análise. Ademais, também foram medidos os coeficientes de atrito das ligas nos diferentes meios.

O principal resultado de Huang, Jiang e Li (2000) foi que, nos meios ácido sob proteção catódica e ácido com adição do inibidor, a perda por desgaste do aço AISI 1045 não

sofreu mudanças significativas, o que implica que a utilização de inibidores de corrosão contribui para a integridade do aço-carbono. Outra constatação feita é que a perda por desgaste mecânico dos materiais ao ar é maior, devido ao maior coeficiente de atrito apresentado.

Além disso, os resultados de perda por desgaste do aço AISI/SAE 1045 em água destilada não são muito recomendados para análise, pois ainda há corrosão devido a certas concentrações de oxigênio dissolvido. Logo, não existe uma maneira de detectar com precisão a quantidade de material perdida mecanicamente (HUANG, JIANG, LI, 2000).

Segundo Hu, Duan e Jiang, a presença do elemento hidrogênio também é uma variável a ser considerada ao se avaliar um meio, pois a fragilização por hidrogênio diminui a tenacidade de aços-carbono, uma vez que a presença de uma carga elevada que o ambiente proporciona, combinada a uma possível fase frágil, facilita a propagação de trincas.

## **5.6 Mitigação dos desgastes sofridos pelos aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás**

Ao usar um determinado componente destinado à produção ou refino de petróleo e gás a partir de aço-carbono, além do material, é necessário selecionar as formas de proteção ao desgaste corrosivo e mecânico. Isso geralmente ocorre a partir de uma análise de corrosividade do sistema, dos parâmetros operacionais, como pressão, temperatura, presença de água e profundidade de poços de exploração. A localização do poço, *onshore* ou *offshore*, injeção de aditivos e presença de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S também são fatores que precisam ser estudados (ASKARI *et al.*, 2021).

Devido ao fato dos aços-carbono serem relativamente pobres em resistência à corrosão e resistência ao desgaste em ambientes severos, na sua aplicação na indústria de petróleo e gás é inevitável a utilização de modos de mitigação desses processos (ASKARI *et al.*, 2021).

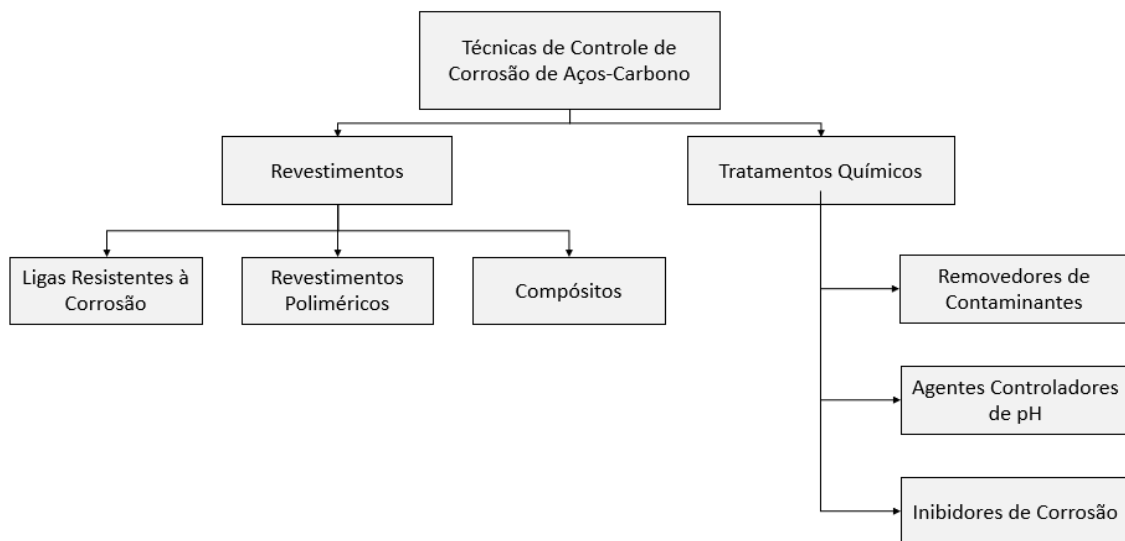
Como abordado anteriormente ao longo deste trabalho, a literatura relata que os aços-carbono sofrem fenômenos deteriorantes quando submetidos aos ambientes severos



existentes no setor de petróleo e gás, como fragilização por hidrogênio, corrosão sob tensão por sulfetos, corrosão uniforme por CO<sub>2</sub>. Entretanto, materiais com melhores propriedades mecânicas e de resistência à corrosão são mais caros de serem produzidos. Portanto, torna-se necessária a busca por formas de aplicação dos aços-carbono com técnicas que proporcionem longevidade a estas ligas.

As maneiras comumente difundidas de mitigação do desgaste de aços-carbono utilizados neste setor são: revestimento com ligas metálicas resistentes à corrosão, revestimento com materiais poliméricos ou compósitos e tratamentos químicos. Em resumo, as formas de mitigação de desgastes de aços-carbono utilizados na indústria de petróleo e gás são mostradas no esquema da Figura 12.

Figura 12 — Esquemático de projeto para técnicas de controle de corrosão de aços-carbono aplicados na indústria de petróleo e gás



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, as formas de mitigação destacadas na Figura 12 serão abordadas mais detalhadamente.

### **5.6.1 Revestimentos com ligas metálicas resistentes à corrosão**

Atualmente, a maneira mais viável de produzir tubulações ou outros componentes com economia de material e de mesma eficiência é através da combinação de aço-carbono com outras ligas de melhores propriedades, para fins de união ou revestimento, processo conhecido como soldagem dissimilar.

Sotoodeh (2021) menciona a utilização da superliga de níquel AWS ERNiCrMo-3, conhecida comercialmente como Inconel 625, como revestimento interno de válvulas subsea de aço-carbono, pois estas são susceptíveis à erosão e corrosão. Esta técnica permite a prevenção de corrosão por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S aos aços-carbono, assim como fragilização por hidrogênio. Sotoodeh também afirma que a camada de revestimento ideal depende do processo de soldagem, o qual implica em várias outras variáveis que não cabem ao estudo em questão.

Prabakaran e Kannan (2021) estudam os efeitos de tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS) em juntas soldadas de aço-carbono AISI 1018 com aço inoxidável austenítico AISI 316, combinação utilizada em refinarias de petróleo e gás. No trabalho, são avaliadas as propriedades de tensão de escoamento, limite de resistência à tração e dureza; além de suas propriedades metalúrgicas.

Khan *et al.* (2021) pesquisa a respeito da soldagem dissimilar do aço inoxidável austenítico AISI 304 com aço-carbono AISI 1020. O objetivo é encontrar uma combinação de maior eficiência, menor peso e maior qualidade, aliados a baixo custo para a indústria de petróleo. Aliado à produção, estuda-se os efeitos de TTPS a essas juntas, pois, segundo os autores, juntas dissimilares possuem características frágeis na região de união.

Khadeer (2020) avalia a performance de juntas soldadas de aço-carbono ASTM A106 Gr. B com aço baixa-liga AISI 4140. O aço 4140 é comumente utilizado em tubulações de sistemas de perfuração de poços, devido a sua rigidez estrutural e boa resistência ao desgaste. Com o objetivo de diminuir custos, apenas as uniões entre tubulações passaram a ser feitas a partir do aço baixa-liga, enquanto as tubulações são feitas do aço-carbono. Porém, a

respeito de propriedades mecânicas, na região de união entre os dois metais, a tenacidade apresentou níveis baixos, devido à presença de carbetos na interface da solda.

No trabalho de Askari *et al.* (2021), encontram-se informações a respeito da aplicação de diversos materiais, desde os aços inoxidáveis, como o AISI 420, com 13% do elemento cromo, indicado para ambientes com CO<sub>2</sub>, até as ligas de níquel, como a AWS ERNiCrMo-4, com nome comercial Hastelloy C-276, para ambientes com altos teores de H<sub>2</sub>S.

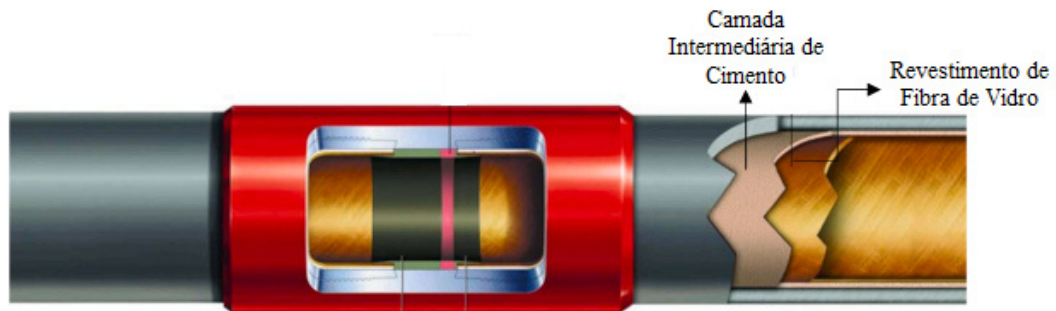
### **5.6.2 Revestimentos com materiais não-metálicos**

O uso de revestimentos não-metálicos também é uma prática comum para fins de proteção à corrosão e desgaste, quando se trata de tubulações fabricadas de aço-carbono. Tais formas de mitigação devem suportar condições operacionais de altas pressão e temperatura, desgaste e abrasão, grandes concentrações de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, e a presença de aditivos para completação de poços e acidulantes, como HCl e HF — utilizados para quebrar cadeias maiores de hidrocarbonetos em cadeias menores (ASKARI *et al.*, 2021).

Polímeros como resinas epóxi, nylon, fenóis foram empregadas para essa finalidade ao longo dos anos (ASKARI *et al.*, 2021).

Sharif *et al.* (2012) estudaram a combinação de aço-carbono aliado a revestimento interno de fibra de vidro. Segundo os autores, esta técnica obteve sucesso e sua performance possui bom retorno financeiro, de acordo com a indústria. A Figura 13 esquematiza a técnica de proteção, onde é possível observar que, entre o substrato de aço-carbono e a camada de compósito, é aplicada uma camada de cimento, com o propósito de fornecer maior aderência à camada interna.

Figura 13 — Tubulação de aço-carbono com revestimento interno de fibra de vidro



Fonte: Sharif *et al.* (2012).

Hsi *et al.* (2001) mencionam a utilização de revestimentos poliméricos internos em tubulações de aço-carbono como forma de mitigação de corrosão e desgaste. Esta aplicação é comum em ambientes mais agressivos, onde a temperatura e pressão são maiores, com aumento de resistência à abrasão e desgaste, embora esse tipo de recobrimento não possua tanta eficiência em ambientes muito ácidos. É válido ressaltar que revestimentos poliméricos atuam bem na função de prevenir vazamentos.

### 5.6.3 Tratamentos químicos

Tratamentos químicos são realizados com o intuito de proteger os equipamentos utilizados contra corrosão e desgaste, através da interação de aditivos com o meio ou o material. Esses tratamentos podem ser feitos através de elementos removedores de contaminantes — do inglês “*scavengers*”, agentes controladores de pH e inibidores de corrosão (ASKARI *et al.*, 2021).

Removedores de contaminantes reduzem a corrosividade da água para o aço-carbono utilizado em tubulações de produção, retirando os gases agressivos do ambiente, como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. Todavia, esses aditivos não funcionam perfeitamente em ambientes ácidos.

Sendo assim, são comumente usados em conjunto com um agente controlador de pH. Removedores de dióxido de carbono comuns são: sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), bissulfito de amônio ( $\text{H}_3\text{N}\cdot\text{H}_2\text{O}_3\text{S}$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Enquanto isso, nitretos são bons removedores de sulfeto de hidrogênio (HEIDERSBACH, 2018).

Inibidores de corrosão fazem parte do método mais comum de proteção à corrosão utilizado, principalmente em poços feitos com tubulações fabricadas de aço-carbono. Sua aplicação é economicamente mais viável em relação ao revestimento de ligas resistentes à corrosão. Existe uma imensa gama desses aditivos, classificados como orgânicos ou inorgânicos (GARVERICK, 1994).

A escolha de um inibidor adequado depende da temperatura do ambiente, assim como das condições do fluido produzido. O primeiro fator é determinante, pois, inibidores não-resistentes a altas temperaturas podem perder eficiência ou até se decomporem. O inibidor de corrosão é injetado em tubulações, com o intuito de protegê-las internamente de desgastes (GARVERICK, 1994).

## 6 CONCLUSÃO

Após a análise dos estudos apresentados no decorrer do presente trabalho, foi possível compilar diversas informações a respeito do uso de aços-carbono na indústria de petróleo e gás, assim alcançando o objetivo principal de estruturar uma revisão de literatura sobre esse tema. Durante a elaboração deste trabalho, obtiveram-se as seguintes principais conclusões:

- A escolha de um aço-carbono depende, principalmente, da sua tenacidade e da resistência ao desgaste. Deve-se avaliar a composição química e propriedades mecânicas regulamentadas pelas normas. As principais normas que regulamentam as aplicações dos aços-carbono na indústria de petróleo e gás são: ISO 3183 e API 5L, ASTM A106/A106M, ASTM A53/A53M, ASTM 234/234M e ASTM A216/216M. Além destas, as especificações das normas AISI/SAE também são utilizadas;
- Foi possível identificar as ligas AISI/SAE 1020, AISI/SAE 1045, API 5L Gr. B, API 5L X80, ASTM A216 Gr. WCB e ASTM A106 Gr. B como sendo as principais ligas aplicadas na indústria de petróleo e gás;
- Os contaminantes presentes nos fluidos petrolíferos, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e íons cloreto, são responsáveis pela deterioração de equipamentos fabricados a partir de aço-carbono, a partir de reações químicas. Os produtos de corrosão formados são FeCO<sub>3</sub>, FeS, H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. Dentre as formas de mitigação de processos corrosivos, as mais comuns são: revestimento de ligas metálicas resistentes à corrosão, revestimentos não-metálicos e inibidores de corrosão, e a escolha de um destes métodos é determinada pelos custos de construção e operacionais de projeto;
- Além do desgaste corrosivo, quando aplicados na indústria de petróleo, podem sofrer desgaste puramente mecânico, o qual possui sinergia com processos corrosivos, visto que, principalmente quando combinados, ocasionam uma grande perda de massa do material.

## **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente trabalho pode ser complementado com a elaboração de um inventário mais completo dos aços utilizados em cada componente das torres de destilação de petróleo, a fim de catalogar e montar um histórico dos materiais usados para este fim. Além disso, podem-se realizar outras pesquisas tendo como objetivo um maior aprofundamento no tópico que discute a corrosão dos aços aplicados na indústria de petróleo e gás, para tratar especificamente dos tipos de corrosão que estes sofrem, tais como corrosão sob tensão, corrosão transgranular e a corrosão intergranular.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Radnay Stepham de Assis; OLIVEIRA, Rodrigo Tavares; GUIMARÃES, Rodrigo Freitas. Corrosão em tubulações de aço carbono pertencentes ao sistema STU-85 da Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM) - PETROBRAS/URUCU-AM: estudo de caso. **Matéria**, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BgPqZxr3fV37R7QWHXS3XWM/?lang=pt>. Acesso em: 07 dez. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification for Piping Fittings of Wrought Carbon Steel and Alloy Steel for Moderate and High Temperature Service**. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service**. 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless**. 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-Temperature Service**. 2021.

ASKARI, M. *et al.* Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production – a review. **Applied Surface Science Advance**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266652392100074X?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 87/2000. Aço-Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**. 2004.

AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC). 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/2498>. Acesso em: 6 jan. 2022.

BALLESTEROS, Adriana Forero; GOMES, José Antônio Ponciano; BOTT, I.S. Corrosion Evaluation of SAW Welded API 5L X-80 Joints in H<sub>2</sub>S-Containing Solution. **Materials Research**, vol. 18(2), p. 417-426, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277917470\\_Corrosion\\_evaluation\\_of\\_saw\\_welded\\_API\\_5L\\_X-80\\_joints\\_in\\_H2S-containing\\_solution](https://www.researchgate.net/publication/277917470_Corrosion_evaluation_of_saw_welded_API_5L_X-80_joints_in_H2S-containing_solution). Acesso em: 29 nov. 2021.

BATISTA, Carolina. **Refino do Petróleo**. Toda Matéria, 2021. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/refino-petroleo/>. Acesso em: 05 dez. 2021.



BUENO, A. H. S. *et al.* Tribocorrosion evaluation of hydrogenated and silicon DLC coatings on carbon steel for use in valves, pistons and pumps in oil and gas industry. **Wear**, p. 60-70, 2017. Disponível em: <https://eprints.whiterose.ac.uk/122192/1/1-s2.0-S0043164817309882-main.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2021.

CALLISTER, Willian D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 8° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7° ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. 1° ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2008.

COLPAERT, Hubertus. **Metalurgia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3° ed. Editora Edgard Blucher Ltda, 2008.

FARIAS, Francisco Werley Cipriano; FILHO, João da Cruz Payão; AZEVEDO, Luiz Maurício Barreto de. Microstructural and Mechanical Characterization of the Transition Zone of 9%Ni Steel Cladded with Ni-Based Superalloy 625 by GTAW-HW. **Metals**, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/12/1007>. Acesso em: 05 dez. 2021.

GARVERICK, L. **Corrosion in the Petrochemical Industry**. 2° Ed. ASM, 1994.

GERDAU. **Manual de Aços, Edição Atualizada**. Gerdau Aços Piratini, 2003. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf). Acesso em: 15 dez. 2021.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Italo Martins. **Análise dos Mecanismos de Danos do Aço-Carbono ASTM A106 Grau B em Fornos de Refinaria de Petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) — Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará. 2011.

HAMBY, Tyler W. **Development of High Pressure Sour Gas Technology**. SPE Paper 8309, 1979. Disponível em: <https://onepetro.org/JPT/article-abstract/33/05/792/69493/Development-of-High-Pressure-Sour-Gas-Technology?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 05 dez. 2021.

HSI, D.C. *et al.* **Field Evaluation of Downhole Corrosion Mitigation Methods at Prudhoe Bay Field, Alaska**. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. 2001. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-abstract/01OCS/All-01OCS/SPE-65014-MS/133189>. Acesso em: 09 jan. 2022.

HEIDERSBACH, Robert. **Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production**, 2<sup>o</sup> Ed. Wiley, 2018.

HU, Z.Y., DUAN, D.L., JIANG, S.L. *et al.* Pure Mechanical Wear Measurement of Carbon Steel in Oil–Water Fluids. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, 17, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0017-9>. Acesso em: 10 jan. 2022.

HUANG, Yanliang; JIANG, Xiaoxia; LI, Sizuo. Pure mechanical wear loss measurement in corrosive wear. **Bull Bulletin of Materials Science**, 6, vol. 23, p. 539-542, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02903897/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aplicações do Aço**. 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/aplicacoes-do-aco/>. Acesso em: 9 nov. 2021.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6<sup>o</sup> ed. Prentice Hall, 2009.

KHADEER, Sk. Abdul *et al.* Evaluation of friction welded dissimilar pipe joints between AISI 4140 and ASTM A 106 Grade B steels used in deep exploration drilling. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 197-205, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.078>. Acesso em: 10 jan. 2022.

KHAN, Mahmud; DEWAN, Mohammad Washim; SARKAR, Md. Zahidul. Effects of welding technique, filler metal and post-weld heat treatment on stainless steel and mild steel dissimilar welding joint. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 64, pp. 1307-1321, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612521001602>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LASEBIKAN, B.A.; AKISANYA, A.R.; DEANS, W.F.; MACPHEE, D. E. The effect of hydrogen sulphide on ammonium bisulphite when used as an oxygen scavenger in aqueous solutions. **Corrosion Science**, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X11004240>. Acesso em: 05 dez. 2021.

MELO, Felipe Augusto Cordeiro; FILHO, Severino Leopoldino Urtiga. **Estudo do Processo de Corrosão de Aço-Carbono Exposto a Misturas de Petróleo e Águas Salinas**. XXIII CONIC, VII CONITI, IV ENIC, 2015. Disponível em: [https://www.ufpe.br/documents/616030/926745/Estudo\\_processo\\_a%C3%A7o.pdf/2629a050-78ff-4beb-9be8-ed56de972842](https://www.ufpe.br/documents/616030/926745/Estudo_processo_a%C3%A7o.pdf/2629a050-78ff-4beb-9be8-ed56de972842). Acesso em: 08 dez. 2021.

MEYER, F. H.; RIGGS, O. L.; MCGLASSON, R. L.; SUDBURY, Josh. Corrosion Products of Mild Steel in Hydrogen Sulfide Environments. **Corrosion**, vol. 14, p. 109-115, 1958. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261550527\\_Corrosion\\_Products\\_of\\_Mild\\_Steel\\_In\\_Hydrogen\\_Sulfide\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/261550527_Corrosion_Products_of_Mild_Steel_In_Hydrogen_Sulfide_Environments). Acesso em: 20 nov. 2021.

MILLIAMS, D.E; KROESE, C. J. **Aqueous Corrosion of Steel by H<sub>2</sub>S and H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>**. Third International Conference on the Internal and External Protection of Pipes, 1979.

MURATA, T.; MATSUHASHI, R.; TANIGUCHI, T.; YAMAMOTO, K. **The Evaluation of H<sub>2</sub>S Containing Environments from the Viewpoint of OCTG and Linepipe for Sour Gas Applications**. Offshore Technology Conference, 1979. Disponível em: <https://search.spe.org/i2kweb/SPE/doc/onepetro:E84913CE>. Acesso em: 08 dez. 2021.

MUTAHHAR, Faisal *et al.* **Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies**. Woodhead Publishing Series in Energy, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081011058000310>. Acesso em 20 nov. 2021.

NASIRPOURI, Farzad; MOSTAFAEI, Amir; FATHYUNES, Leila. Assessment of localized corrosion in carbon steel tube-grade AISI 1045 used in output oil-gas separator vessel of desalination unit in oil refinery industry. **Engineering Failure Analysis**, vol. 40, p. 75-88, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630714000466>. Acesso em: 7 jan. 2022.

PANOSSIAN, Zehbour; VIEIRA, Fabiana Yamasaki Martins; FERREIRA, Leandro Pires, *et al.* **Estudo da corrosão de aços utilizados em sede de válvulas gaveta e tubulações de refinaria em meio de águas acres de refinaria de petróleo**. INTERCORR, 2012. Disponível em: [https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2012/INTERCORR2012\\_5.pdf](https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2012/INTERCORR2012_5.pdf). Acesso em: 07 dez. 2021.

PEDROSA, Igor Rafael Vilarouco; CASTRO, Renato Soares de; YADAVA, Yogendra Prasad; FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. Study of Phase Transformations In API 5L X80 Steel in Order to Increase its Fracture Toughness. **Materials Research**, 16, vol. 2, p. 489-496, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/262512798\\_Study\\_of\\_Phase\\_Transformations\\_In\\_API\\_5L\\_X80\\_Steel\\_in\\_Order\\_to\\_Increase\\_its\\_Fracture\\_Toughness](https://www.researchgate.net/publication/262512798_Study_of_Phase_Transformations_In_API_5L_X80_Steel_in_Order_to_Increase_its_Fracture_Toughness). Acesso em: 09 jan. 2022.

PETROBRAS. **Processos de Refino**. Adaptado do Material Original de Elie Abadie. PETROBRAS, 2002. Disponível em: [https://www.academia.edu/4155339/Apostila\\_Petrobras\\_Processos\\_de\\_Refino](https://www.academia.edu/4155339/Apostila_Petrobras_Processos_de_Refino). Acesso em: 19 nov. 2021.

PRABAKRAN, M. P.; KANNAN, G. R. Effects of post-weld heat treatment on dissimilar laser welded joints of austenitic stainless steel to low carbon steel. **International Journal of Vessels and Piping**, 2021. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/ijpvp>. Acesso em: 09 jan. 2022.

PROJECT MATERIALS. **API 5L Pipes for Pipelines Explained**. 2017. Disponível em: <https://blog.projectmaterials.com/pipes/api-5l-pipe/>. Acesso em: 13 dez. 2021.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; TASSINARI, C. C. G. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, vol. 95, p. 33-42, 2012. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/52236>. Acesso em: 07 dez. 2021.

ROGNE, T. **Internal Corrosion Offshore Pipelines, Aqueous Corrosion of Steel in H<sub>2</sub>S and H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> Containing Solutions**. SINTEF Report STF-16A82015, 1982.  
SANTOS, Briza Mateus; SOUZA, Rayanna Aguiar de; BEZERRA, Elaine Cristina Macêdo. **Utilização de Aços em Dutos na Indústria do Petróleo**. 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2019. Disponível em: [http://www.portalabpg.org.br/site\\_portugues/anais/anais10/repositorio/trabalho/512707150920199411.pdf](http://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais10/repositorio/trabalho/512707150920199411.pdf). Acesso em: 08 dez. 2021.

SHANNON, Donald W. **Factors Affecting the Corrosion of Steel by Oil-Brine-Hydrogen Sulfide Mixtures**. *Corrosion*, Vol. 15, p. 299-302, 1959.

SHARIF, Qamar J., *et al.* **Experience with Fiberglass GRE Lined Carbon Steel Tubular for Corrosion Protection for Oil Production Applications**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2012. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/12ATCE/All-12ATCE/SPE-160236-MS/156307>. Acesso em: 07 jan. 2022.

SHARMA, Satish Kunar; MAHESHWARI, Sachin. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, vol. 38, p. 203-217, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510016309398>. Acesso em: 13 dez. 2021.

SHEN, Shuoxun; WANG, Zhirong; JIANG, Juncheng, *et al.* Synergistic Effect of the Total Acid Number, S, Cl and H<sub>2</sub>O on the Corrosion of AISI 1020 in Acidic Environments. **ACS Omega**, vol. 5, p. 20311-20320, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c02219>. Acesso em: 09 dez. 2021.

SILVA, André Luís da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2º ed. Sumaré: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.

SILVA, Rita Cristina. **Inibição da Corrosão do Aço AISI 1020 por Poliol Fosfato em Meio de Packer Fluid e Glixial**. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/187573>. Acesso em: 5 jan. 2022.

SMITH, Stephen N.; JOOSTEN, Michael. **Corrosion of Carbon Steel By H<sub>2</sub>S in CO<sub>2</sub> Containing Oilfield Environments**. 61st Corrosion NACEExpo. NACE International, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261177321\\_Corrosion\\_of\\_Carbon\\_Steel\\_by\\_H2S\\_in\\_CO2\\_Containing\\_Oilfield\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/261177321_Corrosion_of_Carbon_Steel_by_H2S_in_CO2_Containing_Oilfield_Environments). Acesso em: 28 nov. 2021.

SOTOODEH, Karan. **Subsea Valves and Actuators for the Oil and Gas Industry**. Gulf Professional Publishing, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323906050000049>. Acesso em: 19 nov. 2021.

THOMASON, William H. **Formation Rates of Protective Iron Sulfide Films on Mild Steel in H<sub>2</sub>S Saturated Brine as a Function of Temperature**. Corrosion/18, 1978. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/254544802\\_Formation\\_of\\_Multilayer\\_Iron\\_Sulfide\\_Films\\_During\\_High\\_Temperature\\_CO2H2S\\_Corrosion\\_of\\_Carbon\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/254544802_Formation_of_Multilayer_Iron_Sulfide_Films_During_High_Temperature_CO2H2S_Corrosion_of_Carbon_Steel). Acesso em: 07 dez. 2021.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. **Aço: Sua aplicação e relação com o carbono**. Gerdau: Blog de Aços Especiais. 2019. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/aco-e-sua-aplicacao-e-relacao-com-o-carbono>. Acesso em: 09 nov. 2021.

VIDOR, G. F.; LOPES, N. F.; MARCOLINO, J. B.; MORAES, M. K. COSTA, E. M. **Influência da Microestrutura do Aço ao Carbono SAE 1045 na Corrosão por CO<sub>2</sub> a Alta Pressão e a Alta Temperatura nos Estados: Encruado, Recozido e Temperado e Revenido**. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: [https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12520/2/nfluencia\\_da\\_Microestrutura\\_do\\_a\\_co\\_ao\\_Carbono\\_SAE\\_1045\\_no\\_corrosao\\_por\\_CO2\\_a\\_Alta\\_Pressao\\_e\\_a\\_Alta\\_Temperatura\\_nos.pdf](https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12520/2/nfluencia_da_Microestrutura_do_a_co_ao_Carbono_SAE_1045_no_corrosao_por_CO2_a_Alta_Pressao_e_a_Alta_Temperatura_nos.pdf). Acesso em: 7 jan. 2022.