



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

**VITÓRIA LIMA DE SOUZA**

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO THERMEX VIA LAMINAÇÃO A QUENTE**  
**NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO VERGALHÃO CA-50**

**FORTALEZA**

**2021**

VITÓRIA LIMA DE SOUZA

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO THERMEX VIA LAMINAÇÃO A QUENTE NA  
RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO VERGALHÃO CA-50

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA

2021

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)

---

S236e Souza, Vitória Lima de.  
Efeito do tratamento térmico thermex via laminação a quente na resistência à corrosão do vergalhão CA-50 / Vitória Lima de Souza. – 2021.  
57 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

1. Laminação. 2. Vergalhão. 3. Thermex. 4. Corrosão. I. Título.

CDD 669

---

VITÓRIA LIMA DE SOUZA

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO THERMEX VIA LAMINAÇÃO A QUENTE NA  
RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO VERGALHÃO CA-50

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 17 de Dezembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Laercio Pereira Caitano  
Gerdau Aços Longos

Aos meus pais, que com seu amor imensurável,  
me guiaram até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Solange e Marcellos, por serem meu alicerce, me sustentarem da forma mais admirável: por meio do amor. Vocês são tudo na minha história, o melhor e maior significado da minha existência.

Ao meu irmão, Marcellos Romero, pelo amor, pela cumplicidade, por representar meu ponto de paz.

Ao meu sobrinho e afilhado, Davi Romero, que transborda meus dias de amor, felicidade e gratidão.

À minha avó, Teresinha, pelo incentivo, pela força, por estar sempre comigo e acreditar em mim.

Ao meu amado, Daniel, por construir comigo uma história linda e compartilhar o maior dos sentimentos. Obrigada pela cumplicidade, pelo encorajamento e por compartilharmos todos os dias juntos.

À Universidade Federal do Ceará por ter sediado a realização de um sonho.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Walney Silva Araújo, pela confiança desde a iniciação científica, pelas oportunidades e pelos conhecimentos adquiridos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará que contribuíram com a minha formação.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC por ter me permitido vivenciar, além dos ensaios eletroquímicos, experiências que sempre lembrarei.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) da UFC pela realização dos ensaios de Microdureza Vickers e Microscopia Eletrônica de Varredura.

A todos os amigos da Gerdau Cearense, em especial, Pereira, Adriano, Alequecesar, Pinheiro, por toda a aprendizagem adquirida, pelas palavras de incentivo e pela amizade.

Aos amigos que estiveram comigo nessa jornada, em especial às minhas amigas da metal, Stephany e Victória, que fizeram parte de incontáveis momentos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho: o meu mais sincero: "muito obrigada!".

“Devemos ter perseverança e, acima de tudo, confiança em nós mesmos. Acreditar que somos dotados para algo e que isso deve ser alcançado.”

(Marie Curie)

## RESUMO

O uso de vergalhões como reforço estrutural do concreto armado ressalta a relevância destes materiais em muitos setores industriais, sobretudo nos de construção e infraestrutura. Neste contexto, o processamento por laminação permite a obtenção de um material com menor custo e boa qualidade, conforme as especificações requeridas, principalmente quando se executa, em laminação a quente, a etapa de tratamento térmico Thermex, na qual se obtém a melhoria das propriedades mecânicas em decorrência das transformações microestruturais ocorridas. Estas transformações também exercem influência sobre a resistência à corrosão do material, pois as variações microestruturais derivadas dos parâmetros do tratamento térmico podem apresentar desempenhos distintos em termos de corrosão. Neste trabalho, o vergalhão CA-50 de aço carbono 1025 foi avaliado no que se refere à resistência à corrosão, cujo interesse deu-se no efeito do Thermex sobre tal propriedade. Foram realizadas análises eletroquímicas como Potencial de Circuito Aberto, Curvas de Polarização Linear e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, que juntamente aos meios de 250, 500 e 1000 ppm NaCl, auxiliaram a definir os principais parâmetros de corrosão. Além disso, medidas de Microdureza Vickers verificaram indiretamente as transformações microestruturais ocorridas ao longo do tratamento. A caracterização por Microscopia Eletrônica por Varredura, por sua vez, além de identificar as fases formadas após o tratamento, também caracterizou a morfologia após os ensaios de corrosão, revelando a presença de corrosão generalizada e localizada. As técnicas utilizadas nas rotas com e sem Thermex permitiram ressaltar como a microestrutura formada ao longo do Thermex influencia as diferenças obtidas nas caracterizações, impactando na resistência à corrosão do vergalhão.

**Palavras-chave:** Laminação. Vergalhão. Thermex. Corrosão.

## ABSTRACT

The use of rebar as structural reinforcement of reinforced concrete shows the relevance of these materials in a large number of industrial sectors, particularly in construction and infrastructure. In this context, the rolling manufacturing allows obtaining a material with lower cost and good quality, according to the required specifications, remarkably when performing, in hot rolling, the Thermex heat treatment step, in which the improvement of the mechanical properties is obtained as a result of the microstructural transformations that occurred. These transformations also influence the corrosion resistance of the material, as the microstructural variations acquired by the heat treatment parameters can present different performances in terms of corrosion. In this work, the CA-50 rebar made of 1025 carbon steel was evaluated with regard to corrosion resistance, whose interest was in the effect of Thermex on this property. Electrochemical analyzes such as Open Circuit Potential, Linear Polarization Curves and Electrochemical Impedance Spectroscopy were carried out, and with the solutions of 250, 500 and 1000 ppm NaCl, helped to define the main corrosion parameters. In addition, Vickers Microhardness measurements indirectly verified the microstructural transformations that occurred during the treatment. The microstructural characterization by Scanning Electron Microscopy, in its turn, in addition to identifying the phases formed after the treatment, also characterized the morphology after the corrosion tests, revealing the presence of generalized and localized corrosion. The techniques used in the routes with and without Thermex allowed to highlight how the microstructure formed along the Thermex influences the differences obtained in the characterizations, impacting the rebar corrosion resistance.

**Keywords:** Rolling. Rebar. Thermex. Corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de produção do aço . . . . .	19
Figura 2 – Processo de laminação . . . . .	20
Figura 3 – Exemplos de passes de laminação . . . . .	20
Figura 4 – Diagrama tensão-deformação . . . . .	22
Figura 5 – Diagrama Fe-C . . . . .	23
Figura 6 – Diagrama TTT de um aço hipoeutetóide . . . . .	25
Figura 7 – Transformação microestrutural na laminação a quente . . . . .	26
Figura 8 – Sistema Thermex . . . . .	27
Figura 9 – Curvas de variação da temperatura da barra para diferentes posições de raio durante o processo de tratamento térmico superficial . . . . .	28
Figura 10 – Circuito elétrico equivalente de uma interface metal-eletrólito . . . . .	34
Figura 11 – Fluxograma da metodologia experimental . . . . .	36
Figura 12 – Célula eletroquímica de três eletrodos . . . . .	38
Figura 13 – Evolução do potencial de circuito aberto das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl . . . . .	41
Figura 14 – Curvas de polarização linear das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl . . . . .	43
Figura 15 – Diagramas de Nyquist das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl . . . . .	45
Figura 16 – Resistência à transferência de carga das amostras com e sem Thermex em 250, 500 e 1000 ppm NaCl . . . . .	46
Figura 17 – Relação entre microdureza e tratamento térmico para as amostras (a) Com Thermex, (b) Sem Thermex . . . . .	47
Figura 18 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex	49
Figura 19 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex	50
Figura 20 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 250 ppm NaCl . . . . .	51
Figura 21 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 500 ppm NaCl . . . . .	52
Figura 22 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 1000 ppm NaCl . . . . .	53

Figura 23 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 250 ppm NaCl . . . . .	54
Figura 24 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 500 ppm NaCl . . . . .	54
Figura 25 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 1000 ppm NaCl . . . . .	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço 1025 . . . . .	36
Tabela 2 – Parâmetros de Tafel das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl . . . . .	42

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFC	Cúbica de Face Centrada
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
PVC	Policloreto de Vinila
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
LPTS	Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Fase Ferrita
$\gamma$	Fase Austenita
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
<i>HV</i>	Dureza Vickers
<i>Hz</i>	Frequência
<i>MPa</i>	Tensão
<i>ppm</i>	Concentração
<i>V</i>	Potencial

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
2	<b>OBJETIVOS</b>	18
2.1	<b>Objetivo Geral</b>	18
2.2	<b>Objetivos Específicos</b>	18
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	19
3.1	<b>Laminação</b>	19
3.1.1	<i>Vergalhão CA-50</i>	21
3.2	<b>Propriedades Mecânicas</b>	21
3.3	<b>Transformações de Fases nos Aços</b>	23
3.4	<b>Thermex</b>	26
3.5	<b>Corrosão</b>	30
3.6	<b>Técnicas Eletroquímicas</b>	32
3.6.1	<i>Potencial de Circuito Aberto</i>	32
3.6.2	<i>Curvas de Polarização Linear</i>	32
3.6.3	<i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</i>	33
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	36
4.1	<b>Materiais</b>	36
4.2	<b>Métodos</b>	36
4.2.1	<i>Ensaio Eletroquímico</i>	37
4.2.2	<i>Caracterização Mecânica</i>	38
4.2.3	<i>Caracterização Microestrutural</i>	39
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	40
5.1	<b>Ensaio Eletroquímico</b>	40
5.1.1	<i>Potencial de Circuito Aberto</i>	40
5.1.2	<i>Curvas de Polarização Linear</i>	41
5.1.3	<i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</i>	44
5.2	<b>Caracterização Mecânica</b>	46
5.2.1	<i>Microdureza Vickers</i>	46
5.3	<b>Caracterização Microestrutural</b>	48
5.3.1	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	48

5.3.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura - Ensaios de Corrosão</i> . . . . .	50
6	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	57

## 1 INTRODUÇÃO

Os vergalhões de aço carbono combinam atributos como baixo custo, boa qualidade e boas propriedades mecânicas, sendo os materiais mais comumente utilizados como reforço estrutural do concreto armado pela contribuição com a resistência à tração. Neste contexto, o aço é um insumo fundamental em muitos setores industriais como o de construção e infraestrutura, gerando impactos no funcionamento da economia em geral.

Além disso, a relativa facilidade de processamento desses materiais quando se consideram obter a forma desejada, o controle de propriedades e o custo conveniente resulta no desenvolvimento de processos de conformação plástica como a laminação, em que são fabricados os vergalhões. Conforme mostra Hosford (2005), estes processos podem ser realizados a quente ou a frio, nos quais a principal propriedade considerada é a temperatura de recristalização. A conformação a quente costuma ocorrer acima da temperatura de recristalização e o material de trabalho recristaliza à medida que é deformado. Adicionalmente, os vergalhões laminados a frio geralmente obtêm maior resistência mecânica do que os laminados a quente, entretanto possuem menor ductilidade.

De uma maneira geral, os metais apresentam alta resistência à deformação e tenacidade, que os tornam adequados a uma série de aplicações tecnológicas. Ao mesmo tempo, permitem a sua conformação no estado sólido, por meio de diversos processos de trabalho mecânico, associados aos tratamentos térmicos que permitem a alteração e o controle de diversas propriedades. Dessa forma, a utilização de sistemas de tratamentos térmicos em linha em processos de laminação de vergalhões se mostra uma grande evolução no que diz respeito ao aumento da resistência mecânica em aços com baixo teor de carbono. (RIZZO, 2007; FILHO, 2004)

Neste contexto, no processo Thermex, por meio de um resfriamento forçado com água, reduz-se a temperatura superficial da barra e ocorre uma mudança microestrutural na mesma. Esta alteração microestrutural pode afetar propriedades importantes do material como resistência mecânica e à corrosão.

Após o Thermex, geralmente obtêm-se as tensões de escoamento e de ruptura necessárias por norma do produto, e este aumento da resistência mecânica do material viabiliza a utilização de menor teor de carbono na composição das ligas, impactando na redução de custos na fabricação, além de possibilitar a obtenção de um material com propriedade de soldabilidade.

Na ausência do sistema de resfriamento, as barras permanecem à altas temperaturas de laminação a quente, conseqüentemente, apresentam uma baixa resistência mecânica e uma

grande facilidade de deformação, se comparadas às propriedades do aço a temperatura ambiente. (FILHO, 2004)

Em relação à corrosão de vergalhões, este é um dos tópicos mais importantes no campo da pesquisa de cimento e concreto, podendo ocorrer a partir de três estágios: fase de iniciação, aparecimento da corrosão e propagação. Além disso, a heterogeneidade das características da superfície, decorrente do tratamento térmico, é favorável à formação de sítios precursores para corrosão. (DONG *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2019)

Existem importantes considerações referentes ao Thermex e seus parâmetros de processo que influenciam na resistência à corrosão do produto final.

Neste cenário, o uso habitual do tratamento térmico durante o processamento dos vergalhões laminados a quente e o evidente interesse no desempenho destes materiais em relação à corrosão ressaltam a necessidade de se obterem informações mais completas sobre como as fases presentes em sua microestrutura podem influenciar no desenvolvimento do ataque nas barras.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Identificar, estudar e avaliar efeito do tratamento térmico Thermex mediante laminação a quente na resistência à corrosão do vergalhão CA-50.

### **2.2 Objetivos Específicos**

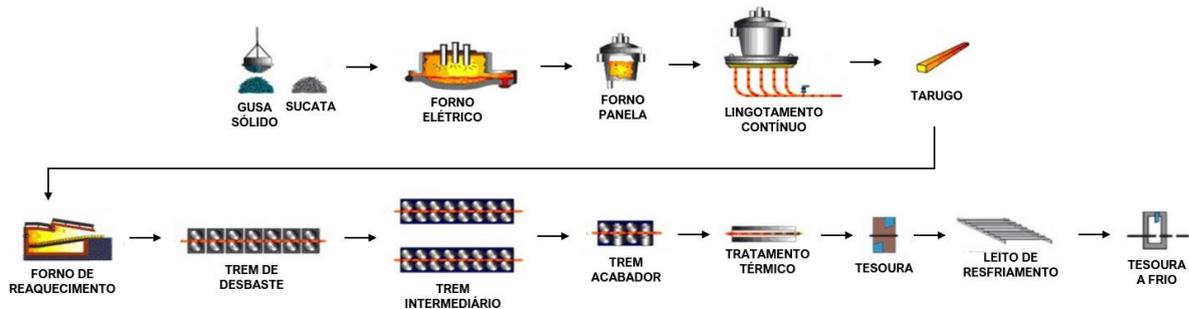
- Estabelecer correlações entre a microestrutura formada após o processo no comportamento geral do material à corrosão, bem como em suas propriedades mecânicas;
- Avaliar de forma comparativa as propriedades mecânicas dos vergalhões produzidos em rota com e sem Thermex;
- Analisar a influência da microestrutura obtida em cada rota na resistência à corrosão e nas propriedades mecânicas do vergalhão.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Laminação

Na siderurgia, o aço é produzido a partir de etapas que envolvem redução, refino e conformação mecânica para dar a forma final ao material, conforme mostra o fluxograma da Figura 1. Considerada um dos processos de transformação mecânica mais utilizados, a laminação busca atender às exigências do mercado extremamente competitivo por meio da redução dos custos operacionais, aumento da qualidade e produtividade, possuindo controle preciso do produto final.

Figura 1 – Fluxograma de produção do aço



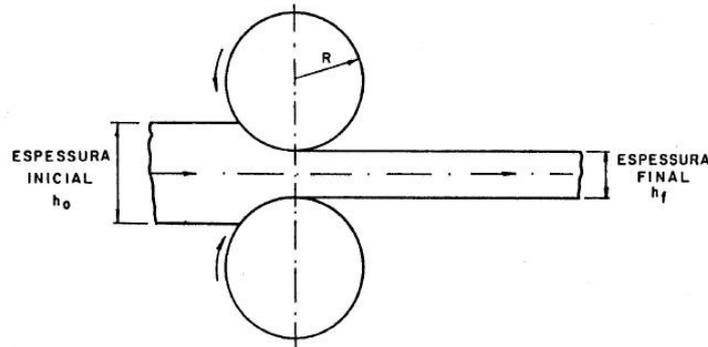
Fonte: adaptado de Kameoka (2012)

Neste processo, o material é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com praticamente a mesma velocidade superficial e espaçados entre si a uma distância menor que o valor da dimensão inicial do material a ser deformado, conforme mostra a Figura 2. Assim, o material é submetido a altas tensões compressivas dos cilindros e a tensões de cisalhamento de superfície, como resultado do atrito entre os cilindros e o metal. Devido ao atrito, o metal é puxado para os cilindros e sofre deformação plástica, tendo sua seção transversal reduzida, enquanto a largura e o comprimento aumentam. (RIZZO, 2007; JR, 1998)

Além disso, o processo de laminação pode ser conduzido a frio ou a quente. A matéria-prima da laminação a quente é obtida a partir do lingotamento, contínuo ou convencional, assumindo a forma de produto plano ou longo após os passes pelos cilindros laminadores. A temperatura de trabalho está acima da temperatura de recristalização da peça, de modo a reduzir a resistência à deformação plástica em cada passe e permitir a recuperação da estrutura do material, evitando que ocorra encruamento para os passes seguintes.

No caso da laminação a frio, a matéria-prima é um produto semi-acabado proveniente

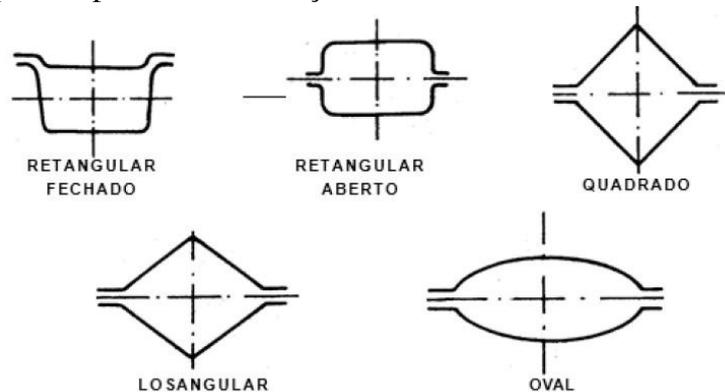
Figura 2 – Processo de laminação



Fonte: Filho *et al.* (2011)

da laminação a quente. Neste processo, a temperatura de trabalho localiza-se abaixo da temperatura de recristalização do material, dessa forma há maior resistência à deformação que, inclusive, aumenta conforme a deformação, caracterizando assim o encruamento. Neste contexto, as reduções de seção transversal do material não são tão elevadas em comparação com a laminação a quente. (MOURAO *et al.*, 2007)

Figura 3 – Exemplos de passes de laminação



Fonte: Filho *et al.* (2011)

Conforme pode ser visto na Figura 3, para que se consiga obter a espessura desejada do material, são realizados passes sucessivos na peça por meio dos cilindros. A sequência destes passes deve considerar a temperatura de trabalho, a capacidade do laminador e as especificações do produto final. Os passes iniciais e intermediários são realizados com objetivo único de reduzir a seção, sendo considerados passes de desbaste. Já os passes finais estão relacionados com o acabamento da peça, levando em consideração o coeficiente de expansão térmica do material e as tolerâncias dimensionais da seção. (MOURAO *et al.*, 2007)

### **3.1.1 Vergalhão CA-50**

Os produtos laminados são classificados em planos ou longos. Os produtos planos possuem a forma da seção transversal retangular, com largura muito maior que a espessura. Podem ser obtidos por laminação a quente ou a frio, sendo subdivididos em bobinas, chapas, fitas, folhas, tiras e rolos. Já os produtos longos são classificados em barras, fio-máquina, tubos, perfis comuns, perfis especiais e trilhos. Em contrapartida aos planos, possuem a seção transversal geralmente não retangular, com a largura não muito maior que a espessura.

Os vergalhões constituem barras redondas laminadas, geralmente nervuradas, com amplas tolerâncias dimensionais ou de superfície. São produtos longos utilizados em larga escala na construção civil para construção de casas, conjuntos habitacionais, edifícios comerciais e residenciais, supermercados, shoppings, postes, galpões, pré-fabricados, viadutos, pontes, barragens, obras de saneamento, entre outros. (FILHO, 2004)

Além disso, o aço na construção possui destaque devido à resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Neste contexto, os aços carbono são bastante utilizados em estruturas, atendendo aos seguintes requisitos: ductilidade e homogeneidade; valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento; soldabilidade; susceptibilidade de corte por chama, sem endurecimento; resistência razoável à corrosão. De fato, o teor de carbono relativamente baixo e o trabalho a quente proporcionado pela laminação garantem a ductilidade necessária, além de produzir uma homogeneidade muito boa em toda a extensão das peças, com pequenas variações de resistência à tração e compressão, que não chegam a prejudicar. (CHIAVERINI, 2008)

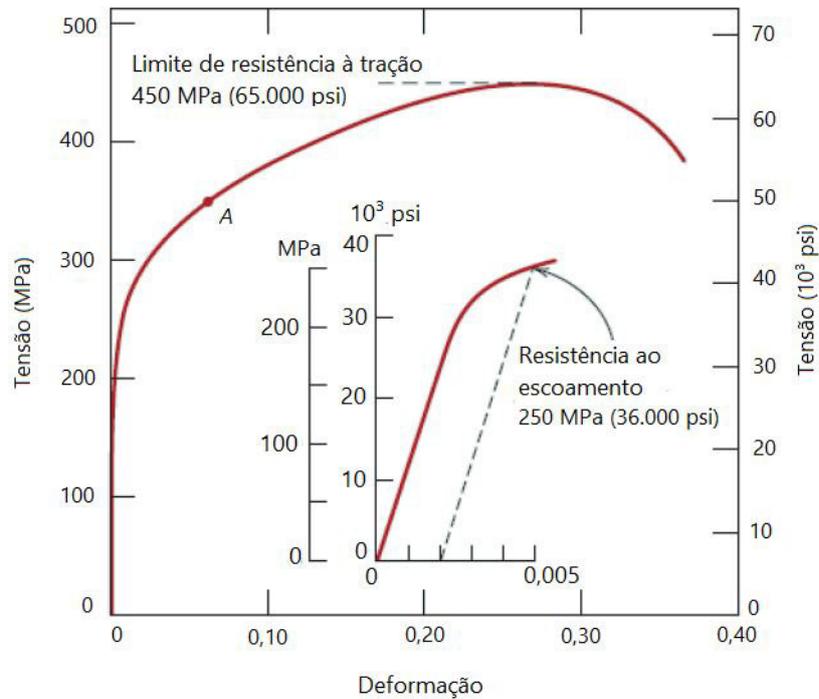
As barras de aço laminadas a quente utilizadas pela construção civil são classificadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7480:2007 nas categorias CA-25 e CA-50, correspondente aos limites de escoamento mínimos de 250 e 500 MPa, respectivamente.

## **3.2 Propriedades Mecânicas**

Quando o material é submetido a uma tensão externa, ocorre uma resposta a este fenômeno na forma de deformação, elástica ou plástica, ou fratura, dependendo do tipo da intensidade, frequência, velocidade, forma de aplicação da tensão, e da estrutura do material, que compreende suas ligações químicas, sua estrutura cristina e micro/macroestrutura. (RIZZO, 2007)

Neste contexto, na deformação elástica, um corpo deformado recupera totalmente sua forma e tamanho originais ao remover a carga externa, enquanto que quando ocorre deformação plástica o corpo não recupera sua forma e dimensões na retirada da carga externa.

Figura 4 – Diagrama tensão-deformação



Fonte: adaptado de Jr e Rethwisch (2012)

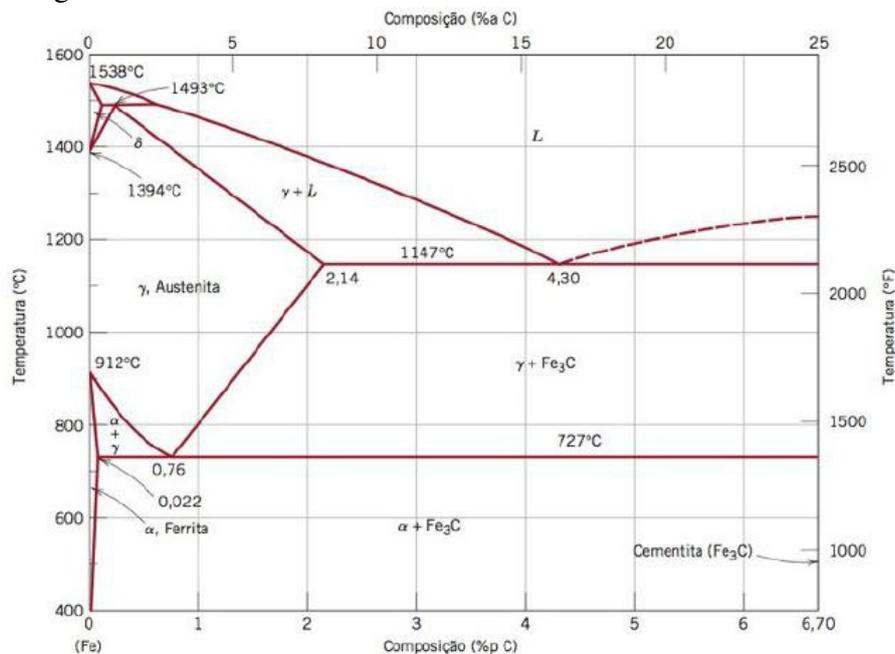
Conforme pode verificar-se na Figura 4, existe uma relação entre a força de tração atuando na área da seção transversal da peça e o alongamento correspondente devido à tensão de tração. Quando o limite elástico é excedido e o ponto de escoamento é atingido, o metal sofre deformação permanente ou plástica. Assim, a deformação total ou deformação produzida por um determinado sistema de forças externas é a soma da deformação elástica e plástica. (WUSATOWSKI, 1969)

Além disso, o escoamento caracteriza-se por uma deformação permanente do material sem que haja aumento da carga, mas com aumento da velocidade de deformação. Após o escoamento, pode ocorrer o encruamento, ou seja, o aumento da tensão necessária para continuar com a deformação. Neste caso, o material resiste cada vez mais à tração externa, exigindo uma tensão cada vez maior para se deformar. Assim, ao subir, a tensão atinge um valor máximo que determina o limite de resistência do material.

### 3.3 Transformações de Fases nos Aços

Em equilíbrio termodinâmico, a combinação do ferro e carbono dá origem a diferentes fases para diversas temperaturas, conforme ilustra a Figura 5. Quando se adiciona carbono ao ferro, podem ser formadas fases sólidas baseadas nas formas alotrópicas do ferro, constituídas por soluções sólidas intersticiais e que apresentam campos de estabilidade em função do teor de carbono e da temperatura, e uma fase intermediária. Na produção industrial do aço, entretanto, a solidificação e o resfriamento são muito rápidos para que o equilíbrio termodinâmico seja alcançado, por isso ocorre a formação de uma fase metaestável, a cementita (carboneto de ferro), no lugar da grafita. (SILVA; MEI, 2006; SANTOS, 2006)

Figura 5 – Diagrama Fe-C



Fonte: Jr e Rethwisch (2012)

Além disso, existem outros constituintes. A austenita é uma solução sólida intersticial de carbono no ferro  $\gamma$ , apresentando uma estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC) de grãos poligonais irregulares, com boa resistência mecânica e apreciável tenacidade, além de não ser magnética. A solubilidade máxima de carbono no ferro é de 2,11% a 1148 °C, aproximadamente 100 vezes maior que a da ferrita, uma vez que as posições intersticiais na estrutura CFC são maiores e, portanto, as deformações impostas pelos átomos de ferro circunvizinhos são muito menores. (CHIAVERINI, 2008; JR; RETHWISCH, 2012)

Já a ferrita é ferro no estado alotrópico  $\alpha$ , com estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC), contendo em solução sólida intersticial traços de carbono. Apresenta também

uma estrutura de grãos poligonais irregulares, possuindo baixa dureza e resistência à tração, porém excelente resistência ao choque e elevado alongamento. (CHIAVERINI, 2008)

A cementita, por sua vez, se forma quando o limite de solubilidade do carbono na ferrita  $\alpha$  é excedido abaixo de 727 °C. Não depende das estruturas alotrópicas do ferro, sendo considerada uma fase intermediária. Sua estrutura cristalina é ortorrômbica, muito dura e quebradiça, responsável pela elevada dureza dos aços alto carbono, assim como por sua menor ductilidade. (CHIAVERINI, 2008; JR; RETHWISCH, 2012; SANTOS, 2006)

A transformação da austenita em perlita contendo ferrita e cementita é característica de muitas reações no interior de sólidos, ou seja, começa nos contornos de grãos e prossegue em direção ao seu centro, pois os átomos dos contornos de grão apresentam maiores energias que os átomos dentro dos grãos. Neste contexto, a perlita é uma mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, contendo propriedades mecânicas intermediárias.

De fato, a formação da ferrita e da cementita - conseqüentemente da perlita - exige a mudança do reticulado cristalino do ferro, assim como o movimento de átomos, por difusão, através da austenita sólida; tais modificações levam tempo. Em conseqüência, se for aumentada a velocidade de resfriamento da austenita, não haverá tempo suficiente para uma completa movimentação atômica e as reações de transformação da austenita se modificam, podendo mesmo deixar de formar-se os constituintes normais - como a perlita - e surgirem novos constituintes de grande importância para a aplicação dos aços. (CHIAVERINI, 2008)

A bainita é um microconstituente resultante da transformação austenítica, cuja microestrutura é composta por uma matriz de ferrita e partículas alongadas de cementita. Forma-se como agulhas ou placas, dependendo da temperatura de transformação. Além disso, ocorre em temperaturas abaixo daquelas na quais a perlita se forma. (JR; RETHWISCH, 2012)

Já a martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita. Diferentemente da maioria dos processos de transformações de fases, que ocorre por nucleação e crescimento, em que se têm movimentos atômicos por difusão, a transformação martensítica ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão. (SILVA; MEI, 2006; SANTOS, 2006)

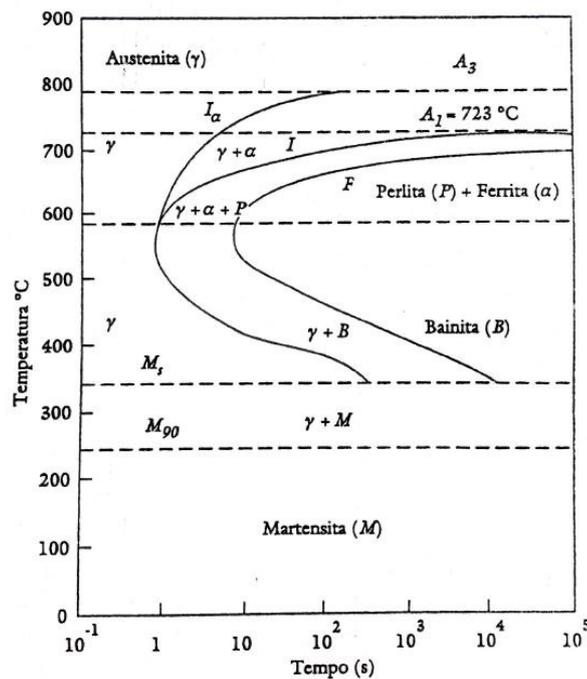
Neste contexto, existem transformações de fases fora das condições de equilíbrio termodinâmico, que dependem da composição do aço e podem ocorrer quando, inicialmente à temperatura da fase austenítica, o aço é resfriado rapidamente até determinada temperatura, que é mantida para que a transformação ocorra, ou quando o aço, também à temperatura austenítica,

é deixado resfriar-se continuamente.

As transformações de fase induzidas em condições fora do equilíbrio termodinâmico permitem os tratamentos térmicos dos aços, que visam obter estruturas metaestáveis por meio do resfriamento controlado, a partir de uma temperatura em que esses aços apresentam uma estrutura monofásica austenítica. Como a velocidade de resfriamento se afasta das condições de equilíbrio, o diagrama de fases já não descreve satisfatoriamente as transformações de fases que ocorrem nesses casos, sendo necessário, portanto, um diagrama como o da Figura 6. (SANTOS, 2006)

Considerando um aço com composição hipoeutetóide, ou seja, com teor de carbono menor que 0,8%, que apresenta uma transformação isotérmica, com rápido resfriamento a partir de determinada temperatura, podem-se analisar as transformações de fases a partir do diagrama Tempo-Temperatura-Transformação (TTT) mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama TTT de um aço hipoeutetóide



Fonte: Santos (2006)

Na Figura 6, a linha  $I_{\alpha}$  representa o início da formação de ferrita primária, enquanto que a temperatura  $A_3$  corresponde ao início da transformação da austenita em ferrita primária considerando as condições de equilíbrio. Como o teor de carbono é menor nesses aços, a quantidade de átomos que deve se mover por difusão é também menor, por isso as transformações ocorrem mais rapidamente, sendo as linhas I e F deslocadas para a esquerda, o que dificulta

a obtenção de estruturas bainíticas e martensíticas. Além disso, as linhas de início e fim da transformação martensítica são deslocadas para cima. (SANTOS, 2006)

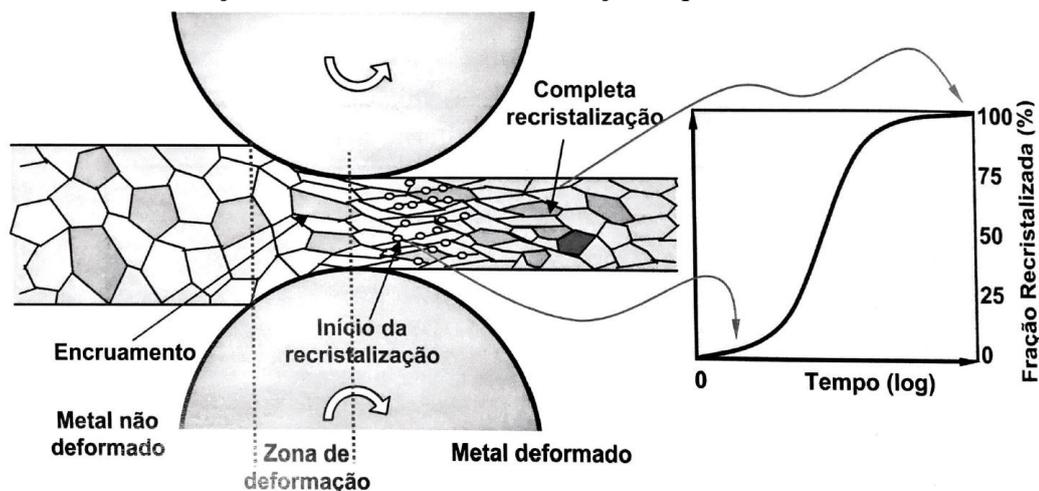
Em contrapartida, existem alguns fatores que influenciam na nucleação da perlita e da bainita a partir da austenita, afetando os diagramas de transformação. O primeiro deles é a composição química do aço. Alguns elementos de liga como manganês, níquel, cromo e molibdênio, por exemplo, quando adicionados ao aço, podem deslocar as curvas de forma bem mais significativa que o carbono, facilitando a obtenção de estruturas martensíticas por meio de resfriamentos menos drásticos. (SANTOS, 2006)

Outros pontos relevantes estão relacionados com o tamanho de grão da austenita, que ao serem menores, favorecem a nucleação de uma nova fase, pois os contornos de grão são regiões preferenciais para a nucleação heterogênea e o menor tamanho proporciona uma maior área total de contornos disponíveis; além da homogeneidade da austenita, que inclui a ausência de inclusões, regiões com alta densidade de discordâncias em materiais deformados a frio e carbonetos residuais. (SANTOS, 2006)

### 3.4 Thermex

Conforme o material passa entre os cilindros de laminação a quente, ocorrem várias transformações microestruturais, decorrentes principalmente da temperatura em determinadas regiões da zona de conformação, além da deformação e da taxa de deformação.

Figura 7 – Transformação microestrutural na laminação a quente



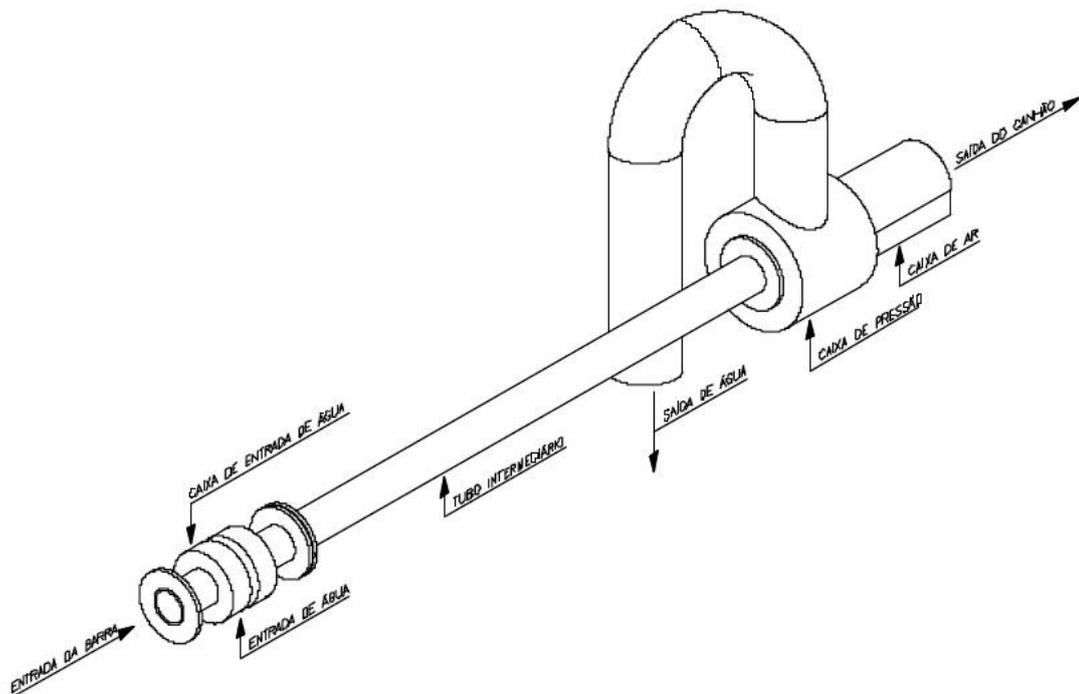
Fonte: Rizzo (2007)

De acordo com a Figura 7, no início do processo há grãos maiores e, com a interação entre discordâncias e com barreiras que impedem seu movimento por meio da rede cristalina,

reduzindo a mobilidade média das discordâncias e necessitando de uma maior tensão para realizar o movimento das mesmas e assim promover a deformação plástica, ocorre o encruamento. No processo de alívio da energia interna, ocorrem três estágios: recuperação, recristalização e crescimento de grãos. Na recuperação, há reação entre defeitos pontuais, que conduz à redução dos mesmos; eliminação de discordâncias de sinais opostos; rearranjo de discordâncias para formar configurações de menor energia; formação de contornos de grão de alto ângulo. Já na recristalização, há absorção de defeitos pontuais e de discordâncias por contornos de grão de alto ângulo em movimento; enquanto que no crescimento de grão, há redução da área total dos contornos de grão. (RIZZO, 2007)

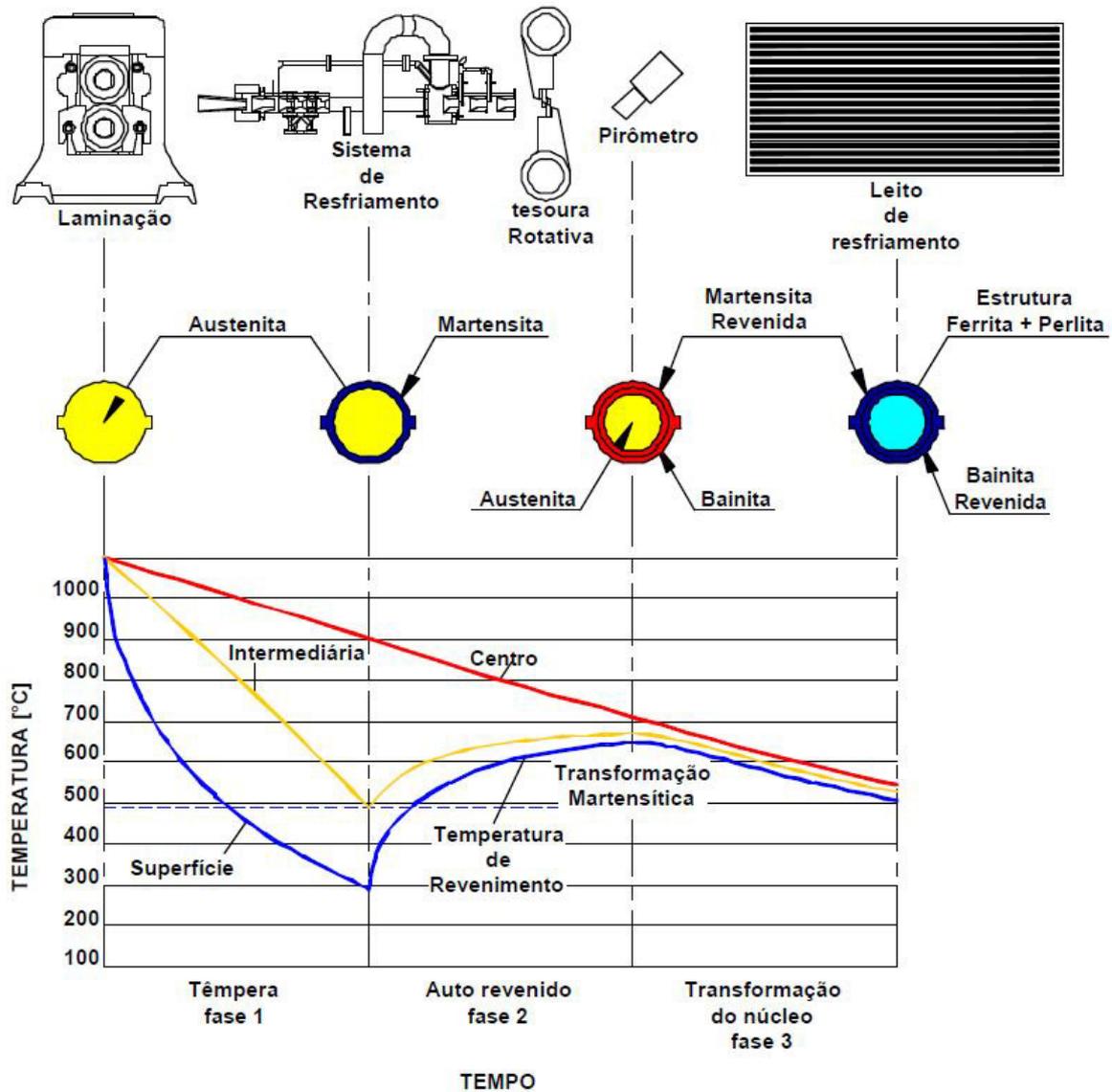
Essa condição ocorre até o último passe na laminação de vergalhões. Em seguida, estes materiais são submetidos a um tratamento térmico, Thermex, derivado do inglês *Thermal Wave Experiment*. No sistema Thermex, como mostra a Figura são utilizados tubos, também denominados canhões, onde a água troca calor com as barras, tendo seu fluxo no mesmo sentido de laminação. Este sistema de troca térmica garante, por sua vez, que a barra tenha um resfriamento homogêneo em sua superfície, para garantir suas propriedades mecânicas ao final do processo. (FILHO, 2004)

Figura 8 – Sistema Thermex



Fonte: FILHO (2004)

Figura 9 – Curvas de variação da temperatura da barra para diferentes posições de raio durante o processo de tratamento térmico superficial



Fonte: FILHO (2004)

Além disso, conforme a Figura 9, após o último passe de laminação na gaiola acabadora, a barra atravessa o interior dos tubos do sistema mostrado na Figura 8, em contato com a água, sofrendo, assim, um rápido resfriamento de sua superfície, em que a temperatura superficial da barra passa de cerca de 1000 °C para valores próximos de 300 °C. Esta condição promove a transformação da microestrutura da camada superficial de austenita para martensita. Simultaneamente, devido à transferência de calor, a taxa de resfriamento no núcleo é mais lenta, por isso a microestrutura austenítica é mantida enquanto a superfície está sendo resfriada, o que corresponde à fase 1 mostrada na Figura 9.

Essa transformação martensítica da superfície ocorre por cisalhamento de volumes discretos do material, com o movimento simultâneo de muitos átomos, mas em distâncias da ordem de uma distância interatômica, não caracterizando um movimento por difusão de átomos individuais. É possível, termodinamicamente, se a variação negativa da energia livre de volume superar as variações positivas da energia relacionada com a superfície de separação entre as duas fases e da energia de deformação. Como não há mudança de composição na transformação da austenita em martensita, as energias livres das duas fases dependem apenas da temperatura. (SANTOS, 2006)

Em contrapartida, após o resfriamento no sistema Thermex, a camada superficial passa a ser reaquecida pelo calor acumulado no núcleo. Neste caso, ocorre um auto revenimento, e podem-se melhorar a ductilidade e tenacidade da martensita, bem como aliviar tensões internas provocadas pelo aumento de volume que ocorre na transformação martensítica devido ao fato de a austenita ser mais densa que a martensita. Este processo corresponde à fase 2 da Figura 9. Ainda na fase 2, parte da austenita se transforma em bainita, devido ao aumento da temperatura próximo à superfície.

Quando o material passa para o leito de resfriamento, o resfriamento ocorre ao ar, correspondendo à fase 3 da Figura 9. A temperatura da superfície é praticamente igual a do núcleo neste caso. Após a saída do tubo de resfriamento, a temperatura da superfície aumenta com o auto revenimento e atinge-se a temperatura de equalização (equilíbrio) da barra em torno de 610 °C. Assim, as taxas de resfriamento são mais lentas, portanto a austenita do núcleo se transforma em ferrita e perlita, enquanto que a bainita sofre o auto revenimento. Portanto, a partir das transformações da austenita, cada uma das estruturas obtidas apresenta suas características próprias, transferindo ao material propriedades de acordo com o gradiente microestrutural formado.

Comprovados os três estágios, têmpera de camada superficial, auto revenimento da martensita e transformação do centro da barra, destacam-se os principais parâmetros de controle de processo como a taxa de vazão de água durante o resfriamento, o tempo necessário para realizar a têmpera e a temperatura de revenimento das barras no leito. Há, entretanto, uma interdependência desses fatores, sendo a temperatura de revenimento a variável de controle do processo, uma vez que esta possui uma influência direta nas propriedades mecânicas do aço. (FILHO, 2004)

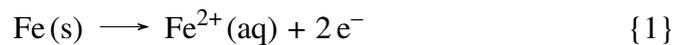
### 3.5 Corrosão

Devido ao uso dos vergalhões como reforço estrutural para o concreto armado, a degradação das armaduras de aço devido à corrosão é uma grande preocupação para a durabilidade das estruturas de concreto e implica em sérias perdas econômicas.

Durante a laminação a quente, a superfície do aço é exposta ao ar e à água, havendo a formação de uma camada de óxido na mesma. Dependendo do método de produção, essa camada de óxido apresenta composição, espessura e aderência diferenciadas ao substrato metálico. No caso de tratamentos térmicos como o Thermex, geralmente, o resfriamento drástico com água e o ciclo térmico subsequente ao auto revenimento da barra, contribuem para a formação de uma camada protetora fina e aderente na superfície, que aumenta a resistência à corrosão das barras de aço. Entretanto, essa camada passiva pode ser quebrada pela ação de íons cloreto a partir de alguns mecanismos como dissolução química do filme, acúmulo de furos na interface filme/substrato, bem como formação de pites. (ZITROU *et al.*, 2007; ALMUSALLAM, 2001)

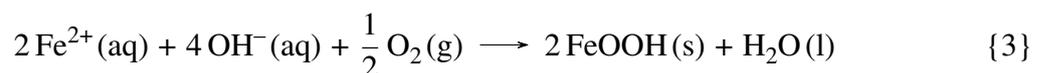
Neste contexto, a corrosão em meio aquoso é o tipo de corrosão com maior incidência, pois a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre com principal solvente a água. Além disso, este fenômeno está associado a um processo eletroquímico, em que, na presença da superfície metálica, ocorre passagem de corrente através do metal, e a reação é eletroquímica em sua natureza. (WOLYNEC, 2003)

Em um processo corrosivo, as principais reações eletroquímicas envolvidas são:

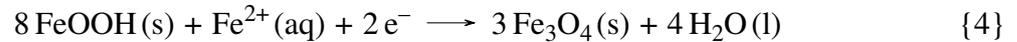


A Equação 1 representa a oxidação do ferro, sendo uma reação anódica, em que os elétrons são o produto da reação. Já a Equação 2 constitui a reação catódica, de redução do oxigênio, que ocorre devido aos elétrons que são gerados pela reação anódica e que se deslocam através do metal desta para a região catódica.

Uma outra consequência das duas reações eletroquímicas básicas é a precipitação da ferrugem. Possui uma composição complexa, porém é, basicamente, constituída por compostos da forma FeOOH e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. A formação do primeiro composto ocorre por uma reação não eletroquímica do tipo:

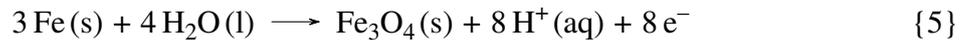


Enquanto o segundo seria formado a partir do primeiro por uma reação eletroquímica catódica do tipo:



Neste contexto, de acordo com a Equação 3, a ferrugem é resultante da reação entre o íon ferroso formado na área anódica e a hidroxila formada na área catódica, razão por que a sua precipitação ocorre entre as duas áreas em consequência do encontro dos dois íons. (WOLYNEC, 2003)

Além disso, devido à elevação do pH provocada pela produção de íons hidroxila, criam-se condições favoráveis à formação de uma película de óxido na superfície do metal de acordo com a reação:



Esta película, aderente ao metal e extremamente fina, corresponde à película passiva, que protege o material contra a corrosão, entretanto não evita a passagem dos elétrons, necessários para a ocorrência da reação, pois se trata de um óxido semiconductor. (WOLYNEC, 2003)

Em relação à microestrutura do aço, a estrutura da martensita pode ser caracterizada por uma fração fina e de pequenos tamanhos de grãos, o que resulta em maior nível de dureza para o aço do vergalhão, mas diminui a tenacidade e o alongamento. A alta fração de ferrita, por sua vez, também favorece a diminuição da tenacidade e do alongamento, enquanto que as baixas frações de ferrita aumentam a suscetibilidade à corrosão sob tensão por cloreto.

Um aspecto importante que deve ser levado em consideração neste estudo é a composição microestrutural ao longo da seção transversal. Isso porque é relatado que os pequenos tamanhos dos grãos da estrutura de martensita na camada de borda do vergalhão podem favorecer a corrosão intergranular com alta velocidade de distribuição. Nesta circunstância, o material termicamente tratado seria mais suscetível ao desenvolvimento de corrosão não uniforme e trincas por fadiga. (BLIKHARSKYY *et al.*, 2021)

Em contrapartida, a propagação da corrosão na barra de aço depende de um grande número de fatores externos independentes, incluindo os seguintes: as características ambientais agressivas, o estado de tensão-deformação do elemento, a presença de tensões iniciais, o estado de propagação da corrosão, a diferença de potencial, as deficiências e os danos locais no material da seção transversal, e a presença de regiões com características químicas heterogêneas tanto do ambiente agressivo circundante quanto do próprio material do elemento influenciado, que, ao

serem analisadas, auxiliam a compreender o comportamento do material em relação à corrosão. (BLIKHARSKYY *et al.*, 2021)

### 3.6 Técnicas Eletroquímicas

#### 3.6.1 Potencial de Circuito Aberto

O acompanhamento do potencial em função do tempo de circuito aberto auxilia a compreender a propensão à corrosão do metal na solução.

Ao imergir um metal em uma solução eletrolítica, é estabelecida uma interface condutor metálico/condutor iônico, a qual exibe uma distribuição não homogênea de cargas. Dessa forma, determina-se uma diferença de potencial entre o metal e a solução, conhecida como potencial de eletrodo que, medido em relação a um eletrodo de referência, corresponde ao potencial de circuito aberto. (SOUZA *et al.*, 2009)

A transferência de elétrons de um metal para íons e moléculas eletroquimicamente ativos produz um potencial de circuito aberto mensurável para um metal em um ambiente corrosivo ou potencialmente corrosivo. A magnitude do potencial é determinada pelo tipo de metal, a condição da superfície do metal e o tipo de eletrodo de referência usado para medir o potencial. (KUTZ, 2018)

#### 3.6.2 Curvas de Polarização Linear

Para se avaliar o comportamento eletroquímico de um metal em um potencial distinto do potencial de corrosão, utilizando-se de fontes externas, podem-se considerar as curvas de polarização, que além disso, representam o efeito das reações que ocorrem no eletrodo de trabalho.

A equação de Butler-Volmer relaciona a corrente elétrica às mudanças no potencial do metal causadas por uma fonte de energia externa:

$$i = i_{corr} [exp - (\sigma n F \eta / RT) - exp((1 - \sigma) n F \eta / RT)] \quad (3.1)$$

Onde:

R é a constante de gás ideal, 8,314 J mol<sup>-1</sup> K;

T é a temperatura, em Kelvin (K);

n é o número de elétrons na semi-reação anódica;

$F$  é a constante de Faraday,  $96500 \text{ C mol}^{-1}$ ;

$i$  é a densidade de corrente externa, em  $\text{A cm}^{-2}$ , fluindo de ou para um eletrodo devido a um potencial aplicado;

$i_{\text{corr}}$  é a densidade da corrente de corrosão, em  $\text{A cm}^{-2}$ , que ocorre quando o eletrodo está em seu potencial de circuito aberto;

$\sigma$  é um coeficiente com valores que variam de 0 a 1;

$\eta$  é o sobrepotencial, a diferença entre o potencial de circuito aberto e o potencial aplicado.

O componente  $\exp(\sigma nF\eta/RT)$  na Equação 3.1 é referente à corrente catódica, enquanto que o componente  $\exp((1 - \sigma)nF\eta/RT)$  representa a corrente anódica. No potencial de circuito aberto,  $\eta = 0$ , as correntes anódica e catódica são iguais e a corrente externa é zero. Assim, pela equação de Butler-Volmer, pode-se perceber que, ao aplicar uma tensão ao eletrodo de trabalho em uma célula eletroquímica, surge uma corrente externa, que induz uma mudança de potencial e causa polarização.

Adicionalmente, a inclinação das curvas de polarização linear representa uma relação entre o potencial e a corrente, dada por  $\Delta E/\Delta i$ , que corresponde à resistência à polarização. Kutz (2018) mostrou que a corrente de corrosão precisa ser convertida em uma taxa de corrosão para ser usada para estimar a vida útil da estrutura de metal; para tal utiliza-se a equação de Stern-Geary:

$$i_{\text{corr}} = [1/(2,303R_p)][(\beta_a * \beta_c)/(\beta_a + \beta_c)] \quad (3.2)$$

Onde:

$R_p$  é a resistência à polarização, em  $\Omega \text{ cm}^2$ ;

$\beta_a$  é a inclinação anódica de Tafel, em V/década da densidade de corrente;

$\beta_c$  é a inclinação catódica de Tafel, em V/década da densidade de corrente;

O termo  $(\beta_a + \beta_c)$  é dado como a constante de Tafel.

Nas curvas de polarização, varia-se o potencial do eletrodo com taxa de varredura constante, obtendo-se os parâmetros acima mencionados.

### 3.6.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

As medidas de impedância eletroquímica descrevem o comportamento metal/eletrólito, bem como as transformações ocorridas a partir do potencial de circuito aberto.

Em vez de se aplicar um potencial de eletrodo de corrente contínua, utiliza-se um potencial de corrente alternada com diferentes valores de frequência. Wolyneec (2003) mostrou que o potencial elétrico varia com o tempo em um circuito de corrente alternada conforme a expressão:

$$E(t) = A \cos \omega t \quad (3.3)$$

Em que  $\omega t = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência de oscilação da corrente; assim, a resposta para esta frequência é:

$$I(t) = B \sin(\omega t + \phi) \quad (3.4)$$

A relação entre o potencial e a corrente pode ser expressa por uma expressão semelhante à da lei de Ohm:

$$E(t) = ZI(t) \quad (3.5)$$

Onde  $Z$  é a impedância, que pode ser expressa por meio da relação:

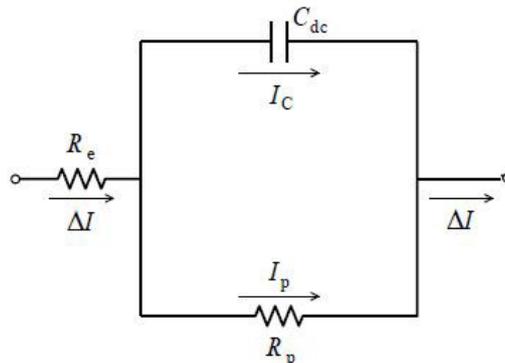
$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (3.6)$$

Ou

$$Z = Z_r + jZ_i \quad (3.7)$$

Em que  $\exp(j\phi) = \cos\phi + j\sin\phi$  e  $j$  é um número complexo ( $j^2 = -1$ ), portanto,  $|Z|$ ,  $Z_r$  e  $jZ_i$  representam o módulo, a parte real e a parte imaginária do número complexo  $Z$ , respectivamente.

Figura 10 – Circuito elétrico equivalente de uma interface metal-eletrólito



Fonte: Wolyneec (2003)

Popov (2015), Woly nec (2003) mostraram que a interface metal-eletrólito de um eletrodo pode ser representada por um circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 10, incluindo a resistência do eletrólito, as películas de superfície e os condutores do circuito. Neste circuito, a resistência à polarização,  $R_p$ , está em paralelo com a capacitância da dupla camada,  $C_{dc}$ .

A impedância desse circuito é dada por:

$$Z = Z_r + jZ_i = R_e + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_{dc}} \quad (3.8)$$

Que pode ser reescrita como:

$$[Z_r - (R_e + \frac{1}{2}R_p)]^2 + Z_i^2 = (\frac{R_p}{2})^2 \quad (3.9)$$

Assim, podem-se utilizar circuitos equivalentes para representar os fenômenos eletroquímicos. Vale salientar também a necessidade de se considerarem parâmetros como concentração e resistência do eletrólito e área do eletrodo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

No presente estudo, foram utilizadas amostras de vergalhão grau CA-50 e bitola 12,5 mm, de acordo com a norma NBR 7480:2007, nas condições com e sem Thermex, cedidas por uma usina siderúrgica localizada no estado do Ceará. A composição química do vergalhão fornecido pela usina siderúrgica está mostrada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Composição química do aço 1025

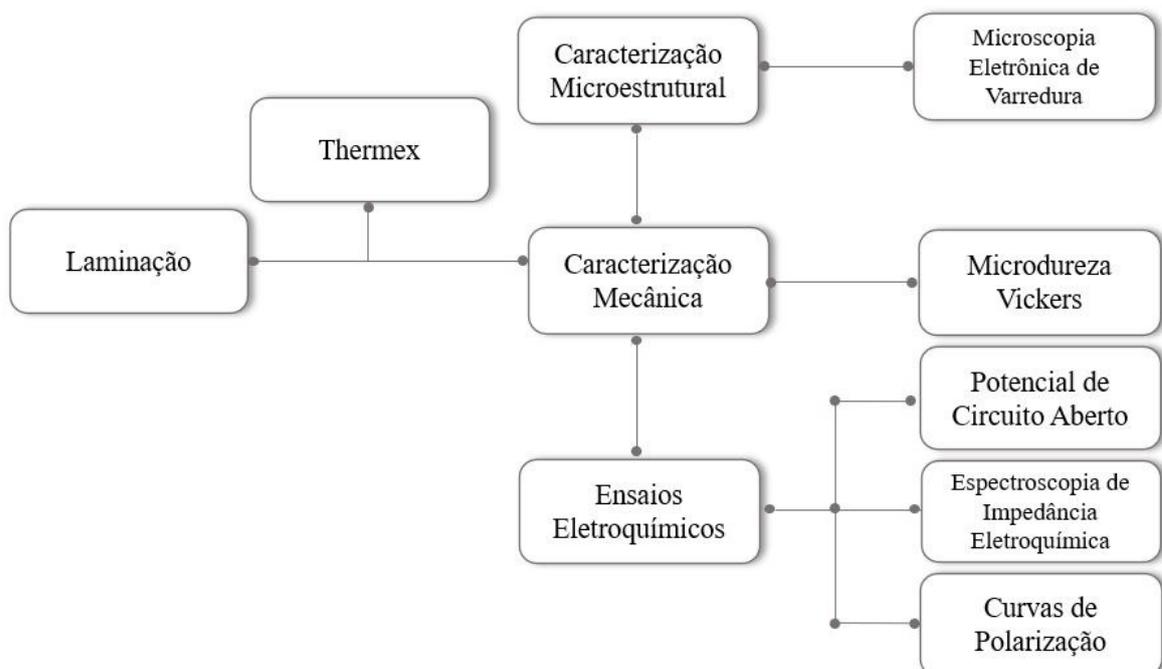
	C	Mn	S	Si	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	Nb	Sn	Al	V
Mínimo	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,015	-	-	-
Máximo	0,2	0,2	0,1	0,11	0,035	0,3	0,2	0,2	0,08	0,08	0,03	0,09	0,1	0,015

Fonte: elaborado pela autora (2021).

### 4.2 Métodos

O fluxograma apresentado na Figura 11 ilustra a metodologia adotada no presente trabalho.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Os vergalhões nas condições com e sem Thermex foram cortados com o auxílio de um disco abrasivo para a obtenção dos corpos de prova, com comprimento de 1 cm. Após o corte, as amostras foram limpas e submetidas a lixamento em lixa d'água com lubrificação de água corrente, por meio de uma politriz Arotec na granulometria de 120 *mesh* para retirar imperfeições superficiais.

Após este lixamento inicial, realizou-se o embutimento em duas condições: a frio e a quente. O embutimento a frio ocorreu a partir de resina polimerizável (epóxi), sendo adicionada de um catalisador. Além disso, foi utilizado um anel cortado de um eletrodo de Policloreto de Vinila (PVC) como molde. O material foi conectado a um cabo de cobre para permitir a realização dos ensaios de corrosão. O contato elétrico entre o cabo de cobre e a amostra foi testado a partir de um multímetro.

Já o embutimento a quente foi obtido a partir de uma embutidora Arotec PRE 30 Mi, em que a amostra foi encapsulada em um cilindro de 25 mm de diâmetro, a cerca de 150 °C, utilizando-se uma pressão de 300 kg cm<sup>-2</sup>. A resina utilizada neste embutimento foi baquelite.

#### **4.2.1 Ensaios Eletroquímicos**

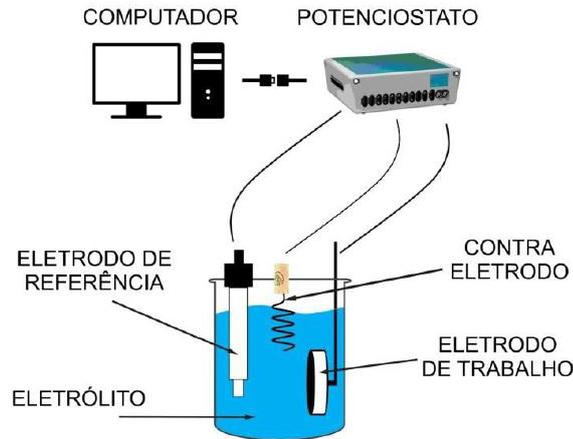
Os eletrólitos utilizados como meios corrosivos nos ensaios de corrosão foram soluções preparadas a partir de NaCl nas concentrações de 250, 500 e 1000 ppm. O preparo se deu a partir da pesagem do sal nas concentrações requeridas e sua completa solubilização em água destilada.

As técnicas eletroquímicas realizadas para avaliar o comportamento do material em relação à corrosão foram: potencial de circuito aberto, espectroscopia de impedância eletroquímica e curvas de polarização linear. Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, conforme ilustra a Figura 12, que é composta pelo eletrodo de trabalho, amostra de análise nas condições com e sem Thermex, com uma área exposta de aproximadamente 0,95 cm<sup>2</sup>; eletrodo de referência, prata-cloreto de prata [Ag<sub>(s)</sub>/AgCl<sub>(s)</sub>/Cl<sup>-</sup><sub>(aq)</sub>(KCl saturado)]; contra eletrodo de platina.

As medidas eletroquímicas foram conduzidas a partir de um potenciostato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT302N, e a coleta de dados foi realizada a partir do software Nova v.2.1.4.

Anteriormente à realização de cada medida, as amostras foram lixadas com lixas d'água nas granulometrias 120, 220, 320, 400, 600 *mesh*, em seguida foram lavadas com água destilada e álcool e secadas com jato de ar quente. Além disso, a interface resina/eletrodo de

Figura 12 – Célula eletroquímica de três eletrodos



Fonte: Resende *et al.* (2017)

trabalho foi protegida com esmalte para evitar corrosão por frestas.

Em se tratando do potencial de circuito aberto, inicialmente deixou-se o material por uma hora em imersão para estabilização do potencial, de modo a identificar o potencial de corrosão.

Além disso, nas curvas de polarização linear foram realizadas as varreduras anódicas e catódicas de -0,2 mV a 1 V com relação ao potencial de circuito aberto também estabilizado após uma hora de imersão. As superfícies das amostras após os ensaios de polarização foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica foram conduzidos a partir do potencial de circuito aberto também estabilizado em uma hora de imersão, sob condições estacionárias, sendo utilizada uma faixa de frequência de 100 kHz a 6 mHz, com uma onda senoidal de 10 mV de amplitude de perturbação sobre o potencial de circuito aberto.

#### 4.2.2 Caracterização Mecânica

Foram obtidos valores de dureza pelo método Vickers para as amostras nas condições com e sem Thermex a partir de um microdurômetro Leco modelo LM-110AT do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) da Universidade Federal do Ceará, com carga de 0,3 HV durante 15 s, totalizando cerca de 55 medições. Os testes foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6507-1:2019, com medições da borda da amostra até o centro, para analisar a influência do tratamento na dureza de cada uma das amostras em estudo.

### **4.2.3 Caracterização Microestrutural**

Para a caracterização por microscopia eletrônica de varredura e mecânica, os corpos de prova metalográficos foram lixados em uma politriz com lixas d'água de granulometrias 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Em seguida, foi realizado o polimento com pasta diamantada de diâmetros 3 e 1  $\mu\text{m}$  para obtenção de superfície plana e sem arranhões.

De modo a revelar a microestrutura, delineando os contornos entre as fases, os grãos e as outras características amostrais, foi realizado o ataque por imersão em temperatura ambiente durante 4 segundos com solução de Nital 2% (1 mL de ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$ , em 49 mL de etanol,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). Imediatamente após o ataque, as amostras foram lavadas com água destilada e álcool e secas com jato de ar quente.

As análises por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas por meio de um microscópio eletrônico da marca FEI®, modelo Quanta 250.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaios Eletroquímicos

#### 5.1.1 *Potencial de Circuito Aberto*

As medições do potencial de circuito aberto proporcionam informações importantes acerca da termodinâmica e cinética da interface metal-eletrólito.

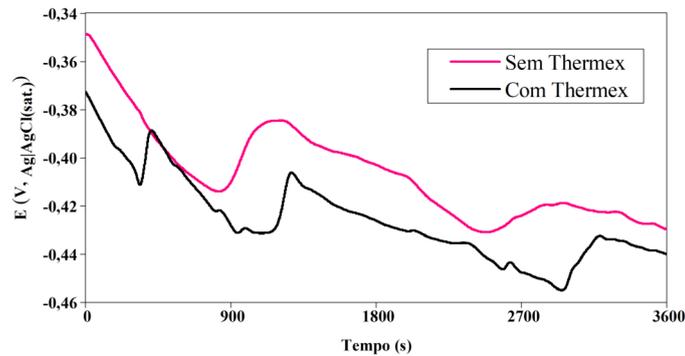
A evolução dos potenciais de circuito aberto para as amostras com e sem Thermex, imersas durante 1 hora em solução de NaCl nas concentrações de 250, 500 e 1000 ppm são mostradas na Figura 13 a seguir.

Um deslocamento do valor do potencial de circuito aberto para valores mais negativos geralmente indica uma superfície eletroquímica mais ativa.

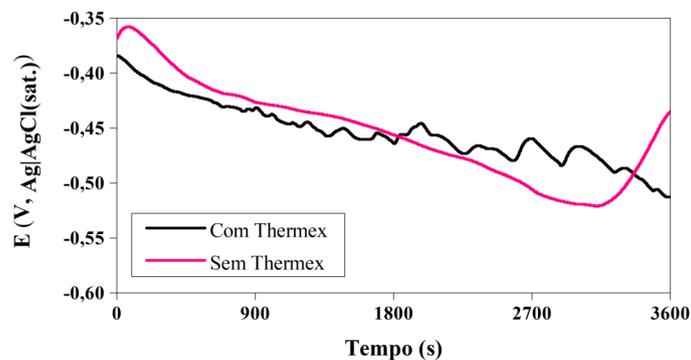
Pode ser observado em todos os meios analisados que o valor do potencial tende a diminuir assim que as amostras são imersas no eletrólito e posteriormente estabiliza. Uma comparação entre as amostras com e sem Thermex mostra que há uma tendência nos valores de potencial de circuito aberto serem mais negativos para as amostras com Thermex, podendo indicar que sua superfície é mais eletroquimicamente ativa. Além disso, os valores de potencial oscilaram entre valores mais e menos negativos antes da estabilização. Xuea *et al.* (2019) mostraram que isso indica que o aço carbono tende a ficar em estado de pseudo-passivação sob o efeito do oxigênio dissolvido no estágio inicial, ou seja, o potencial de circuito aberto está em um nível alto e o aço está em um estado de polarização forte com uma taxa de corrosão relativamente alta. No entanto, este estado pode ser danificado rapidamente devido à dissolução complexante do filme de óxido causada pelo cloreto.

O valor do potencial para as amostras imersas em 1000 ppm NaCl foi mais negativo, indicando novamente uma superfície mais ativa quando comparada com as amostras imersas em concentrações menores. Isso pode estar relacionado a uma menor concentração de oxigênio dissolvido. Zeng *et al.* (2021) mostraram que o oxigênio dissolvido desempenha papéis importantes nos processos de corrosão de materiais metálicos em soluções salinas. Como agente despolarizante, pode facilitar a reação catódica, formação de filme passivo e resistência à polarização.

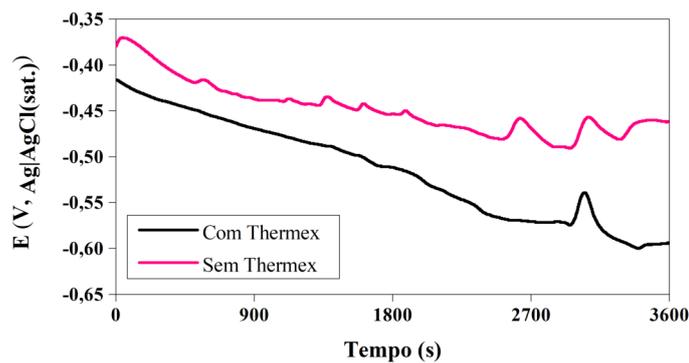
Figura 13 – Evolução do potencial de circuito aberto das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl



(a) 250 ppm NaCl



(b) 500 ppm NaCl



(c) 1000 ppm NaCl

Fonte: elaborado pela autora (2021).

### 5.1.2 Curvas de Polarização Linear

A Figura 14 mostra as curvas de polarização linear das amostras com e sem Thermex imersas nas soluções de 250, 500 e 1000 ppm NaCl. Pode ser observado uma diferença em relação às amostras com e sem o tratamento térmico, pois houve uma tendência de deslocamento

nas amostras com Thermex para menores densidades de corrente em todas as concentrações analisadas em relação às amostras sem o tratamento. Entretanto, o comportamento das amostras, de um modo geral, mostra relativa estabilidade em relação às densidades de corrente. Além disso, como o eletrólito NaCl não é um meio passivante, não há completa diferenciação entre a região ativa e o processo de passivação. Entretanto, em potenciais mais elevados, as correntes anódicas podem influenciar devido à evolução de oxigênio na superfície do material, ocorrendo assim um rápido aumento da densidade de corrente, que pode estar relacionado tanto com a passivação quanto com nucleação de pites, dependendo do potencial com que ocorre.

A Tabela 2 mostra os dados cinéticos obtidos a partir da extrapolação de Tafel para as curvas de polarização linear da Figura 14, identificando o potencial de corrosão,  $E_{\text{corr}}$ , a densidade de corrente de troca,  $i_{\text{corr}}$ , a taxa de corrosão, CR, a resistência à polarização,  $R_p$ , e as inclinações das retas anódicas e catódicas,  $\beta_a$  e  $\beta_c$ , respectivamente.

Por meio dos dados cinéticos da Tabela 2, pode-se especificar o efeito do ataque corrosivo. Os valores de densidade de corrente de troca e taxa de corrosão tendem a crescer e os potenciais estacionários direcionam-se a valores mais negativos com a evolução do ataque.

Tabela 2 – Parâmetros de Tafel das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl

	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu$ A cm <sup>-2</sup> )	CR (mm ano <sup>-1</sup> )	$R_p$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )	$ \beta_a $ (V/década)	$ \beta_c $ (V/década)
Com Thermex	-0,377	2,733	0,032	8516,41	0,109	0,107
Sem Thermex	-0,350	3,422	0,039	7915,31	0,118	0,145

(a) 250 ppm NaCl

	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu$ A cm <sup>-2</sup> )	CR (mm ano <sup>-1</sup> )	$R_p$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )	$ \beta_a $ (V/década)	$ \beta_c $ (V/década)
Com Thermex	-0,542	6,837	0,079	6177,37	0,124	0,523
Sem Thermex	-0,510	2,537	0,029	6716,71	0,062	0,125

(b) 500 ppm NaCl

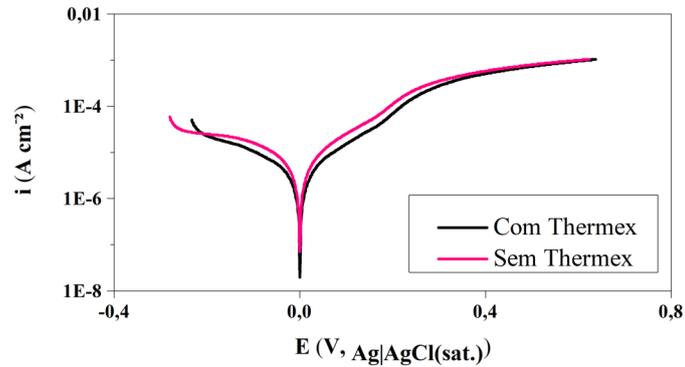
	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu$ A cm <sup>-2</sup> )	CR (mm ano <sup>-1</sup> )	$R_p$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )	$ \beta_a $ (V/década)	$ \beta_c $ (V/década)
Com Thermex	-0,526	4,448	0,051	4222,17	0,071	0,112
Sem Thermex	-0,576	4,423	0,051	4836,43	0,083	0,157

(c) 1000 ppm NaCl

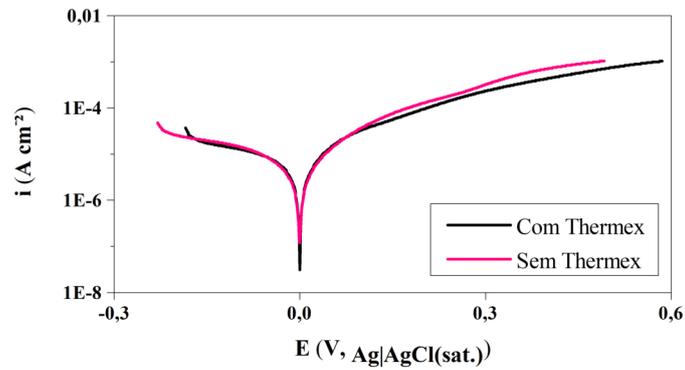
Fonte: elaborado pela autora (2021).

A resistência à polarização, por sua vez, tende a diminuir, evidenciando que com

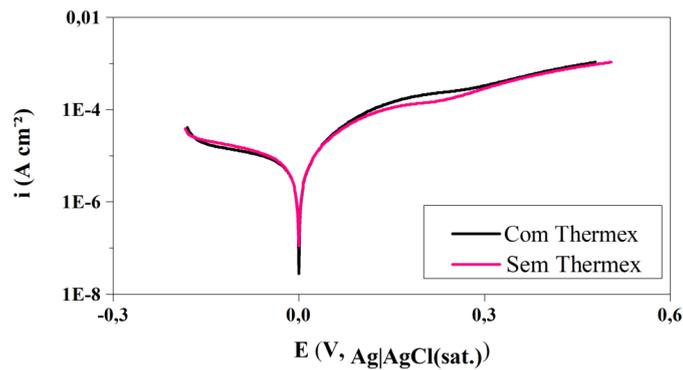
Figura 14 – Curvas de polarização linear das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl



(a) 250 ppm NaCl



(b) 500 ppm NaCl



(c) 1000 ppm NaCl

Fonte: elaborado pela autora (2021).

o incremento na agressividade do ataque, a partir do aumento da concentração de NaCl, o material torna-se mais susceptível ao ataque corrosivo, afastado-se de seu estado estacionário. Adicionalmente, a inclinação anódica de Tafel tende a ser maior que a catódica, significando que o processo anódico é o mais dificultado, e a densidade de corrente é mais controlada pela

semirreação anódica do que catódica.

### 5.1.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Os valores experimentais de  $Z_r(\omega)$  e  $Z_i(\omega)$  são representados diretamente em um gráfico de  $-Z_i$  versus  $Z_r$  como os apresentados na Figura 15.

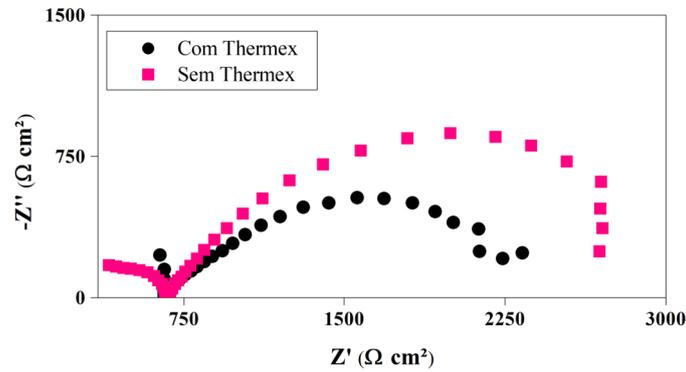
Nos diagramas de Nyquist, os pontos correspondentes aos baixos valores de frequência estão no lado direito do semicírculo, sendo que o ponto correspondente a  $\omega = 0$  está sobre o eixo  $Z_r$  e é igual a  $R_e + R_p$ . À medida que a frequência cresce, os pontos se deslocam para a esquerda, passam pelo ponto indicado por  $\omega_{m\acute{a}x}$  e, para valores tendendo a  $\infty$ , voltam a se aproximar do eixo  $Z_r$  no ponto equivalente a  $R_e$ .

A Figura 15 mostra a evolução do arco capacitivo para as amostras com e sem Thermex imersas nas soluções de 250, 500 e 1000 ppm NaCl, com potencial de circuito aberto estabilizado após uma hora de imersão. Os sistemas de 250 ppm NaCl apresentaram dois arcos capacitivos, sendo o primeiro relacionado à resistência do eletrólito. Segundo Wolyneć (2003), este comportamento também pode estar relacionado com uma reação eletroquímica que apresenta duas etapas. Adicionalmente, em geral, os sistemas são caracterizados por um arco que não se completa na região de baixas frequências, o que pode ser justificado porque o intervalo de frequência utilizado pode não ser suficiente para contemplar toda a impedância, ou devido a um aumento na resistência à corrosão.

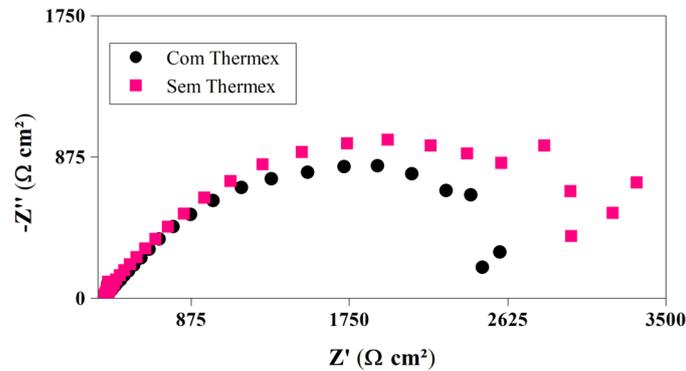
Um ponto fundamental mostrado por Al-rubaiey *et al.* (2013) está relacionado com o efeito da microestrutura sobre o comportamento do material na corrosão. A estabilidade à corrosão das várias microestruturas pode surgir de variações de fases dentro do aço. Geralmente, os aços de estrutura de perlita/ferrita fina, representados pelas amostras sem Thermex, obtêm melhor desempenho em termos de corrosão generalizada quando comparados aos de estrutura de martensita revenida, que é o caso das amostras com Thermex. É sugerido que a taxa de corrosão do aço diminui à medida que a fração de volume da ferrita aumenta. Neste contexto, a ferrita, com maior teor de Fe do que a martensita, atua como ânodo, enquanto a martensita, com maior teor de C do que a ferrita, age como cátodo. Em relação ao ataque localizado por pites, mostrou-se que ambas as fases exibem o mesmo comportamento.

Além disso, como já mencionado, existem tensões internas provocadas pelo aumento de volume que ocorre na transformação martensítica, podendo diminuir a resistência à corrosão do material quanto maior for a quantidade de martensita presente.

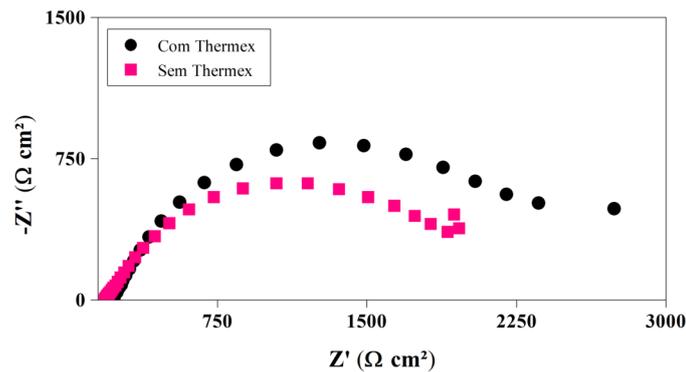
Figura 15 – Diagramas de Nyquist das amostras com e sem Thermex em (a) 250 ppm NaCl, (b) 500 ppm NaCl e (c) 1000 ppm NaCl



(a) 250 ppm NaCl



(b) 500 ppm NaCl

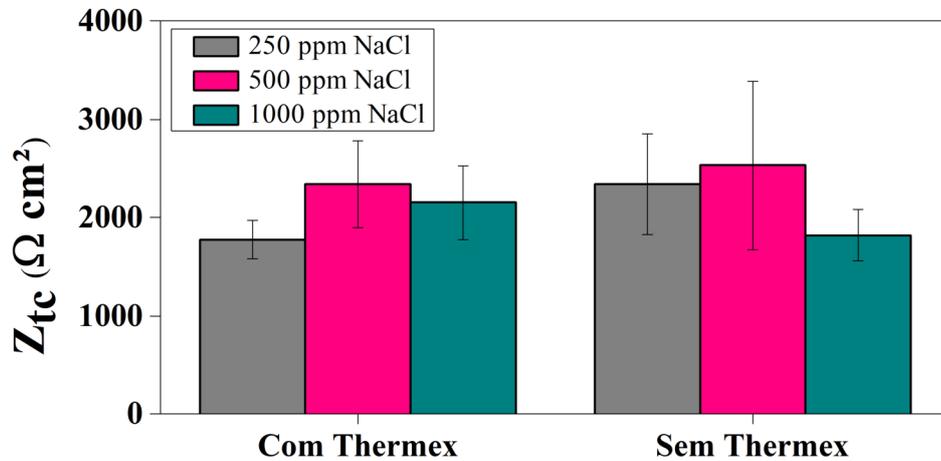


(c) 1000 ppm NaCl

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Conforme mostrado por Wang *et al.* (2021) e pela Figura 16, existe uma variação da resistência de transferência de carga,  $R_{tc}$ , do aço na célula de corrosão, que permite observar a diferença entre as diferentes concentrações de  $Cl^-$ . O menor valor de  $R_{tc}$  significa que a

Figura 16 – Resistência à transferência de carga das amostras com e sem Thermex em 250, 500 e 1000 ppm NaCl



Fonte: elaborado pela autora (2021).

reação eletroquímica na interface metal/eletrólito tende a ocorrer mais facilmente. Enquanto a concentração de NaCl foi aumentada, os raios dos semicírculos capacitivos, de modo geral, e a  $R_{tc}$  tornaram-se maiores e em seguida diminuíram, indicando que a superfície metálica pode ter se tornado mais susceptível ao ataque da solução de NaCl.

## 5.2 Caracterização Mecânica

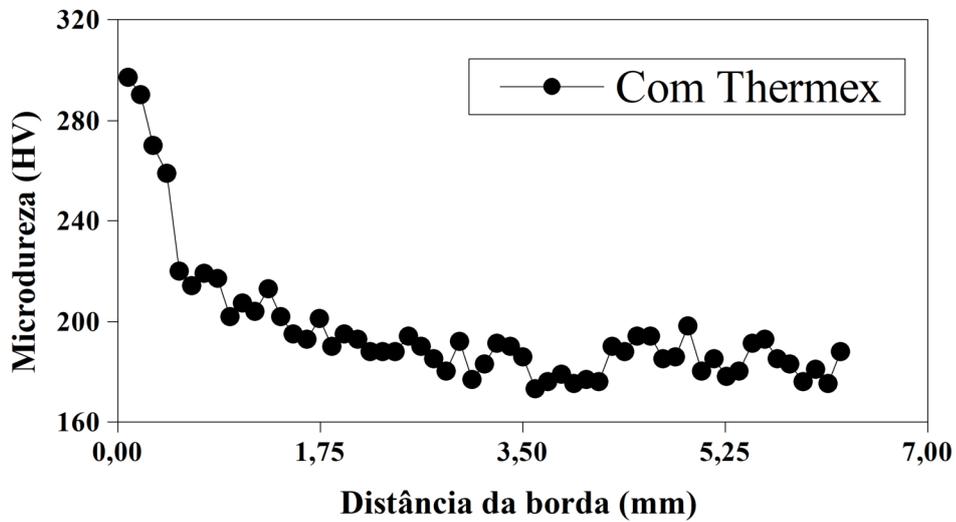
### 5.2.1 Microdureza Vickers

A dureza de um material está relacionada com sua resistência à deformação plástica localizada. Devido à pequena dimensão da seção transversal do vergalhão e necessidade de uma caracterização da dureza em ao longo da seção, foi realizado um ensaio de microdureza, ao invés de um ensaio de dureza convencional, para garantir uma maior amostragem em uma pequena área testada.

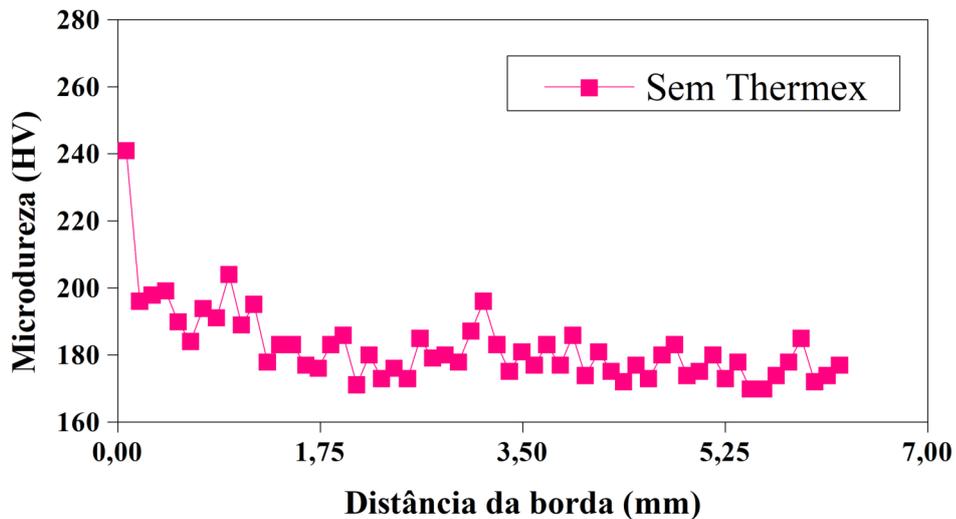
Neste contexto, conforme mostra a Figura 17, foram realizados ensaios de microdureza Vickers para avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas dos materiais investigados, verificando, de forma indireta, as transformações microestruturais que ocorrem ao longo do Thermex.

Há uma grande variação de dureza ao longo da seção das amostras com Thermex com acentuada queda da mesma, devido à microestrutura do material. Na borda, os valores de dureza

Figura 17 – Relação entre microdureza e tratamento térmico para as amostras (a) Com Thermex, (b) Sem Thermex



(a) Com Thermex



(b) Sem Thermex

Fonte: elaborado pela autora (2021).

foram maiores, comprovando a melhora na propriedade ocasionada pela formação da martensita. Bautista *et al.* (2019) mostraram que existe uma dispersão na espessura da martensita em relação a amostragem que pode estar relacionada à dispersão nos tamanhos de grãos de austenita durante o processamento do vergalhão. Adicionalmente, existe uma queda de dureza após essa região, correspondente à zona de transição borda/centro, e a dureza tende a se estabilizar no centro devido à transformação de fases.

Já no caso das amostras sem Thermex, o comportamento do gráfico se assemelha à região do centro no gráfico com Thermex, pois nas amostras sem Thermex a microestrutura é essencialmente uma combinação de ferrita e perlita.

Conforme salientado por FILHO (2004), todas as amostras analisadas são provenientes de um processo produtivo em larga escala que apresenta variações normais de operação provenientes de subprocessos como reaquecimento de tarugos, temperatura da água de arrefecimento, faixas de composição química do material laminado, condições do ambiente, associação de erros aleatórios de medição, dentre outros. A combinação de tais fatores pode ser verificada por meio das variações normais identificadas nas medições realizadas.

### **5.3 Caracterização Microestrutural**

#### **5.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura**

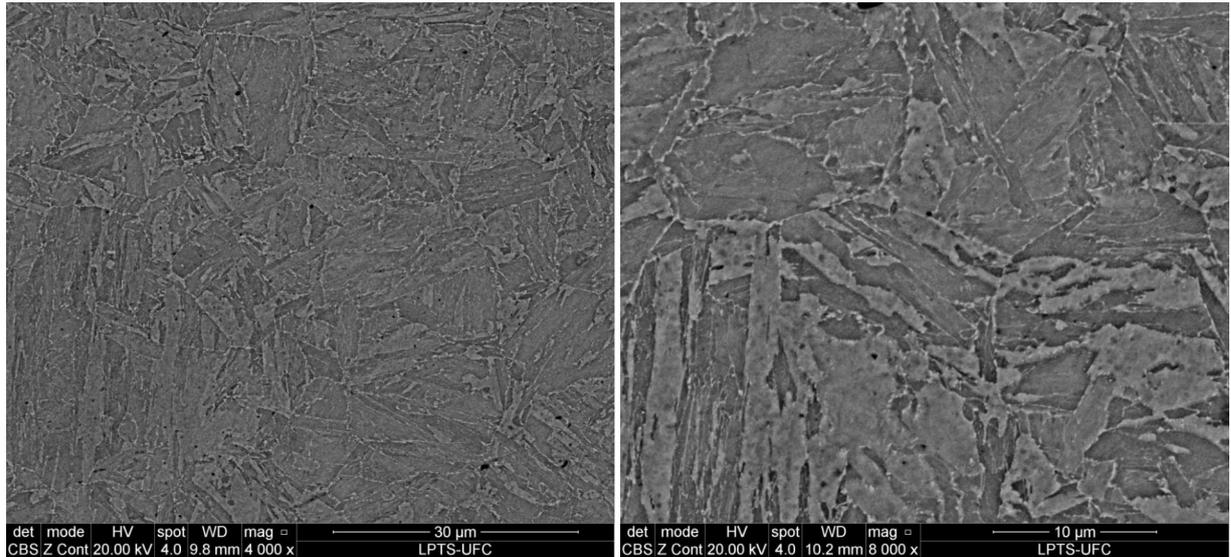
Por meio de análise microscópica eletrônica por varredura, foi possível confirmar que o material obtido a partir do tratamento térmico apresenta duas regiões distintas, características da borda e do centro do vergalhão, conforme a Figura 18.

Na borda, há presença da estrutura martensítica característica em ripas. É relatado por Pereloma e Edmonds (2012) que o grão de austenita é dividido em pacotes, um grupo de ripas paralelas com o mesmo plano de hábito, e que cada pacote é subdividido em blocos, um grupo de ripas com a mesma orientação.

Neste contexto, em ligas de baixo teor de carbono, cada pacote consiste em blocos paralelos e há três blocos com orientações diferentes em cada pacote. Além disso, cada bloco consiste em ripas de dois grupos de variantes específicos (sub-blocos), que são desorientados por um pequeno ângulo de cerca de  $10^\circ$ . Blocos e pacotes são principalmente cercados por contornos de ângulo alto, enquanto os contornos das ripas em um bloco são do tipo de baixo ângulo. É importante que o tamanho dos pacotes e blocos diminua conforme o tamanho do grão de austenita é refinado para aumentar a resistência mecânica, embora o tamanho da ripa seja quase insensível a mudanças no tamanho de grão da austenita anterior.

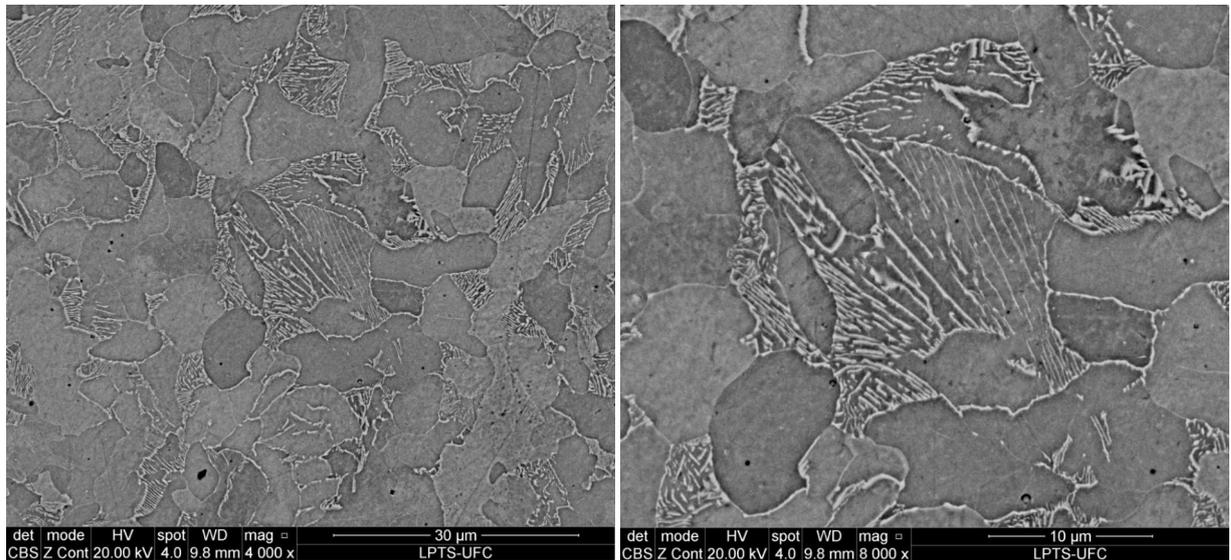
No caso do centro das amostras com Thermex e das amostras sem Thermex, mostradas na Figura 19, a microestrutura é formada por ferrita e perlita. Uma característica mostrada por Teixeira *et al.* (2021) que ocorre nas duas amostras é a presença de inclusões, que são relatadas como carbonetos localizados principalmente nos contornos dos grãos de ferrita proeutetóide

Figura 18 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex



(a) Borda 4000x

(b) Borda 8000x



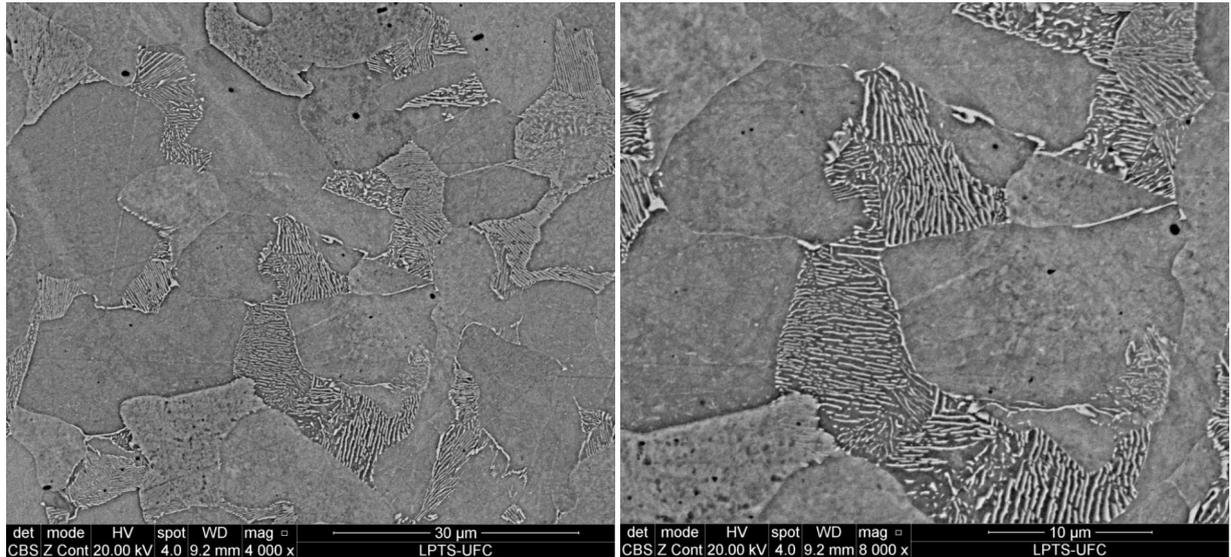
(c) Centro 4000x

(d) Centro 8000x

Fonte: elaborado pela autora (2021).

e fora das ilhas de perlita. Durante a transformação da ferrita proeutetóide, algumas regiões da austenita ricas em carbono ficariam presas entre os grãos de ferrita em crescimento e se decomporiam em um ou vários carbonetos de cementita e ferrita. Assim, a recristalização da ferrita, com o tempo, modifica o tamanho e a distribuição espacial dos carbonetos de cementita isolados em relação aos contornos de grão da ferrita. Alguns carbonetos ficam presos dentro dos grãos de ferrita recristalizados, enquanto outros carbonetos estão localizados nos limites dos grãos de ferrita.

Figura 19 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex



(a) 4000x

(b) 8000x

Fonte: elaborado pela autora (2021).

### 5.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura - Ensaio de Corrosão

A microestrutura do aço desempenha um papel significativo em relação à taxa de corrosão e ao mecanismo com que a corrosão ocorre, conforme mostrado nas figuras a seguir.

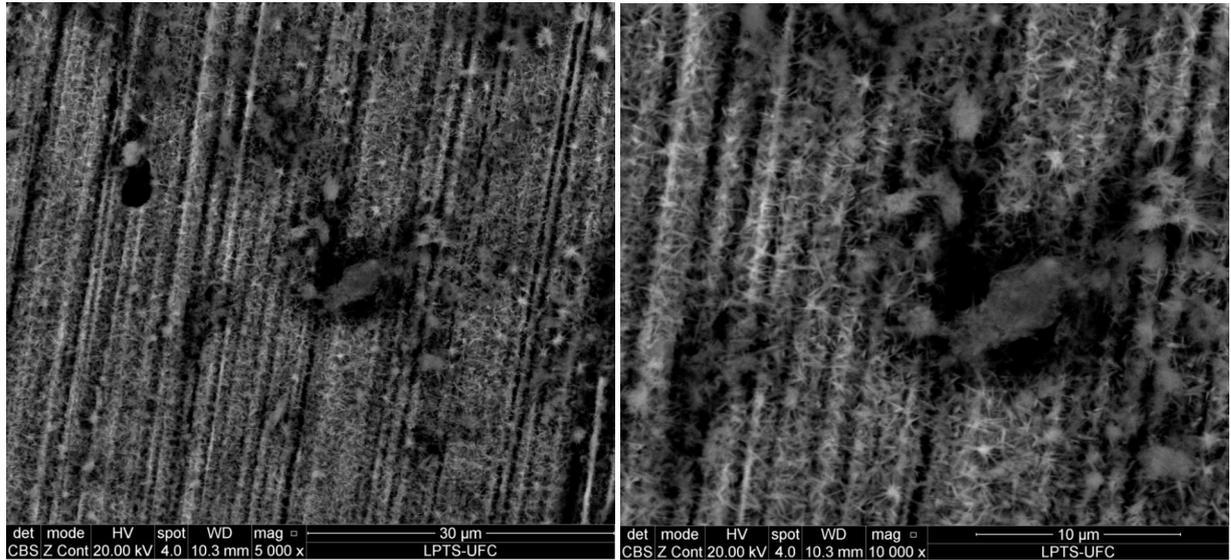
O  $\text{Cl}^-$  pode estimular a dissolução do filme de corrosão, formando complexos solúveis; como resultado, alguns pequenos pites seriam formados na superfície do aço, como mostram as Figuras 21 e 22. Com a hidrólise do íon ferroso nos pites, o valor do pH da solução nos pites seria diminuído, o que também pode acelerar a dissolução ativa do aço. (XUEA *et al.*, 2019)

Dois tipos de formas de corrosão ocorreram, a corrosão localizada (por pites) e generalizada, que está mostrada nas Figuras 20 e 23. A corrosão por pites ocorre em pequenas áreas localizadas na superfície metálica. Adicionalmente, é possível observar que os pites possuem características semelhantes e que há uma tendência no aumento da quantidade de pites conforme a concentração aumenta de 500 para 1000 ppm NaCl.

Al-rubaiey *et al.* (2013) mostraram que as variações na corrosão generalizada/localizada ocorrem em parte devido a diferenças na microestrutura. Sugere-se que a taxa de corrosão do aço diminua à medida que a fração de volume da ferrita aumente. Esse comportamento foi atribuído ao fato de que a ferrita, com maior teor de Fe do que a martensita, atua como ânodo, enquanto a martensita, com maior teor de C do que a ferrita, atua como cátodo.

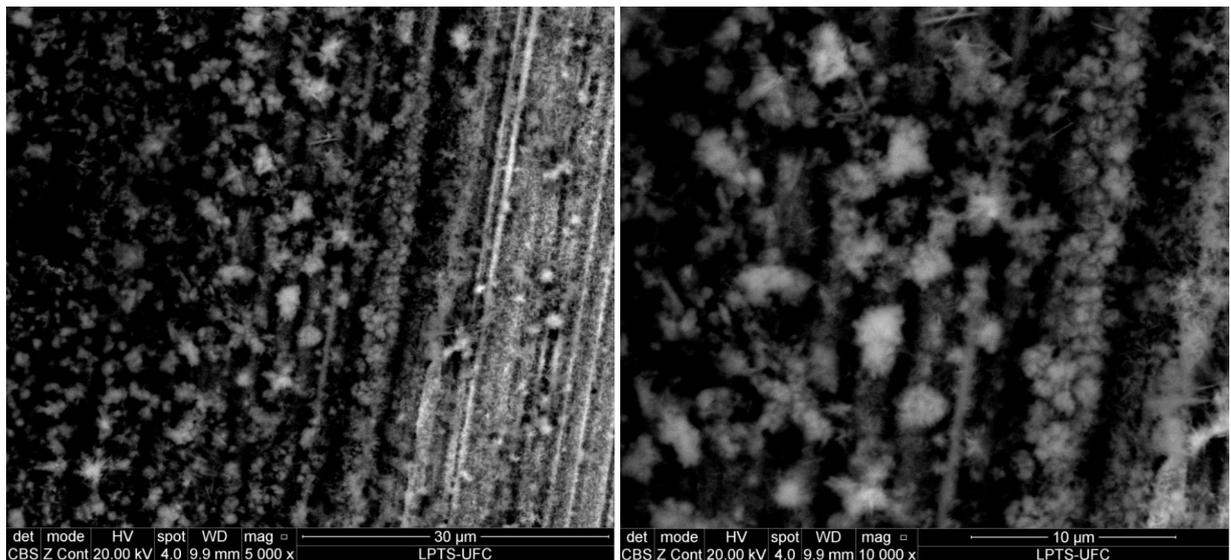
Além disso, a heterogeneidade da microestrutura proporciona a existência dos

Figura 20 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 250 ppm NaCl



(a) Borda 5000x

(b) Borda 10000x



(c) Centro 5000x

(d) Centro 10000x

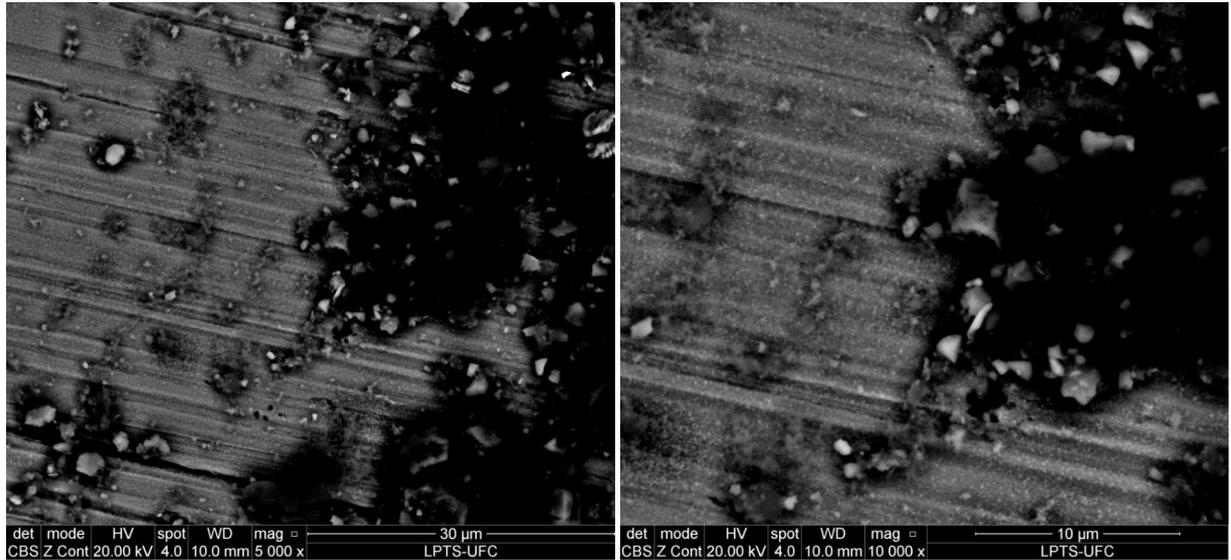
Fonte: elaborado pela autora (2021).

seguintes mecanismos de corrosão: ânodos e cátodos locais que podem ser formados devido a diferenças eletroquímicas entre a matriz e as fases secundárias; ataques localizados devido à distribuição de carboneto; formação de pares galvânicos entre as fases ricas em carbono e o aço bruto, sendo observado que a cementita é catódica em relação ao ferro.

Adicionalmente, a forma e distribuição de ferrita/cementita desempenham um papel importante em influenciar a taxa de corrosão e os formatos dos pites.

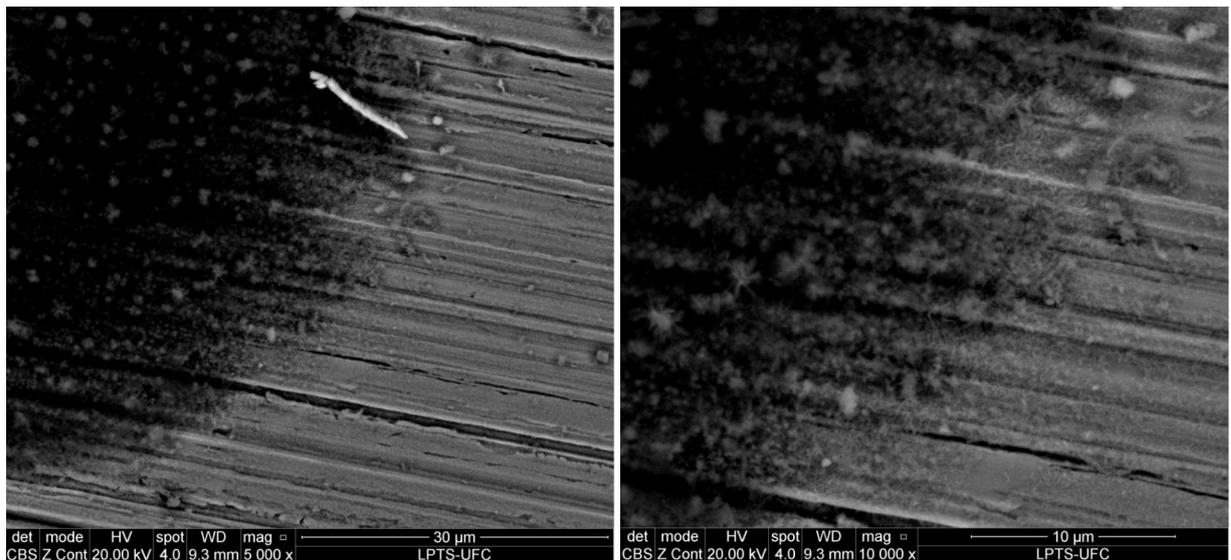
O comportamento da corrosão, assim como as propriedades mecânicas, relaciona-se com a microestrutura da liga, que é determinada pelos parâmetros do tratamento térmico. Sendo

Figura 21 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 500 ppm NaCl



(a) Borda 5000x

(b) Borda 10000x



(c) Centro 5000x

(d) Centro 10000x

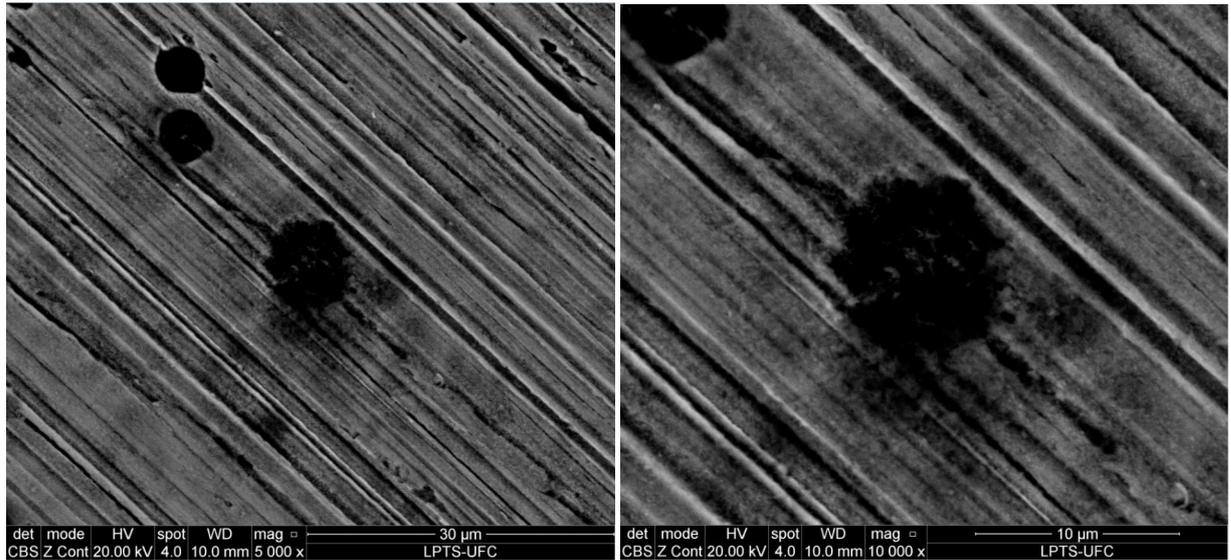
Fonte: elaborado pela autora (2021).

assim, o tamanho e a distribuição dos pites, por exemplo, estão relacionados a diferentes tensões e tamanhos de grãos causados pelo processo de fabricação.

Além disso, foi relatado por Bautista *et al.* (2019) que a morfologia dos pites é um fator chave que influencia o comportamento de tração e fadiga dos vergalhões e, portanto, determina a probabilidade de patologias perigosas ou falhas em serviço para as estruturas, já que, embora os pites afetem partes pequenas do material, podem causar perfurações e originarem concentradores de tensão, aumentando a possibilidade de falha do material.

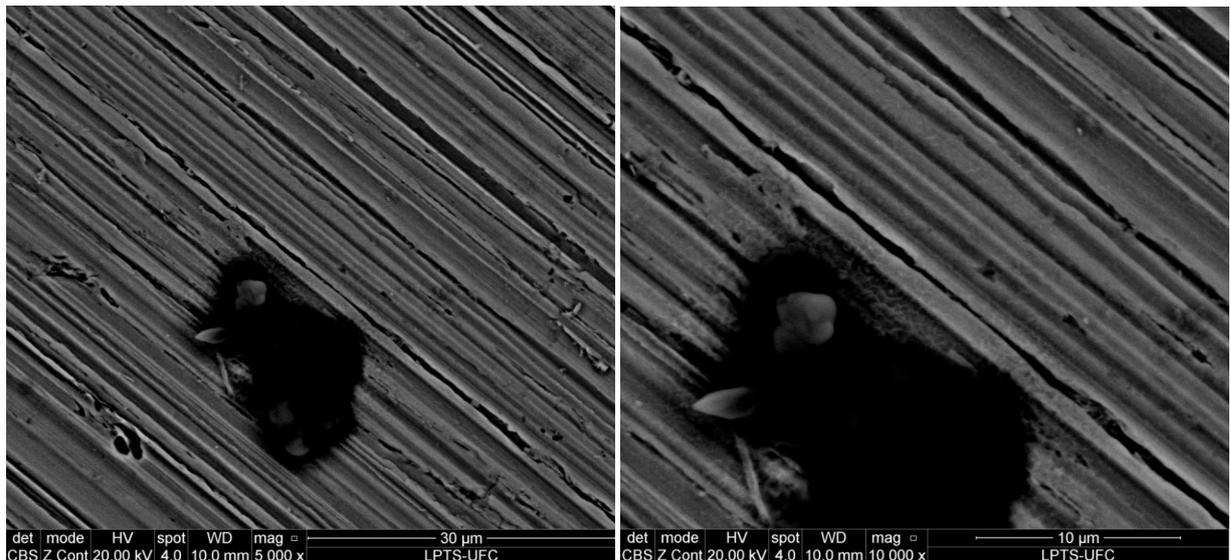
Os elementos de liga podem reduzir a taxa de corrosão, aumentando a resistência

Figura 22 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com Thermex em 1000 ppm NaCl



(a) Borda 5000x

(b) Borda 10000x



(c) Centro 5000x

(d) Centro 10000x

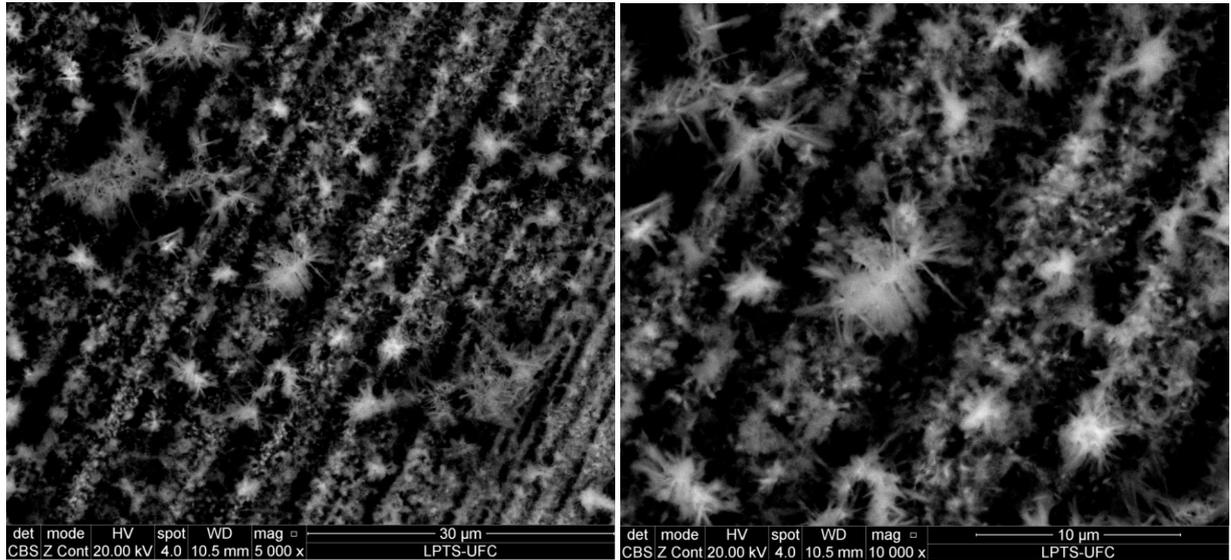
Fonte: elaborado pela autora (2021).

eletroquímica da ferrita e/ou evitando a formação de  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Para o ferro puro, as amostras tratadas termicamente corroem a taxas muito mais baixas do que qualquer um dos aços ligados, filtrando o efeito do teor de carbono na corrosão do aço. (AL-RUBAIEY *et al.*, 2013)

Neste contexto, a microestrutura e a composição química dos vergalhões também podem afetar o teor de cloretos e outros aspectos relevantes para o desempenho da estrutura como a localização e morfologia do ataque, afetando no tipo de corrosão presente, conforme pode ser visto nas figuras.

Pode-se considerar também que a ocorrência de corrosão localizada por pites em aços

Figura 23 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 250 ppm NaCl

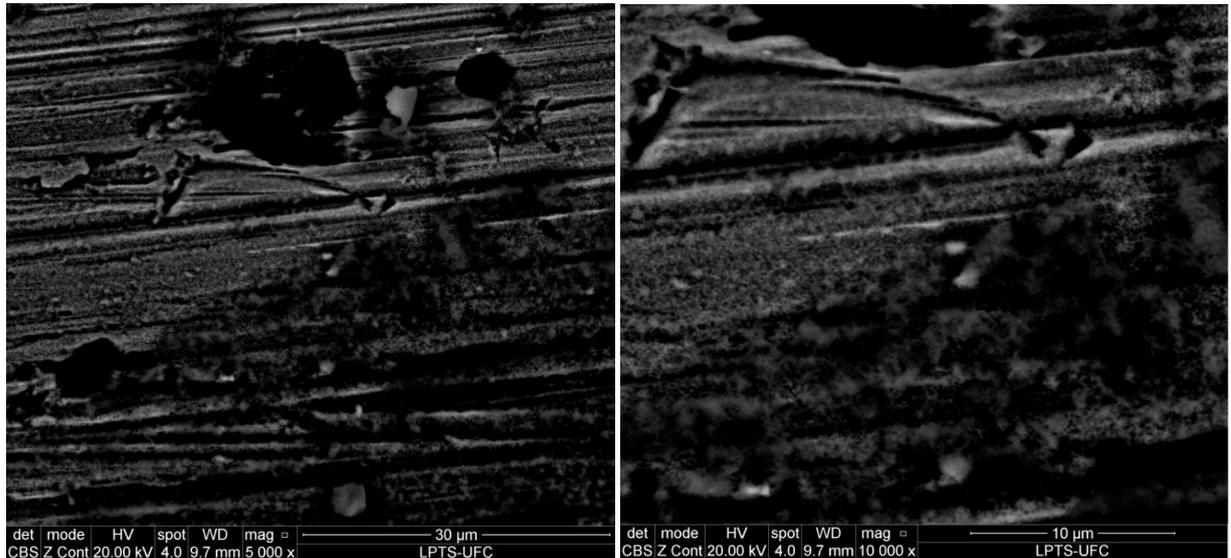


(a) 5000x

(b) 10000x

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Figura 24 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 500 ppm NaCl



(a) 5000x

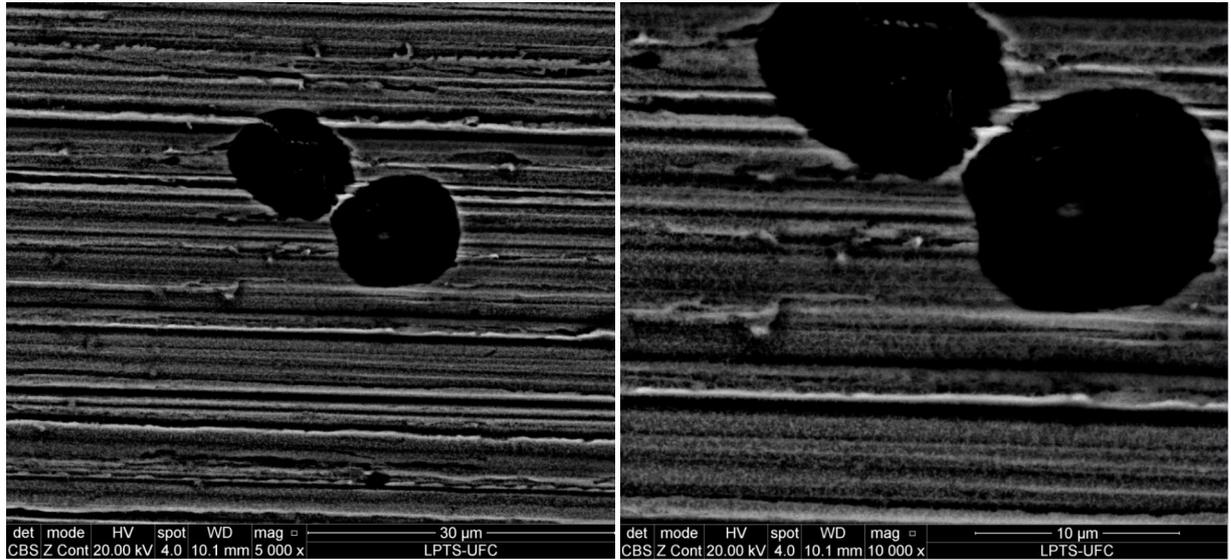
(b) 10000x

Fonte: elaborado pela autora (2021).

de baixo carbono não está apenas relacionada ao íon cloreto contido na solução, mas também à concentração de oxigênio dissolvido, conforme mostrado por Xuea *et al.* (2019). Neste contexto, o efeito sinérgico do  $\text{Cl}^-$  e do oxigênio dissolvido gera muito mais produtos de corrosão na superfície do aço.

O comportamento das amostras, de modo geral, é semelhante, apresentando ambas, com e sem Thermex, corrosão generalizada e localizada por pites conforme as concentrações de

Figura 25 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras sem Thermex em 1000 ppm NaCl



(a) 5000x

(b) 10000x

Fonte: elaborado pela autora (2021).

NaCl, 250, 500 e 1000 ppm requeridas.

## 6 CONCLUSÃO

As variações microestruturais resultantes do tratamento térmico Thermex exibem distintos comportamentos em relação à corrosão, decorrentes da morfologia das fases formadas. Neste contexto, nas condições dos ensaios eletroquímicos testados, a rota sem Thermex obteve desempenho sucintamente superior à com Thermex, indicando que o processo corrosivo foi menos agressivo para estas amostras. Eletrólitos bastante diluídos como os utilizados não ocorrem habitualmente, pois na prática os meios são excessivamente agressivos; entretanto, as soluções utilizadas foram necessárias para que se obtivesse uma diferença de desempenho entre as rotas.

A análise de propriedades mecânicas por Microdureza Vickers evidenciou a presença da transformação microestrutural no sentido borda-centro a partir da queda do valor da dureza, que ocorre devido às diferentes estruturas de cada fase.

A morfologia após os ensaios de corrosão indicou a presença de corrosão generalizada e localizada por pites, cuja corrosão localizada teve aumento a partir da concentração do eletrólito.

## REFERÊNCIAS

- AL-RUBAIEY, S. I.; ANOON, E. A.; HANOON, M. M. The influence of microstructure on the corrosion rate of carbon steels. **Engineering and Technology Journal**, 2013.
- ALMUSALLAM, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. **Construction and Building Materials**, Elsevier, 2001.
- BAUTISTA, A.; POMARES, J. C.; GONZÁLEZ, M. N.; VELASCO, F. Influence of the microstructure of tmt reinforcing bars on their corrosion behavior in concrete with chlorides. **Construction and Building Materials**, Elsevier, 2019.
- BLIKHARSKYY, Y.; SELEJDAK, J.; KOPIKA, N. Specifics of corrosion processes in thermally strengthened rebar. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, 2021.
- CHEN, H.; HE, Z.; LU, L. Correlation of surface features with corrosion behaviors of interstitial free steel processed by temper rolling. **Materials Science and Technology**, Elsevier, 2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- DONG, B.; LIU, W.; ZHANG, T.; CHEN, L.; FAN, Y.; ZHAO, Y.; YANG, W.; BANTHUKUL, W. Corrosion failure analysis of low alloy steel and carbon steel rebar in tropical marine atmospheric environment: Outdoor exposure and indoor test. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, 2021.
- FILHO, C. H. M. A. **Análise da influência da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2004.
- FILHO, E. B.; SILVA, I. B. da; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo: EPUSP, 2011.
- HOSFORD, W. F. **Mechanical Behavior of Materials**. New York: Cambridge University Press, 2005.
- JR, G. E. D. **Mechanical Metallurgy**. London: Mcgraw-Hill Book Company, 1998.
- JR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- KAMEOKA, F. **Logística reversa de sucatas de materiais metálicos**. São Paulo, SP: [S. n.], 2012. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/tutufischer/logstica-reversa-no-setor-de-sucatas-4062012-apresentao-de-fernando-kameoka>. Acesso em: 04 dez. 2021.
- KUTZ, M. **Handbook of Environmental Degradation of Materials**. Cambridge: Elsevier, 2018.
- MOURAO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. da S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. L. e; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES, M.; FACO, R. J. **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

PERELOMA, E.; EDMONDS, D. V. **Phase Transformations in Steels: Diffusionless Transformations, High Strength Steels, Modelling and Advanced Analytical Techniques**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems**. Oxford: Elsevier, 2015.

RESENDE, C.; DINIZ, A. F.; MARTELLI, P. B.; BUENO, A. H. S. Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão para concretos em ambientes contaminados com  $\text{CO}_2$  e íons cloretos. **Revista Virtual de Química**, 2017.

RIZZO, E. M. d. S. **Processos de Laminação dos Aços: Uma introdução**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

SANTOS, R. G. d. **Transformações de Fases em Materiais Metálicos**. Campinas: UNICAMP, 2006.

SILVA, A. L. da Costa e; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SOUZA, A. R.; MOTA, D. P.; PAULA, S. R. de; AGOSTINHO, S. M. L.; SILVA, M. M. P. Medidas de potencial de circuito aberto: um experimento para o ensino de eletroquímica. **Sociedade Brasileira de Química**, 32a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2009.

TEIXEIRA, J.; MORENO, M.; ALLAIN, S.; OBERBILLIG, C.; GEANDIER, G.; BONNET, F. Intercritical annealing of cold-rolled ferrite-pearlite steel: Microstructure evolutions and phase transformation kinetics. **Acta Materialia**, Elsevier, 2021.

WANG, X.-P.; SHAO, M.; YE, C.-Q.; DONG, S.-G.; DU, R.-G.; LIN, C.-J. Study on effect of chloride ions on corrosion behavior of reinforcing steel in simulated polluted concrete pore solutions by scanning micro-reference electrode technique. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, Elsevier, 2021.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2003.

WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of Rolling**. Gliwice: Pergamon Press, 1969.

XUEA, F.; WEI, X.; DONG, J.; WANG, C.; KE, W. Effect of chloride ion on corrosion behavior of low carbon steel in 0.1M  $\text{NaHCO}_3$  solution with different dissolved oxygen concentrations. **Journal of Materials Science and Technology**, Elsevier, 2019.

ZENG, H.; YANG, Y.; ZENG, M.; LI, M. Effect of dissolved oxygen on electrochemical corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in hot concentrated seawater. **Journal of Materials Science and Technology**, Elsevier, 2021.

ZITROU, E.; NIKOLAOU, J.; TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D. Atmospheric corrosion of steel reinforcing bars produced by various manufacturing processes. **Construction and Building Materials**, Elsevier, 2007.