

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

REBECCA BRUNO LOPES

**DETERMINAÇÃO DE ATAQUES QUÍMICOS PARA REVELAÇÃO DE
ESTRUTURA MARTENSÍTICA EM AÇOS BAIXO CARBONO**

LONDRINA

2022

REBECCA BRUNO LOPES

**DETERMINAÇÃO DE ATAQUES QUÍMICOS PARA REVELAÇÃO DE
ESTRUTURA MARTENSÍTICA EM AÇOS BAIXO CARBONO**

**DETERMINATION OF CHEMICAL ATTACKS FOR THE REVELATION OF
MARTENSITIC STRUCTURE IN LOW CARBON STEELS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Silvia Midori Higa
Coorientador: Luiz Paulo Boni

**LONDRINA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

REBECCA BRUNO LOPES

**DETERMINAÇÃO DE ATAQUES QUÍMICOS PARA REVELAÇÃO DE
ESTRUTURA MARTENSÍTICA EM AÇOS BAIXO CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Materiais da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 01/dezembro/2022

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Profª. Drª. Silvia Midori Higa
Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

**LONDRINA
2022**

AGRADECIMENTOS

A Deus, de quem vem toda a minha suficiência.

Aos meus pais, Márcio e Patrícia, por me mostrarem o Caminho, pelo apoio e pelo investimento nos meus estudos.

Ao meu irmão Matheus, pelo apoio e companheirismo, mesmo com a distância.

Aos meus avós, que sempre me guardaram e sustentaram em oração.

A minha orientadora Silvia, pela disposição e por ter me aceitado como orientanda.

Ao meu coorientador Boni e a toda a equipe do laboratório metalúrgico da Apolo Tubulars S/A, por viabilizar a realização deste trabalho.

“Graças, porém, a Deus, que, em Cristo, sempre nos conduz
em triunfo e, por meio de nós, manifesta em todo lugar a
fragrância do seu conhecimento.”
(BÍBLIA, 1993).

RESUMO

Os aços-carbono têm diversas aplicações, sendo que para cada uma há exigências específicas de propriedades que são alcançadas por meio do controle microestrutural. Para isso, são submetidos a tratamentos térmicos como de têmpera, bastante usual, no qual o material adquire maior dureza pela formação de martensita, que pode fragilizar o material e ocasionar falha no componente. Assim, seguido da têmpera, o tratamento térmico de revenimento é realizado para aliviar as tensões decorrentes do endurecimento do material, aumento da sua ductilidade e da tenacidade. Porém, mesmo após o revenimento, é possível ainda existir martensita não revenida, a qual pode ser detectada por análise microestrutural, aplicando técnicas de microscopia. A partir disso, este trabalho teve como foco o uso de diferentes reagentes para analisar a microestrutura do aço-carbono quanto à presença de martensita. As amostras de aço baixo carbono foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas, seguido de ataque químico para revelação da sua microestrutura. Os reagentes utilizados foram Nital 2%, LePera e LePera modificado. Pelas análises realizadas utilizando microscópio óptico, concluiu-se que o resultado depende do percentual dos elementos contidos no aço, sendo que, na presença de elementos de maior temperabilidade, o Nital 2% apresenta melhor resultado, enquanto que o LePera apresenta melhores resultados quando a reatividade entre seus elementos e os do aço é maior. O LePera modificado apresentou menor clareza na revelação da microestrutura.

Palavras-chave: aço baixo carbono; martensita; metalografia; reagentes.

ABSTRACT

Carbon steels have several applications, and for each one there are specific requirements for properties that are achieved through microstructural control. For this, they are subjected to thermal treatments such as quenching, which is quite common, in which the material acquires greater hardness through the formation of martensite, which can weaken the material and cause component failure. Thus, followed by quenching, the tempering heat treatment is carried out to relieve the stresses resulting from the hardening of the material, increasing its ductility and toughness. However, even after tempering, it is possible to still have untempered martensite, which can be detected by microstructural analysis, applying microscopy techniques. From this, this work focused on the use of different reagents to analyze the microstructure of carbon steel for the presence of martensite. The low carbon steel samples were cut, embedded, sanded and polished, followed by chemical etching to reveal their microstructure. The reagents used were Nital 2%, LePera and modified LePera. From the analyzes carried out using an optical microscope, it was concluded that the result depends on the percentage of elements contained in the steel, and, in the presence of elements of greater hardenability, Nital 2% presents better results, while LePera presents better results when the reactivity between its elements and those of steel is greater. The modified LePera showed less clarity in revealing the microstructure.

Keywords: low carbon steel; martensite; metallography; reagents.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de transformação isotérmica para uma liga ferro-carbono com composição hipoeutetóide.....	20
Figura 2 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura para os tratamentos térmicos de aços-carbono comuns	21
Figura 3 – Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido	21
Figura 4 – Fluxograma de atividades	27
Figura 5 – Processo produtivo pela Apolo Tubulars	28
Figura 6 – Tubos produzidos pela Apolo Tubulars	29
Figura 7 – Amostras enviadas ao laboratório metalúrgico para preparação e análise	29
Figura 8 – Equipamentos utilizados: a) Policorte Fortel CFI; b) Politriz Fortel PLF e c) Microscópio Óptico Fortel Platina Invertida 720 IM720	30
Figura 9 – Capela de exatão de gases Quimis.....	31
Figura 10 – Micrografia do Aço 1 atacado com Nital 2% durante 10s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita).....	33
Figura 11 – Micrografia do Aço 2 atacado com Nital 2% durante 10s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita).....	34
Figura 12 – Micrografia do Aço 3 atacado com Nital 2% durante 10s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita), O (oxidação)	35
Figura 13 – Micrografia do Aço 1 atacado com LePera durante 60s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita).....	37
Figura 14 – Micrografia do Aço 2 atacado com LePera durante 60s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x.....	38
Figura 15 – Micrografia do Aço 3 atacado com LePera durante 60s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x.....	39
Figura 16 – Micrografia do Aço 1 atacado com LePera Modificado durante 90s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)	41
Figura 17 – Micrografia do Aço 2 atacado com LePera Modificado durante 90s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x	42
Figura 18 – Micrografia do Aço 3 atacado com LePera Modificado durante 90s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química teórica em massa (%) dos aços.....	17
Tabela 2 – Fases constituintes do aço.	18
Tabela 3 – Etapas da metalografia.....	22
Tabela 4 – Reagentes utilizados para ataque químico em aços-carbono.	24
Tabela 5 – Composição química em massa (%) dos aços.....	26
Tabela 6 – Dimensões dos tubos de onde foram retiradas as amostras.	26
Tabela 7 – Comparação dos resultados da análise micrográfica em função do tipo de reagente.	44
Tabela 8 – Cronograma de atividades TCC.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Austenita
B	Bainita
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
M	Martensita
MA	Martensita e austenita retida
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
P	Perlita
s	Segundos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TCC	Tetragonal de corpo centrado
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TTT	Diagrama tempo-temperatura-transformação

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Temperatura crítica inferior para os aços hipereutetoides
A_3	Temperatura crítica superior para os aços hipoeutetoides
A_{cm}	Temperatura crítica superior para os aços hipereutetoides
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
$^{\circ}C$	Graus Celsius
%p	Porcentagem em massa
%p C	Porcentagem de carbono em massa
α	Fase Ferrita
γ	Fase Austenita
Fe_3C	Cementita na liga ferro-carbono
SiC	Carbeto de Silício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1	Aços-carbono	16
4.1.1	Microestrutura.....	17
4.1.2	Temperabilidade dos aços baixo carbono em função do carbono equivalente	21
4.2	Metalografia	22
4.2.1	Ataque químico.....	23
<u>4.2.1.1</u>	<u>Reagentes</u>	<u>23</u>
5	MATERIAIS E MÉTODOS	26
5.1	Materiais	26
5.2	Métodos.....	27
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1	Análise micrográfica das amostras	32
6.1.1	Nital 2%	32
6.1.2	LePera.....	36
6.1.3	LePera Modificado.....	40
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
9	CRONOGRAMA.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Aços-carbono, dentre outras aplicações, são utilizados em tubulações para indústria de óleo e gás. Para tal, é necessário que o aço tenha boas propriedades mecânicas, com combinação entre resistência mecânica e ductilidade. Portanto, é necessário o controle da microestrutura do material, de forma que suas propriedades atendam aos requisitos. Esse controle é alcançado por meio de tratamentos térmicos, muitas vezes sendo utilizados de forma combinada.

No processo produtivo, após conformação mecânica do tubo, seguido de soldagem, geralmente são combinados os tratamentos térmicos de normalização para homogeneização da estrutura; de têmpera, a fim de aumentar sua dureza e, então, de revenimento para que as tensões internas provenientes da têmpera sejam suavizadas. Porém, após revenimento pode ainda haver martensita não revenida na estrutura do aço, o que é indesejável, uma vez que a martensita como temperada é extremamente dura e frágil e peças submetidas à condição de alto tensionamento interno correm grande risco de trincar.

Sendo assim, para avaliar a eficácia dos tratamentos térmicos e verificar se a microestrutura resultante é a requerida, realiza-se a análise micrográfica das amostras. Nesta análise são utilizados reagentes que diferenciam as fases presentes no aço. Cada reagente, porém, é favorável à revelação de fases específicas e em tipos de aço específicos.

Neste trabalho busca-se a revelação da estrutura martensita em aços baixo carbono utilizados na indústria de óleo e gás, por meio de ataque químico com reagentes adequados. Em função do efeito da martensita não revenida nas propriedades mecânicas, serão analisadas amostras temperadas, a fim de garantir a existência de martensita não revenida.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Determinar ataques químicos que revelem a estrutura martensítica em aços baixo carbono.

2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar análise metalográfica por microscopia óptica das amostras atacadas com diferentes reagentes;
- Determinar, a partir da análise metalográfica, qual(is) o(s) reagente(s) mais adequado(s), assim como a condição do ataque para revelar a estrutura martensítica em aços baixo carbono.

3 JUSTIFICATIVA

Na análise da microestrutura e das propriedades de peças após conformação mecânica e tratamentos térmicos são utilizadas diferentes técnicas e ensaios. Em particular, para a caracterização da microestrutura é comum o emprego de técnica de metalografia. Para a análise microestrutural destacam-se as análises em Microscópio Óptico (MO) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Muitas indústrias, no entanto, possuem recursos limitados, não contando com o MEV em seu laboratório de ensaios. Desta forma, as amostras são enviadas a um laboratório externo. O envio é feito no final da produção e, em caso de inconformidades no laudo, poderá ser necessário retrabalho em todo o lote produzido, gerando custo e atraso na entrega do produto ao cliente.

Assim, para as empresas que dispõem apenas de MO, o conhecimento de quais ataques químicos são mais adequados para revelar as fases presentes no aço após todo o processo produtivo, a fim de determinar se está em conformidade com as normas utilizadas, tem contribuição significativa.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Aços-Carbono

Os aços-carbono são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga; gerando ligas de diferentes composições e/ou tratamentos térmicos. As propriedades mecânicas dos aços-carbono são sensíveis ao teor de carbono, que normalmente é inferior a 1,0 %peso (CALLISTER, 2016).

A definição de um aço-carbono pode ser feita como sendo uma liga binária com seus principais elementos o ferro e o carbono, porém os aços comerciais no geral contêm outros elementos secundários, devido aos processos de fabricação (CHIAVERINI, 1988).

Uma das maneiras de classificar os aços é por meio de sua composição química, especificamente pelo teor de carbono presente. Sendo assim, os aços baixo carbono possuem no máximo 0,30% de carbono, os aços médio carbono entre 0,30% e 0,60% de carbono e os aços alto carbono possuem 0,60% a 1,00% de carbono (SOUZA, 2001). Também existem subclasses dentro de cada grupo, de acordo com as concentrações de outros elementos de liga. Os aços-carbono comuns contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono, e um pouco de manganês (CALLISTER, 2016).

Os aços-carbono constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços simplesmente ao carbono, sem qualquer elemento de liga, e na maioria dos casos também sem qualquer tratamento térmico, são suficientes para atender à maioria das aplicações. Os estados normais de utilização desses materiais são o fundido e o trabalhado. As peças fundidas geralmente requerem um tratamento térmico de recozimento ou normalização para alívio das tensões originadas na solidificação e para homogeneização da microestrutura (CHIAVERINI, 1988). As peças trabalhadas, ou seja, aquelas conformadas mecanicamente, também passam por tratamento térmico quando conformadas a frio devido ao encruamento.

Na Tabela 1 tem-se a composição química dos aços baixo carbono comerciais que serão utilizados neste trabalho.

Tabela 1 – Composição química teórica em massa (%) dos aços

Aço	C	Si	Mn	P	S
Aço 1	0,24 – 0,284	0,15 – 0,25	1,25 – 1,45	–	–
Aço 2	0,18 – 0,230	–	0,60 – 0,90	0,030 máx.	0,035 máx.
Aço 3	0,25 máx.	–	1,35 máx.	0,035 máx.	0,040 máx.

Fonte: Adaptado de Gerdau e ArcelorMittal (2015)

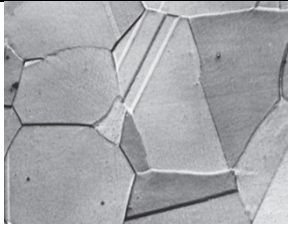
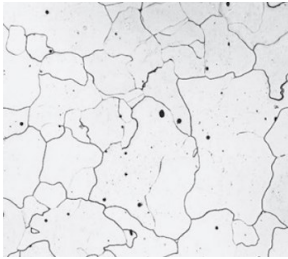
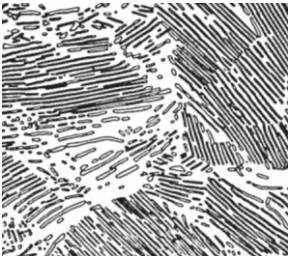
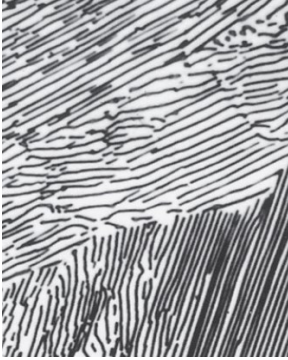
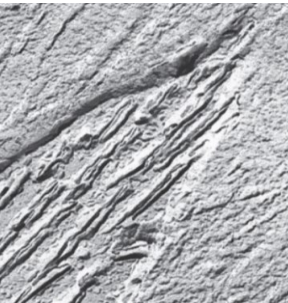
Os aços que possuem maior percentual de carbono, manganês ou a presença de fósforo e silício em sua composição apresentam maior dureza e maior resistência mecânica. O carbono, o fósforo e o enxofre reduzem a ductilidade do aço. Além disso, silício e manganês conferem ação desoxidante.

Os aços 2 e 3 são utilizados na indústria de óleo e gás em linhas de condução de petróleo e gás. Também são utilizados na condução de fluidos não corrosivos, sob pressão, além de aplicações estruturais. O aço 1 é utilizado tanto para condução de petróleo quanto para prospecção *onshore*.

4.1.1 Microestrutura

Para se obter no aço uma boa combinação entre resistência mecânica e ductilidade, ele deve possuir microestrutura multifásica, ou seja, uma estrutura constituída de diferentes fases coexistindo em aproximado equilíbrio termodinâmico (WANG et al, 2006; ALI et al, 1993 apud DEL SANT, 2010). A seguir estão descritas na Tabela 2 as fases que podem estar presentes no aço-carbono.

Tabela 2 – Fases constituintes do aço

Fase	Descrição	Imagem
Austenita	É uma solução sólida de carbono em ferro gama (γ). A fase γ possui estrutura cristalina CFC que permite maior solubilidade do carbono (máximo de 2,14 %p. a 1147°C); é estável acima de 727°C e paramagnética acima de 783°C.	
Ferrita	É uma solução sólida de carbono em ferro alfa (α) originada do ferro γ , com estrutura cristalina CCC, sendo estável à temperatura ambiente. Apresenta solubilidade máxima de 0,025% de carbono, a 723°C. Forma-se por difusão, nucleando preferencialmente nos contornos de grão da austenita.	
Cementita	É um carboneto de ferro (Fe_3C), contendo 6,68% de carbono, de grande dureza e quebradiço. Dos constituintes que ocorrem nos aços é o mais duro, chegando a riscar o vidro. Na imagem ao lado, a fase clara é a ferrita e a escura, a cementita.	
Perlita	Constituinte formado por lamelas justapostas de ferrita e de cementita e que ocorre abaixo de 723°C nas ligas ferro-carbono. Como a perlita é formada de lamelas moles de ferrita e outras duras de cementita, sua dureza é intermediária entre as duas. A proporção de cementita que intervém na perlita é aproximadamente de 1 para 6 de ferrita e, após ataque químico, a cementita é a fase escura e a ferrita a clara, como observado na imagem ao lado.	
Bainita	Consiste nas fases ferrita e cementita, tendo processos difusionais envolvidos em sua formação. Se forma entre a região de formação da perlita e da martensita como agulhas ou placas, dependendo da temperatura de transformação. A formação como agulhas se dá entre 350 e 550°C, sendo esta a bainita superior e a formação como placas se dá entre 250 e 350°C, sendo a bainita inferior.	

Martensita É uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro de estrutura cristalina TCC. É uma fase metaestável que se forma quando as ligas ferro-carbono são austenitizadas e resfriadas rapidamente (ou temperadas) até uma temperatura relativamente baixa. Resulta de uma transformação por cisalhamento, sem difusão. Devido à deformação associada à sua formação, a martensita é um constituinte bastante duro. A fase branca na imagem ao lado é austenita retida.

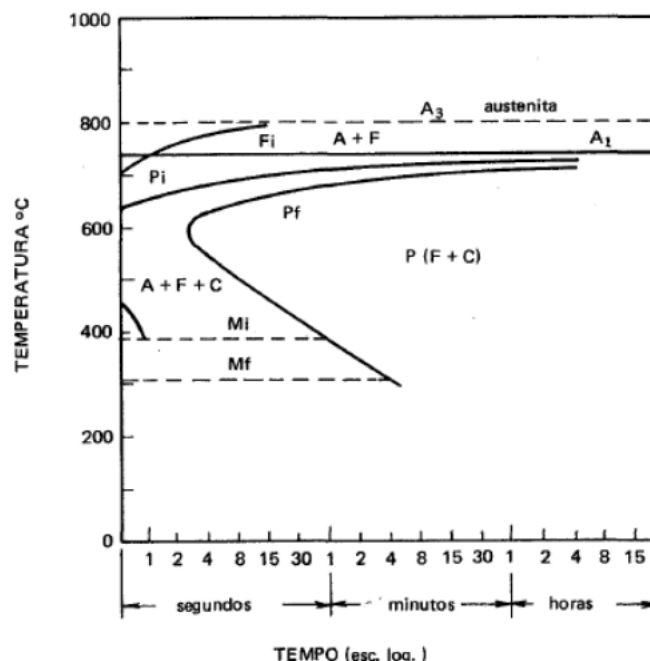


Fonte: Adaptado de Callister (2016)

Para um bom controle da microestrutura, são realizados tratamentos térmicos na peça. Segundo Chiaverini (1988), tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. Em geral, produzem transformações na austenita, segundo o tipo, a velocidade e as condições de esfriamento adotadas.

É possível ver as transformações microestruturais ocorridas no aço conforme o tempo a que é submetido a determinadas temperaturas por meio do diagrama de transformação isotérmica, conforme Figura 1, também chamado de curva TTT.

Figura 1 – Diagrama de transformação isotérmica para uma liga ferro-carbono com composição hipoeutetóide



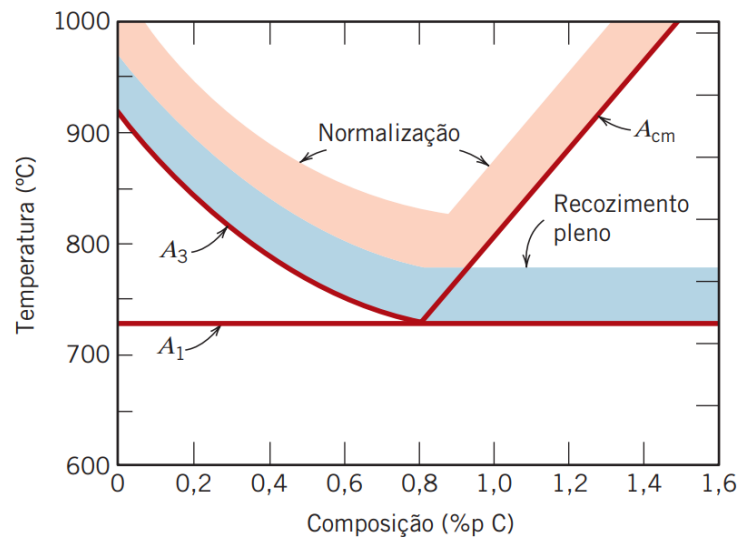
Fonte: Dutra (2017)

Na Figura 2 tem-se os diagramas dos tratamentos térmicos de normalização e recozimento pleno. A normalização é necessária para a completa austenitização do aço, tornando sua estrutura homogênea. Esse tratamento precede a têmpera.

A têmpera consiste em aquecer o aço e resfriá-lo rapidamente, formando a martensita. Na têmpera ocorre o aumento da dureza do aço, porém há o surgimento de tensões internas. Estas tensões são atenuadas ou removidas com o revenimento, que é o reaquecimento do material temperado até uma temperatura inferior à temperatura de austenitização, seguida de resfriamento geralmente ao ar. No revenimento reduz-se a dureza e aumenta-se a ductilidade. No diagrama apresentado na Figura 3 tem-se os tratamentos de têmpera e revenimento.

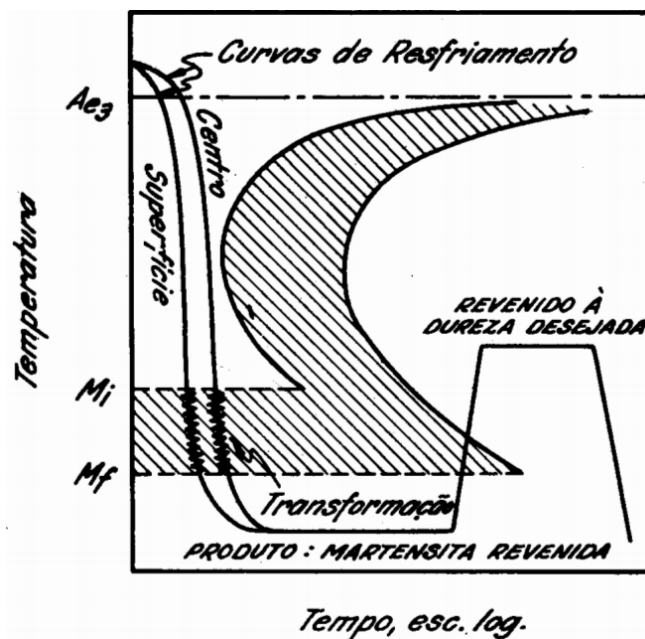
A transformação de estrutura austenítica para martensítica geralmente não é completa, com formação de austenita retida entre as ripas ou placas de martensita. Ela é indesejável pois pode afetar as propriedades mecânicas do aço e pode se tornar metaestável, se transformando posteriormente e podendo causar alterações dimensionais, resultando em trincas (SILVA, 2012).

Figura 2 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura para os tratamentos térmicos de aços-carbono comuns



Fonte: Callister (2016)

Figura 3 – Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido



Fonte: Chiaverini (1988)

4.1.2 Temperabilidade dos aços baixo carbono em função do carbono equivalente

A temperabilidade de um aço é prevista a partir do seu carbono equivalente. Existem algumas fórmulas para o cálculo do carbono equivalente, sendo que para aços baixo carbono, ele é medido a partir da fórmula:

$$Ceq = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{26} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}$$

Assim, o carbono equivalente depende do teor de carbono e dos elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono (SILVA, 2009).

A formação de martensita depende do carbono equivalente, sendo que, quanto menor ele for, menor a probabilidade de formação de martensita.

4.2 Metalografia

O exame metalográfico analisa o metal sob o ponto de vista de sua estrutura, procurando relacioná-la às propriedades físicas, composição, processo de fabricação etc., de modo a poder esclarecer ou prever seu comportamento numa determinada aplicação. O exame pode ser feito à vista desarmada (exame macrográfico ou macrografia) ou com o auxílio de um microscópio (exame micrográfico ou micrografia) (COLPAERT, 1974).

A análise metalográfica exige que a amostra seja previamente preparada. O processo de preparação de amostras divide-se em: corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque (ROHDE, 2010). Cada uma dessas etapas pode ser realizada utilizando diferentes métodos e podem variar de acordo com as propriedades específicas do material (PETZOW, 1999). Na Tabela 3 são descritas cada uma das etapas da metalografia.

Tabela 3 – Etapas da metalografia

Etapas	Descrição
Seccionamento	É realizado para se obter uma amostra de tamanho conveniente. Dentre as formas de seccionamento, tem-se fresamento, corte abrasivo, eletroerosão, disco abrasivo e disco diamantado. Destaca-se o disco abrasivo, uma das formas mais utilizadas onde, sob refrigeração, ocorre pouca modificação estrutural na amostra.
Embutimento	Circundar a amostra em material adequado, geralmente resina de cura frio ou quente, com a finalidade de facilitar o seu manuseio e evitar o abaulamento de sua superfície.
Lixamento	Lixamento da amostra, sucessivamente, com lixas d'água de granulometria decrescente, mudando a direção em 90° a cada lixa subsequente, a fim de remover os traços da anterior.

Polimento	Polir a amostra utilizando agente polidor (geralmente diamante ou alumina em suspensão) até obter superfície plana, sem riscos e com alta refletividade.
-----------	--

Fonte: Adaptado de Fukugauchi (2010); Petzow (1999); Rohde (2010)

4.2.1 Ataque Químico

O objetivo do ataque químico é permitir a identificação dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo e causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica (ROHDE, 2010).

Quando uma superfície polida é submetida uniformemente à ação de um reativo, acontece, quase sempre, que certas regiões são atacadas com maior intensidade do que outras. Esta diferença de atacabilidade provém habitualmente de duas causas principais: diversidade de composição química ou de estrutura cristalina (COLPAERT, 1974).

O contato do corpo com o reativo pode ser de três modos: 1) mergulhando a superfície polida numa cuba contendo certo volume de reagente – é o chamado por ataque por imersão; 2) estendendo uma camada de reativo sobre a secção em estudo com auxílio de um pincel ou chumaço de algodão e, acompanhando o ataque, regularizá-lo se for preciso – é o ataque por aplicação; 3) lançando mão de um papel fotográfico, convenientemente umedecido com um reagente apropriado, aplicando-o sobre a superfície polida, e obtendo sobre ele um decalque da maneira como se encontram distribuídos os sulfuretos – é o método de impressão direta de Baumann (COLPAERT, 1974).

Após o ataque químico é feita a análise microscópica onde, segundo Colpaert (1974), por ação do reativo é possível ver o contraste entre áreas de composição química ou cristalização diferentes, já que algumas regiões irão escurecer mais do que outras.

4.2.1.1 Reagentes

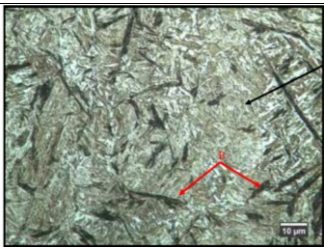
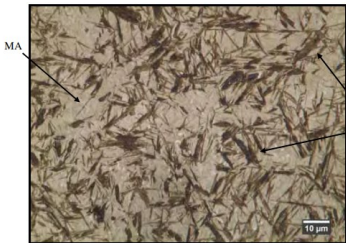
Dentre os reagentes mais comuns utilizados para o ataque de aços tem-se o Nital, usado para realçar características da bainita e martensita através de escurecimento dessas estruturas. Porém, dependendo dos parâmetros de tratamentos térmicos ao qual o aço tenha sido submetido, a presença de microestruturas mais complexas, contendo outras fases além da ferrita e martensita, torna difícil a observação dessas estruturas em MO, após ataque com Nital (SOUZA, 2008).

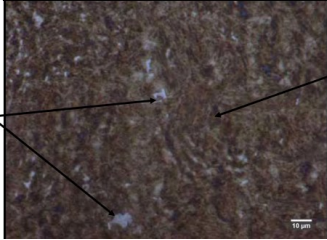
As soluções a base de ácido pícrico são mais versáteis. A formulação mais comum é conhecida como Picral, numa mistura de 4 g de ácido pícrico e 96ml de álcool etílico. O Picral é tipicamente usado em aços ao carbono e aços liga para atacar a perlita, mas também pode revelar a bainita, martensita temperada, cementita e outros carbonetos (BRAMFIT, LAWRENCE, 2004 apud SOUZA, 2008).

LePera (1979) usou um reagente, o qual foi denominado de reagente LePera, composto da mistura, em partes iguais, de duas soluções, 1% de metabissulfito de sódio diluído em água e de 4% de ácido pícrico diluído em álcool, para revelar a martensita em aços bifásicos de alta resistência (SOUZA, 2008).

Na Tabela 4 tem-se as informações quanto à composição, aplicação e exemplos de imagens obtidas por MO com os reagentes acima citados.

Tabela 4 – Reagentes utilizados para ataque químico em aços-carbono

Reagente	Composição	Aplicação	Imagem	Forma de Aplicação do Reagente	Tempo de Ataque
Nital 2%	98 ml de álcool etílico 2 ml de ácido nítrico concentrado	Realçar características da bainita e martensita		Por aplicação	8 – 10 s
LePera	Solução 1: 1 g de metabissulfito de sódio 100 ml de água destilada Solução 2: 4 g de ácido pícrico 96 ml de álcool Misturar 1:1	Diferenciar ferrita, bainita e martensita, tornando a última branca		Por imersão	5 – 7 s

LePera Modificado	Solução 1: 1 g de metabissulfito de sódio 100 ml de água destilada Solução 2: 4 g de ácido pícrico 96 ml de álcool Misturar 1:2	Diferenciar ferrita, bainita e martensita, tornando a última branca		Por imersão 15 – 20 s
----------------------	---	--	--	-----------------------

Fonte: Adaptado de Souza (2008)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Os materiais utilizados são os aços baixo carbono, cujas composições estão apresentadas na Tabela 5, utilizados em tubulação de transporte de óleo e gás, cedidos pela empresa Apolo Tubulars S/A. Foram utilizadas amostras apenas temperadas, a fim de garantir a existência de martensita.

Tabela 5 – Composição química em massa (%) dos aços

Aço	C	Si	Mn	P	S
Aço 1	0,2740	0,2300	1,3400	0,0028	0,0010
Aço 2	0,2100	0,1920	0,7000	0,0130	0,0034
Aço 3	0,1230	0,0220	0,8600	0,0086	0,0014

Fonte: Apolo Tubulars (2021)

As amostras foram retiradas de tubos das dimensões descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões dos tubos de onde foram retiradas as amostras

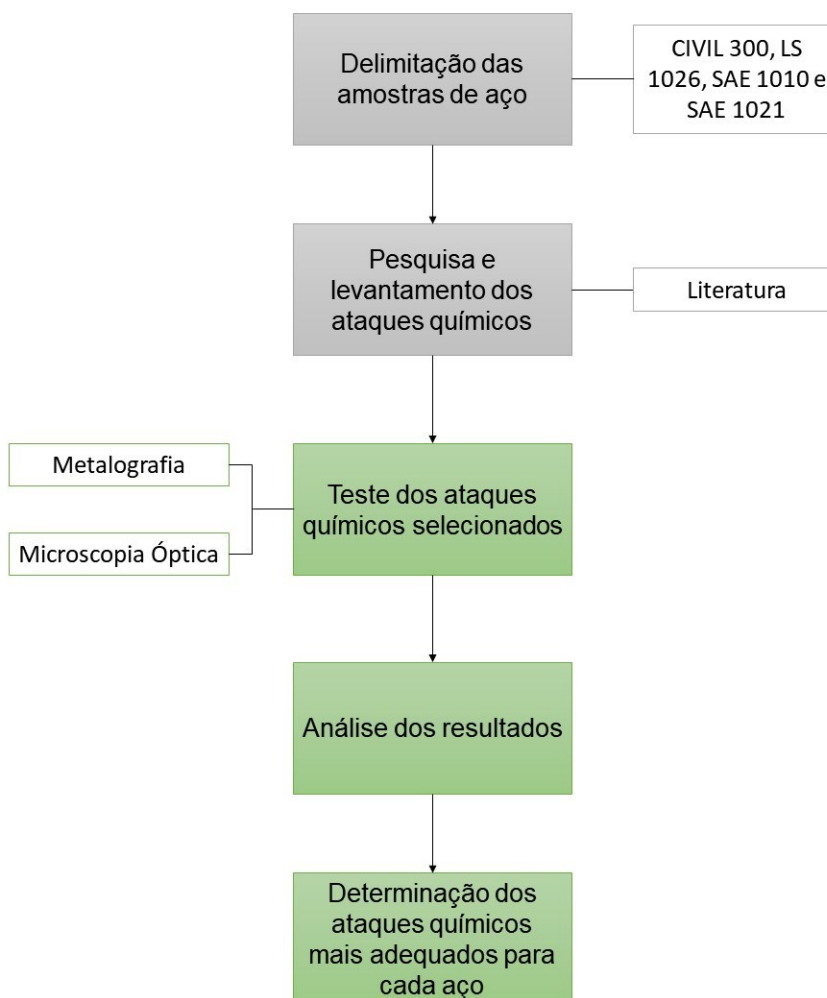
Aço	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
Aço 1	73,00	5,51
Aço 2	114,30	6,02
Aço 3	114,30	7,62

Fonte: Autoria própria (2021)

5.2 Métodos

As etapas, técnicas e ensaios adotados para o desenvolvimento do trabalho são apresentados por meio do fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autoria própria (2021)

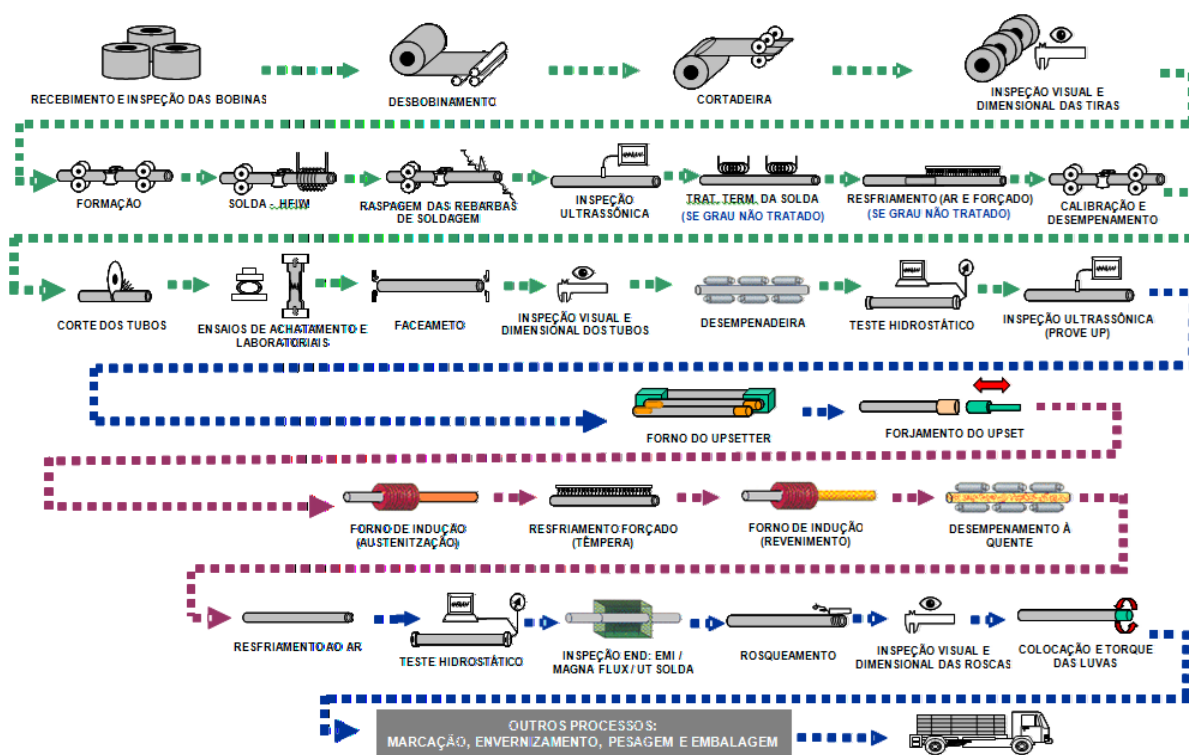
Na primeira parte do trabalho foi realizada uma pesquisa com base na literatura a fim de fazer um levantamento dos reagentes utilizados para revelar a estrutura martensítica em aços-carbono. Também foram selecionados os aços-

carbono para testar os ataques químicos, sendo preparadas três amostras de cada aço.

A etapa seguinte consistiu na metalografia das amostras dos aços selecionados. Para isso, as amostras foram seccionadas, tomando-se a região de solda do tubo, por ser a região de interesse da empresa, que despende maior controle microestrutural e, também, a região onde já foi localizada martensita não revenida em análise por MEV em laboratório externo.

A seguir são mostradas imagens do processo produtivo para formação dos tubos (Figura 5), dos tubos após conformação mecânica (Figura 6) e das amostras retiradas para análise em laboratório, com indicação da região de solda, devido à importância citada anteriormente e a indicação da região de corte para embutimento e análise (Figura 7).

Figura 5 – Processo produtivo Apolo Tubulars



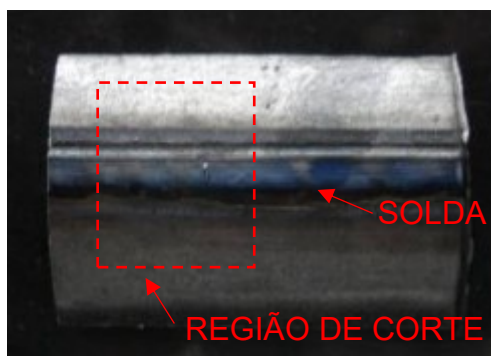
Fonte: Apolo Tubulars (2021)

Figura 6 – Tubos produzidos pela Apolo Tubulars



Fonte: Apolo Tubulars (2022)

Figura 7 – Amostras enviadas ao laboratório metalúrgico para preparação e análise



Fonte: Apolo Tubulars (2022)

Após seccionamento, as amostras foram embutidas, lixadas e polidas e, por fim, atacadas quimicamente utilizando os reagentes escolhidos: Nital 2%, LePera e LePera modificado. As amostras polidas, após ataque, foram levadas ao MO para análise e obtenção dos registros micrográficos. Para cada tipo de aço foram embutidas três amostras, a fim de se utilizar uma para cada ataque químico.

O seccionamento das amostras foi realizado utilizando Policorte Fortel modelo CFI (Figura 6a), com disco abrasivo de Al_2O_3 e SiC. As amostras foram embutidas com resina acrílica de metil metacrilato e catalisador metacrilato de metila – éster, em capela de exaustão de gases Quimis (Figura 7), onde também foram realizados os ataques químicos.

Para o preparo metalográfico foi utilizada a sequência de lixas d'água 80, 180, 320, 600 e 1200 *mesh*, seguido de polimento com pano para polimento metalográfico. No polimento foi utilizado lubrificante de baixa viscosidade e suspensão diamantada policristalina. O lixamento e polimento foram realizados em Politriz Fortel modelo PLF

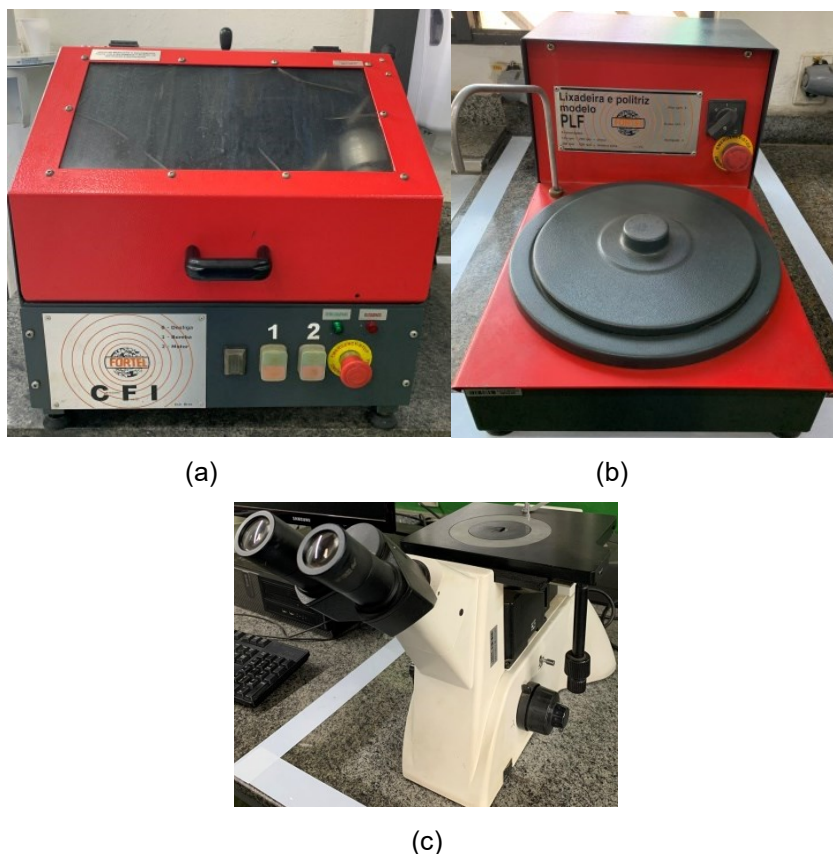
(Figura 6b). As imagens para análise microestrutural foram obtidas no MO da marca Fortel modelo Platina Invertida 720 IM720 (Figura 6c). A análise foi realizada em região próxima do cordão de solda e na seção transversal do tubo.

Foram realizados os ataques químicos baseados na Tabela 4, sendo aplicado o reagente em cada amostra imediatamente após seu polimento e subsequente limpeza em água corrente, álcool etílico e secagem. Para interrupção do ataque químico a amostra novamente foi lavada em água corrente e em álcool etílico, finalizando com secagem com jato de ar frio.

As amostras então foram analisadas por MO para verificar se foi possível revelar a martensita. Por fim, as imagens obtidas das amostras com diferentes ataques químicos foram comparadas entre si a fim de determinar qual reagente revelou a estrutura de interesse de forma mais satisfatória nos diferentes aços-carbono.

Toda parte experimental foi realizada no Laboratório Metalúrgico da empresa Apolo Tubulars S/A.

Figura 8 – Equipamentos utilizados: a) Policorte Fortel CFI; b) Politriz Fortel PLF e c) Microscópio Óptico Fortel Platina Invertida 720 IM720



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 9 – Capela para exaustão de gases Quimis



Fonte: Autoria própria (2021)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise micrográfica das amostras

A análise micrográfica das amostras foi realizada em MO imediatamente após os ataques químicos e, então, foram obtidas imagens nas lentes de aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x, porém observou-se maior aproveitamento para este trabalho nas imagens obtidas com as lentes de aumento de 500x e 1000x, que possibilitaram uma melhor visualização das estruturas reveladas. A seguir, os resultados serão apresentados para cada reagente utilizado.

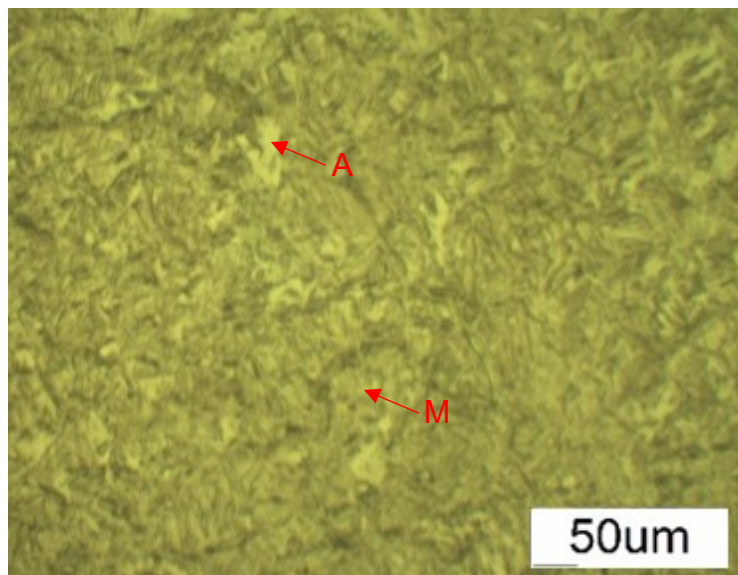
6.1.1 Nital 2%

O ataque químico feito com Nital seguiu a composição apresentada na Tabela 4, de 2 ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool etílico. A forma de ataque foi por aplicação, onde um chumaço de algodão foi mergulhado na solução de Nital 2% e friccionado contra a amostra, a fim de estender sobre ela uma camada de reativo. O tempo de contato entre a amostra e o algodão embebido de reagente foi de 10 s, tempo suficiente para revelar os contornos de grão do material sem que houvesse queima da superfície. O reagente foi utilizado no mesmo dia em que foi preparado.

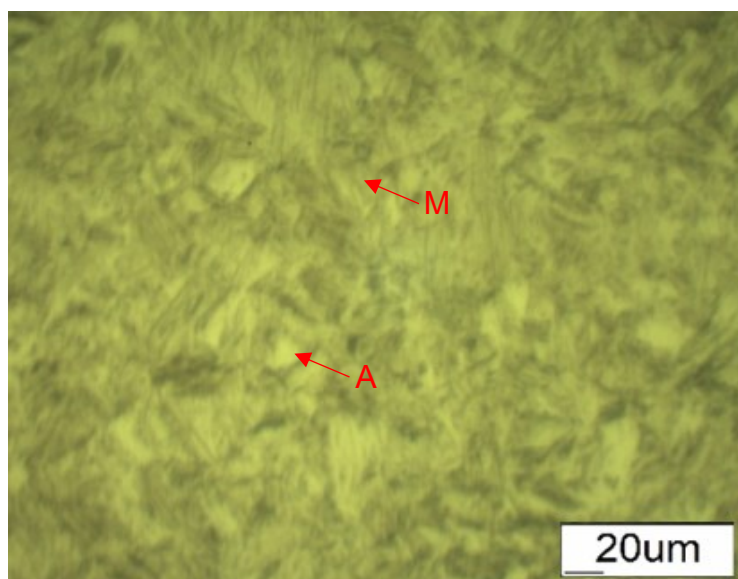
Após ataque as amostras foram lavadas em água corrente e em álcool etílico e secadas com jato de ar com cerca de 10 cm de distância.

Na Figura 10 é possível observar a micrografia da amostra do aço 1, com maior percentual de carbono e manganês, além do silício, não presente nos aços 2 e 3, que aumentam a temperabilidade. O ataque revelou uma coloração castanho em tonalidade clara e escura. É possível identificar a martensita na tonalidade escura com austenita retida de tonalidade mais clara, porém o ataque não foi muito satisfatório, já que o contraste apresentado é baixo. Ao aumentar o tempo de exposição ao reagente para 15 s a amostra ficou queimada, indicando tempo de ataque excessivo.

Figura 10 – Micrografia do aço 1 atacado com Nital 2% durante 10 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)



(a)



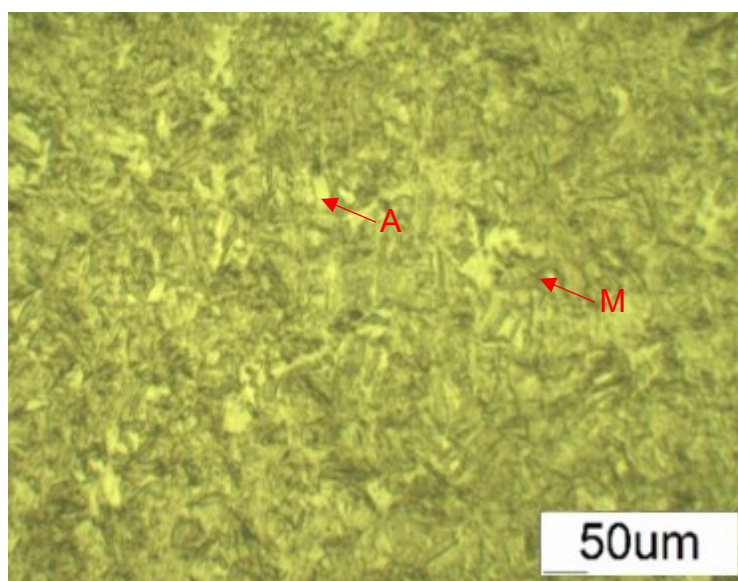
(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

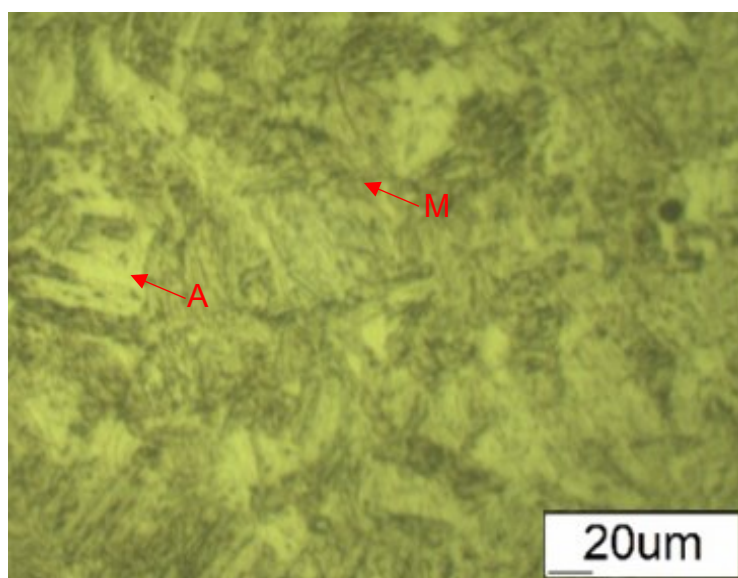
Na Figura 11, que mostra a micrografia do aço 2, observa-se grande semelhança com a micrografia do aço 1, com revelação nas mesmas tonalidades, apesar de o aço 2 possuir teor de carbono um pouco menor. O ataque, porém, foi ligeiramente mais efetivo, sendo possível ver mais claramente as ripas de martensita, se comparado a Figura 10b, provavelmente pela presença de enxofre que, combinado

com silício, forma sulfeto de manganês (MnS), que também aumenta a temperabilidade do aço e, portanto, a formação de martensita. Além disso, os elementos enxofre, fósforo, manganês e silício, reagem com oxigênio e nitrogênio, presentes no Nital. Ainda assim, o Nital 2% se mostrou pouco satisfatório, pois o contraste continuou baixo.

Figura 11 – Micrografia do aço 2 atacado com Nital 2% durante 10 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)



(a)

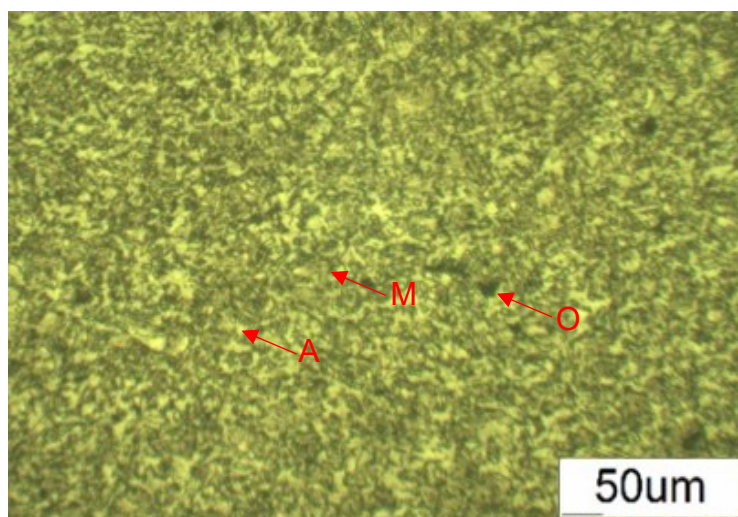


(b)

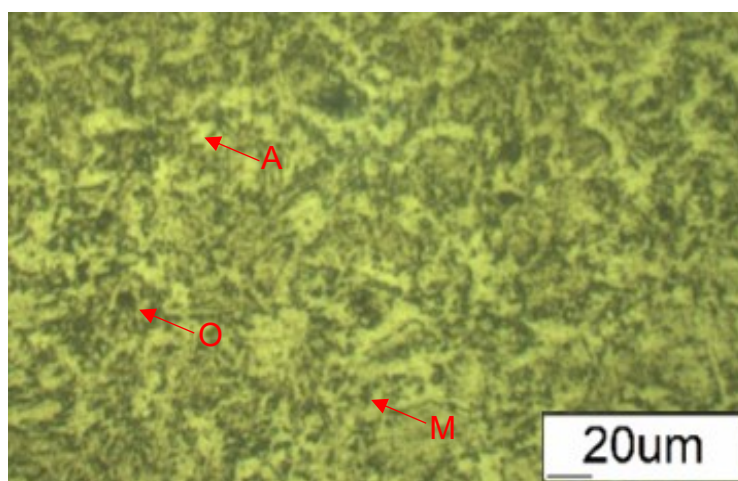
Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 12, na micrografia do aço 3 é possível notar alguns pontos de oxidação. Observa-se melhores contornos de grão em relação às micrografias dos aços 1 e 2 para o ataque com Nital 2%. A coloração foi um pouco esverdeada e a martensita aparece em tonalidade mais escura. O ataque químico utilizando reagente Nital 2% foi um pouco mais satisfatório para o aço 3 do que para os aços 1 e 2. Isso porque, assim como no aço 2, além de carbono ocorre a presença de manganês, fósforo e silício, porém em maior percentual que aquele, fazendo com que a temperabilidade desse aço seja maior, bem como a reatividade com os elementos presentes no Nital.

Figura 12 – Micrografia do aço 3 atacado com Nital 2% durante 10 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita), O (oxidação)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

6.1.2 LePera

Esse reagente faz parte do grupo de ataques químicos *Tint Etching* que, diferente dos ataques corrosivos, produzem um filme fino depositado na superfície da amostra de forma seletiva em diferentes áreas. A coloração depende da espessura desse filme (SOUZA, 2008). A composição desse reagente seguiu a Tabela 4, misturando em partes iguais as soluções de Picral 4% (4g de ácido pícrico em 96 ml de álcool etílico) e metabissulfito de sódio (1g de metabissulfito de sódio em 100 ml de água destilada).

A literatura indica a possibilidade de realizar um pré ataque com Nital 2% ou Picral 4%, sendo que o resultado é o mesmo, diferindo apenas o tempo de exposição do material ao reagente de forma que, com o pré ataque, esse tempo é cerca de dez vezes menor. Na Tabela 4 consta um tempo de ataque variando de 5 a 7 s, porém neste trabalho, sem o pré ataque, o tempo necessário foi de 60 s, confirmando-se o impacto do pré ataque encontrado na literatura.

Como o resultado nesse tipo de ataque depende do filme fino que é depositado na superfície da amostra, o método de ataque por aplicação, onde um chumaço de algodão é friccionado contra a amostra, não é recomendado, já que esse atrito impede a formação do filme. Por isso o método utilizado foi o de imersão, onde a superfície polida da amostra é mergulhada em um recipiente contendo o reagente e movimentada suavemente.

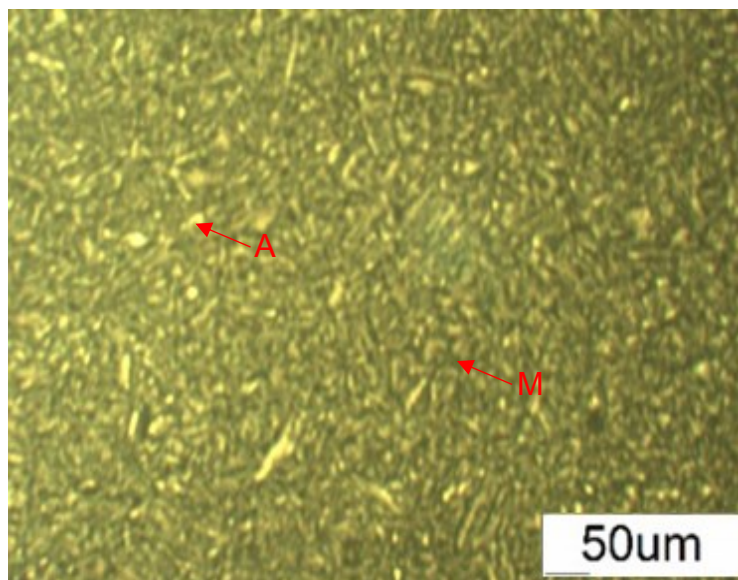
Outro ponto importante é em relação ao armazenamento do reagente. As duas soluções podem ser armazenadas, separadamente e em recipientes fechados, por um período de cerca de 20 dias, porém ao misturá-las, para um resultado satisfatório, deve se usar o reagente obtido imediatamente e uma única vez, devendo ser descartado logo em seguida.

A interrupção do ataque se deu com as amostras sendo lavadas em água corrente e em álcool etílico, com cuidado para não haver remoção do filme. Depois foram secadas em jato de ar frio com cerca de 10 cm de distância.

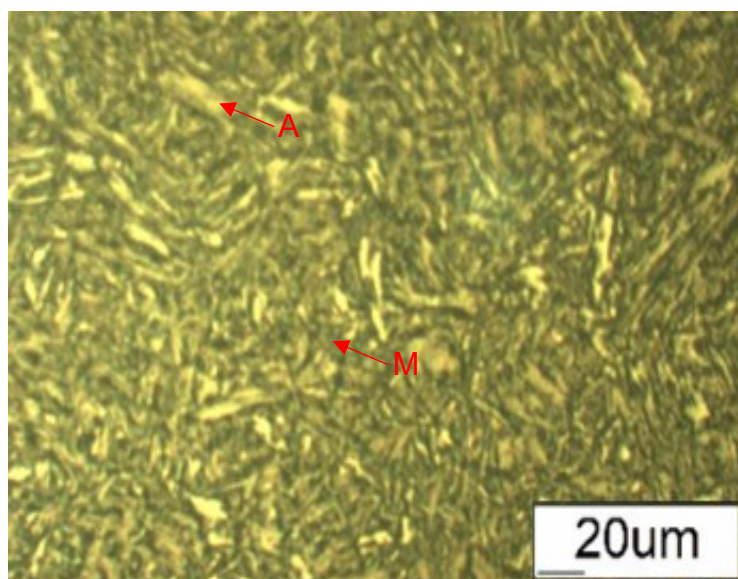
Na Figura 13 são mostradas as imagens obtidas após ataque químico com LePera do aço 1. O ataque revelou coloração marrom, sendo a martensita mais escura e a parte mais clara austenita retida. Para o aço 1 o reagente de LePera foi significativamente mais satisfatório do que o Nital 2%, sendo o contraste de coloração

entre as estruturas maior, já que os reagentes, nesse caso, atacam a martensita e não a austenita.

Figura 13 – Micrografia do aço 1 atacado com LePera durante 60 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)



(a)



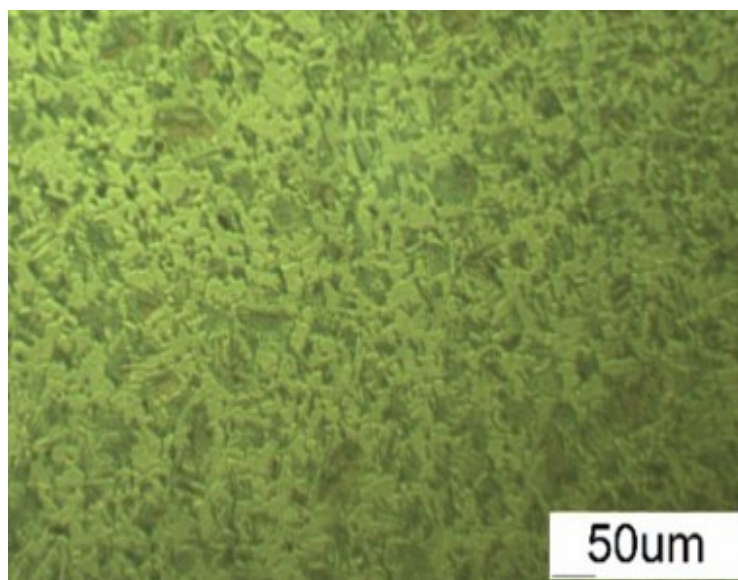
(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

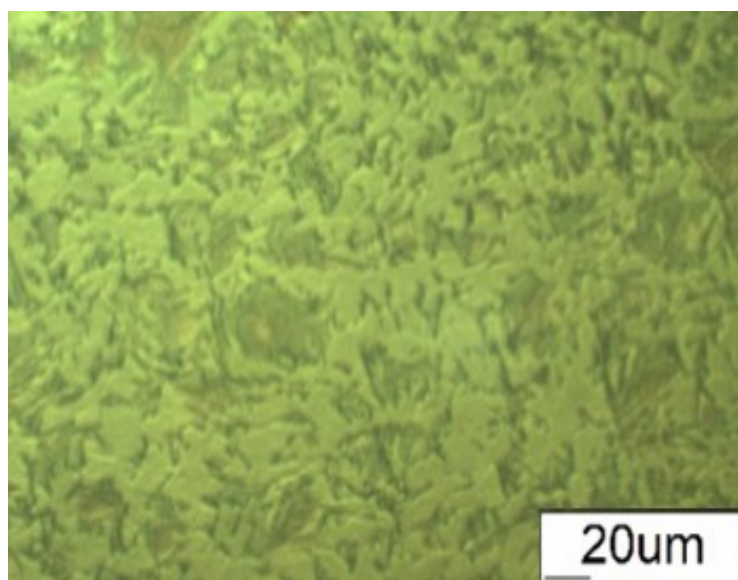
A Figura 14 refere-se às imagens obtidas do aço 2 após ataque químico, que revelou uma coloração esverdeada evidenciando que o tempo de ataque foi insuficiente. Porém, em teste de imersão durante 75 s, a superfície da amostra ficou muito escurecida, indicando ataque excessivo. Nesse caso a martensita aparece com

a tonalidade mais clara. Há um contraste entre as microestruturas, mas não é possível ver claramente qual é cada uma, isso pode ser devido a presença de fósforo e enxofre e a reatividade com o metabissulfito de sódio, não ocorrendo a reação necessária.

Figura 14 – Micrografia do aço 2 atacado com LePera durante 60 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x



(a)



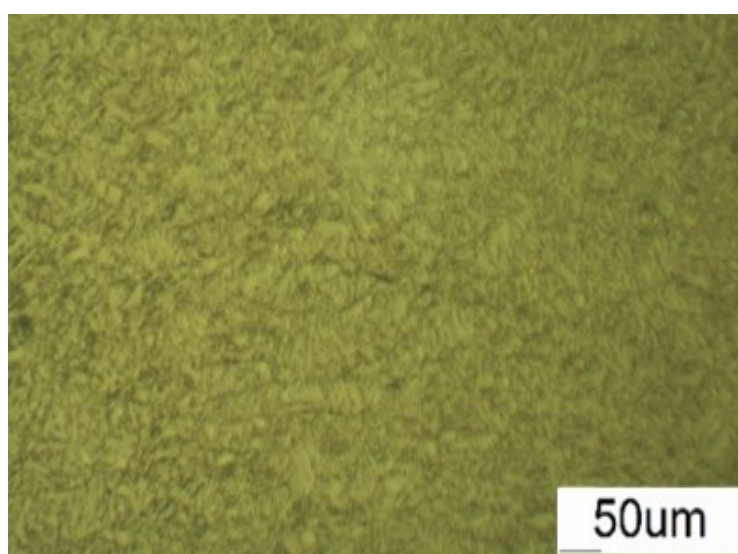
(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

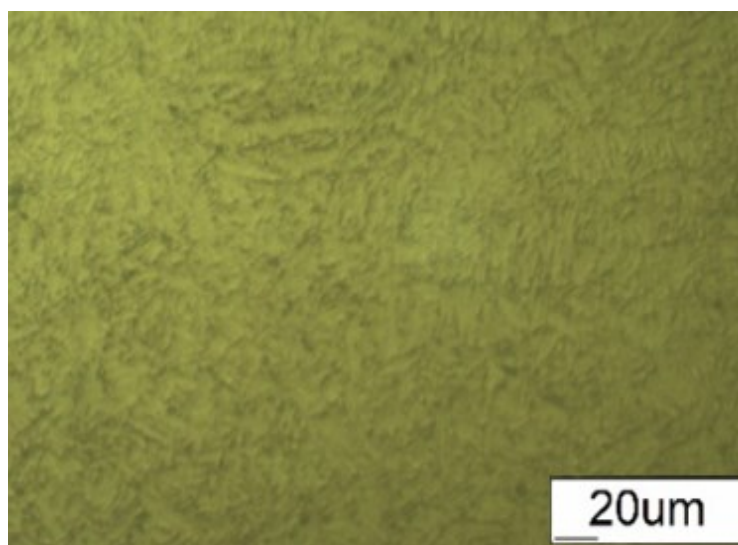
Na Figura 15 são mostradas as imagens obtidas para o aço 3, no qual o ataque foi insatisfatório. É possível notar os contornos de grão escurecidos e perceber características de estrutura martensítica, mas como os contornos de grão não estão

tão claros, é difícil identificar corretamente a microestrutura. Ao se comparar com as imagens do aço 3 obtidas do ataque com Nital 2% (Figura 12), este revelou a microestrutura de forma mais nítida. Para o tempo de exposição da superfície polida da amostra ao reagente de 75 s não houve alteração significativa na imagem e para 90 s a amostra ficou queimada. O provável motivo para isso é a concentração mais baixa de carbono nesse aço, dificultando o mecanismo de revelação do reagente de LePera.

Figura 15 – Micrografia do aço 3 atacado com LePera durante 60 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

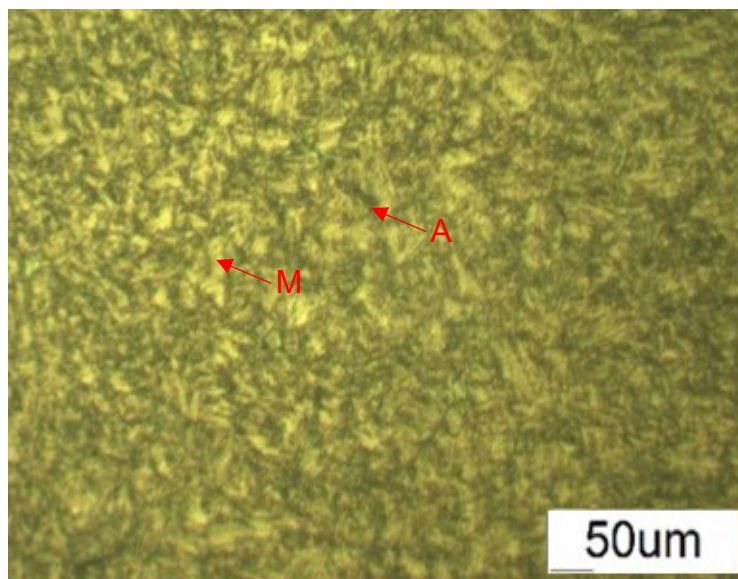
6.1.3 LePera Modificado

A diferença entre o reagente de LePera e LePera Modificado está na proporção entre as duas soluções, conforme Tabela 4. Essa proporção pode sofrer modificações até que se chegue a um resultado ideal. Neste trabalho, com base na literatura, optou-se por utilizar a proporção de duas partes de Picral 4% para uma parte de metabissulfito de sódio.

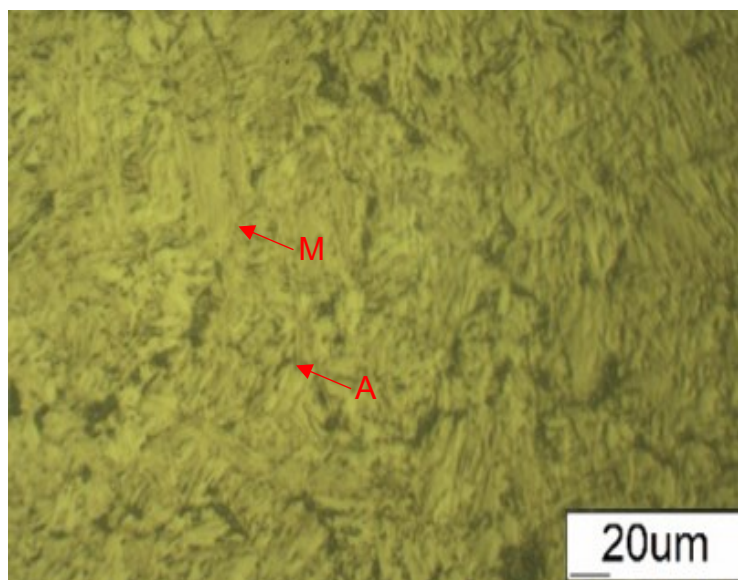
O tempo de ataque contido na Tabela 4, de 15 a 20 s, considera um pré ataque com Nital 2% ou Picral 4%. Neste trabalho, descartou-se essa etapa, pois na tentativa de realizá-lo as amostras ficaram manchadas. Dessa forma, o tempo de ataque com o reagente LePera Modificado que apresentou melhores resultados foi de 90 s. Ademais, foram tomados os mesmos cuidados e seguidos os mesmos passos descritos na seção 6.1.2.

Na Figura 16 é mostrada a micrografia do aço 1 após ataque com LePera Modificado. A revelação foi menos satisfatória se comparado ao ataque com reagente LePera nas proporções originais, provavelmente pelo fato de o metabissulfito de sódio apresentar melhor reação com os elementos do aço utilizado, porém é possível identificar a martensita, que aparece na Figura 14 com a tonalidade mais clara.

Figura 16 – Micrografia do aço 1 atacado com LePera Modificado durante 90 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)



(a)

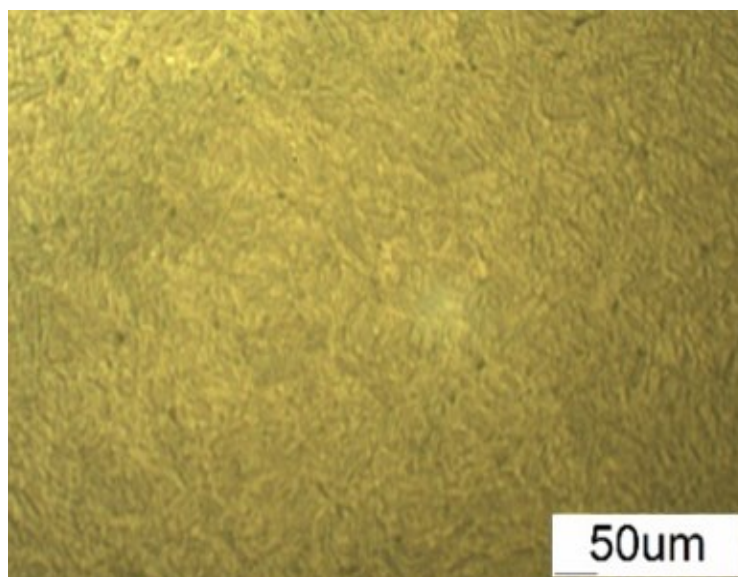


(b)

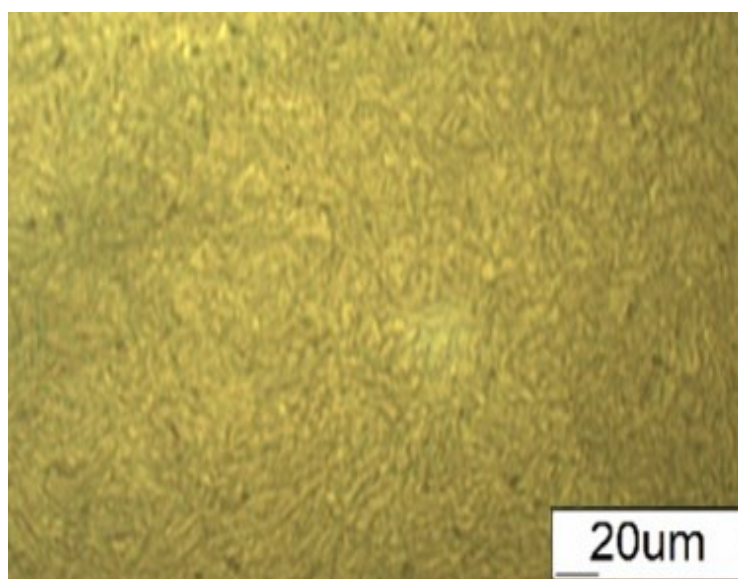
Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 17 refere-se à micrografia do aço 2 atacado com LePera Modificado. Observa-se coloração castanho-amarelada e contornos de grão levemente demarcados, porém o resultado também foi insatisfatório, sendo preferível a composição do reagente com proporções iguais entre as soluções, considerando a menor reatividade com o Picral e a presença de elementos que diminuem mais essa reatividade (fósforo e enxofre), também apresentando dificuldade na revelação clara da microestrutura.

Figura 17 – Micrografia do aço 2 atacado com LePera Modificado durante 90 s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x



(a)

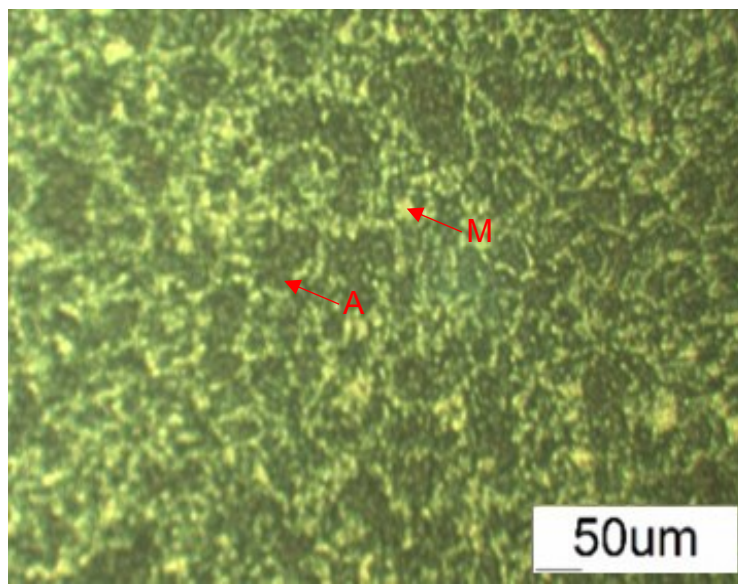


(b)

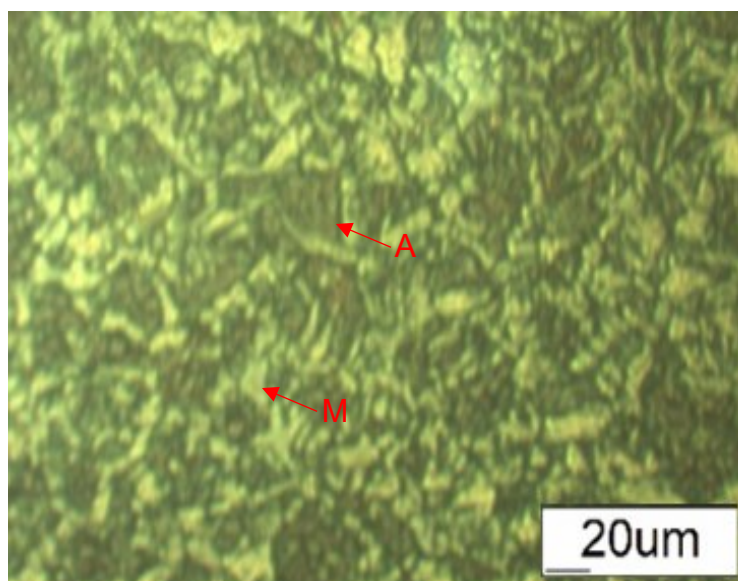
Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 18, a micrografia no aço 3 apresenta coloração verde, revelando uma maior diferença entre a austenita e a martensita, quando comparada às demais micrografias. A martensita aparece com tonalidade mais clara e a austenita retida em tonalidade mais escura.

Figura 18 – Micrografia do aço 3 atacado com LePera Modificado durante 90s. a) Ampliação 500x; b) Ampliação 1000x. A (austenita), M (martensita)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 7 – Comparação dos resultados da análise micrográfica em função do tipo de reagente

Reagente	Resultado
Nital 2%	A martensita foi revelada com pouco contraste em relação à austenita, podendo não ter clareza. O contraste aumenta conforme se aumenta o percentual de elementos que contribuem na temperabilidade do aço.
LePera	A martensita foi revelada de forma satisfatória quando há maior reatividade entre os elementos do material e os reagentes utilizados no ataque químico. Se a reatividade é baixa, não ocorre de forma satisfatória.
LePera Modificado	Se mostrou menos efetivo que o experimento utilizando as proporções originais de LePera, devido ao Picral, que provavelmente é menos reativo com os aços utilizados do que o metabissulfito de sódio.

Fonte: Autoria própria (2022)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Observando as imagens obtidas no MO, nota-se que a baixa qualidade do equipamento é bastante prejudicial ao resultado, mesmo com um ataque químico satisfatório, pois nas lentes de maior aumento (1000x) a nitidez é significativamente afetada, sendo esse aumento essencial para a observação da microestrutura formada. As imagens também apresentaram regiões mais escurecidas e pontos de maior reflexo da luz por deficiência do equipamento.

- As técnicas metalográficas empregadas foram adequadas, uma vez que não se observou problemas relacionados ao lixamento, polimento e secagem, como riscos, rabos de cometa ou manchas de álcool.

- Algumas amostras, mesmo atacadas imediatamente após polimento, apresentaram oxidação, mostrando ser inviável sua armazenagem entre polimento e ataque, mesmo que em dessecador.

- Em todos os casos, por se tratar de aços baixo carbono, a formação e revelação de martensita é menos favorecida se comparado a aços com teores mais altos do elemento. Além disso, nesses materiais a martensita foi observada predominantemente em forma de ripas, justamente por essa baixa concentração de carbono.

- O resultado do ataque químico com cada reagente variou de acordo a composição química da amostra, sendo que o LePera foi mais satisfatório para a amostras de aço com elementos que possuem maior reatividade com o reagente em questão e também para maior concentração de carbono (aço 1, vide Tabela 5). Sendo esse o aço que mais passa pelo tratamento térmico de têmpera na indústria em questão, para o objetivo do trabalho o reagente de LePera é o que melhor atende.

- O Nital 2% revela a presença de martensita em amostras temperadas, porém de forma um tanto quanto deficiente, devido ao baixo contraste em relação à austenita. Em caso de têmpera seguida de revenimento, caso haja martensita não revenida é provável que esse reagente não seja suficiente.

- O LePera Modificado foi menos satisfatório que o LePera nas proporções originais, provavelmente pela menor reatividade entre o Picral e os aços utilizados, porém pode apresentar melhores resultados com modificações que utilizem proporções diferentes da utilizada neste trabalho.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho, sugere-se:

- Variar as concentrações das soluções no reagente LePera.
- Analisar das amostras em MEV para comparar com as microestruturas observadas em MO.
 - Repetir os ensaios para amostras revenidas, para avaliar a possibilidade de localizar martensita revenida em MO e diferenciá-la de martensita não revenida, quando existir, porém com auxílio de MEV para confirmar os resultados obtidos, devido à dificuldade de diferenciá-la.
 - Realizar os testes em diferentes aços utilizados na indústria para verificar sua eficácia.

9 CRONOGRAMA

O desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve duração total de dezoito meses, dividido em Trabalho de Conclusão de Curso 1 (TCC 1) e Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC 2). No TCC 1 foi realizada a pesquisa bibliográfica, com o levantamento de dados para o desenvolvimento do TCC 2, leitura, redação, revisão e entrega. No TCC 2 as amostras foram preparadas, foram realizados os testes dos ataques químicos selecionados, a análise e discussão dos resultados e a entrega do projeto finalizado, conforme Tabela 7.

Tabela 8 – Cronograma de atividades TCC

Atividade	06/21	07/21	08/21	09/21	10/21	10/22	11/22
Levantamento bibliográfico e leitura	X						
Redação	X						
Revisão		X					
Entrega TCC 1			X				
Preparo das amostras				X	X		
Testes dos ataques químicos					X		
Análise e discussão dos resultados						X	
Entrega TCC 2							X

Fonte: Autoria própria (2022)

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL. Catálogo de Produtos Laminados. 2015. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-acos-planos.pdf?asCatalogo=pdf>>. Acesso em 19 de jul. de 2021.
- BÍBLIA, N. T. 2 Coríntios. A Bíblia Sagrada. Tradução de João Ferreira de Almeida (revista e atualizada no Brasil). 2ed. São Paulo. Sociedade Bíblica Brasileira, 1993.
- CALLISTER JR, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais** – uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 1988.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1974.
- COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.
- DEL SANT, R. **Estudo da transformação da austenita retida em martensita induzida por deformação plástica em aços multifásicos**. 2010. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- DUTRA, K. **Processos Metalúrgicos**. Diagrama TTT e Tratamentos Térmicos. 2017. Disponível em: <https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2017/05/pm_aula7-8_tratamentos-tc3a9rmicos.pdf>. Acesso em 08 de dez. de 2022.
- FUKUGAUCHI, C. S. **Metodologia para caracterização metalográfica de um aço TRIP por microscopia óptica**. 2010. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- GERDAU. **Aços Planos Gerdau: Chapas Grossas**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais?gclid=Cj0KCQjwxdSHBhCdARIsAG6zhlUK4NUEt4goZS62f360A506GN2xZj-mTZfdvGLriTO0WKafonJd2tcaAnzkEALw_wcB>. Acesso em 19 de jul. de 2021.
- PETZOW, G. **Metallographic Etching**. 2. ed. Ohio: ASM International, 1999.
- ROHDE, R. A. **Metalografia: Preparação De Amostras**. Santo Ângelo, RS - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2010.

SILVA, E. T. P. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**. 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual no Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

SILVA, R. A. **Correlação entre parâmetros de curvamento por indução de tubo API X80 e propriedades mecânicas microestruturais**. 2009. 260f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica**. 2008. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2001.

VANDER VOORT, G. F. ASM Handbook: **ASM Handbook – Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. v. 9.

ZUPPO, R. M. **Análise Comparativa do Efeito da Têmpera e Revenimento e da Austêmpera Seguida ou não de Conformação a Frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.