

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUIS VINÍCIUS ZUTIN ANTONELLO

**Estudo do Efeito de Tratamento Térmico nas Propriedades
Mecânicas do Aço Inoxidável AISI 440c**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2018

LUIS VINÍCIUS ZUTIN ANTONELLO

**Estudo do Efeito de Tratamento Térmico nas Propriedades
Mecânicas do Aço Inoxidável AISI 440c**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes

Londrina

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

LUIS VINICIUS ZUTIN ANTONELLO

ESTUDO DO EFEITO DE TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 440C

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 27 de abril de 2018 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a Dr^a Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Msc. Diego Ruben Martin
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a vida, por ter colocado nela pessoas que sempre me apoiaram e por ter me dado teimosia suficiente para provar errado todos que me falaram que não conseguiria.

Ao prof. Dr. Marcio Andreato Mendes pela amizade construída, pelo apoio, confiança e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À prof.^a. Dr.^a. Silvia Midori Higa e ao Prof. Msc. Diego Ruben Martin, por participarem da banca, pelas valiosas sugestões e pelo apoio dado a este trabalho de conclusão de curso.

Aos meus pais, Sérgio Luis Antonello e Raquel Regina Zutin Antonello, por terem dedicado grande parte de suas vidas para me tornar a pessoa que sou hoje e por terem acreditado em mim até quando nem mesmo eu conseguia fazer.

À Gabrieli Oliveira Primo, por ter sido meu porto seguro em muitas ocasiões durante meu percurso.

Aos colegas de laboratório, Filippe de Carvalho Bernardino, Carlos Augusto Hort e Vitor Guerreiro Bigelli pela amizade e contribuições técnico-científicas durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Ícaro Gabriel Rodrigues Santos e Rafael Vinicius Monetta de Carvalho por terem sido uma família longe de casa.

A todos meus colegas de graduação pelos momentos de companheirismo que vivenciamos durante esses anos.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia de Materiais da UTFPR/LD, pela atenção e amizade.

“Quando as diversidades parecerem insuperáveis lembre-se que lugar de navio bom não é no porto, mas no mar enfrentando tempestade.”

-Peres, F. M.

RESUMO

ANTONELLO, L. V. Z. **Estudo do Efeito de Tratamento Térmico nas Propriedades Mecânicas do Aço Inoxidável AISI 440c**. 2018. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

Existe grande interesse na utilização da liga de aço inoxidável AISI 440c devido as suas propriedades mecânicas, geradas pela sua composição com altos teores de carbono aliado a presença de cromo, que durante tratamentos térmicos, formam carbonetos em uma matriz martensítica. Os carbonetos formados, dependendo de sua morfologia, permitem que o material tenha uma elevada dureza e resistência mecânica. Este trabalho traz como objetivo analisar as alterações nas propriedades mecânicas da liga por meio de tratamentos térmicos de têmpera seguida de revenimento, variando os meios de têmpera e a temperatura de revenimento. Neste trabalho pôde-se observar que tais variações no processamento da liga levam a mudanças microestruturais, permitindo uma maior dureza e com isso melhorando sua resistência mecânica.

Palavras-chave: AISI 440c. Aço inoxidável martensítico. Tratamento térmico.

ABSTRACT

ANTONELLO, L. V. Z. **Study of the Effect of Thermal Treatment on the Mechanical Properties of 440c Stainless Steel**. 2018. 43 p. Undergraduated thesis – Materials engineering department, Universidade tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

There is great interest in the use of the AISI 440c stainless steel alloy due to its mechanical properties, due to its mechanical properties, given by its high carbon composition and the presence of chromium, which during the heat treatment forms carbides in a martensitic matrix. The carbides formed, depending on their morphology, allow the material to have a high hardness and mechanical strength. This work objective is to analyze the changes in the mechanical properties of the alloy by means of quenching followed by tempering, varying the quenching fluids and the tempering heat. In this work it was observed that such variations in alloy processing lead to microstructural changes allowing a greater hardness and thus improving its mechanical resistance.

Key-words: AISI 440c. Martensitic stainless steel. Heat treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Microscopia (a) óptica e (b) MEV da microestruturas da liga AISI 440c recozidas. Setas Vermelhas indicam os carbonetos.	16
Figura 2 – Microscopia (a) óptica e (b) MEV da microestruturas da liga AISI 440c temperadas. Setas Vermelhas indicam carbonetos.	18
Figura 3 - MEV mostrando estruturas da liga AISI 440c como (a) recebido e (b) após tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento.....	19
Figura 4 - Espectro XRD da liga 440c (a) como recebida e (b) após tratamento de têmpera seguida de revenimento.	20
Figura 5 - Representação do mecanismo de desgaste adesivo.....	22
Figura 6 - Esquema de destacamento em formato de cunha.....	22
Figura 7 - Esquema de (a) uma superfície dura ou de uma partícula abrasiva fixa, deslizando em uma superfície macia, e (b) partículas abrasivas livres entre duas superfícies menos duras que as partículas.	23
Figura 8 - Esquema de um tribômetro do tipo bloco sobre anel.	25
Figura 9 - Desgaste causado por partícula cônica.	26
Figura 10 - Fluxograma de procedimentos.....	29
Figura 11 - Dimensionamento e posição dos corpos de prova na amostra.....	31
Figura 12 - Torno mecânico (a) antes e (b) após a montagem do tribossistema desenvolvido.	33
Figura 13 - Partes do tribossistema montado.....	34
Figura 14 - Micrografia da amostra como recebida com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.	36
Figura 15 - Micrografia da amostra 1 com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.....	37
Figura 16 - Micrografia das amostras (a) 2, (b) 3, (c) 4 e (d) 5 com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.	38
Figura 17 - Dureza média das amostras após tratamento térmico.....	39
Figura 18 - Perda média de massa (%) para cada amostra.....	40

Figura 19 - Taxa média de desgaste (mg/m) para cada amostra.....	41
Figura 20 - Micrografia dos caminhos de desgaste. Amostra (a) como recebida, (b) 1, (c) 2, (d) 3, (e) 4 e (f) 5. Aumento de 50x.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de composição química do aço 440c (% em massa).....	16
Tabela 2 - Dureza e composição de fase da liga AISI 440c.....	20
Tabela 3 - Composição química da liga estudada (% em massa).....	30
Tabela 4 – Parâmetros do processo térmico em cada amostras.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society of Testing and Materials
C	Carbono
Cr	Cromo
DRX	Difração de Raios X
Fe	Ferro
FeCl	Cloreto férrico
HCl	Ácido clorídrico
HRC	Dureza Rockwell C
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Newton
Ni	Níquel
P	Fósforo
RPM	Revoluções Por Minuto
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carbeto de Silício
α'	martensita
γ_r	austenita retida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1	Classificação Geral dos aços	13
4.2	Aços Inoxidáveis Martensíticos	15
4.3	Tratamentos Térmicos	17
4.4	Caracterização Estrutural	18
4.5	Desgaste	20
4.5.1	Desgaste Adesivo	21
4.5.2	Desgaste Abrasivo	22
4.5.3	Ensaio Bloco Sobre Anel	24
4.5.4	Métodos Utilizados para o Cálculo de Desgaste Abrasivo	25
5	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA	29
5.1	Preparação dos Corpos de Prova	30
5.2	Desenvolvimento do Tribossistema	32
6	Resultados e Discussão	36
6.1	Análise Microscópica	36
6.1.1	Amostra Como Recebida	36
6.1.2	Amostras Pós Têmpera Seguida de Revenimento	37
6.2	Ensaio de Dureza	39
6.3	Ensaio de Desgaste	40
7	CONCLUSÃO	44
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	46
	ANEXO I	48

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis foram primeiramente classificados em 1821 pelo metalurgista francês Pierre Berthier, que notou a elevada resistência dos inoxidáveis contra ataques químicos ácidos e sugeriu sua aplicação na área de cutelaria. Somente quase um século depois, em 1912, o metalurgista Elwood Haynes tentou patentear a primeira liga de aço inoxidável martensítica, entretanto, a patente só foi atribuída em 1919.

Dentre os variados tipos de aços inoxidáveis, os martensíticos são amplamente utilizados em aplicações que necessitam de alta resistência mecânica aliada à moderada resistência a corrosão. Devido ao alto teor de carbono contido nas ligas, a resistência mecânica e a resistência a corrosão são sensíveis a tratamentos térmicos. Em contrapartida, o alto teor de carbono encontrado, que fornece a resistência mecânica desejada para as aplicações da liga martensítica, também é responsável pela liga ter a menor resistência a corrosão na classe dos aços inoxidáveis martensíticos comercializáveis.

A liga AISI 440c é considerada uma das mais resistentes e com maior dureza da classe de aços inoxidáveis martensíticos e é utilizada em várias aplicações industriais, tais como ferramentas de trabalho a quente, hélices, impulsores de bombas, rolamentos buchas e, devido a capacidade de resistir a deformações que fariam com que o material perdesse o fio da lâmina de corte, também é utilizado na indústria de cutelaria.

Quando utilizada em cutelaria industrial, esse aço pode ser aplicado em implementos agrícolas no formato de facas ou discos de arados. Com o intuito de abranger essas aplicações e obter melhorias para as aplicações atuais, como melhorar a resistência a corrosão da liga sem influenciar na resistência mecânica, tem-se realizado estudos acerca de tratamentos térmicos, resistência a corrosão e ao desgaste, em aplicações na área de cutelaria industrial focada para utilização em implementos agrícolas, dentre outras.

Dessa forma, tendo em vista os constantes problemas encontrados na agroindústria, como fraturas, desgaste e corrosão dos materiais, mais especificamente discos e facas de arado, este trabalho irá abordar formas de tratamentos térmicos a fim de aumentar a vida útil de equipamentos destinados

a essa aplicação. Para isso, o objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo sobre a influência de tratamentos térmicos na dureza e na resistência ao desgaste da liga AISI 440c, para, assim, ganhar maior tempo de vida útil em aplicações onde a liga é utilizada com contato com outro material gerando atrito e desgaste.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliação das mudanças na resistência ao desgaste e na dureza na liga AISI 440c, provenientes de diferentes tratamentos térmicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Revisão de literatura acerca da liga AISI 440c, do processo de desgaste e seus mecanismos, e da precipitação de carbonetos por meio do processo de têmpera;
- Adaptação de aparato de desgaste para realização de ensaio bloco sobre anel em um torno mecânico;
- Determinação do desgaste sofrido pelo material por meio da perda de massa utilizando o aparato adaptado no torno mecânico;
- Identificação da influência da temperatura de tratamento térmico na solubilização de carbonetos na matriz;
- Avaliação de como os carbonetos formados irão influenciar na resistência ao desgaste do material.

3 JUSTIFICATIVA

Aços inoxidáveis martensíticos têm uso constante dentro da engenharia e o engenheiro de materiais tem liberdade de explorar uma quantidade muito grande de composições e processamentos para essas ligas. Seu conhecimento sobre diversas áreas da ciência permite trabalhar com eficiência em busca de melhoria na performance do material.

A liga martensítica 440c tem como sua principal aplicação a utilização em cutelaria industrial, onde chapas usinadas e tratadas termicamente são usadas em arados para corte e colheita na agroindústria. Entretanto, o tratamento térmico pode gerar a formação de carbonetos que acabam fragilizando mecanicamente o material.

Com isso, este trabalho tem por justificativa fornecer resultados para ampliar conhecimentos acerca da liga AISI 440c e contribuir para melhor compreensão de suas propriedades e sua correlação com a temperatura de tratamento térmico, com intuito de possibilitar novos estudos e aplicações da mesma.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

O desafio atual das indústrias, dentre elas a agroindústria, está focado em alcançar alta qualidade, alta produção e diminuir o desperdício, maximizando assim o lucro obtido. Neste sentido, um dos maiores gastos em equipamentos está relacionado com peças que necessitam ser substituídas devido ao desgaste físico ou químico e às fraturas durante o trabalho (THAMIZHMANII et al., 2008).

Desgaste abrasivo é a maior causa de falhas prematuras em equipamentos agroindustriais, especialmente em equipamentos utilizados em agriculturas em áreas áridas. Tais falhas são causadas principalmente por fragilizações na matriz do material, podendo ser devido a pontos concentradores de tensão ou a pontos de corrosão (KANG; CHEEMA; SINGLA, 2014).

A liga de aço inoxidável martensítico AISI 440c contém em sua composição um alto teor de carbono e cromo, o que permite que seja tratada termicamente a fim de obter boas propriedades mecânicas, entretanto o tratamento térmico acaba acarretando na formação de carbonetos na matriz (THAMIZHMANII et al., 2008).

Nesta seção serão abordados os assuntos essenciais para a presente proposta, ou seja, o estudo da influência dos diferentes tipos de tratamentos térmicos na resistência ao desgaste da liga. Serão abordados a classificação dos aços, suas propriedades, os diferentes tipos de tratamentos e, por fim, pontos pertinentes aos ensaios de desgaste.

4.1 Classificação Geral dos aços

Aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações consideráveis de outros elementos de liga. Existem milhares de ligas com diferentes composições e/ou tratamentos térmicos. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, que normalmente é inferior 1,0% em massa. Alguns aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono, conhecidos como tipos de aço de baixo, médio e alto teor de carbono (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Aços de baixo teor de carbono são produzidos em maiores quantidades e contêm geralmente menos que 0,25% em massa e não respondem a tratamentos térmicos realizados para formar martensita. As microestruturas consistem de ferrita e perlita e, como consequência, essas ligas têm relativamente baixa dureza e baixa resistência, mas apresentam ductilidade e tenacidade excepcionais, permitindo ser conformados plasticamente, são usináveis, soldáveis e dentre todos os aços são as ligas mais baratas de serem produzidas (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Aços de médio teor de carbono apresentam teores de carbono aproximadamente 0,25 e 0,6% em massa. Essas ligas podem ser tratadas termicamente por austenização, têmpera e então, podem ser revenidas para melhorar suas propriedades mecânicas, sendo utilizadas com mais frequências na condição revenidas. A adição de elementos de liga, como cromo e molibdênio, melhoram a capacidade dessas ligas de serem tratadas termicamente, dando origem a diversas combinações de resistência e ductilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Aços com alto teor de carbono apresentam teores de carbono entre 0,60 e 1,4% em massa, são mais duros e mais resistentes, porém são os menos dúcteis dentre os aços-carbono. Eles são empregados quase sempre em uma condição endurecida e revenida, e sendo assim, são especialmente resistentes ao desgaste e são capazes de manter a aresta de corte afiada. A adição de elementos de liga como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio, combinados com a grande quantidade de carbono favorecem a formação de carbonetos muito duros e resistentes ao desgaste (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os aços chamados de inoxidáveis são ligas metálicas desenvolvidas por volta do século XX, comumente compostas de ferro + cromo, podendo conter outros elementos de liga (como níquel e molibdênio), com grande área de aplicação para a engenharia em função da sua grande resistência a oxidação e corrosão, e das suas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas.

Essa resistência à corrosão é associada ao fenômeno de passivação, ou seja, a formação de uma camada de óxidos mistos (de ferro, cromo, e de outros elementos da liga) e a dissolução desta camada no meio corrosivo. O desempenho satisfatório dos aços inoxidáveis depende não só da consideração

da corrosão uniforme, mas também a prevenção dos fenômenos de corrosão localizada (SILVA; MEI, 2006).

A fim de classificar e discutir as propriedades dos aços inoxidáveis, eles podem ser agrupados em cinco categorias, sendo elas 1.martensíticos, 2.ferríticos, 3.austeníticos, 4.ferríticos-austeníticos (duplex) e 5.endurecidos por precipitação (SILVA; MEI, 2006).

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas ferro-cromo com a estrutura essencialmente ferrítica em todas as temperaturas, e que não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Os austeníticos são ligas à base de ferro, cromo (16-30% em massa) e níquel (8-35% em massa), sendo predominantemente austeníticas após tratamento térmico comercial. São não magnéticas com teor de carbono inferior a 0,08%. Os aços duplex são ligas com microestruturas contendo austenita e ferrita em frações aproximadamente iguais e são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27% em massa), níquel (4-7% em massa), molibdênio (1-4% em massa) e outros elementos, especialmente nitrogênio e apresentam propriedades interessantes para várias aplicações. Já os inoxidáveis endurecidos por precipitação são ligas de ferro, cromo (12-17% em massa), níquel (4-8% em massa), molibdênio (0-2% em massa) contendo adições que permitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio) (SILVA; MEI, 2006).

Os martensíticos, sendo o material de estudo do presente trabalho, serão discutidos com mais detalhes num tópico a parte.

4.2 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Aço inoxidável martensítico é uma classe específica de liga de aços inoxidáveis, onde, diferente dos outros tipos de aço inoxidáveis, podem apresentar baixo ou alto teor de carbono, chegando até 1,2% em massa. A composição química da liga pode ser observada na Tabela 1.

Dentre os aços inoxidáveis martensíticos, a liga AISI 440c é considerada uma das mais resistentes. É utilizada em várias áreas de indústrias, como, por exemplo, em ferramentas e trabalhos a quente, hélices, impulsor de bombas,

esferas de rolamento, mancais, buchas metálicas, válvulas e facas industriais. Tais aplicações necessitam de grande resistência mecânica, resistência ao desgaste e resistência moderada a corrosão (PULI; RAM, 2012).

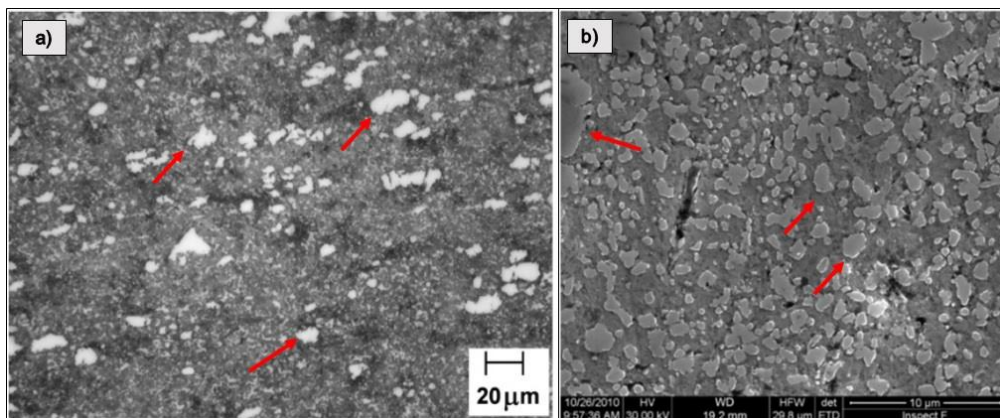
Tabela 1 – Faixa de composição química do aço 440c (% em massa).

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,95-1,20	0-1,00	0-1,00	13,00-18,00	0-0,75	0-0,04	0-0,03

Fonte: Adaptado de (INTERLLOY, 2011)

Quando se adiciona uma quantidade suficiente de carbono em uma liga inoxidável puro cromo, ou seja, uma liga inoxidável com a segunda maior quantidade de elemento de liga sendo cromo e sem a presença de níquel, a liga passa a ter a capacidade de transformar sua microestrutura por meio da deformação devido ao tratamento térmico, passando a ter uma estrutura cristalina que possui resistência mecânica, dureza, capacidade de retenção de fio e resistência a abrasão mais significativas (LUDLUM, 1998; PULI; RAM, 2012). A Figura 1 apresenta a microestrutura transformada por meio de tratamentos térmicos, onde pode-se observar a formação de carbonetos na matriz martensítica, proveniente da grande quantidade de carbono na liga. Neste caso, o material sofreu recozimento a uma temperatura de 750°C por 1 hora e deixado resfriado a ar até a temperatura ambiente (Figura 1 a e b) (PULI; RAM, 2012).

Figura 1 – Microscopia (a) óptica e (b) MEV da microestruturas da liga AISI 440c recozidas. Setas Vermelhas indicam os carbonetos.



Fonte: Adaptado de PULI; RAM, 2012

4.3 Tratamentos Térmicos

Como colocado nas sessões precedentes, as propriedades dos aços inoxidáveis dependem da estrutura cristalina e da morfologia dos grãos do material, e com isso, da composição química e condições de fabricação. Muitas vezes, as estruturas obtidas logo após ao processamento do material não conferem propriedades interessantes para aplicações, devido às variáveis que possam incluir no processamento, como velocidades não controladas de resfriamento (CHIAVERINI, 2008).

O meio mais eficiente e mais utilizado para controlar a estrutura desses materiais é o tratamento térmico, o que significa que, uma vez fixada a composição química do material, seu tratamento térmico pode determinar, em definitivo, a estrutura desejada e, em consequência, as propriedades finais (CHIAVERINI, 2008).

Dentre os tratamentos térmicos encontram-se o recozimento, que consiste em fornecer calor suficiente para que se passe a barreira energética que impede a volta do material para as condições microestruturais originais. Durante o recozimento ocorre uma eliminação dos defeitos estruturais. Tais eliminações dependem dos níveis de temperaturas empregados (CHIAVERINI, 2008).

Outros dois meios de tratamento térmico são a têmpera e revenimento, que consistem em operações realizadas em ligas ferrosas e têm por objetivo produzir uma estrutura que permite ao material, submetido ao resfriamento controlado a partir de altas temperaturas, adquirir propriedades de dureza e resistência mecânica elevadas e compatíveis com as condições de sua utilização (CHIAVERINI, 2008).

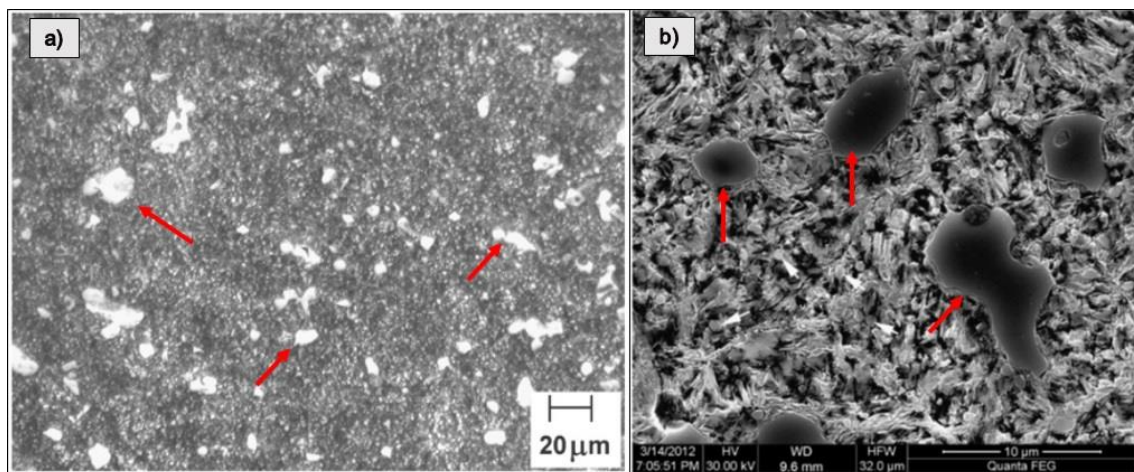
A têmpera é um tratamento térmico de grande importância tecnológica, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em áreas de maior responsabilidade e em aplicações mais críticas. Tal mecanismo visa à obtenção da microestrutura martensítica. A operação consiste num resfriamento rápido a partir da temperatura de austenização, num meio de grande capacidade de resfriamento, como em água, salmoura, óleo e ar (CHIAVERINI, 2008).

O revenimento, tratamento complementar à têmpera, consiste no reaquecimento das peças temperadas, fornecendo ao material propriedades desejadas, como dureza, resistência mecânica e ao desgaste. Dependendo da temperatura de têmpera podem ocorrer pequenas ou grandes transformações na estrutura martensítica (CHIAVERINI, 2008).

Dentre as ligas martensíticas, a liga 440c apresentam elevada endurecibilidade e elevada resistência ao desgaste e pode ser submetida a recozimento, têmpera a revenido e alívio de tensões (CHIAVERINI, 2008).

As transformações na microestrutura desta liga podem ser observadas na Figura 2, onde é mostrada a micrografia da liga 440c obtida por austenização seguida de recozimento, onde o material foi aquecido e mantido por 1 hora à uma temperatura de 1050°C, depois temperado em óleo e em seguida recozido a uma temperatura de 200°C por 2 horas e resfriado ao ar (PULI; RAM, 2012).

Figura 2 – Microscopia (a) óptica e (b) MEV da microestruturas da liga AISI 440c temperadas. Setas Vermelhas indicam carbonetos.



Fonte: Adaptado de PULI; RAM, 2012

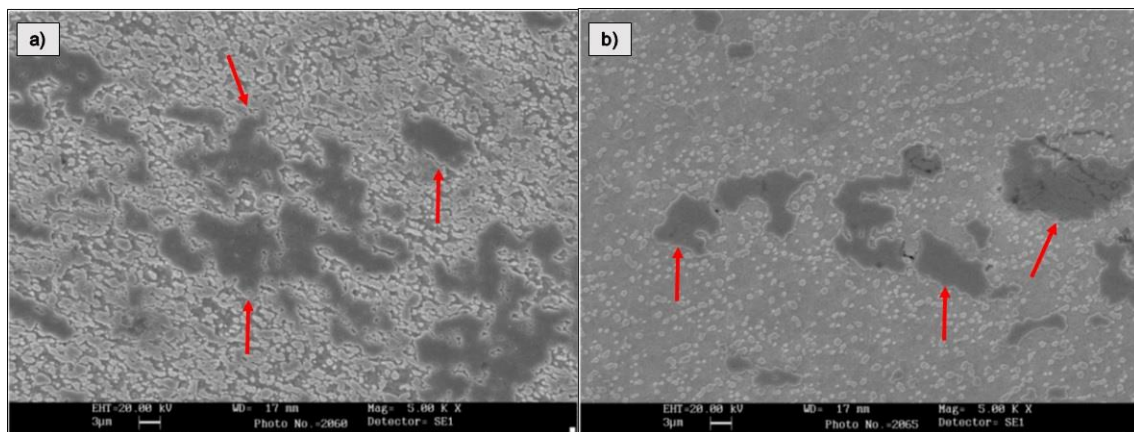
4.4 Caracterização Estrutural

Para serem utilizadas, as ligas de aços inoxidáveis martensíticos geralmente são endurecidas por meio de tratamentos térmicos via transformação de fase em estado sólido. O tratamento térmico empregado pode variar dependendo das propriedades que se deseja alcançar. Tratamentos térmicos de têmpera seguida de revenimento são empregados para tratar o material como

um todo e tratamentos a laser podem ser utilizados, para tratamentos superficiais em locais específicos (LO; CHENG; MAN, 2003).

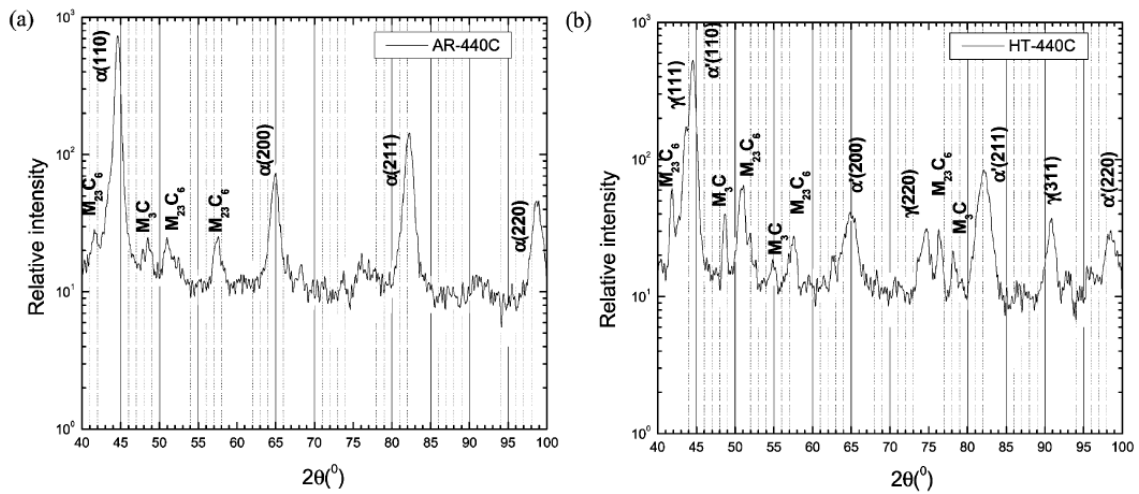
A micrografia em MEV mostrada na Figura 3, juntamente com o espectro de DRX na Figura 4, demonstram que a amostra como recebida (convencionalmente a liga é vendida no estado normalizada) contém uma grande densidade de carbonetos grosseiros, identificados como M_3C e $M_{23}C_6$, onde M representa um metal da composição da liga combinado com carbono para formação de carbonetos, em uma matriz ferrítica. Quando o aquecimento do material é feito dentro da faixa de temperatura de austenização, os carbonetos são parcialmente dissolvidos na matriz. A dissolução dos carbonetos varia com a temperatura alcançada durante o tratamento térmico. A estrutura martensita (α'), austenita retida (γ_r) e carbonetos finos são formados após o resfriamento. A formação de austenita retida em aços inoxidáveis martensíticos é comum em tratamentos térmicos de têmpera, o que proporciona a mudança de propriedades mecânicas (LO; CHENG; MAN, 2003).

Figura 3 - MEV mostrando estruturas da liga AISI 440c como (a) recebido e (b) após tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento.



Fonte: Adaptado de LO; CHENG; MAN, 2003

Figura 4 - Espectro XRD da liga 440c (a) como recebida e (b) após tratamento de têmpera seguida de revenimento.



Fonte: Adaptado de LO; CHENG; MAN, 2003

Para a determinação da resistência ao desgaste, é de grande importância conhecer a dureza do material, pois essa influencia diretamente na determinação de tais propriedades, embora existam algumas exceções. As propriedades da liga AISI 440c como recebida e após tratamento térmico pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Dureza e composição de fase da liga AISI 440c.

Amostra	Dureza (HV)	Fases presentes
Como recebida	280	α , M_3C , $M_{23}C_6$
Após tratamento térmico	680	α , γ_r , M_3C , $M_{23}C_6$

Fonte: Adaptado de LO; CHENG; MAN, 2003

4.5 Desgaste

O desgaste pode ser definido como a perda de material ou deformação irreversível, devido à interação mecânica, impacto ou deslizamento entre dois materiais. O processo ocorre devido à falha mecânica local das zonas de contato, ou regiões interfaciais, decorrentes da concentração de tensão causadas por fatores ambientais. A deterioração superficial pode levar à

produção de partículas, caracterizado por desgaste adesivo. O tipo de movimento relativos entre as partes em contato é comumente utilizado para definir o tipo de desgaste, que podem ser classificados em desgaste abrasivo, adesivo, corrosivo, catastrófico e de deformação (NEALE, 1995).

Tendo em vista os objetivos do presente trabalho de conclusão de curso, apenas os mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo serão relevantes e, portanto, somente esses serão discutidos com maior detalhamento na sequência.

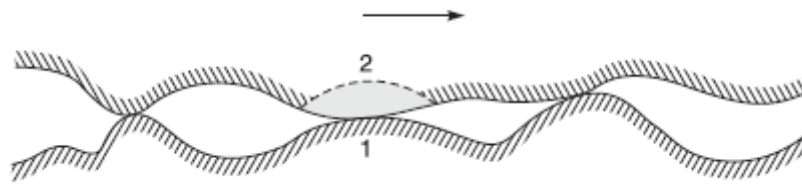
4.5.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo descreve o mecanismo onde fragmentos de materiais são removidos de uma superfície e são transferidas para outra superfície em contato ou são dispersas como partículas perdidas entre os corpos em contatos (WAMG et al., 2013). Este processo de desgaste se inicia quando corpos estão deslizando em contato, com ou sem lubrificação. A adesão ocorre devido à irregularidade da superfície de contato, onde os fragmentos em contato são cisalhados devido ao deslizamento (BHUSHAN, 2013).

Esse processo se inicia quando uma área de contato é criada e as estruturas atômicas dos materiais forma ligações entre si. Conforme o deslizamento ocorre, uma força é gerada e atua sobre a nova área formada com o intuito de separá-la, porém esta força acaba por romper ligações mais longínquas à superfície, transferindo assim fragmentos de um material para o outro (NEALE, 1995).

A Figura 5 representa o mecanismo de desgaste adesivo onde duas superfícies em contato deslizam uma sobre a outra e em uma das regiões de contato formadas há a identificação do fragmento a ser transferido devido à adesão.

Figura 5 - Representação do mecanismo de desgaste adesivo.

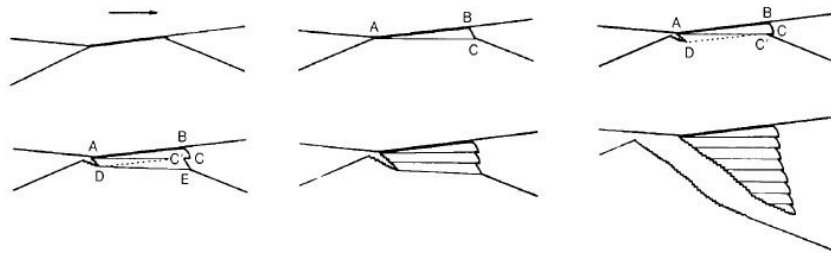


Fonte: BHUSHAN, 2013

Esse processo de adesão e transferência de fragmentos ocorre progressivamente durante o deslizamento, podendo além de transferir fragmentos, produzir partículas livres entre as superfícies que irão continuar aderindo em qualquer um dos materiais ou desencadear outros mecanismos de desgaste.

Outra teoria para este processo de desgaste adesivo ocorre conforme ilustrado pela Figura 6, onde ocorre a quebra em um dos corpos e um fragmento fica anexado à outra superfície. Neste caso, o cisalhamento de camadas sucessivas, juntamente com a aspereza do contato, resulta na transferência de um fragmento no formato de cunha de uma face para a outra.

Figura 6 - Esquema de destacamento em formato de cunha.



Fonte: BHUSHAN, 2013

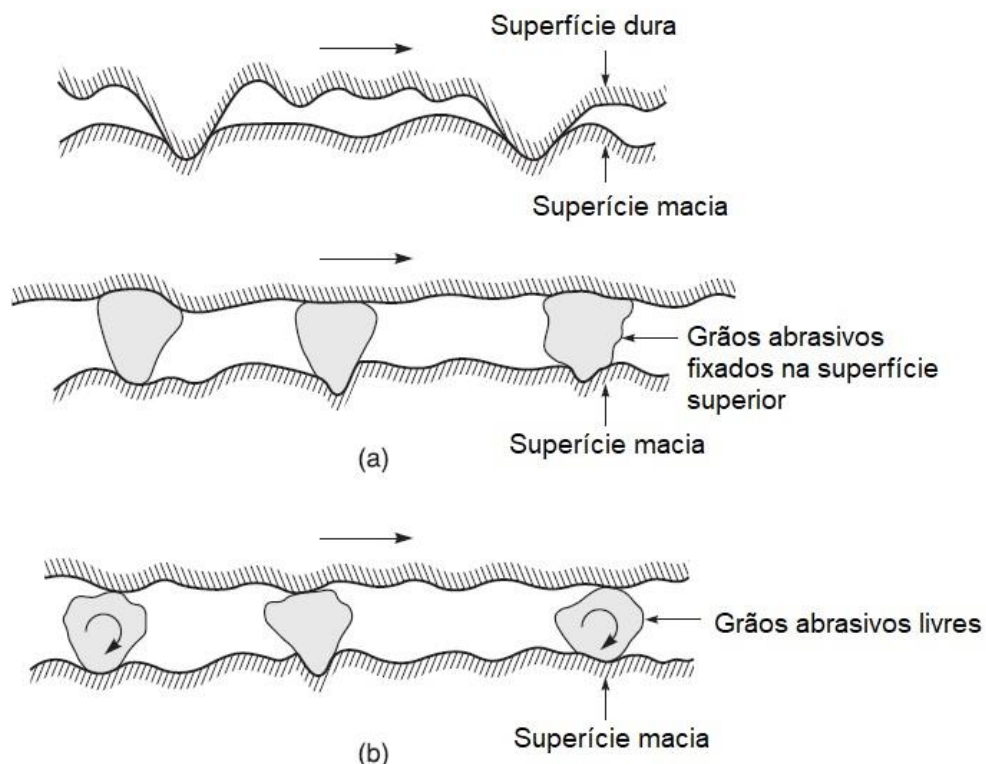
4.5.2 Desgaste Abrasivo

No desgaste por abrasão ocorre quando uma superfície ou partícula dura desliza sobre uma outra superfície menos dura, danificando esta superfície por deformação plástica ou por fratura. Este tipo de desgaste é muito comum e, caso não seja bem controlado, pode gerar perdas e danos consideráveis aos componentes em contato.

Existem duas situações gerais para desgaste abrasivo. O primeiro é conhecido como abrasão de dois corpos e ocorre em um sistema onde dois corpos estão em contato e um deles tem uma dureza mais elevada. No segundo caso tem-se o desgaste abrasivo de 3 corpos, onde o material mais duro é um terceiro corpo entre os dois corpos em movimento relativo, por exemplo uma partícula abrasiva nomeio de duas superfícies (BHUSHAN, 2013).

Em vários casos, o processo de abrasão inicia-se de forma adesiva de dois corpos, o que gera partículas aprisionadas entre as superfícies, resultando em desgaste abrasivo de três corpos, como representado na Figura 7. É comum ver na superfície do material, na maioria dos casos de desgaste abrasivo, ranhuras na direção do desgaste (BHUSHAN, 2013).

Figura 7 - Esquema de (a) uma superfície dura ou de uma partícula abrasiva fixa, deslizando em uma superfície macia, e (b) partículas abrasivas livres entre duas superfícies menos duras que as partículas.



Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2013

Exemplos práticos para os modos de abrasão de dois e três corpos são encontrados em contatos entre engrenagens eixos, mancais, polimentos,

usinagem, assim como nos ensaios tribológicos que tentam reproduzir esse caso (tipo pino disco e nos ensaios de roda de borracha).

4.5.3 Ensaio Bloco Sobre Anel

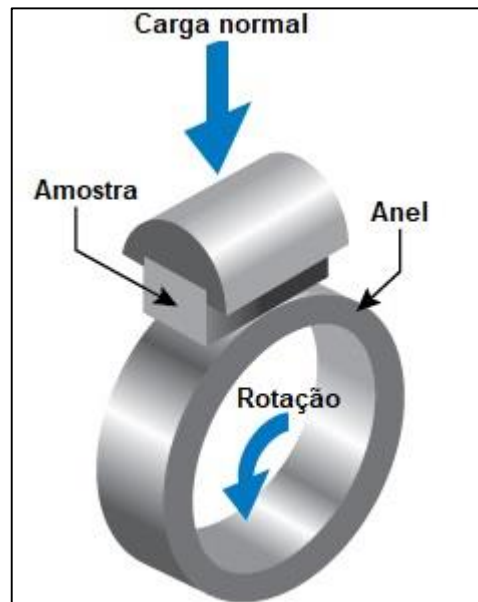
O ensaio abrasivo do tipo bloco sobre anel é regido pela norma ASTM G77 – *Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear* e consiste no movimento relativo de deslizamento entre um bloco do material de estudo e um anel de substrato abrasivo.

Para que o ensaio ocorra, o pino é posicionado de forma perpendicular à superfície do anel e o movimento relativo de rotação é descrito pela revolução do anel (ASTM, 2017).

O bloco é pressionado contra o anel com cargas controladas por pesos, sistemas hidráulicos ou pneumáticos, deixando um caminho linear na superfície do anel, conhecido como caminho de deslizamento (ASTM, 2017).

A taxa de desgaste, grandeza referente à quantidade de material perdido do bloco e/ou do anel, é medida por meio da perda de massa de cada objeto ou da redução linear do bloco e profundidade do caminho formado no anel. Normalmente a taxa de desgaste é apresentada em parâmetros volumétricos devendo ser convertida utilizando-se densidade ou geometria da amostra para os casos respectivos de perda de massa e redução linear. A Figura 8 apresenta o esquema de um tribômetro do tipo bloco sobre anel.

Figura 8 - Esquema de um tribômetro do tipo bloco sobre anel.



Fonte: ASTM G77.

4.5.4 Métodos Utilizados para o Cálculo de Desgaste Abrasivo

O estudo dos mecanismos de desgaste e da resistência ao desgaste em um sistema tribológico é fundamental para a otimização na escolha dos materiais envolvidos num sistema mecânico de movimentos relativos entre corpos e, também, para a previsão da durabilidade do sistema. Esse estudo é normalmente feito através de ensaios em equipamentos que simulam as condições tribológicas entre os materiais de trabalho. Portanto, o equipamento destinado a simular o sistema deve ser específico para o tipo de mecanismo de desgaste entre os materiais de estudo.

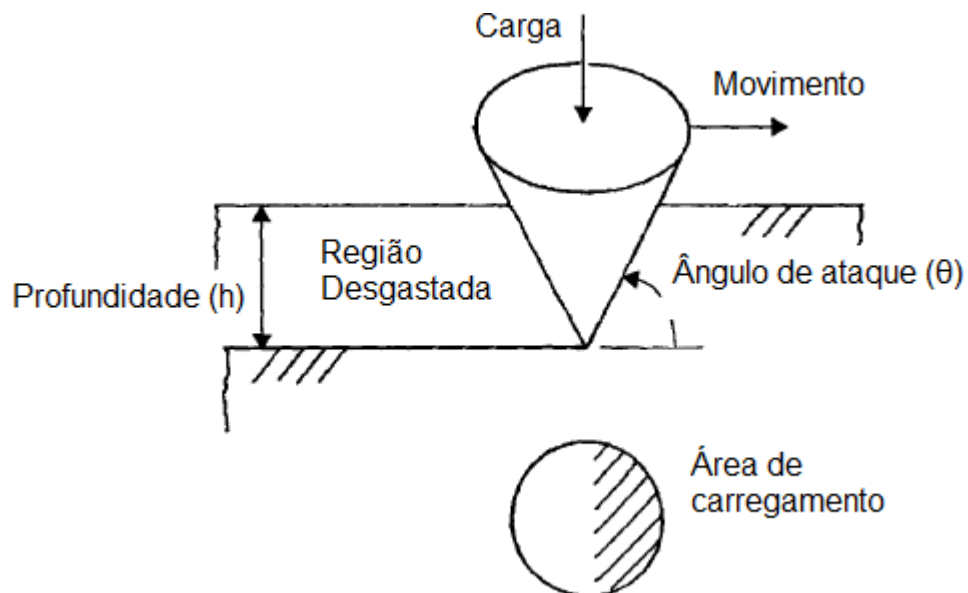
Segundo Williams (1997), um dos ensaios mais comuns para esse tipo de estudo é conhecido como pino sobre disco, onde uma amostra do material no formato cilíndrico é atritada contra um disco abrasivo. Os resultados mostram que o volume de material perdido aumenta proporcionalmente em relação à distância percorrida e em relação à força aplicada sobre o pino. Neste caso, o desgaste pode ser dado pela Equação 1:

$$Volume\ perdido\ (V_p) = \frac{Contante\ (k) \cdot Carga\ (W) \cdot distância\ percorrida\ (l)}{Dureza\ do\ material\ (H)} \quad (1)$$

Onde k é uma constante adimensional que pode ser definida como a probabilidade que uma partícula abrasiva tem de causar desgaste sobre um material. Tipicamente, o valor dessa constante para abrasão entre dois corpos está entre 0,005 e 0,05 e para abrasão entre 3 corpos o valor tende a diminuir para 0,0005.

Basicamente, a taxa de desgaste é analisada por meio de três parâmetros: morfologia da superfície de desgaste, dureza dos corpos envolvidos e força aplicada sobre as partículas ou sobre o substrato. A Figura 9 representa um modelo de desgaste, onde umas das partículas da amostra, com formato cônico, relaciona-se a taxa de desgaste com a dureza da partícula e a carga aplicada no processo (WILLIAMS, 1997).

Figura 9 - Desgaste causado por partícula cônica.



Fonte: Adaptado de WILLIAMS, 1997.

Durante o movimento da partícula abrasiva, ocorre a remoção de certo volume de material da superfície, que varia conforme a distância percorrida pela partícula. A taxa de desgaste (q) pode ser descrita através da Equação 2:

$$q = h^2 \cdot \cot(\theta) \quad (2)$$

onde, com base na Figura 9, a profundidade de penetração (h) pode ser relacionada com a dureza (H) do material e com a força de carregamento (F).

Esta força atua somente na área superficial de contato entre a amostra e a superfície abrasiva, sendo representado na Figura 8 por um semicírculo frontal do cone ou área de carregamento. A força pode então ser descrita pela Equação 3:

$$F = \frac{\pi}{2} \cdot (h \cdot \cot(\theta))^2 \cdot H \quad (3)$$

Relacionando as equações 2 e 3, tem-se que a taxa de desgaste pode ser descrita pela Equação 4:

$$q = \frac{2 \cdot \tan(\theta)}{\pi} \cdot \frac{F}{H} \quad (4)$$

Por fim, Williams (1997) afirma que se houvesse um número n de partículas abrasivas sob a mesma carga, tem-se uma carga total W dado por nxF , e a taxa de desgaste ($Q = nxq$) é dada pela Equação 5:

$$Q = \frac{2 \cdot \tan(\theta)}{\pi} \cdot \frac{W}{H} \quad (5)$$

Entretanto, esse modelo apresenta uma superestimação do desgaste real, já que considera que todo material é removido da superfície, o que de fato não ocorre, uma vez que parte do material que encontra-se no caminho pelo qual o abrasivo irá passar pode ser acumulado sobre as bordas devido a deformações plásticas (WILLIAMS, 1997).

Dentre os trabalhos mais recentes, vem se utilizando medidas de área e de perda de massa para se calcular o desgaste sofrido por um material. Basicamente, a perda de massa é calculada pesando-se a amostra antes e após o ensaio e a taxa com qual o material sofre o desgaste é caracterizada pela razão entre a perda de massa e o tempo de ensaio, carga aplicada ou, assim como será abordado neste trabalho, pela distância percorrida demonstrado na Equação 6 (YE et al., 2010).

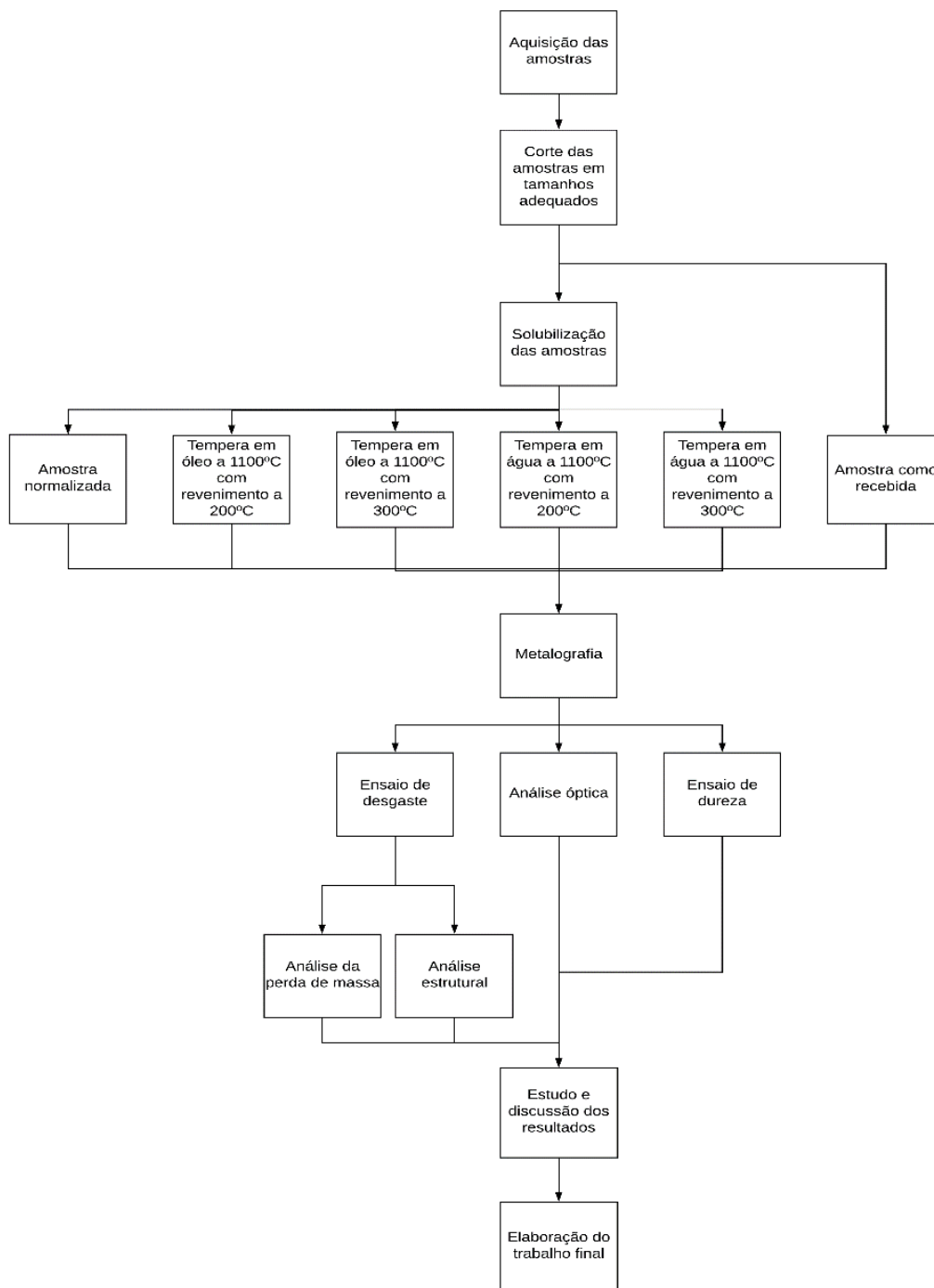
$$\text{Taxa de desgaste} = \frac{\Delta m}{d} \quad (6)$$

onde: Δm é a variação de massa devido ao desgaste sofrido (g) e d é a distância total percorrida (m).

5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

Os tópicos abaixo detalham os procedimentos utilizados durante a preparação dos corpos de prova para o estudo proposto. A Figura 10 ilustra o fluxograma de atividades adotado para esse estudo.

Figura 10 - Fluxograma de procedimentos.



Fonte: Autoria própria.

Para a microscopia, os procedimentos foram seguidos de acordo com a metodologia descrita por Colpaert (2008). Já para o processo de desgaste foram consideradas as situações reais de utilizações da liga AISI 440c, utilizando, para isso, a norma ASTM G77 – *Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test*, que retrata os procedimentos e parâmetros para os ensaios do tipo bloco sobre anel.

5.1 Preparação dos Corpos de Prova

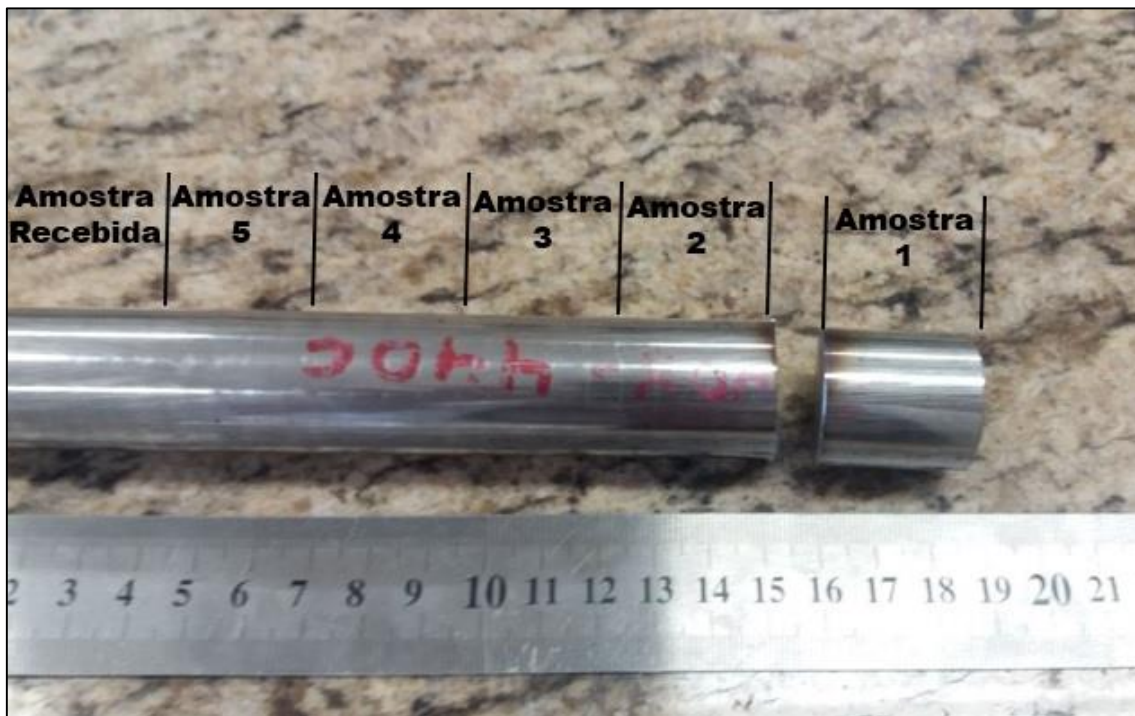
A amostra da liga AISI 440c foi adquirida em uma empresa especializada em comércio de ligas especiais no formato de uma barra de 500 mm de comprimento e diâmetro de 1”, que foi posteriormente seccionada em 6 corpos de prova com aproximadamente 25 mm de comprimento. A composição da liga segundo o laudo, que pode ser encontrado no Anexo I, da empresa pode ser observada na Tabela 3. O dimensionamento da barra e das amostras e a posição onde foi cortada cada amostra da barra podem ser observados na Figura 11.

Tabela 3 - Composição química da liga estudada (% em massa).

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,95	0,43	0,47	16,16	0,06	0,02	0,001

Fonte: Fornecida pela empresa.

Figura 11 - Dimensionamento e posição dos corpos de prova na amostra.



Fonte: Autoria própria.

Foi separado um corpo de prova, com o qual realizou-se a análise da amostra como recebido (recozido pela empresa). Os outros corpos de prova passaram, primeiramente, pelo tratamento de solubilização, onde foi utilizado um forno tipo mufla da marca Jung modelo 1712. Eles foram dispostos no forno e aquecido até 1100°C, mantendo-os nessa temperatura durante 1 hora, sendo posteriormente resfriados ao ar até temperatura ambiente.

Após o tratamento térmico de solubilização, foram selecionados 4 corpos de prova para o processo de têmpera, onde eles retornaram para o forno e foram aquecidos até 1100°C e mantidos nessa temperatura por 1 hora, e, em seguida duas dessas amostras foram resfriados em água e as outras duas restantes foram resfriadas em óleo.

Em seguida ao processo de tempera, foi realizado o tratamento térmico de revenimento para alívio de tensões internas. Neste processo, para cada meio de têmpera realizado (água e óleo), 1 corpo de prova foi revenido a 200°C e o outro a 300°C. Os parâmetros do processo de tratamento térmico realizado em cada amostra podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do processo térmico em cada amostra.

Amostra	Processo
Recebida	Recozido pela empresa
Amostra 1	Normalizada na UTFPR pelo autor
Amostra 2	Temperada em água e revenida a 200°C
Amostra 3	Temperada em óleo e revenida a 200°C
Amostra 4	Temperada em óleo e revenida a 300°C
Amostra 5	Temperada em água e revenida a 300°C

Fonte: Autoria própria.

Após os tratamentos térmicos, os corpos de prova foram submetidos ao processo de lixamento, no qual foram utilizadas lixas d'água de SiC (carbeto de silício) de granulometria 80, 120, 240, 400, 600, 1200 e 1500. Para o polimento foi utilizado uma suspensão de alumina de granulometria de 0,3 µm.

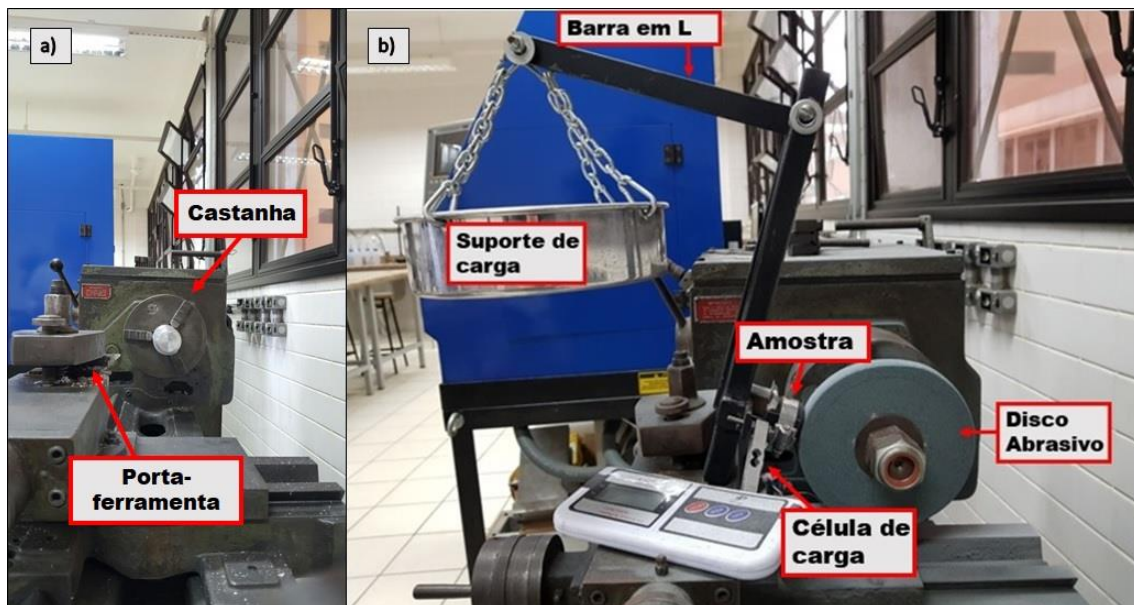
Baseado na norma ASTM E407 – *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, foi realizado ataque químico em todos os corpos de prova utilizando uma solução de 25g de cloreto férrico dissolvidos em 100ml de ácido clorídrico. Após o ataque químico os corpos de prova foram analisados utilizando um microscópio óptico Zeiss Axio Scope A1 equipado com uma câmera digital Zeiss AxioCam ERc 5s. Por fim foram realizados ensaios de dureza, onde utilizou-se um durômetro da marca Insize modelo ISH-RSR150.

5.2 Desenvolvimento do Tribossistema

O ensaio de desgaste foi baseado no modelo bloco sobre anel da norma ASTM G77 - *Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test*, utilizando um dispositivo capaz de prender as amostras e pressioná-las contra um disco abrasivo. Tal adaptação foi possível utilizando um torno mecânico IMOR PRN-520, de modo que o dispositivo (para suporte da amostra a ser desgastada e da carga) foi fixado no porta-ferramentas do torno e o disco abrasivo (utilizado como substrato do desgaste) foi fixado num eixo que, por sua vez, foi preso na castanha do torno (para se ter rotação controlada do disco abrasivo). A Figura 12(a) apresenta essas partes do torno mecânico.

Para a transmissão constante da força da carga para o corpo de prova foi utilizada uma barra em formato de L fixa no dispositivo. Para o controle da carga aplicada foi utilizada uma célula de carga de uma balança Jyaniu modelo B2077 com precisão de 0,05 g fixada à base do dispositivo, por meio da qual eram realizadas medições de carga antes de cada ensaio. A Figura 11(b) apresenta o tribossistema desenvolvido.

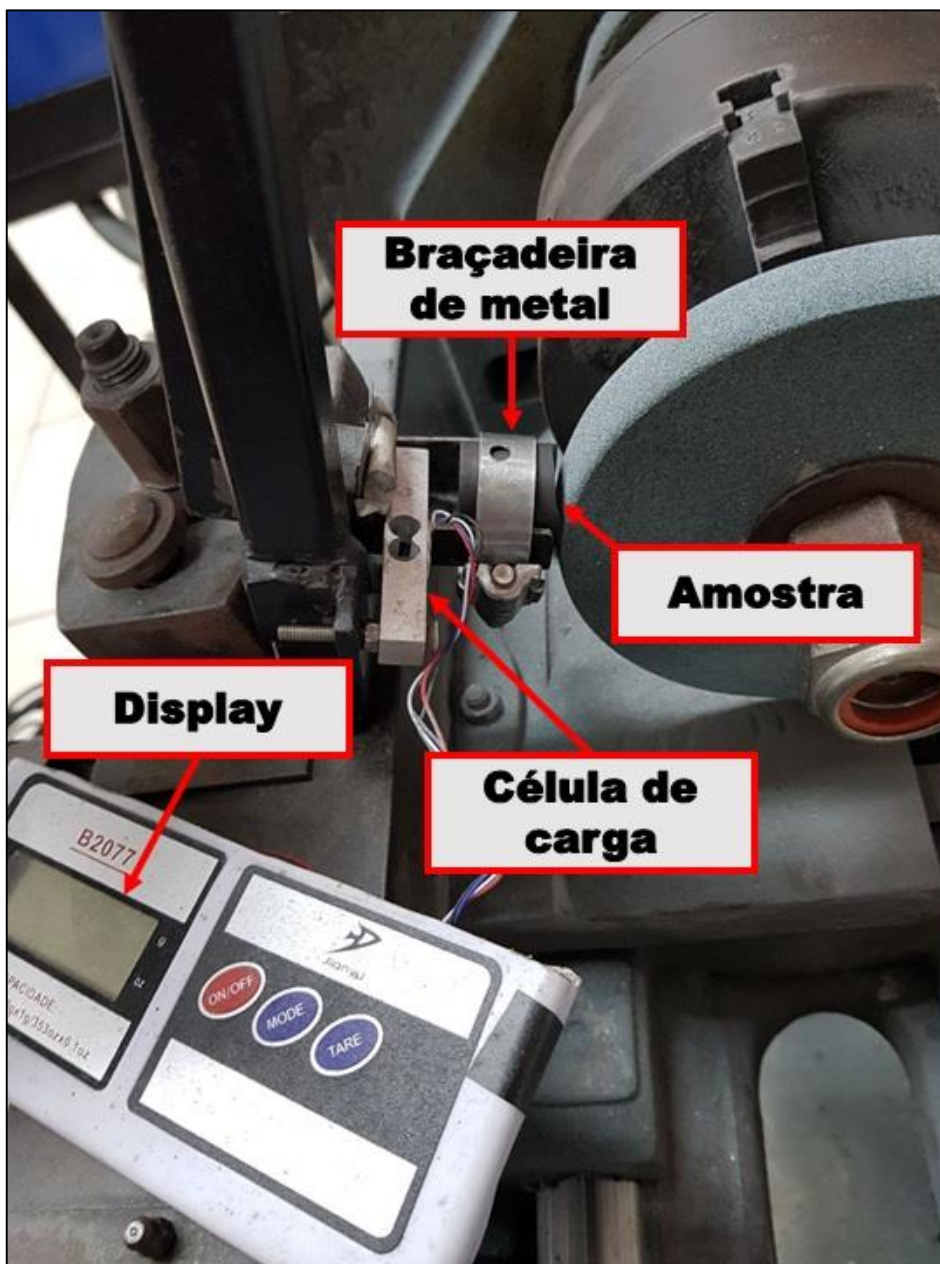
Figura 12 - Torno mecânico (a) antes e (b) após a montagem do tribossistema desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

Após a fixação do dispositivo no torno mecânico, a amostra foi apoiada no trilho e tensionada de maneira a estar em contato com a frente do rebolo, ou seja, de forma transversal ao eixo de rotação. Foi utilizada uma braçadeira de metal para garantir que a amostra não saísse do trilho. A Figura 13 apresenta o tribossistema desenvolvido.

Figura 13 - Partes do tribossistema montado.



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente o equipamento foi testado a fim de analisar a ocorrência de vibrações, resistência mecânica do tribossistema em relação à carga utilizada e, também, a qualidade da superfície abrasiva. Por fim, padronizou-se os ensaios utilizando um rebolo de SiC do tipo RT FE 39C 120 K como substrato abrasivo, carga de 5 N, rotação de 300 RPM com duração de 5 minutos por ensaio, fazendo com que a distância percorrida por ensaio seja de 706,9 metros. Essa padronização foi estabelecida, pois, com os parâmetros adotados, notou-se que o sistema não se aquecia suficiente para alterar a estrutura do material e que as

perdas de massa seriam expressivas o suficiente para se ter o acompanhamento do desgaste em cada amostra.

Para o cálculo da força foi utilizado o Princípio Fundamental da Dinâmica, ou 2ª Lei de Newton, dada pela Equação (7):

$$F = m \cdot a \quad (7)$$

onde: F é a força resultante de todas as forças que atuam no corpo (N); m é a massa do objeto (kg); e a é a aceleração do objeto (m/s^2).

Logo, considerando que a massa apresentada pelo *display* era referente à força peso aplicada na extremidade da barra em L, utilizou-se a aceleração gravitacional, $g = 9,807 \text{ m/s}^2$, para cálculo da força resultante sobre a amostra.

Foram realizados três ensaios para cada corpo de prova por meio dos quais foi calculada a variação de massa e, com isso, obtido a taxa de desgaste pela Equação 6. Para a aferição da massa antes e após dos ensaios, todos os corpos de prova foram pesados em uma balança semi-analítica da marca Even, modelo BL320AB-BI, que apresenta uma precisão de 0,001 g.

Após os ensaios, as pistas (ou caminhos) de desgaste formados foram estudados utilizando o microscópio ótico, a fim de analisar sua morfologia. Tentou-se analisar a superfície de desgaste utilizando um perfilômetro da marca Bruker modelo DektakXT e um rugosímetro modelo Instrutherm modelo RP-200, entretanto não foi possível obter dados confiáveis devido ao formato irregular da pista de desgaste.

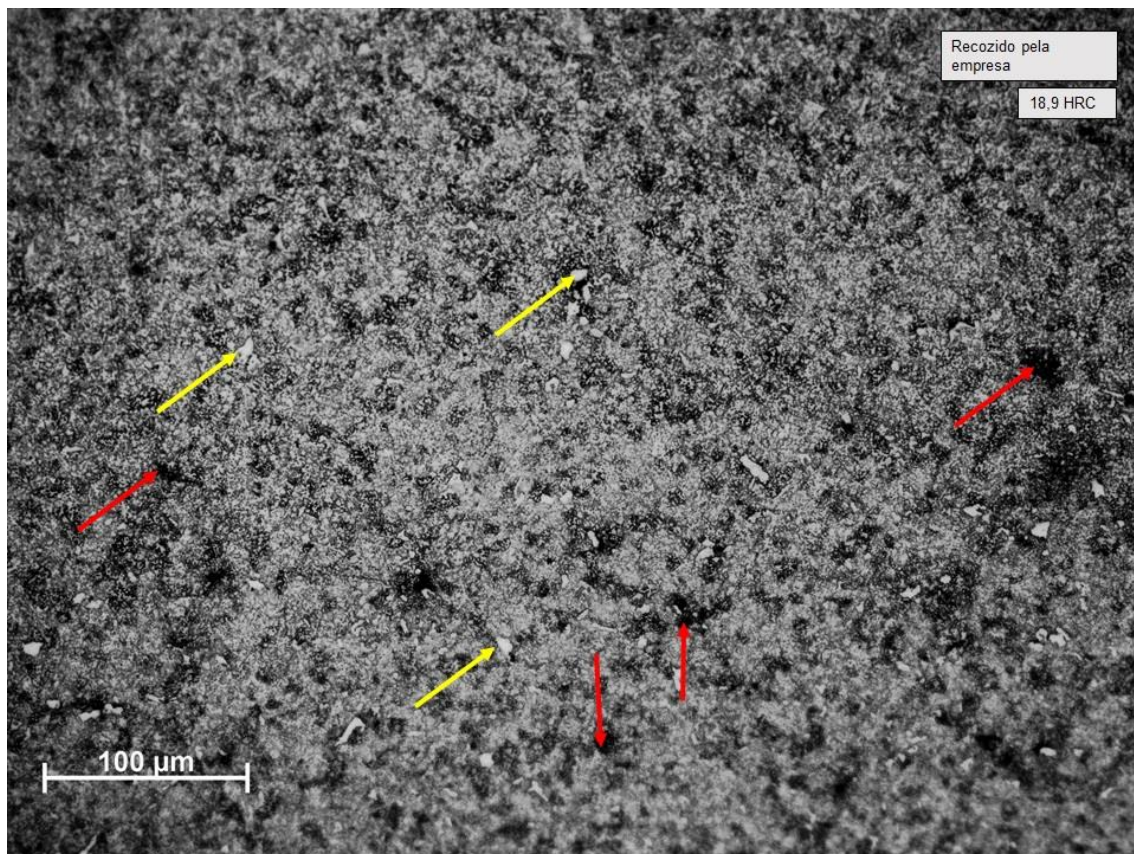
6 Resultados e Discussão

6.1 Análise Microscópica

6.1.1 Amostra Como Recebida

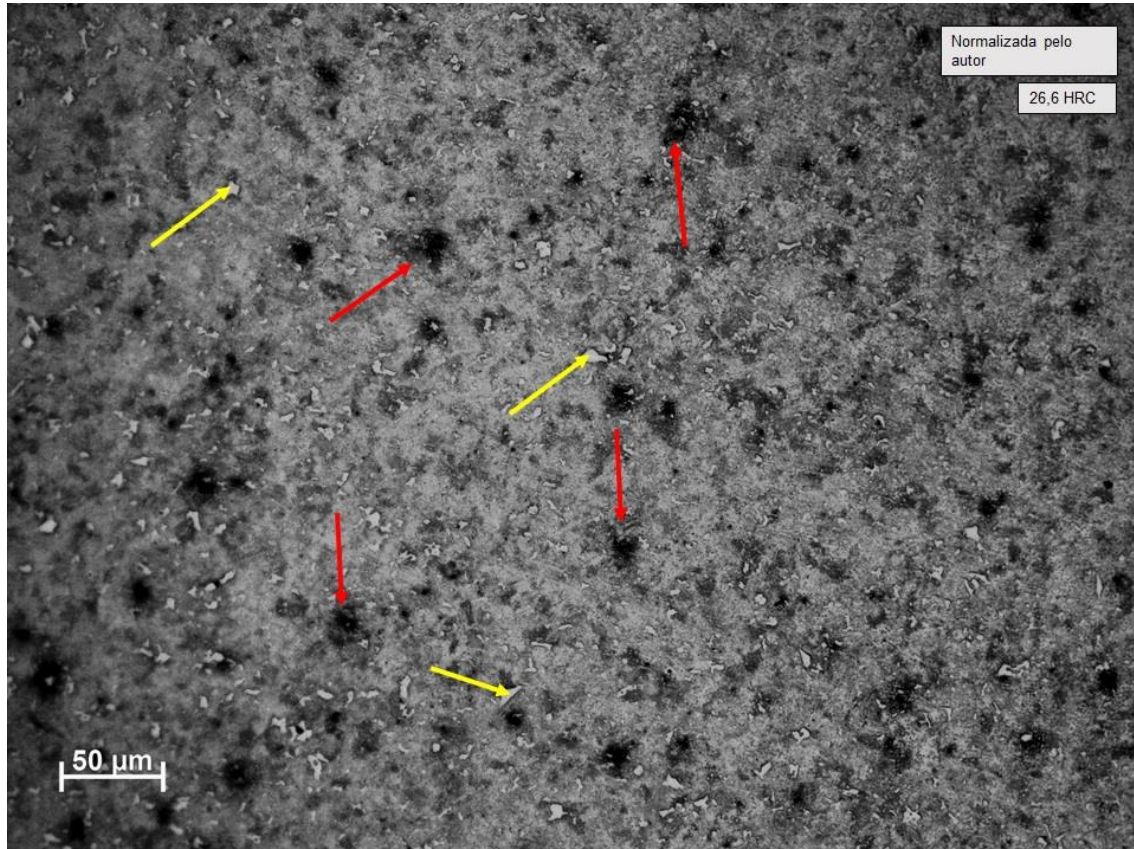
A micrografia da amostra como recebida, Figura 14, mostra que a liga AISI 440c é composta por ferrita e predominância de fase $M_{23}C_6$ (carbonetos globulares). A mesma morfologia pode ser observada na amostra 1, Figura 15, que apresenta grãos pequenos com formação de carbonetos dispersos na matriz (PULI; RAM, 2012). Tal morfologia pode ser explicada pois ambas as amostras passaram por tratamentos térmicos onde a amostra recebe grande energia e tempo (recozimento e normalização), isso permitiu que ocorresse o crescimento dos carbonetos bem como que a austenita retida se transformasse em ferrita.

Figura 14 - Micrografia da amostra como recebida com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.



Fonte: Autorial Própria.

Figura 15 - Micrografia da amostra 1 com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.



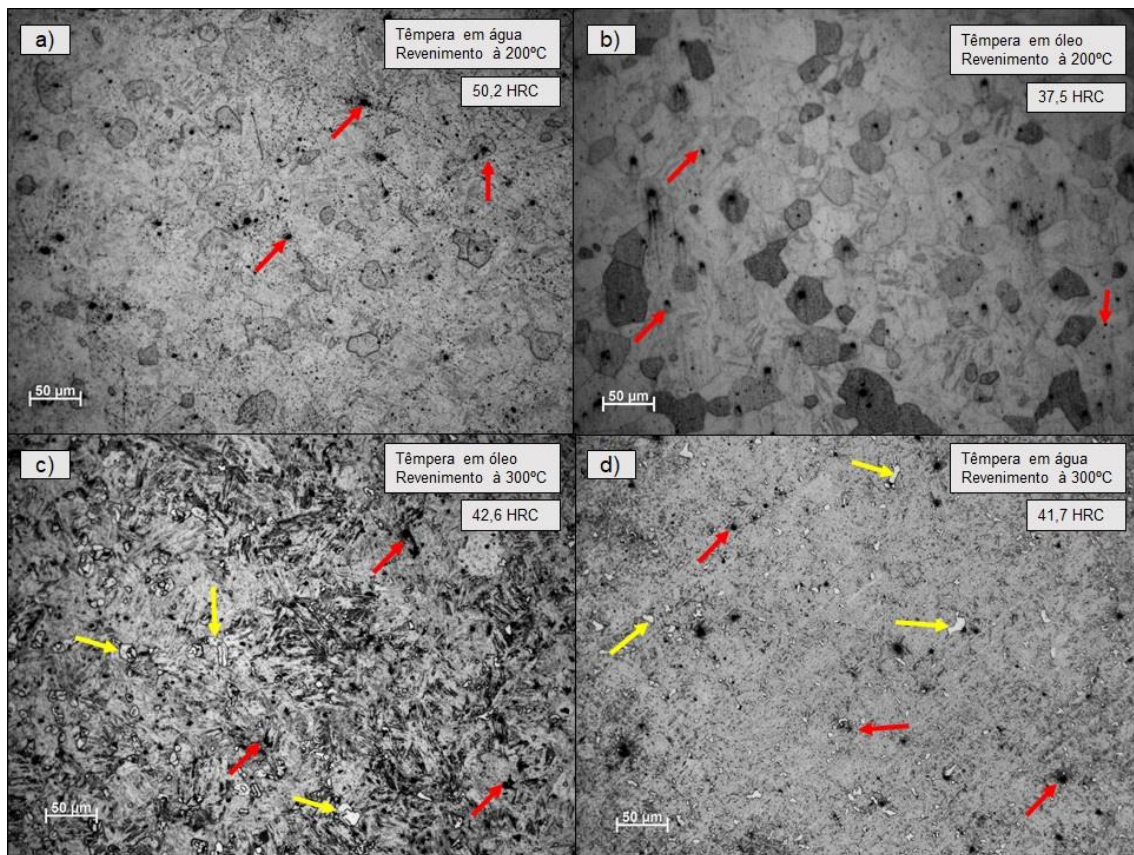
Fonte: Autorial Própria.

Os carbonetos formados apresentam-se de maneira dispersa na matriz, indicando que foram originados da matriz ferrítica supersaturada, devido ao alto teor de carbono na composição da liga (SILVA; MEI, 2006). Entretanto as amostras se diferem em quantidades e tamanhos de carbonetos, assim como ilhas de ferritas devido a diferenças nos tratamentos térmicos.

6.1.2 Amostras Pós Têmpera Seguida de Revenimento

Após os tratamentos térmicos, as amostras apresentaram alterações quanto à microestrutura, diferenciando-se na morfologia nos carbonetos formados, na matriz austeníticas e na formação de martensita. A Figura 16 apresenta as micrografias das amostras 2, 3, 4 e 5.

Figura 16 - Micrografia das amostras (a) 2, (b) 3, (c) 4 e (d) 5 com aumento de 200x. Setas vermelhas indicam carbonetos e as setas amarelas indicam ilhas de ferrita.



Fonte: Autoria Própria.

O aumento de dureza das amostras após os tratamentos térmicos é justificado devido às mudanças estruturais obtidas. O brusco resfriamento aliado à baixa temperatura de revenimento favorece, além da formação de martensita, o aparecimento de carbonetos com morfologia esferoidal (M_7C_3), que apresentam uma maior dureza quando comparados aos carbonetos de morfologia globular, funcionando como barreiras efetivas contra ações de partículas abrasivas (BUCHELY et al., 2005; SANTOS et al., 2015).

Observa-se que, diferente da amostra 1 (somente normalizada), os carbonetos formados por meio da têmpera apresentam a morfologia esferoidal, devido ao rápido resfriamento não proporcionar tempo para o crescimento do carbeto, favorecendo um aumento da resistência mecânica do material, que é refletida na dureza.

Para ligas com concentrações superiores a 0,6% de carbono em sua composição a temperatura onde a transformação da martensita é concluída se

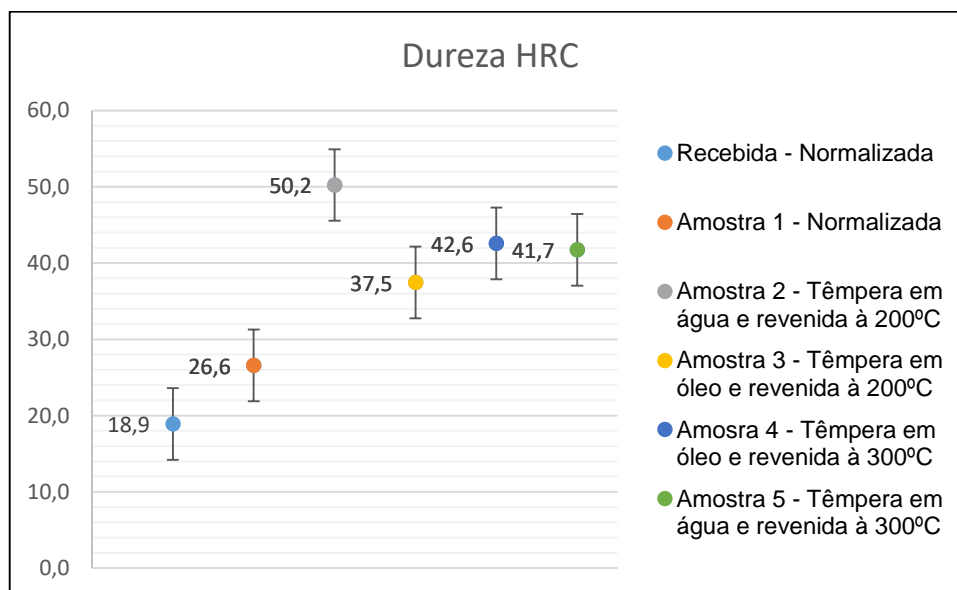
situa abaixo de 0°C, dessa forma, a microestrutura pode continuar apresentando austenita ao fim do tratamento. Esta austenita é comumente chamada de austenita retida e auxilia no aumento da resistência mecânica, pois pode se transformar em martensita devido a deformações (COLPAERT, 2008).

Entretanto, nas amostras 4 e 5 ocorre a presença de ilhas de ferritas, que acabam por diminuir a dureza do material. Pode-se observar que as ilhas de ferritas apresentam uma morfologia côncava, o que indica que a ferrita estava dissolvendo e não crescendo (COLPAERT, 2008).

6.2 Ensaio de Dureza

Os ensaios foram realizados em triplicada, diferenciando a posição do ensaio na amostra, a fim de se obter uma dureza média. A Figura 17 apresenta os resultados médios obtidos.

Figura 17 - Dureza média das amostras após tratamento térmico.



Fonte: Autoria Própria.

Comparando as amostras que passaram pelo processo de têmpera, pode-se notar que a severidade da água como meio de resfriamento implica em uma dureza mais elevada quando comparado com o óleo. A mesma comparação pode ser feita com a temperatura de revenimento.

Apesar da proximidade dos valores nas amostras que passaram pelo processo têmpera seguida de revenimento, a diferença pode ser explicada pela variação na concentração de carbonetos esferoidais e fase martensítica, assim como a presença de ilhas de ferrita.

6.3 Ensaio de Desgaste.

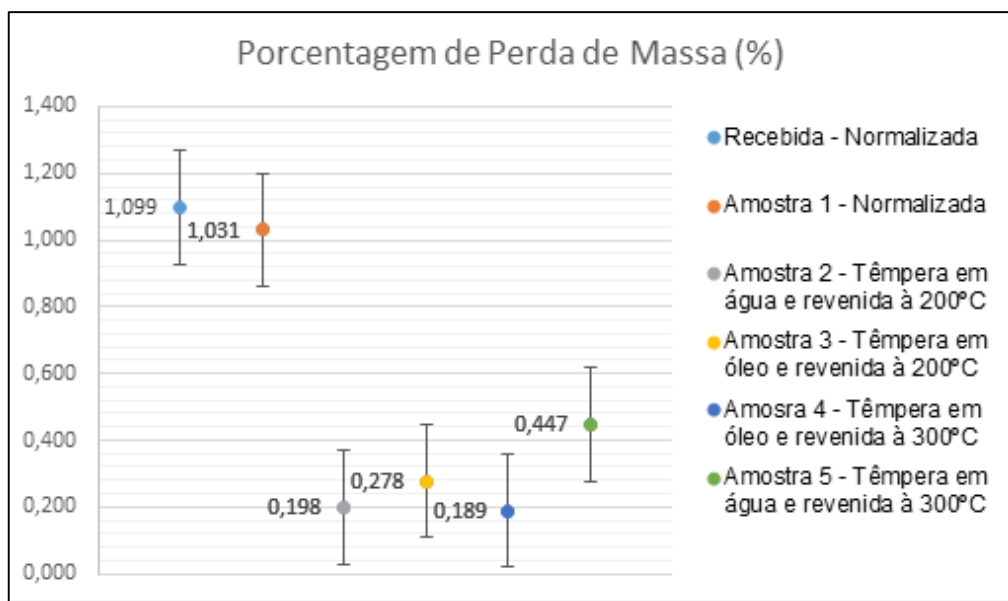
Inicialmente, utilizou-se uma velocidade de 300 RPM para o disco, com um tempo de ensaio de 5 minutos e carga de 5 N. O caminho percorrido pelas amostras foi calculado de acordo com a Equação 8 para o raio máximo do rebolo, 75 mm, tendo uma distância total percorrida de 706,86 m.

$$D = 2. \pi. r. \omega. t \quad (8)$$

Onde: D é a distância percorrida (m), r é o raio do caminho de desgaste (m), ω é a velocidade angular (RPM) e t o tempo (minutos).

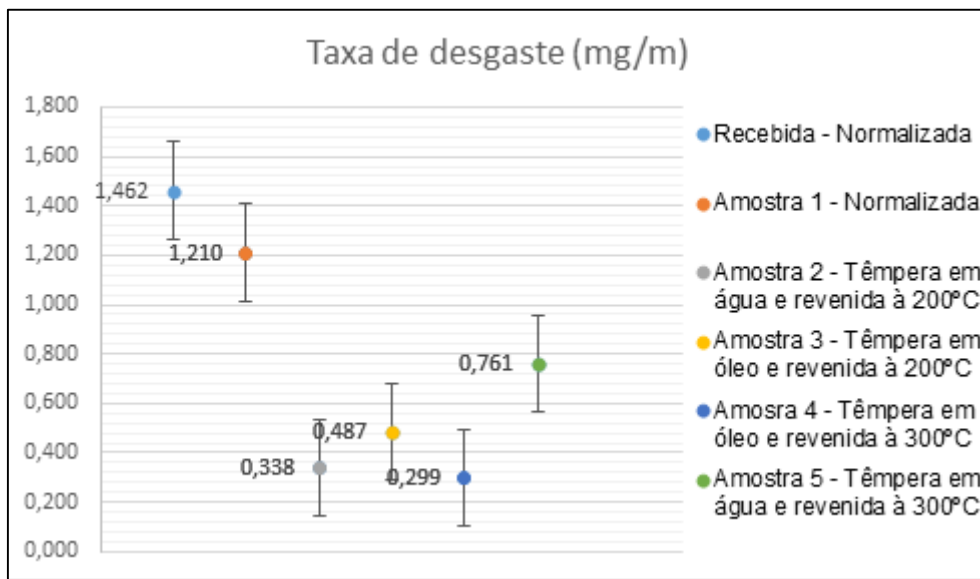
Com os valores de massa coletados antes e após os ensaios, foi possível determinar a perda de massa e a taxa de desgaste médios para cada amostra, apresentadas, respectivamente nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Perda média de massa (%) para cada amostra.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 - Taxa média de desgaste (mg/m) para cada amostra.



Fonte: Autoria Própria.

É possível notar que os valores de taxas de desgaste foram próximos, diferenciando somente a Amostra 1 e a Recebida que não passaram pelo tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento.

Foi obtido, para as amostras temperadas, um desgaste médio de 0,471 mg/m com uma amplitude de 0,462 mg/m. Os resultados mostram-se coerentes com o trabalho de Santos et al. (2015), onde a diferença nos resultados de desgaste é influenciada pela morfologia obtida durante os tratamentos térmicos. A amostra 5 que obteve a maior taxa de desgaste, dentre as temperadas, apresenta a formação de carbonetos em forma de glóbulos que apresentam uma baixa dureza, assim como a formação de ilhas de ferritas, o que acaba elevando o desgaste.

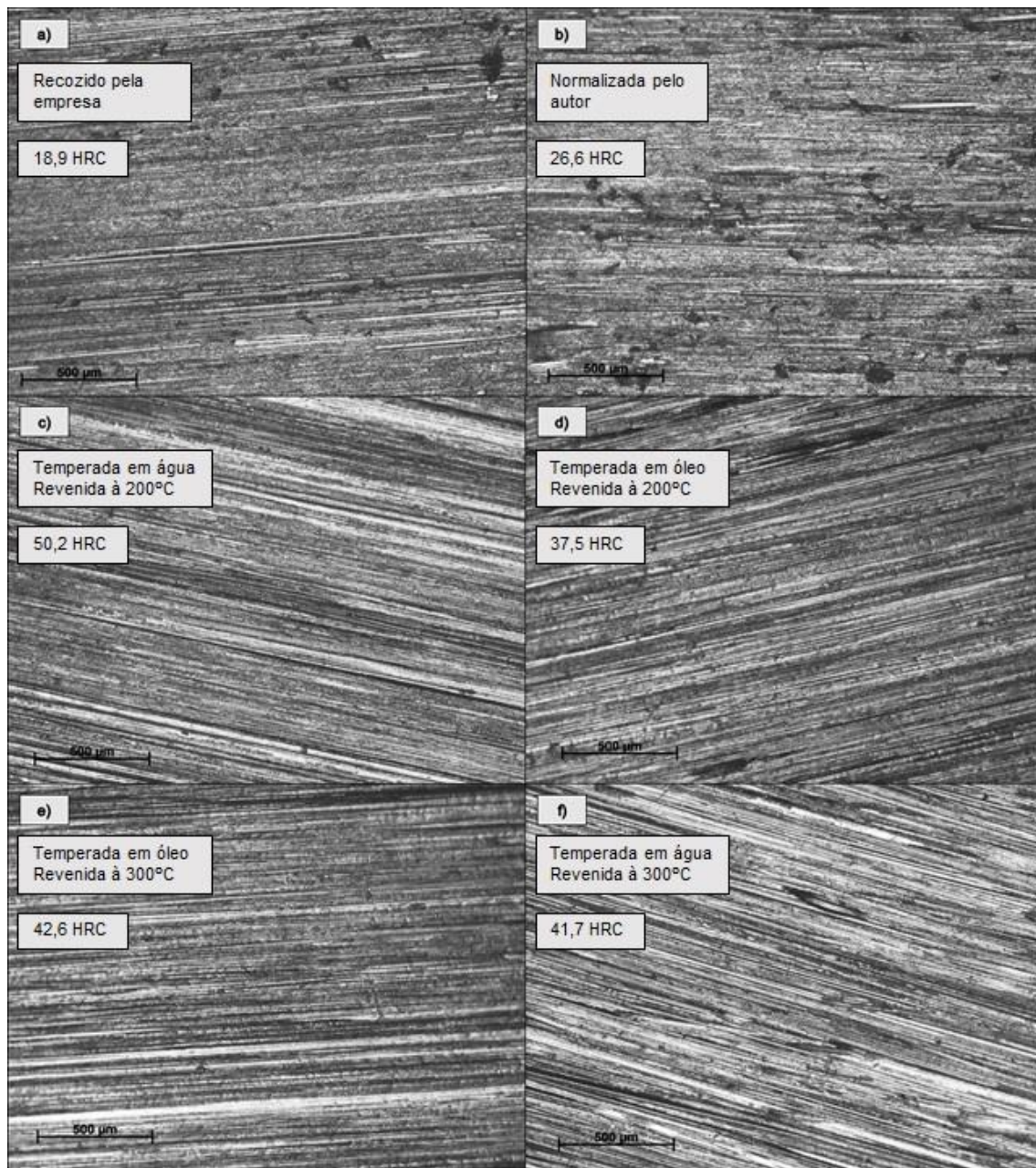
Apesar da proximidade dos valores obtidos para as amostras 2, 3 e 4, a pequena diferença encontrada é dada devida à microestrutura. As três microestruturas apresentam carbonetos na forma esferoidal, entretanto a amostra 3 apresenta grãos maiores e baixa concentração de martensita, o que diminui a resistência mecânica da amostra. A amostra 2, apesar de apresentar baixa concentração de martensita assim como a amostra 3, apresenta grãos menores, o que acaba elevando um pouco a resistência mecânica. Já a amostra 4 apresenta grãos pequenos e grande concentração de martensita, favorecendo

para que tenha a maior resistência mecânica entre as amostras, e com isso a menor taxa de desgaste mesmo apresentando a formação de ilhas de ferrita.

Analisando a amostra como Recebida e amostra 1, também é possível notar uma proximidade nos valores, onde obteve-se uma média de 1,336 mg/m com uma amplitude de 0,252 mg/m. A diferença na taxa de desgaste se dá pelo fato de que ambas as amostras terem matriz ferrítica, a amostra 1 se diferencia da Recebida porá apresentar a formação de carbonetos com morfologia globular, o que favorece a resistência mecânica. Tal diferença morfológica pode ser explicada devido ao tratamento térmico sofrido, onde o recozimento da Recebida favorece uma morfologia favorável ao desgaste.

Por fim, as amostras foram analisadas no microscópio óptico após o desgaste, por meio do qual foram produzidas as micrografias dos caminhos de desgaste (Figura 20), onde há indícios de que o mecanismo de desgaste abrasivo foi preferencialmente de microcorte. Tentou-se realizar uma análise utilizando perfilômetro e um rugosímetro, entretanto não foi possível obter dados devido à morfologia irregular da pista de desgaste.

Figura 20 - Micrografia dos caminhos de desgaste. Amostra (a) como recebida, (b) 1, (c) 2, (d) 3, (e) 4 e (f) 5. Aumento de 50x.



Fonte: Autoria Própria.

7 CONCLUSÃO

O dispositivo desenvolvido neste projeto representou uma possibilidade prática e versátil de estudo tribológico bloco sobre anel. O equipamento apresentou resultados e reprodutibilidade satisfatórios.

O tratamento térmico de têmpera seguido por revenimento é de fundamental importância para a Liga AISI 440c, pois esta é fornecida no estado recozido, com carbonetos de morfologia globular em sua microestrutura, apresentando uma baixa dureza. Entretanto o custo para a realização do tratamento térmico é elevado, e dependendo da aplicação, a dureza alcançada pode ser insignificante caso o substrato de desgaste seja bem menos duro que o material, dessa forma a utilização do material sem têmpera é justificado.

Porém, ao ser tratada termicamente a liga adquiriu uma boa dureza e conseqüente melhora na resistência ao desgaste, prolongando a vida útil do material. Apesar de que nos dados obtidos a amostra submetida à têmpera em óleo seguida de revenimento a 300°C apresenta a menor taxa de desgaste a proximidade dos valores implica o revenimento a 200°C como mais viável, dependendo da aplicação, devido ao menor gasto energético.

A precipitação destes carbonetos potencializou a resistência ao desgaste da liga estudada com forte dependência na concentração, assim como na morfologia encontrada nos carbonetos.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os conhecimentos adquiridos através deste Trabalho de Conclusão de Curso podem ser ampliados para uma análise com total adequação do tribossistema à norma ASTM G77.

Desta forma, sugere-se uma análise criteriosa dos parâmetros de desgaste, como a carga aplicada, materiais utilizados no tribossistema, velocidade de ensaio, volume e área desgastada e rugosidade das pistas de desgaste com instrumentos adequados. Ainda, a substituição do rebolo de SiC por outro substrato abrasivo (adequado para aplicação em estudo), acerto da inclinação no contato amostra/substrato, inserção de um termopar no dispositivo para medição de temperatura, podem contribuir significativamente para as informações e dados retirados de um ensaio tribológico realizado pelo dispositivo.

Por fim, para melhor estudo da liga, sugere-se avaliação da microestrutura antes e após o ensaio de desgaste por técnicas de DRX, MEV e rugosidade, com intuito de caracterizar a estrutura dos carbonetos formados, quantificar a formação de carboneto com as variações nos tratamentos térmicos e caracterizar o mecanismo de desgaste presente, assim como um estudo sobre efeito de tratamentos térmicos superficiais e os efeitos dos tratamentos térmicos na resistência a corrosão da liga.

REFERÊNCIAS

- ASTM. G77-17 - Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear. V. 5, p. 1-6, 2017.
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2ª ed. Columbus: Jhon Wiley & Sons, Ltda, 2013.
- BUCHELY, M. F. et al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. **Wear**, v. 259, n. 1–6, p. 52–61, 2005.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: KTC - Livros Técnicos e Científicos, 2013.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 2ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.
- INTERLLOY. **440c Martensitic Stainless Steel**. Disponível em: <<http://www.interlloy.com.au/our-products/stainless-steel/440c-martensitic-stainless-steel-bar/>>. Acesso em: 7 jan. 2018.
- KANG, A. S.; CHEEMA, G. S.; SINGLA, S. Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 1442–1451, 2014.
- LO, K. H.; CHENG, F. T.; MAN, H. C. Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance. **Surface and Coatings Technology**, v. 173, n. 1, p. 96–104, 2003.
- LUDLUM, A. **Technical Data: Blue Sheet**. Pittsburg: [s.n.].
- NEALE, M. J. **Tribology Handbook**. 2ª ed. Farmham: Elsevier Butterworth-Heinemann, 1995.
- PULI, R.; RAM, G. D. J. Surface & Coatings Technology Microstructures and properties of friction surfaced coatings in AISI 440C martensitic stainless steel. **Surface & Coatings Technology**, v. 207, p. 310–318, 2012.

SANTOS, W. C. et al. Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. **Revista Materia**, v. 20, n. 2, p. 304–315, 2015.

SILVA, A. LUIZ V. DA C. E; MEI, P. R. **Aços e Ligas ESpeciais**. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

THAMIZHMANII, S. et al. Surface roughness analyses on hard martensitic stainless steel by turning. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 26, n. 2, p. 139–142, 2008.

WAMG, Q. J. et al. **Encyclopedia of Tribology** Technology & Engineering, , 2013. (Nota técnica).

WILLIAMS, J. A. The Laboratory Simulation of Abrasive Wear. **Tribotest Jornal**, n. March, p. 267–306, 1997.

YE, J. et al. Wear characteristics of a new type austenitic stainless steel. **Journal of Materials Science**, v. 45, p. 701–705, 2010.

ANEXO I

Laudo de certificado de qualidade recebido na compra da amostra.

Cliente/Customer:			
Endereço/Address:		Cidade/City:	
CNPJ:	Inscr. Estad.:	Estado/State: SP	

DADOS DO MATERIAL / MATERIAL DESCRIPTION			
Código/Code:	020101030012455 - BARRA RED. INOX AISI 440C 25,40 MM	Pedido/Order:	047359
Lote/Lot:	9990021661	Corrida/Heat:	4828815
Bitola/Dimension:	25.4	Emissão/Issue:	/ /
Fabricante/Manufacture:		Entrada/Entry:	/ /
Fornecedor/Supplier:		R.R.M.:	IMPORT-SAP
Certificado/Certificate:		Data/Date:	05/12/2017
Nota Fiscal/Invoice:		U/Unit:	KG

COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS (%)													
C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Ti	Cu	Co	W
0,2500	0,4300	0,4700	0,0240	0,0010	0,0090	0,0000	16,1600	0,0400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Norma/Specification:
 STAINLESS STEEL 304/304L; 316/316L; - NORMS ASTM A276 / A182
 STAINLESS STEEL 310; 321; 316T; 329/329A; 329S; 329S1; 410; 420; 440; 416; 431 - NORM ASTM A276
 STAINLESS STEEL 630/6300G - NORMS ASTM A564 / NORSOK M630 / NACE MR0175/150 15156-3
 STAINLESS STEEL 303 - NORM ASTM A582

ENSAIOS MECÂNICOS-TECNOLÓGICOS / TECHNOLOGICAL-MECHANICAL TEST		
	Ensaio/TESTS	Resultado/RESULTS
Ensaio de Tração - TENSILE TEST	Limite de Resistência/Tensile Strength (TS)	
	% Alongamento/Elongation (AL%)	0,00
	Limite de Escoamento/Yield Strength (YS)	
	% Estricção/Area Reduction (Z%)	0,00
Ensaio de Dureza HARDNESS TEST		236HB
Tratamento Térmico(*) HEAT TREATMENT		RECOZIDO

(*) TRATAMENTO TÉRMICO
 ANNEALED = RECOZIDO
 SOLUTION ANNEALED = SOLUBILIZADO
 SPHEROIDIZED ANNEALING = RECOZIDO GLOBULIZADO
 QUENCHED AND TEMPERED = TEMPERADO E REVENIDO
 SOL.ANN+PRECIPIT. HARDENED = SOLUBILIZADO + ENVELHECIDO
 SOLUTION ANNEALED+COLD WORKED = SOLUBILIZADO + TREFILADO

Notes:

Teste ultrassom de acordo com a norma EN 10308 - classe 3 = produto aprovado
 Ultrasonic test according to EN 10308 - class 3 = approved

São Paulo, 5 de dezembro de 2017