

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Automotiva

Influência do Tratamento Criogênico no Desgaste Abrasivo do Aço SAE 4340

Autor: João Gabriel da Silva Souza
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz Menezes

Brasília, DF
2018



João Gabriel da Silva Souza

Influência do Tratamento Criogênico no Desgaste Abrasivo do Aço SAE 4340

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz Menezes

Coorientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

Brasília, DF

2018

João Gabriel da Silva Souza
Influência do Tratamento Criogênico no Desgaste Abrasivo do Aço SAE 4340/
João Gabriel da Silva Souza. – Brasília, DF, 2018-
85 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz Menezes

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. Aço. 2. Desgaste. I. Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz Menezes. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Influência do Tratamento Criogênico no Desgaste Abrasivo do Aço SAE 4340

CDU 621.78

João Gabriel da Silva Souza

Influência do Tratamento Criogênico no Desgaste Abrasivo do Aço SAE 4340

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 13 de Julho de 2018:

Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz
Menezes
Orientador

Prof. Dr. Rhander Viana
Convidado 1

Prof. Msc. Danilo dos Santos Oliveira
Convidado 2

Brasília, DF
2018

*Dedico a realização desta obra ao Senhor, pois à ele seja dada toda honra e toda glória.
E à todas as pessoas que ao longo desse período estiveram ao meu lado, me apoiando e
me auxiliando. Em especial duas pessoas que infelizmente não fizeram parte diretamente,
mas foram fundamentais, meu pai, Gilberto Batista de Souza e a minha avó, Isabel
Joana de Sousa, pois sempre acreditaram em mim.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado sabedoria, toda honra e toda glória ao teu nome. E também agradeço à todas as pessoas que me apoiaram e me direcionaram para a conclusão deste trabalho.

Ainda que eu ande pelo vale das sombras da morte, não temeria mal algum, pois tu estás comigo. Salmo 23 - 4

*E esta é a confiança que temos nele:
que se pedirmos alguma coisa, segundo
a sua vontade ele nos houve."
(Bíblia Sagrada, 2 João, 5 - 14)*

Resumo

O aço SAE 4340 é muito utilizado na indústria automotiva e aeronáutica em aplicações mecânicas que estão expostas às condições severas, como eixos, engrenagens e trem de pouso. O atrito gerado pelo contato relativo desses componentes com outras superfícies acarreta no surgimento do desgaste. Se o desgaste é provocado por partículas duras (fixa ou móvel), é chamado de desgaste abrasivo. Este trabalho realizou ensaios de desgaste abrasivo do tipo Bloco sobre anel (*block on ring*), definido pela norma ASMT 77-98, para estudar a influência do tratamento criogênico no desgaste abrasivo do aço SAE 4340. Utilizou-se oito amostras que foram divididas em quatro grupos, como recebido (CR), tratamento convencional de têmpera com revenimento (TC), Tratamento Criogênico Profundo imerso por 15h (TCP15h) e Tratamento Criogênico Profundo imerso por 24h (TCP24h). Para a realização do ensaio foram escolhidos parâmetros de tempo, em segundos, (130, 260, 390, 520, 650), carga (5 N e 10 N), abrasivo (Rebolo de metal duro com granulometria 120) e rotação (35 rpm). Os resultados obtidos pelo ensaio de desgaste abrasivo mostraram que as amostras do grupo TCP15h apresentaram menor quantidade de volume perdido, para todos os tempos de ensaio. Enquanto que as amostras do grupo TCP24h apresentaram maior facilidade na transição dos micromecanismos de desgaste. Apesar da literatura encontrar incertezas à respeito da influência do tratamento criogênico, os resultados obtidos a partir deste trabalho mostraram que quando o tratamento é feito em tempo de imersão abaixo de 24 horas torna-se mais eficiente.

Palavras - chave: Tratamento criogênico, desgaste, desgaste abrasivo

Abstract

SAE 4340 steel is widely used in the automotive industry and aeronautics in mechanical applications that are exposed to conditions such as gears and landing gear. The friction was given to marriage in relation to other components with the name of entails in the appearance of wear. If the wear is knocked over by hard blades, it is called abrasive wear. This study was the use of the abrasive block of SAE 4340 steel. It was used 8 samples This was divided in four groups, the acuped process, the essential treatment with revreation (TC) and Treatment Cryogenic Profund on by 15h (TCP15h) and Deep Cryogenic Treatment immersed for 24h (TCP24h). (130, 260, 390, 520, 650), load (5N and 10N), abrasive (120 grit carbide grinding wheel) and rotation (35 rpm). The results obtained by the abrasive wear test were shown as samples from the TCP15h group, the smallest amount of volume lost, for all test times. The samples of group TCP24h can be recovered in the transition of wear micromechanisms. Although the literature finds uncertainties regarding the influence of the cryogenic treatment, the results obtained from this work are when the treatment is done in immersion time below 24 hours becomes more efficient.

Key-words: Cryogenic treatment, wear, abrasive wear.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo de um aço SAE 4340, com curvas de resfriamento superpostas, de modo a indicar as várias microestruturas que podem ser obtidas.(CHIAVERINI, 1988).	25
Figura 2 – Efeito da temperatura de revenimento sobre a dureza e a resistência ao choque (expressa em valores Charpy) de um aço 1045 temperado. (CHIAVERINI, 1988).	29
Figura 3 – Representação esquemática de um tribossistema. (ASHIUCHI, 2015).	32
Figura 4 – Categorias de desgaste e seus mecanismos. (OLIVEIRA, 2008).	34
Figura 5 – Desgaste abrasivo. (BARBOSA, 2013).	35
Figura 6 – Desgaste abrasivo à dois e três corpos. (SCHIMITEL; SANTOS, 2017).	37
Figura 7 – Desgaste por riscamento (esquerda) e Desgaste por rolamento (direita) (ANICÉZIO, 2015).	37
Figura 8 – Micromecanismos de Desgaste (GÓMEZ, 2014).	38
Figura 9 – Equipamento para ensaio de desgaste-microabrasivo. A) Esfera livre e B) Esfera fixa.(ANICÉZIO, 2015).	40
Figura 10 – Ensaio de desgaste pino sobre disco (<i>pin on disk</i>).	41
Figura 11 – Ensaio de desgaste bloco sobre anel (<i>block on ring</i>).	41
Figura 12 – Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal.(RIBEIRO, 2004).	42
Figura 13 – Relação entre a taxa de desgaste e a razão H_a/H_s . (ANICÉZIO, 2015).	43
Figura 14 – Eficiência do abrasivo em função da dureza e da tenacidade.(ASHIUCHI, 2015).	44
Figura 15 – Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo. (RIBEIRO, 2004).	45
Figura 16 – Amostra fixada na morsa.	48
Figura 17 – Amostra antes do lixamento (embaixo) e após o lixamento (acima).	49
Figura 18 – Faceamento das amostras.	50
Figura 19 – Sistema de ensaio de desgaste.	52
Figura 20 – Rebolo de metal duro ART FE 39C120 K da NORTON SAINT – GO-BAIN.	53
Figura 21 – Cratera de desgaste.	55
Figura 22 – Simulação da cratera de desgaste.	56
Figura 23 – Comparação das curvas de volume perdido por distância de deslizamento para amostras do tipo A1.	59
Figura 24 – Comparação das curvas de volume perdido por distância de deslizamento para amostras do tipo A2.	61

Figura 25 – Comparação da variação do coeficiente de desgaste entre amostras do tipo A1 e A2.	64
Figura 26 – Comportamento da taxa de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A1 e A2.	67
Figura 27 – Variação do coeficiente de atrito no intervalo de 130 s para amostras do tipo A1.	70
Figura 28 – Variação do coeficiente de atrito no intervalo de 130 s para amostras do tipo A2.	71
Figura 29 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo CR.	73
Figura 30 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TC.	73
Figura 31 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TCP15h.	74
Figura 32 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TCP24h.	74
Figura 33 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo CR.	75
Figura 34 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TC.	75
Figura 35 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TCP15h.	76
Figura 36 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TCP24h.	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação do Aços.	22
Tabela 2 – Elementos de composição que influenciam nos aços ARBL e suas respectivas faixas em %.	23
Tabela 3 – Composição química do aço SAE 4340 em (%).	24
Tabela 4 – Efeito da velocidade de resfriamento e do resfriamento interrompido sobre a quantidade de austenita retida.	27
Tabela 5 – Dimensões das amostras.	50
Tabela 6 – Características do Rebolo.	53
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste abrasivo Bloco sobre anel (<i>Block on ring</i>).	54
Tabela 8 – Dureza HRC das amostras	57
Tabela 9 – Relação de dureza Ha/Hs para amostras do tipo A1 e A2.	58
Tabela 10 – Volume removido de cada amostra do tipo A2 para todos os grupos pelo tempo de ensaio e a distância de deslizamento.	58
Tabela 11 – Volume removido de cada amostra do tipo A2 para todos os grupos pelo tempo de ensaio e a distância de deslizamento.	60
Tabela 12 – Valor médio do coeficiente de desgaste em [mm ³ /Nm] para amostras do tipo A1 de cada tempo de ensaio em [s].	62
Tabela 13 – Valor médio do coeficiente de desgaste em [mm ³ /Nm] para amostras do tipo A2 de cada tempo de ensaio em [s].	62
Tabela 14 – Valorr médio da taxa de desgaste em [mm ³ /m] para amostras do tipo A1 em cada tempo [s] de ensaio.	65
Tabela 15 – Valor médio da taxa de desgaste em [mm ³ /m] para amostras do tipo A2 em cada tempo [s] de ensaio.	66
Tabela 16 – Variação entre o valor mínimo e máximo do coeficiente de atrito para amostras do tipo A1 e A2 de cada grupo.	69

Lista de abreviaturas e siglas

4340	Aço com elemento de liga (Cromo, Molibdênio e Níquel) e 0,4% de carbono
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ARBL	Alta resistência e Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
A1	Amostra tipo 1 (ensaio com carga de 5N)
A2	Amostra tipo 2 (ensaio com carga de 10N)
CR	Como Recebido
CFC	Cúbica de Face Centrada
Dma	Diâmetro maior
Dme	Diâmetro menor
LabCMat	Laboratório de Caracterização de Materiais
LPF	Laboratório de Processo de Fabricação
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TTT	Tempo-temperatura-transformação
TC	Tratamento Convencional
Subzero	Tratamento Criogênico (Temperaturas de 0°C a -80°C)
TCP	Tratamento Criogênico Profundo (Temperaturas de -80°C a -196°C)
TCP15h	Tratamento Criogênico feito em 15h
TCP24h	Tratamento Criogênico feito em 24h

Lista de símbolos

Al_2O_3	Alumina
M_3C	Carboneto
$\text{Fe}_2\text{3C}$	Carboneto de ferro tipo épsilon
SiC	Carboneto de silício
C	Carbono
w	Carga normal
°C	Celsius
Fe_3C	Cementita
k	Coefficiente de desgaste dimensional
Cr	Cromo
CO_2	Dióxido de carbono
L	Distância de deslizamento
S	Distância de deslizamento
Ha	Dureza da amostra
Hs	Dureza corpo de prova
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
S	Enxofre
FA	Força de atrito
FN	Força normal
P	Fósforo
Hz	Hertz
Mn	Manganês

kg	Massa
ρ	Massa específica
m	Metro
m ³	Metro cúbico
μm	10 ⁻⁶ metro
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	10 ⁻³ metro
mm ³	Milímetros cúbico
Mo	Molibdênio
N	Newton
Nm	Newton-metro
Ni	Níquel
Nb	Nióbio
N ₂ L	Nitrogênio Líquido
MPa	10 ⁶ Pascal
π	Pi
%	Porcentagem
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
kPa	10 ³ Pascal
R	Raio da esfera
rpm	Rotação por minuto
s	Segundos
Si	Silício
Ms	Temperatura de início de transformação
Mf	Temperatura de fim de transformação

Q	Taxa de desgaste
Ti	Titânio
W	Tungstênio
V	Vanádio
V	Volume removido

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Aços	21
2.1.1	Aços alta resistência e baixo teor de liga	22
2.1.2	Aço SAE 4340	24
2.1.2.1	Propriedade Microestrutural e morfologia do aço SAE 4340	24
2.2	Tratamento térmico dos aços	26
2.2.1	Tratamento de têmpera para os aços	28
2.2.2	Tratamento de revenimento	29
2.3	Tratamento criogênico	30
2.4	Tribologia	32
2.5	Desgaste	33
2.5.1	Desgaste abrasivo	35
2.5.1.1	Tipos de desgaste abrasivo	35
2.5.1.2	Mecanismos de desgaste abrasivo	36
2.5.1.3	Desgaste microabrasivo	39
2.5.1.4	Ensaio de desgaste abrasivo (microabrasivo)	39
2.5.1.5	Fatores que influenciam no desgaste abrasivo (microabrasivo)	41
2.5.1.6	Parâmetros do desgaste abrasivo (microabrasivo)	45
2.5.1.7	Equação de Archard para o desgaste abrasivo	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Materiais utilizados	48
3.2	Preparação das amostras para o ensaio de desgaste abrasivo	48
3.3	Calibração sistema tribológico	50
3.4	Parâmetros de ensaio de desgaste abrasivo	52
3.5	Ensaio de desgaste abrasivo (<i>Block on ring</i>)	54
3.6	Ensaio de dureza	55
3.7	Medição do volume removido	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Análise do ensaio de dureza	57

4.2	Análise do volume Removido	58
4.3	Análise do coeficiente de desgaste da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito	62
4.3.1	Coeficiente de desgaste	62
4.3.2	Taxa de desgaste	65
4.3.3	Coeficiente de atrito	68
4.4	Identificação e análise dos micromecanismos de desgaste abrasivo	72
5	CONCLUSÃO	78
5.1	Conclusões Específicas	78
5.1.1	Dureza das amostras	78
5.1.2	Influência da carga e do tratamento criogênico no ensaio de desgaste abrasivo	78
5.1.3	Micromecanismos de desgaste	79
5.2	Conclusão Geral	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82

1 Introdução

Um dos principais requisitos na obtenção de um veículo pelo consumidor é a segurança. A indústria automobilística tem encontrado soluções de segurança no desenvolvimento de seus produtos através de novos métodos de pesquisas tecnológicas na área de materiais. O aço foi um desses materiais, para que o mesmo pudesse se adequar ao perfil atual de aplicações estruturais e mecânicas (COLETTA, 2000). O aço é a liga metálica com maior número de aplicações devido à suas características microestruturais. Essas características quando combinadas proporcionam melhor desempenho e podem variar de acordo com o elemento encontrado em sua composição (REBECHI, 2011).

O aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 4340 classificado como Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) contém em sua composição o níquel, cromo e molibdênio, responsáveis por proporcionar elevada resistência à corrosão, soldabilidade, capacidade de forjamento e ductibilidade. Além de 0,4% de carbono, ou seja, aço médio carbono. É muito utilizado para aplicações de projetos mecânicos e estruturais para a indústria automobilística, aeronáutica e de equipamentos. Podem ser utilizados na fabricação de eixos, engrenagens, virabrequins, junções para foguetes e trens de pouso (CARDOSO, 2011). Sendo este um aço de alta temperabilidade com excelentes propriedades mecânicas, utilizado em condições rigorosas de atuação que exige maior resistência do componente (BARROS, 2013).

Algumas condições severas de atuação de componentes quando há o contato entre superfícies, provoca o surgimento do atrito. As características do atrito são de profunda importância para a prática de engenharia. Handbook (1992) destaca que 10% do consumo do petróleo nos EUA é usado simplesmente para superar o atrito. Todas as variáveis que estão envolvidas na existência do atrito formam um sistema chamado de sistema tribológico. O estudo sobre a tribologia iniciou-se em 1960 com o principal intuito de resolver os problemas industriais como o atrito e o desgaste através da utilização de novos materiais, novas tecnologias de superfície, melhores lubrificantes e métodos de lubrificação.

A relação entre o atrito e o desgaste influenciou a evolução dos estudos tribológicos, mais especificamente no desgaste dos materiais. O desgaste é causado pelo contato relativo entre superfície de materiais metálicos e não metálicos. Os tipos de desgaste mais atuantes na indústria são o desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste erosivo e desgaste por fretting (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Será mostrado uma breve contextualização á respeito do desgaste abrasivo, pois este trabalho irá apresentar um estudo sobre a influencia do tratamento criogênico no desgaste abrasivo no aço SAE 4340.

O desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é colocado em contato

contra partículas de um material com dureza igual ou maior. Qualquer material, mesmo que seja macio, pode causar desgaste abrasivo se partículas duras estiverem presente. Um exemplo que prova essa afirmação são os cortadores e os trituradores de cana de açúcar, pois uma pequena fração de sílica encontra-se presente nas fibras vegetais [Stachowiak e Batchelor \(2013\)](#). O desgaste abrasivo ocorre de forma mais comum em pás de máquinas de terraplanagem, eixos, fresamento de minerais, equipamentos agrícolas, exaustores de partículas finas e engrenagens. A grande dificuldade de realizar o controle do desgaste abrasivo é a falta de informação precisa à respeito dos micromecanismos de desgaste.

Um dos métodos mais comuns para reduzir a ação do desgaste abrasivo é o aumento da dureza e da resistência ao desgaste dos materiais utilizados. Os tratamentos termomecânicos são utilizados para alterar a microestrutura dos aços aprimorando propriedades mecânicas como a resistência ao desgaste, dureza, ductibilidade, tenacidade, usinabilidade entre outros. Os tratamentos são feitos sob condições de aquecimento e resfriamento, controlando a temperatura de aquecimento e a taxa de resfriamento, dependendo da propriedade que se deseja obter ([REBECHI, 2011](#)). O tratamento térmico mais comum na indústria é o têmpera seguido de revenimento. A têmpera tem a capacidade de aumentar a dureza do material e o revenimento reduz a fragilidade provocada pela microestrutura da martensita e a ocorrência de tensões residuais.

Estudos avançados encontraram outra forma de aumentar as características de dureza e resistência ao desgaste com o surgimento do Tratamento Criogênico Profundo (TCP). O interesse de aprimorar as pesquisas sobre o TCP foi buscar entender como o mesmo poderia influenciar na capacidade de resistência dos aços ferramenta. Contudo, esse tipo de tratamento, caracterizado pela exposição à temperaturas abaixo de 0°C, ainda não possui uma respostas exata para outros tipos de aços devido sua complexidade comparado com os tratamentos convencionais. Os principais efeitos que foram constatados além do acréscimo da resistência ao desgaste foram o da dissipação térmica, o aprimoramento da estabilidade dimensional e o alívio de tensões residuais ([ASHIUCHI, 2015](#)).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do tratamento criogênico profundo no aço SAE 4340 via ensaios de desgaste abrasivo, tendo como referência os tratamentos térmicos convencionais de têmpera e revenido.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar ensaios de desgaste abrasivo em amostras do aço SAE 4340 sem tratamento.

2. Realizar ensaios de desgaste abrasivo em amostras do aço SAE 4340 tratadas com têmpera e revenimento.
3. Realizar ensaios de desgaste abrasivo em amostras do aço SAE 4340 tratadas com têmpera, tratamento criogênico profundo por 15 horas e depois revenido.
4. Realizar ensaios de desgaste abrasivo em amostras do aço SAE 4340 tratadas com tempera, tratamento criogênico profundo por 24 horas e depois revenido.
5. Comparar os resultados obtidos para amostras tratadas e não tratadas com o Tratamento Criogênico Profundo (TCP) e analisar a influência deste tratamento no desgaste abrasivo.

2 Referencial Teórico

2.1 Aços

De acordo com [CCBA \(2017\)](#), o aço é a liga metálica mais versátil e mais importante devido a sua variedade de tipos e formas advinda das exigências que o mercado impõe. Nos últimos 20 anos foram desenvolvidos 75% dos aços existentes. Utilizado em diferentes aplicações na indústria, em projetos mecânicos e estruturais. Suas aplicações variam de acordo com o seu tipo de liga e da porcentagem de carbono em sua estrutura ([SEVALE, 2014](#)). Os aços doces, possuem ótima ductibilidade e são utilizados na fabricação de para-lamas de automóveis e portas de geladeira, aços duros possuem boa tenacidade e são usados na fabricação de engrenagens e tratores. E alguns destes podem ter boas características elétricas e magnéticas ([VLACK, 1970](#)).

A classificação dos aços acontece da seguinte forma:

- Aços de baixo carbono – Contém até 0,25% de carbono, obtendo em sua microestrutura as características das fases ferrita e perlita. Nessas fases o aço possui mais ductibilidade ou maleabilidade tornando-se de fácil conformação.
- Aços de médio carbono – Contém entre 0,25% – 0,50% de carbono, é o mais utilizado na indústria, de acordo com a sua capacidade de acordar várias características, dureza, tenacidade, temperabilidade. Tais características podem ser aprimoradas através do tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento e assim empregado em diversas aplicações, automobilísticas, aeronáutica, naval entre outras.
- Aços de alto carbono - Contém acima de 0,5% de carbono, possui característica de ter dureza e resistência ao desgaste mais elevado, pois possui maior porcentagem de carbono. Usado na fabricação de engrenagens, virabrequins entre outros que recebem atrito severo.

De acordo com a AISI – *American Iron and Steel Institute* e a SAE – *Society Automotive Engineers*, órgãos responsáveis pela classificação dos aços, os aços de baixa liga da família SAE 41XX, possuem em sua composição, o cromo, molibdênio e o níquel. Suas características mecânicas podem ser elevadas através de tratamento térmicos, como a têmpera seguida de revenimento. O limite de escoamento pode variar entre 410 MPa – 965 MPa, atingindo também elevado valor de resistência à tração ([SILVA, 2012](#)). A tabela 1 abaixo, apresenta a classificação dos aços de acordo com a porcentagem de elemento de liga contida no mesmo.

Tabela 1 – Classificação do Aço.

AISI-SAE	UNS	TIPOS DE AÇO
10XX	G10XXX	Aços – carbono
11XX	G11XXX	Aços de usinagem fácil, com alto S
12XX	G12XXX	Aços de usinagem fácil, com altos P e S
15XX	G15XXX	Aços-Mn com mangânes acima de 1, 00%
13XX	G13XXX	Aços-Mn com 1, 75% de Mn médio
40XX	G40XXX	Aços-Mo com 0, 25% de Mo médio
41XX	G41XXX	Aços-Cr-Mo com 0, 40% a 1, 10% de Cr e 0, 08% a 0, 35% de Mo
43XX	G43XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1, 65% a 2, 00% de Ni e 0, 40% a 0, 90% de Cr e 0, 20% a 0, 30% de Mo
46XX	G46XXX	Aços-Ni-Mo com 0, 70% a 2, 00% de Ni e 0, 15% a 0, 30% de Mo
47XX	G47XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1, 05% de Ni, 0, 45% de Cr e 0, 20% de Mo
48XX	G48XXX	Aços-Ni-Mo com 3, 25% a 3, 75% de Ni e 0, 20% a 0, 30% de Mo
51XX	G51XXX	Aços-Cr com 0, 70% a 1, 10% de Cr
E51100	G51986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1, 00% de Cr
E52100	G52986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1, 45% de Cr
61XX	G61XXX	Aços-Cr-V com 0, 60% a 0, 95% de Cr e 0, 10% ou 0, 15% de V min.
86XX	G86XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0, 55% de Ni, 0, 50% de Cr e 0, 20% de Mo
87XX	G87XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0, 55% de Ni, 0, 50% de Cr e 0, 25% de Mo
88XX	G88XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0, 55% de Ni, 0, 50% de Cr e 0, 30% a 0, 40% de Mo
9260	G92XXX	Aços-Si com 1, 80% a 2, 20% de Si
50BXX	G50XXX	Aços-Cr com 0, 20% a 0, 60% de Cr e 0, 0005% a 0, 003% de boro
51B60	G51601	Aços-Cr com 0, 80% de Cr e 0, 0005% a 0, 003% de boro
81B45	G81451	Aços-Ni-Cr-Mo com 0, 30% de Ni, 0, 45% de Cr, 0, 12% de Mo e 0, 0005% a 0, 003% de boro
94BXX	G94XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0, 45% de Ni, 0, 40% de Cr, 0, 12% de Mo e 0, 0005% a 0, 003% de boro

Fonte: Adaptado de (CHIAVERINI, 1988).

A introdução de outros elementos de liga nos aços-carbono é feita quando se deseja obter diversas características. O aumento da resistência é obtido através da adição de no máximo 5% de todos os elemento de liga. Abaixo é listado algumas propriedades obtidas.

- Aumentar a dureza e resistência mecânica.
- Conferir resistência uniforme em toda seção de peças com grandes dimensões.
- Reduzir o peso.
- Resistência à corrosão.
- Resistência ao calor.
- Resistência ao desgaste.
- Aumentar a capacidade de corte.
- Melhorar propriedades elétricas e magnéticas.

2.1.1 Aços alta resistência e baixo teor de liga

Desenvolver projetos mecânicos e estruturais que exigem alta resistência, impulsionou os projetistas a utilizarem materiais com características de elevada resistência mecânica, entretanto evitando os materiais mais pesados (CHIAVERINI, 1988). Aços de

Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), possuem baixo teor de liga, contudo possuem a característica de ter alto limite de resistência. Com o auxílio de tratamentos termomecânicos sua microestrutura é alterada, aprimorando a tenacidade e a ductibilidade (CARDOSO, 2011). A utilização de aços ARBL é uma grande tendência da indústria em aplicações estruturais quando se deseja:

- Aumentar a resistência mecânica permitindo acréscimo de carga da estrutura, empregando seções mais leves.
- Melhorar a resistência à corrosão.
- Melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga.
- Aumentar o limite de resistência à tração, sem perda da ductibilidade.

Os aços ARBL podem ser aplicados em estruturas fixas de edifícios, pontes, reservatórios e em indústrias automobilísticas, ferroviária e aeronáutica. A tabela 2 abaixo apresenta os elementos que influenciam nos aços ARBL, com suas respectivas faixas em %.

Tabela 2 – Elementos de composição que influenciam nos aços ARBL e suas respectivas faixas em %.

ELEMENTOS DE COMPOSIÇÃO	FAIXA EM (%)
CARBONO	0,28 – 0,6
FÓSFORO	0,01 – 0,12
SILÍCIO	0,01 – 0,9
MANGANÊS	0,35 – 1,6
COBRE	0 – 1,25
CROMO	0 – 1,8
NÍQUEL	0 – 5,25
MOLIBDÊNIO	0 – 0,65
ZIRCÔNIO	0 – 0,12
ALUMÍNIO	0 – 0,20
ENXOFRE	0 – 0,03
TITÂNIO	0 – 0,05
BORO	0 – 0,005
NÍÓBIO	0 – 0,12

Fonte: Adaptado de (CHIAVERINI, 1988).

Os aços ARBL podem ser classificados em:

1. Aços estruturais perlíticos com limite de escoamento entre 275 a 345 MPa.
2. Aços carbono temperado e revenidos com limite de escoamento entre 290 a 690 MPa.
3. Aços de baixo teor em liga, temperados e revenidos com limite de escoamento entre 550 a 760 MPa.

4. Aços microligados, combinado a partir de micro-adições de determinados elementos de liga (Vanádio ou Nióbio) e alto limite de escoamento. Adquiridos através de condições controladas de laminação e forjamento, sem necessidade de tratamento térmico para o aumento de suas propriedades (CHIAVERINI, 1988).

2.1.2 Aço SAE 4340

Usado comercialmente desde 1955 e com grande aplicação na indústria aeroespacial e automobilística. O aço SAE 4340 é um aço ARBL sendo aplicado em situações de trabalho mais rígidas, desde elementos de fixação à componentes de máquina (SOUZA, 2008).

O aço SAE 4340 adequa diferentes características. Alta resistência mecânica, boa ductibilidade e moderada tenacidade. Muito utilizado para aplicações onde tem-se a atuação de esforços cíclicos. Pode obter resistência de 1900MPa quando tratado na faixa de temperatura de 200°C - 230°C (SOUZA, 2008). A dureza obtida depende do controle da temperatura e do tempo de revenimento (ANAZAWA et al., 2012).

A tabela 3 abaixo, apresenta os valores em (%) dos elementos que fazem parte da composição química do aço SAE 4340.

Tabela 3 – Composição química do aço SAE 4340 em (%).

Composição	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
(%)	0,39	0,001	0,01	0,2	0,6	0,8	1,8	0,2

Fonte: Adaptado de (ABDALLA et al., 2010).

O aço SAE 4340 é utilizado em virabrequins para aviões, tratores, componentes estruturais como eixos para turbina, trem de pouso, rotores integrados a turbina a vapor, luvas e árvores universais para laminadores, engrenagens e pinhões.

2.1.2.1 Propriedade Microestrutural e morfologia do aço SAE 4340

Estruturas multifásicas, permitem ao aço obter combinações microestruturais, como boa resistência mecânica e ductibilidade. Quanto maior for o percentual de cada fase, maior será a influência de suas características. Pois ao provocarem alterações na microestrutura modificam as propriedades mecânicas (SANT, 2010). Os tratamentos térmicos são utilizados para transformar as fases do material e assim aprimorar as propriedades mecânicas. Dependem do tempo e da velocidade de aquecimento e resfriamento, para a obtenção da microestrutura desejada. As transformações de fase podem ser congruentes ou incongruentes, ou seja quando não se tem alteração na composição, no caso congruente. Ou quando pelo menos uma fase irá sofrer alteração em sua composição, para

a situação incongruente (CALLISTER, 1999). A figura 1 abaixo, apresenta o diagrama Transformação-Tempo-Temperatura (TTT), que mostra as curvas de início e término da transformação austenítica por resfriamento contínuo do aço SAE 4340, de acordo com a variação de temperatura e tempo.

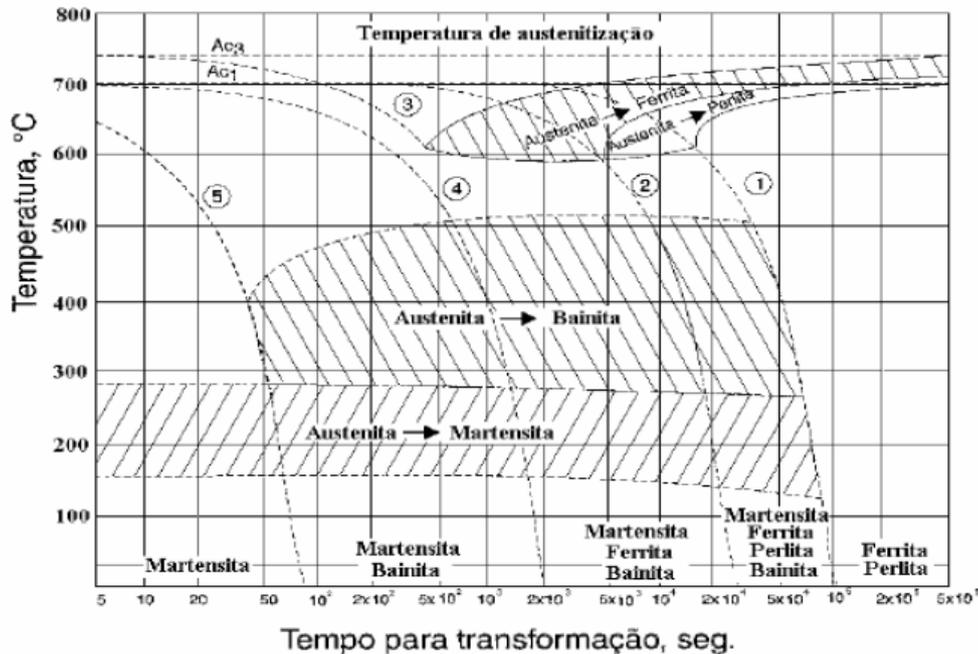


Figura 1 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo de um aço SAE 4340, com curvas de resfriamento superpostas, de modo a indicar as várias microestruturas que podem ser obtidas. (CHIAVERINI, 1988).

A curva 1 – As curvas de resfriamento entre a curva 1 e 2 produzindo ferrita, perlita, bainita e martensita.

A curva 2 – As curvas com velocidade entre as curvas 2 e 3 que produz ferrita, bainita e martensita.

A curva 3 – As curvas com velocidade de resfriamento entre as curvas 3 e 4 produzindo ferrita, bainita e martensita.

A curva 4 – As curvas com velocidade de resfriamento de resfriamento entre as curvas 5 e 4 passam pela área da bainita, portanto as velocidades de resfriamento, dentro desta faixa, farão um percentual de austenita se transformar em bainita, e o restante se transforma em martensita.

A curva 5 – Curva que limita a menor velocidade de resfriamento em que se obtém somente martensita, chamada de velocidade crítica de resfriamento. Curvas com velocidade de resfriamento menores que a curva 1, produzirão somente ferrita e perlita.

O aço SAE 4340 é um aço baixa-liga que tem em sua composição o níquel, cromo e

o molibdênio. Esses elementos possibilitam ao aço ser tratado termicamente modificando suas propriedades, combinando resistência e ductibilidade (SEVALE, 2014).

2.2 Tratamento térmico dos aços

É o método de aprimoramento das propriedades mecânicas através do processo de aquecimento e resfriamento. São feitos em condições controladas de temperatura de aquecimento, temperatura de resfriamento, velocidade de resfriamento, atmosfera e tempo. Altera a microestrutura e o tamanho do grão, influenciando no comportamento dos aços (BARROS, 2013). Os principais fatores que influenciam no tratamento térmico são:

- Aquecimento – Este é realizado acima de (730°C) para que o aço torne-se homogêneo (austenitização completa). A partir desta fase, poderá sofrer outras transformações, que irão ser influenciadas através da velocidade que o aço é resfriado.
- Tempo de permanência à temperatura de aquecimento – O tempo que o aço permanece em determinada temperatura é imprescindível para ter uma temperatura homogênea ao longo de sua seção.
- Velocidade de Resfriamento – Dentre todos os fatores, é o mais importante. Através da velocidade de resfriamento pode-se obter a estrutura desejada e sua respectiva propriedade mecânica. Transformações isotérmicas nos aços são utilizadas para poder observar as mudanças de fases que acontecem ao elevar a sua temperatura e depois resfriá-lo de forma brusca ou lenta. Considerando também, o tempo que permanece em cada temperatura (VLACK, 1970). O diagrama TTT mostra que as reações são lentas tanto em temperaturas relativamente baixas como em temperaturas próximas a de transformação. O teor de carbono e os elementos de ligas podem afetar a posição de início e fim das transformações e também a posição das curvas isotérmicas, retardando a transformação (CHIAVERINI, 1988). Ao fazer o resfriamento rápido, obtém-se a martensita, entretanto ela não é transformada completamente e uma certa quantidade de austenita fica retida. Elementos de liga tendem a estabilizar a austenita retida, aumentando-a à quaisquer níveis de carbono. A velocidade de resfriamento é um dos fatores que influenciam na estabilização da austenita (CHIAVERINI, 1988). A tabela 4 abaixo, apresenta os valores de austenita retida em (%), para resfriamento em água, óleo e banho de sal.

Tabela 4 – Efeito da velocidade de resfriamento e do resfriamento interrompido sobre a quantidade de austenita retida.

Tratamento	Austenita retida em (%)
Resfriamento em água à 20°C	5,8
Resfriamento em óleo à 20°C	7
Resfriamento em óleo à 49°C ; Resfriamento ao ar à 20°C	9
Resfriamento em óleo à 121°C; Resfriamento ao ar à 20°C	9,5
Resfriamento em banho de sal à 232°C; Resfriamento ao ar à 20°C	10,6
Resfriamento em banho de sal à 232°C; Resfriamento na água à 20°C	6,1

Fonte: Adaptado de ([CHIAVERINI, 1988](#)).

De acordo com a tabela 4, pode-se observar que o resfriamento em água é mais eficiente do que em óleo e em banho de sal, pois obtém-se através dele, menor quantidade de austenita retida.

Os tratamentos térmicos de aços e ligas podem ser feitos desde temperaturas de austenitização de 1280°C até temperaturas abaixo de 0°C (Subzero e TCP). Quando se atinge a microestrutura desejada, alcança propriedades mecânicas mais adequadas para determinado tipo de aplicação. O tratamento mais comum é a têmpera. Ocorre pela temperatura de austenitização e ao ser resfriado brucamente atinge elevada dureza. Seguida pelo revenimento, atribuindo ao material a propriedade de ductibilidade ([REBECHI, 2011](#)). Aços com médio teor de carbono que não possuem elementos de liga, apresentam baixa temperabilidade. Para obter resultado satisfatório no tratamento térmico, este deve ser feito com taxas de resfriamento muito rápidas. No caso do aço SAE 4340, os elementos de Cromo, Níquel e Molibdênio, melhoram essa capacidade ([SEVALE, 2014](#)). De acordo com [Rebechi \(2011\)](#), a utilização do tratamento térmico é importante para atingir as seguintes características:

- Aumento ou diminuição da dureza
- Aumento da resistência mecânica
- Melhora da ductibilidade
- Melhora da usinabilidade
- Melhora a resistência ao desgaste
- Melhora as propriedades de corte
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas
- Melhora a resistência à corrosão
- Melhora a resistência ao calor

Ao se utilizar o tratamento térmico, algumas propriedades são melhoradas, entretanto outras sofrem prejuízo. Para obter as características desejadas sem reduzir outras propriedades é necessário utilizar o tratamento ideal para aplicação que se deseja (SEVALE, 2014). Este trabalho aborda os tratamentos térmicos convencionais mais utilizados no aço SAE 4340, como a têmpera e o revenimento. E também será tratado sobre o tratamento criogênico, que se divide em: Subzero e TCP.

2.2.1 Tratamento de têmpera para os aços

O tratamento de têmpera no aço é feito em uma temperatura de aproximadamente 800°C. É necessário que o aço permaneça um período de tempo de no mínimo 15 minutos (SOUSA, 2014). Essa faixa de temperatura é conhecido como temperatura de austenitização, pois é nela que se forma a microestrutura da austenita - Cúbica de Face Centrada - (CFC). Depois o aço é resfriado de forma brusca, ou seja, ele é temperado. E então, apresenta a microestrutura da martensita (ECHEVERRI; ANDERSON, 2012). Para que o aço adquira essa microestrutura, é necessário que ele atinja a temperatura M_s – Temperatura de início de transformação, chegando até a temperatura M_f – Temperatura de fim de transformação. temperatura na qual a austenita foi transformada em martensita. Quanto menor for a temperatura M_s , a variação de volume durante a transformação será maior e assim maior será as tensões resultantes por deformação (ECHEVERRI; ANDERSON, 2012).

Existe uma relação entre o teor de carbono, com austenita retida e as temperaturas M_s e M_f . A temperatura M_f é reduzida à temperatura abaixo da temperatura ambiente quando o seu teor de carbono é 0,7%. Ou seja, existe uma quantidade de austenita retida que não foi transformada em martensita (ECHEVERRI; ANDERSON, 2012).

O tratamento de têmpera tem como resultado para as propriedades mecânicas, características como:

- Aumento do limite de resistência à tração do aço
- Aumento da dureza
- Redução da ductibilidade
- Redução da tenacidade
- Surgimento de tensões internas

A elevada dureza dos aços temperados e as tensões internas provenientes da têmpera podem ser reduzidas com o tratamento de revenimento. Reaquecendo o aço a uma faixa de temperatura determinada (CHIAVERINI, 1988).

2.2.2 Tratamento de revenimento

O tratamento de revenimento geralmente é feito após a têmpera para que seja aprimorada as propriedades que foram reduzidas com o endurecimento excessivo. Tenacidade, ductibilidade, redução de tensões residuais são as propriedades modificadas com o revenimento, além de diminuir a fragilidade causada pela elevada dureza (SEVALE, 2014). De acordo com o aumento da temperatura de revenimento, a dureza do aço diminui e a tenacidade aumenta.

No gráfico da figura 2, pode-se observar valores de dureza e resistência ao choque para um aço 1045 temperado com temperaturas de revenimento entre 0°C e 700°C. A partir da temperatura de 300°C tem-se um aumento considerável na resistência ao choque, enquanto a dureza diminui exponencialmente.

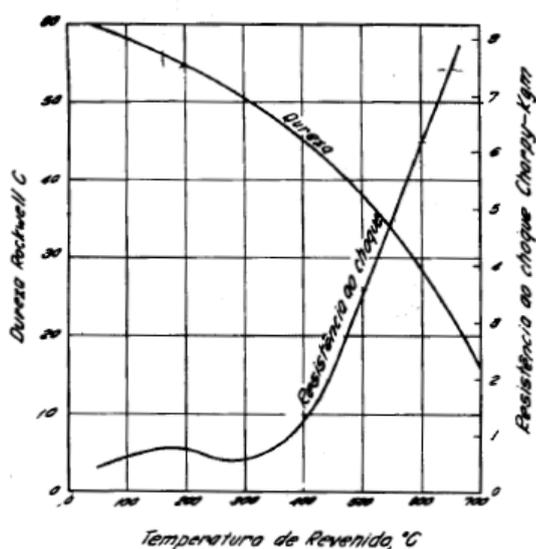


Figura 2 – Efeito da temperatura de revenimento sobre a dureza e a resistência ao choque (expressa em valores Charpy) de um aço 1045 temperado. (CHIAVERINI, 1988).

As transformações da microestrutura e mudança das propriedades acontecem conforme a mudança de temperatura do revenido e são classificadas em estágios.

- Entre 25°C e 100°C, ocorre segregação e uma redistribuição do carbono em direção a discordância. Essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza, fenômeno predominante em aços de alto carbono.
- Entre 100°C e 250°C, chamada de primeiro estágio do revenimento. Ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula Fe_23C , e reticulado hexagonal. Este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor de liga a dureza Rockwell C pode cair até chegar a 60.

- Entre 200°C a 300°C, às vezes chamado de segundo estágio do revenido ocorre transformação de austenita retida em bainita. A transformação ocorre somente em aços-carbono de alto teor de carbono, a dureza Rockwell C continua a diminuir.
- Entre 400°C a 600°C, ocorre uma recuperação de subestrutura de discordância. Os aglomerados de Fe_3C passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular. A dureza Rockwell C cai para valores de 45 a 25.
- Entre 500°C a 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitação de carboneto de liga; a transformação é chamada “endurecimento secundário” ou quarto estágio do revenido.
- O estágio final entre 600°C a 700°C, ocorre recristalização de crescimento de grão, a cementita precipitada apresenta forma nitidamente esferoidal. A ferrita apresenta forma equiaxial e a estrutura é chamada de “esferoidita” e caracteriza-se por ser muito tenaz e baixa dureza com uma variação de 5 a 20 Rockwell C.

2.3 Tratamento criogênico

O tratamento criogênico consiste em transformar a austenita retida nos aços, em martensita. Aumentando a tenacidade, dureza e a resistência ao desgaste. Este tratamento é feito em temperaturas que se aproximam à do nitrogênio líquido (-196°C) (MOREIRA et al., 2009). Os questionamentos a respeito da influência do tratamento criogênico, motivou nos últimos anos pesquisas para aplicações em ferramentas de aço rápido. E apresentaram eficiência no aumento da vida das ferramentas de corte devido ao aumento das propriedades de dureza e resistência ao desgaste (SILVA, 2012). Os benefícios que o tratamento criogênico proporciona depende tanto da temperatura que o material está sujeito quanto do tempo que ele permanece. Sendo apresentado na literatura de diferentes formas (ALBANO, 2013).

- Tratamento Subzero – Leva de alguns minutos até algumas horas até atingir -80°C em posição ao gelo seco de (CO_2).
- Tratamento Criogênico – De alguns minutos à algumas horas até atingir -196°C por exposição rápida ao nitrogênio líquido (N_2L).
- Tratamento Criogênico Profundo – Resfriamento lento, dezenas de horas até atingir -196°C por exposição lenta e controlada ao gás resfriado obtido da evaporação do (N_2L) e aquecimento lento e controlado.

O tratamento Subzero é bastante utilizado devido seu baixo custo inicial, atua na eliminação das tensões residuais advindo dos processos de conformação mecânica (AL-

BANO, 2013). Consiste no resfriamento da peça a temperaturas na faixa de -60°C a -80°C e atua conforme os parâmetros de têmpera e tempo de permanência na temperatura. Minimizando o teor de austenita retida, juntamente com a precipitação de microcarbonetos elevando a dureza do material (MOREIRA et al., 2009).

O Tratamento Criogênico Profundo (*Deep Cryogenic Treatment – DCT*) é feito em temperaturas abaixo de zero, mais precisamente em -196°C , temperatura do nitrogênio. A duração desse tratamento pode chegar a 24h, dependendo do caso, a duração pode ser maior. É necessário que seja feito em taxa de resfriamento lento, pois assim evita a ocorrência de trincas ocasionadas pelas tensões internas. Para que se tenha resultados satisfatórios em relação ao tratamento criogênico, é fundamental que se faça o uso da automação do processo, controlando a taxa de resfriamento (ALBANO, 2013). O tratamento criogênico possui alguns mecanismos gerados durante o seu procedimento, como:

- Transformação da austenita retida - Após a têmpera, a austenita pode se estabilizar. O tratamento criogênico só tem efeito sobre ela antes de ocorrer essa estabilização provocada por manter o material em temperatura ambiente. O tratamento Subzero, possui maior eficiência em relação ao TCP. Pois na faixa de temperatura entre 0°C e -80°C , uma elevada quantidade de austenita retida é transformada em martensita. Contudo o mesmo não acontece em temperaturas mais baixas como -196°C , transformando apenas uma quantidade muito baixa (EBONI, 2010). A influência da transformação da austenita retida em martensita proporciona algumas características como:
 1. Aumento na dureza
 2. Redução da tenacidade
 3. Pequeno aumento na resistência ao desgaste
 4. Estabilidade dimensional
- Condicionamento da martensita – Após a formação da martensita, o tratamento criogênico provoca a formação de finos carbonetos durante o revenimento, pois o resfriamento é feito abaixo da temperatura de formação da martensita aumentando a instabilidade da mesma. A formação dos carbonetos ocorre devido a martensita ter sido criada através da têmpera, chamada de martensita primária (ALBANO, 2013).

Encontra-se muitas incertezas na literatura sobre o tratamento criogênico, pois não sabe-se ao certo como este influencia nas propriedades da microestrutura dos aços (FARINA et al., 2012). Há poucos estudos que apresentam exatidão à respeito de taxas de aquecimento e resfriamento. Não se pode identificar de forma visual quando um aço foi tratado criogenicamente, pois o mesmo não sofre alteração na coloração, apenas sendo observável à nível microestrutural (ALBANO, 2013).

2.4 Tribologia

A tribologia é uma ciência que estuda a relação do contato quando há um movimento relativo entre superfícies e engloba estudos relacionados ao atrito, desgaste e lubrificação. O atrito funciona como dissipador de energia através do contato entre dois corpos. Conforme o atrito aumenta, tem-se como resultado o desgaste. Para reduzir a ação do desgaste, lubrifica-se as superfícies em contato, reduzindo a dissipação de energia e o atrito (SCHIMITEL; SANTOS, 2017).

O estudo relacionado a tribologia é bastante complexo, pois os fenômenos envolvidos são sistêmicos, dependem das condições em que o sistema ou tribossistema está envolvido. Para obter respostas que possam solucionar problemas relacionados a tribologia é necessário associar alguns ramos da ciência como: Química, reologia, ciência dos materiais, mecânica dos fluidos e afins (ASHIUCHI, 2015).

Analisar os mecanismos do sistema tribológico separadamente, permite determinar como cada um pode influenciar o sistema, pois geralmente acontecem de forma simultânea tornando sua análise bastante complexa. As modificações tribológicas podem ser classificadas em quatro tipos: Efeitos mecânicos em micro e macro escala, efeitos químicos e transferência de material (ASHIUCHI, 2015). Pode-se entender um tribossistema como a existência de atrito quando duas superfícies estão em contato através do movimento relativo. Quanto maior o tempo que as superfícies permanecem em contato, maior será a alteração no tribossistema. Na figura 3 pode ser observado alguns fatores que influenciam o tribossistema: Condições ambientais, elementos interfaciais, rugosidade das superfícies, corpo sólido e contracorpo. A estrutura de um tribossistema é definida por suas características e suas interações, sendo afetada pelo período que está sujeita à ação do atrito e do desgaste (ASHIUCHI, 2015).

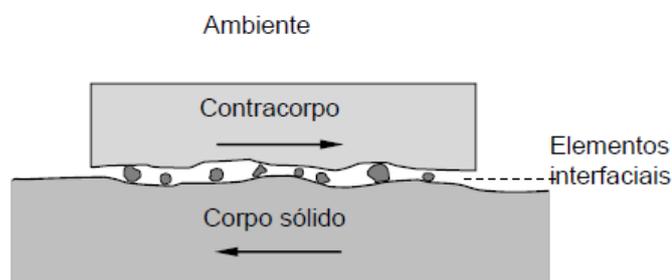


Figura 3 – Representação esquemática de um tribossistema. (ASHIUCHI, 2015).

De acordo com o tipo de desgaste, o contra-corpo pode ser um sólido, líquido, um gás ou uma mistura de fases. Os elementos interfaciais podem ser representados pela presença de lubrificantes e/ou partículas em estado sólido, contaminantes, óxidos, etc.

2.5 Desgaste

Desgaste pode ser definido como perda de material, contudo, pode-se haver apenas transição de massa ou volume sem perda de material (BHUSHAN B; WINBIGLER, 2013). De acordo com Cozza (2006), o desgaste é o dano em uma superfície sólida que causa perda crescente de massa, através do movimento de rotação relativa entre uma superfície dura e outra superfície de menor dureza. O desgaste está entre um dos problemas mais comuns relacionados à indústria. A perda de potência e o aumento excessivo de lubrificante causados pelo desgaste, influencia a troca do componente/peça aumentando o custo da produção. Quando o material está sendo desgastado, ocorre uma mudança em seu comportamento, devido à fatores como: Tipo de contato, nível de tensão e da temperatura resultante (TIER, 1998). Os mecanismos de desgaste podem ser observados em três estágio distintos, denominados como: Regimes de Severidade de Contato. Este regimes são divididos de acordo com o grau de desgaste (RAMOS et al., 2014).

I – Regime de desgaste brando – As superfícies são afetadas em baixo nível de desgaste, nos cantos dos poros ocorre desgaste microabrasivo, nos defeitos e nos risco da superfície ocorre a nucleação da trinca e iniciação do desgaste.

II – Regime de transição - Desgaste brando para Desgaste severo – Neste regime, os níveis de tensão dinâmica na superfície excedem o limite crítico para iniciação incontrolável da propagação das trincas resultando na ruptura da superfície.

III – Regime severo – A superfície é coberta pelos *debris* (finos fragmentos moídos) desgastados. Os *debris* são compactados termo-mecanicamente e forma tribos *debris* que controlam o desgaste e a reposta ao atrito.

O desgaste que ocorre por deslizamento em superfícies é influenciado por fatores mecânicos, químicos e térmicos e pode ser dividido em alguns fenômenos como: Desgaste abrasivo, adesivo, químico ou corrosivo, impacto por erosão, à fadiga e desgaste induzido por arco elétrico (RAMOS et al., 2014);(BHUSHAN B; WINBIGLER, 2013). A figura 4 apresenta a classificação e os tipos de desgastes existentes.

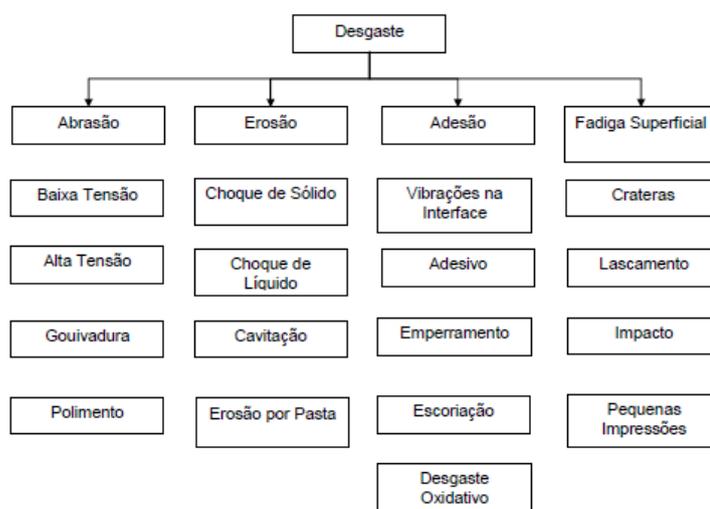


Figura 4 – Categorias de desgaste e seus mecanismos. (OLIVEIRA, 2008).

Desgaste por abrasão – Resultado do contato relativo entre uma superfície abrasiva com partículas duras que é forçada através de uma superfície macia e maleável (OLIVEIRA, 2008);(GASPARINI; JUSTEN, 2015)). Há a penetração e formação de ranhuras com perda de material na superfície que possui menor dureza (TIER, 1998). Esse tipo de desgaste possui extremidades pontiagudas que exercem efeito cortante na superfície de eixos, fresamento de minerais, equipamentos agrícolas, exaustores de partículas finas (GASPARINI; JUSTEN, 2015).

Desgaste por adesão ou fricção – Referente à 15% dos problemas de desgaste que estão presentes na indústria, identificado pelo corte ou cisalhamento obtido através do movimento relativo entre superfícies, caracterizado por uma ser dura e a outra mais dúctil ou maleável (RIBEIRO, 2004). Geralmente, esse contato é feito a seco, pois as partículas abrasivas que entram em contato com a superfície produzem uma área muito pequena (GASPARINI; JUSTEN, 2015). De acordo com o aumento progressivo do desgaste, torna-se em fase mista, onde o mesmo não acontece apenas à seco. Elementos de máquinas como engrenagens, cames, pistões e parafusos têm sua taxa de desgaste reduzida quando ocorre a utilização de lubrificantes (OLIVEIRA, 2008).

Desgaste por fadiga superficial – O fenômeno de desgaste por fadiga acontece em superfícies de componentes/peças que estão sujeitos à esforços ou carregamentos cíclicos. Antes dos danos se tonarem visíveis, estes já estão presentes, porém ainda não estão ativos (RIBEIRO, 2004). O efeito da fadiga estabelece cavidades na superfície do material. Esses buracos são obtidos por aplicações que se reiteram por deslizamento ou rolamento, ocasionando trincas sub-superficiais que conforme crescem e desenvolvem seus estágios produzem a fratura em rolamentos, engrenagens e cames (OLIVEIRA, 2008).

Desgaste por erosão – Este tipo de desgaste é ocasionado por impactos contínuos

e sem interrupções provocados por partículas sólidas, fluidos, bolhas (em um líquido). E partículas sólidas (em um líquido em movimento relativo) em superfícies, gerando erosões por deformação plástica, arrancamento progressivo de material, corrosão em sistemas de bombeamento, tubulações e palhetas de turbina. (OLIVEIRA, 2008). A verificação de forma precisa das circunstâncias que influenciam o desgaste, e a identificação dos fatores que colaboram para a causa de nocividades é uma das formas de solucionar os problemas relacionados ao desgaste (RAMOS et al., 2014). Foi apresentado os principais tipos de desgaste. O desgaste abrasivo será apresentado com mais detalhes, pois este representa aproximadamente cerca de 50% dos desgastes que ocorrem na indústria.

2.5.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo possui uma definição específica. Como sendo a perda sucessiva de massa devido ao movimento relativo entre superfícies, contudo causado por partículas duras (COZZA, 2006). Essas partículas podem estar presente entre as superfícies ou adaptadas em uma ou nas duas superfícies (SCHIMITEL; SANTOS, 2017). Conforme as partículas entram em contato, ao longo do tempo, forma-se ranhuras que geram aberturas na forma de sulcos, microfraturas e microcortes na superfície macia (GOBBI, 2009). Quando a superfície mais dura possui formato inconstante, que não possui simetria, o material é deformado plasticamente (ASHIUCHI, 2015). As partículas que geram o desgaste, podem ser de duas formas: Mineral – sílica, alumina ou demais minerais. E partículas provenientes da superfície com maior dureza pelo seus cantos agudos, produzindo o corte (ASHIUCHI, 2015). A partir da figura 5, tem-se a forma que a partícula realiza o desgaste abrasivo.

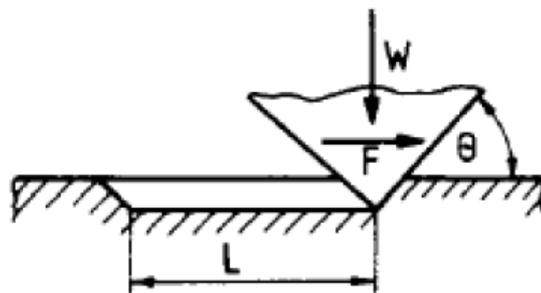


Figura 5 – Desgaste abrasivo. (BARBOSA, 2013).

RIBEIRO (2004) destaca os principais tipos de desgaste em:

2.5.1.1 Tipos de desgaste abrasivo

1. Abrasão a baixa tensão
2. Abrasão a alta tensão

3. Gouivadura

Abrasão em baixa tensão - Apresenta ranhuras na superfícies, com canais profundos. É estabelecido como baixa tensão quando apresenta forças baixas o suficiente para que não haja uma trituração das partículas abrasivas. As partículas abrasivas que possuem cantos pontiagudos tem a capacidade de realizar desgastes mais efetivos. Geralmente ocorrem em equipamentos que trabalham no manejo de areias, terras, minérios, máquinas agrícolas, equipamentos de escavação entre outros.

Abrasão em alta tensão - Normalmente de maior intensidade, produzindo deformações plásticas, ao mesmo tempo em que cria crateras ao longo da superfície junto com as ranhuras. Suas partículas podem ser médias ou pequena e podem ou não serem espremidos pelo metal que está em contato. Este tipo de desgaste ocorre em caçambas de escavação ou carga, lâminas niveladoras, arados, raspadores, cilindros de laminadores e rolos de linhas de laminação.

Goivagem - Ação de carregamentos compressivos repetitivos de materiais duros contra superfícies mais moles. Neste caso a fadiga tem papel importante, pois o arrancamento não se dá por uma só ação. A superposição de goivas (marcas na superfície) pode levar à fratura da região. Pode se observar este tipo de desgaste em dentes de caçamba, pois trabalham com areia, rocha e argila.

2.5.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo

Há fatores que influenciam no desgaste abrasivo, e ele são divididos em dois grupos: Abrasão à dois corpos e abrasão à três corpos. No desgaste de abrasão a dois corpos, o material abrasivo possui partículas que estão fixadas na superfície com maior dureza (SCHIMITEL; SANTOS, 2017). Quando essas partículas recebem um esforço normal à superfície, começam a deslizar gerando atrito (RAMOS et al., 2014). No desgaste abrasivo a três corpos, as partículas encontram-se livres entre as duas superfícies (SCHIMITEL; SANTOS, 2017). As partículas envolvidas no processo de desgaste abrasivo por três corpos podem ser de origem endógena ou exógena. Conforme o desgaste ocorre, as partículas podem se soltar da superfícies e gerar um outro corpo interfacial, definindo uma situação endógena. Para a situação exógena, as partículas abrasivas são adicionadas entre os dois corpos (ASHIUCHI, 2015). Pode-se obter os dois tipos de desgaste quando combinadas condições de concentração do abrasivo na solução, tipo de abrasivo utilizado na solução e a força normal entre a esfera e o corpo de prova. A figura 6 mostra como se comporta os dois processos e como é o formato da superfície ao sofrer o desgaste.

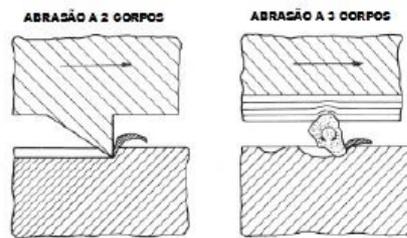


Figura 6 – Desgaste abrasivo à dois e três corpos. (SCHIMITEL; SANTOS, 2017).

O desgaste abrasivo por dois corpos (*“two body abrasive wear”*), também chamado de desgaste abrasivo por riscamento (*“grooving abrasion”*) é caracterizado por apresentar na superfície macia, ranhuras paralelas. Esse aspecto é similar ao movimento de uma lixa sobre a superfície. Quando o movimento relativo ocorre e as partículas encontram-se fixa, podem deslizar sobre o corpo. O desgaste abrasivo por três corpos (*“three body abrasive wear”*) ou desgaste por rolamento (*“rolling abrasive”*) apresenta na superfície características não lineares, que não podem ser determinadas. Nessa situação, as partículas livres apenas rolam entre as superfícies (ANICÉZIO, 2015). Pode ser observado na figura 7, através de Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV, o formato dos riscos na superfície desgastada.

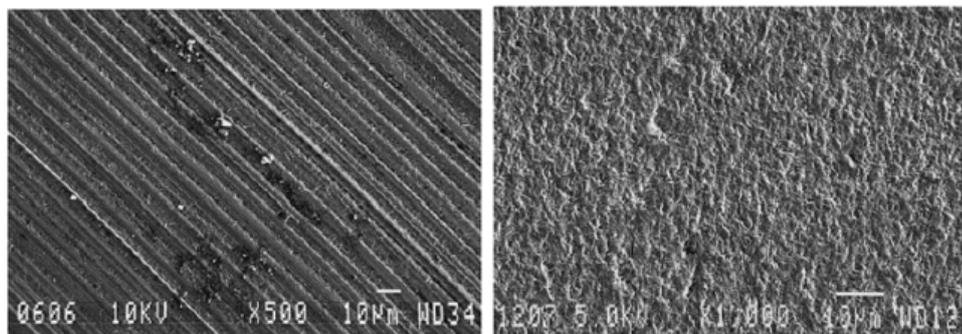


Figura 7 – Desgaste por riscamento (esquerda) e Desgaste por rolamento (direita) (ANICÉZIO, 2015).

Na superfície de desgaste pode ser avaliado os micromecanismos que atuam. Esses micromecanismos são classificados como:

- Microsulcamento
- Microcorte
- Microtrincamento ou lascamento
- Microfadiga

No mecanismo de microsulcamento não acontece a retirada de material. A partícula abrasiva desloca material para a lateral do sulco produzindo bordas por deformação plástica. No mecanismo de microcorte, ocorre grande perda de material quando a tensão de

cisalhamento provocada pelas partículas abrasivas é maior do que a tensão de escoamento do material (dúctil). Essa perda é de acordo com o volume da partícula abrasiva. No mecanismo de microtrincamento ou lascamento, ocorre a separação da superfície frágil e o aparecimento de trincas devido a ação das partículas abrasivas. O mecanismo de microfadiga assemelha-se ao mecanismo de microsulcamento. Contudo, a mudança repetitiva de material através das partículas abrasivas gera a fadiga no material e a remoção de material da superfície (SCHIMITEL; SANTOS, 2017); (RIBEIRO, 2004). Após a descrição de cada mecanismos de desgaste, tem-se na figura 8 o comportamento da superfície em decorrência da ação de cada mecanismo.

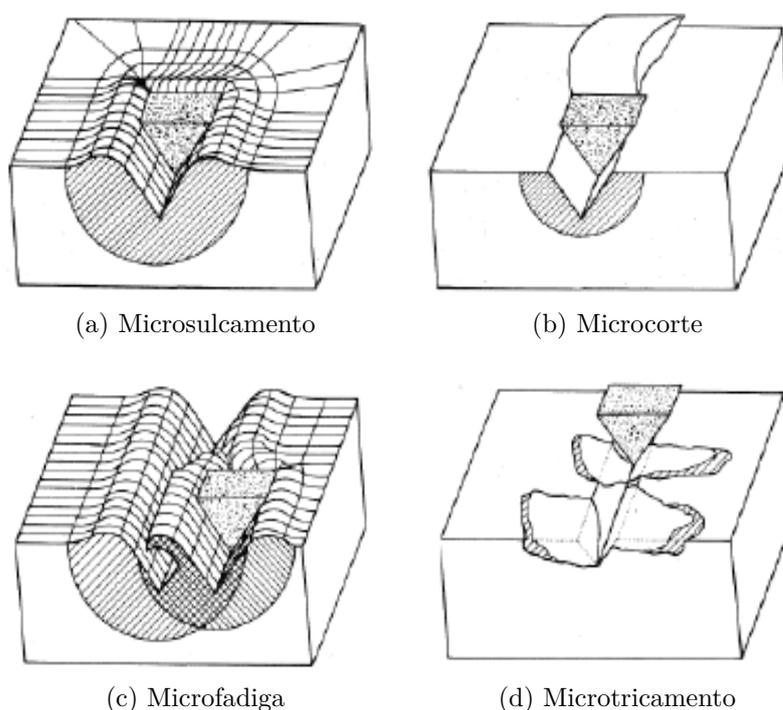


Figura 8 – Micromecanismos de Desgaste (GÓMEZ, 2014).

Ramos et al. (2014) diz que a taxa de desgaste abrasivo e os micromecanismos de desgaste podem ser influenciados por:

1. Material – Tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica e dureza.
2. Ensaio – Forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos.
3. Meio ambiente – Temperatura, contaminação, umidade, atmosfera e lubrificação.
4. Lubrificação – Tipo de lubrificante, estabilidade de lubrificante, tipo de fluido.

2.5.1.3 Desgaste microabrasivo

O desgaste abrasivo pode ser classificado em desgaste microabrasivo, de acordo com, a ordem em microns (μ), do tamanho médio da partícula abrasiva. As partículas se encontram em uma faixa de 3 a 6 μm para o desgaste microabrasivo e para o desgaste abrasivo de 50 a 250 μm . O coeficiente de desgaste e taxa de desgaste também mudam para o desgaste abrasivo e para o desgaste microabrasivo (COZZA, 2006).

2.5.1.4 Ensaios de desgaste abrasivo (microabrasivo)

Os métodos de avaliação tribológica tiveram grande avanço nos últimos anos. Surgiu então o ensaio de microabrasão ou ensaio micro-abrasivo proporcionando certos benefícios como baixo custo, e baixo tempo de realização. Através deste método pode-se avaliar a resistência ao desgaste de materiais metálicos e cerâmicos em escalas micrométricas (SCHIMITEL; SANTOS, 2017);(BARBOSA, 2013). Os ensaios podem ser realizados através do Ensaio de esfera rotativa (esfera fixa ou livre), (Pino sobre disco) *Pin on disc* (ASTM G99 – 2000) e (Bloco sobre anel) *Block on ring* (ASTM G77 - 98). Para a realização dos ensaio é necessário estimar alguns parâmetros que influenciam no processo. Tempo de ensaio (s), distância de deslizamento (m), carga normal aplicada (kg), abrasivo (dureza), rotação do motor (rpm) entre outros.

Esfera rotativa – O ensaio de esfera rotativa (*“ball-cratering abrasion test”* or *“micro-scale abrasive wear test”*) foi desenvolvido por RUTHERFORD e HUTCHINGS em 1996 com o intuito de medir espessura de revestimento das superfícies. O equipamento foi idealizado por uma esfera de raio (R), que gira junto ao eixo – motor (fixa) ou gira em movimento relativo ao do eixo (livre). Conforme a esfera gira e entra em contato com o corpo de prova, é gerado uma força normal (N) sobre o corpo de prova. Há existência do atrito através do contato, produz uma espécie de cratera na superfície desgastada. Pode ser adicionado uma suspensão abrasiva durante o ensaio, caracterizando-o como (ensaio abrasivo três corpos) (ANICÉZIO, 2015). Pode ser observado os dois tipos de equipamento para a realização do ensaio de desgaste por esfera rotativa através da figura 9.

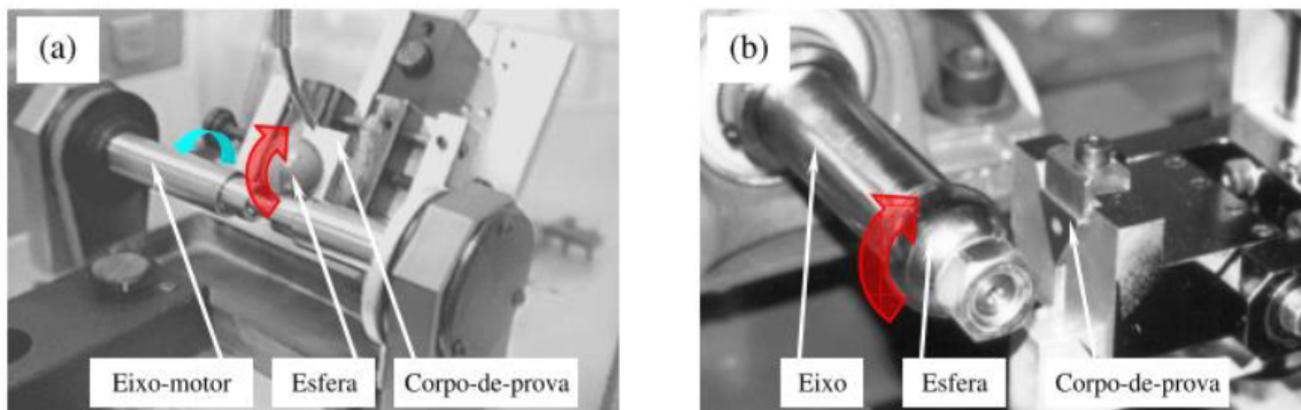


Figura 9 – Equipamento para ensaio de desgaste-microabrasivo. A) Esfera livre e B) Esfera fixa. (ANICÉZIO, 2015).

Na figura 9, pode-se observar dois tipos de configuração para o ensaio de esfera rotativa. Na primeira situação, a) A esfera encontra-se sobreposta ao eixo e gira no sentido contrário do eixo (esfera livre). Na situação b) A esfera encontra fixa ao eixo e ambos possuem o mesmo sentido de rotação. A carga normal aplicada para ambos os casos possui formas distintas de aplicação. No caso da esfera fixa, o operador do equipamento define a intensidade da carga diretamente no equipamento. Para o caso da esfera livre, o peso da esfera é utilizado como a carga, levando em consideração a inclinação entre o corpo de prova em reação ao eixo-motor (ANICÉZIO, 2015).

Pino sobre disco (*Pin on disc*) – A norma ASTM G99-2000 descreve a forma e os parâmetros de ensaio pino sobre disco. Consiste em um disco revestido por um abrasivo que gira em sentido anti-horário com uma determinada rotação (rpm) no plano horizontal. A amostra (pino) de formato cilíndrica sofre desgaste em sua base, através de um disco que é revestido por uma lixa abrasiva. A outra base que se encontra livre recebe uma força normal (F) que permite que os riscos provocados pelo desgaste se comportem de maneira uniforme. O aumento da carga quantifica a intensidade do desgaste. A norma ASTM G99-2000 não restringe a escolha dos parâmetros e deixa por escolha do usuário a escolha dos parâmetros do ensaio. Através da figura 10, pode ser observado como este ensaio é realizado.

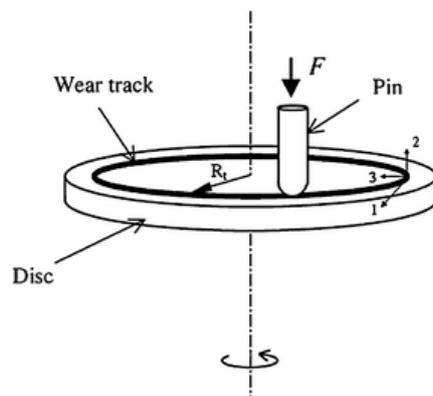


Figura 10 – Ensaio de desgaste pino sobre disco (*pin on disk*).

Bloco sobre anel (*Block on ring*) – A norma ASTM G77-98 descreve este método por um disco (abrasivo) vazado que gira no plano vertical. O teste de bloco sobre anel é feito com um disco vazado em formato de anel, revestido por um abrasivo, que gira em sentido horário. O contato com a amostra (bloco) é através da superfície lateral, sendo que a mesma com geometria cilíndrica ou retangular. Uma carga é aplicada sobre a amostra para aumentar o contato entre as superfícies. Assim como para o ensaio de pino sobre disco, a norma ATSM G77-98 também permite que o usuário escolha os parâmetros de ensaio. A figura 11 apresenta o ensaio como descrito.

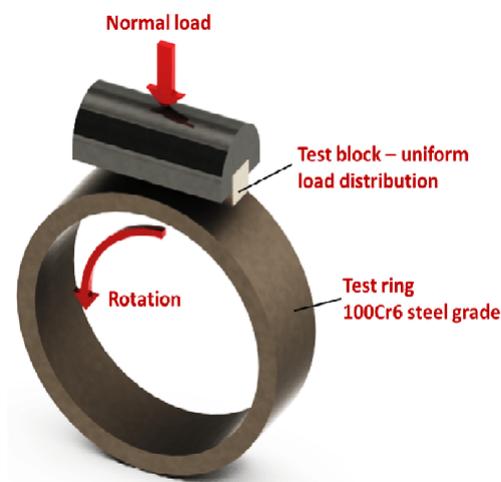


Figura 11 – Ensaio de desgaste bloco sobre anel (*block on ring*).

2.5.1.5 Fatores que influenciam no desgaste abrasivo (microabrasivo)

Alguns fatores podem influenciar nos resultados obtidos após a realização do desgaste abrasivo. RIBEIRO (2004) destaca que os principais fatores são o abrasivo e os fatores externos. Através do abrasivo pode ser analisado a dureza do abrasivo, abrasividade, tamanho da partícula, a geometria das partícula. Os fatores externos são a velocidade do abrasivo e a força de compressão entre o abrasivo e a superfície do corpo de prova.

Dureza do abrasivo - O coeficiente de dureza é um fator muito relevante na dureza do abrasivo, pois é definido como a razão entre a dureza do abrasivo (H_a) e a dureza do corpo de prova (H_s) (RIBEIRO, 2004). Outro fator que depende diretamente da dureza das partículas é a taxa de desgaste. Quando o coeficiente de dureza é maior ou igual a 1,2 as partículas abrasivas provocam riscamento, independente da sua geometria. O desgaste ocorre de forma mais severa para valores maiores que 1,2. Para valores menores do que 1,2 classifica-se como desgaste moderado (ASHIUCHI, 2015).

A figura 12 abaixo apresenta a variação da velocidade de desgaste, em relação função da variação do coeficiente de dureza. É possível observar que a partir da relação de dureza com valores menores que 1.2, a velocidade permanece quase constante. Entretanto, acima de 1.2 a velocidade cresce ligeiramente.

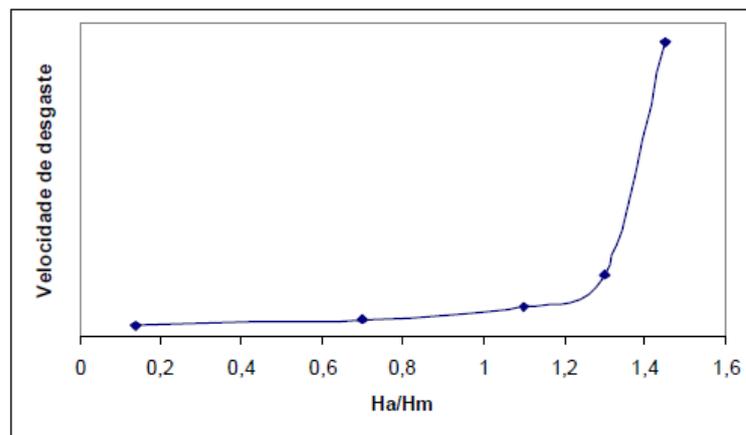


Figura 12 – Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal.(RIBEIRO, 2004).

Regime de desgaste - Os regimes de desgaste são classificados de acordo com a razão entre a dureza do abrasivo (H_a) e a dureza do corpo de prova (H_s) que pode ser observado na figura 13.

$$H_a/H_s \leq 0,8$$

Regime moderado - A dureza do material abrasivo é menor do que o material que sofre desgaste. Se H_a se mantém constante constante, com o aumento de H_s ocorre pouca variação na taxa de desgaste. Nesta região, H_s possui pouca influência no processo de desgaste.

$$0,8 \leq H_a/H_s \leq 1,5$$

Regime de transição - Neste regime a dureza do abrasivo e do corpo de prova devem ser o mesmo. Se H_s permanece constante e H_a varia pouco, o desgaste abrasivo sai

do regime moderado. Se o contrário acontecer, o desgaste volta para o regime moderado.

$$H_a/H_s \geq 1,5$$

Regime severo - Este processo acontece de forma similar ao regime moderado, pois o abrasivo possui dureza maior que o material do corpo de prova. Mantendo H_s constante a taxa de desgaste varia muito pouco com o aumento de H_a , ou seja, H_a possui pouca influência no processo de desgaste.

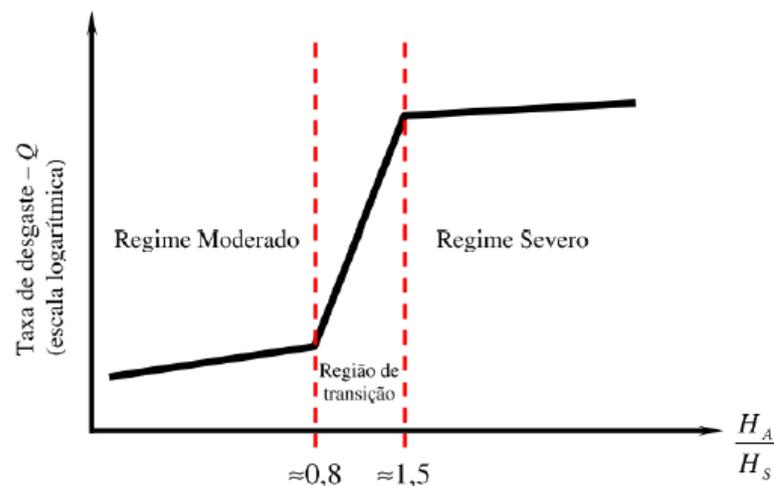


Figura 13 – Relação entre a taxa de desgaste e a razão H_a/H_s . (ANICÉZIO, 2015).

Abrasividade – A abrasividade está relacionada com a eficiência da partícula abrasiva quando ela entra em contato com o material a ser desgastado. Há situações em que as partículas podem interagir a ponto de desgastar ou não o material. Quando a dureza do material for inferior a 80% comparada com a dureza da partícula abrasiva, o desgaste acontece de forma rápida. Contudo, o desgaste em um material que possui maior tensão de escoamento do que a partícula abrasiva, ocorre com menor intensidade (moderado). A situação de desgaste lento ocorre quando a dureza das partículas abrasivas e do material são iguais (ASHIUCHI, 2015). Os materiais abrasivos mais utilizados é a alumina (Al_2O_3) que possui dureza Vickers de 2000 HV e Carbetto de silício (SiC) de 2600 KV.

Alguns materiais podem não ser totalmente homogêneos, atribuindo a cada microestrutura existente valores distintos de dureza. Na figura 14 pode-se observar como o abrasivo influencia quando fases mais dúcteis sofrem desgaste, mesmo se as partículas abrasivas possuírem dureza 40% menor.

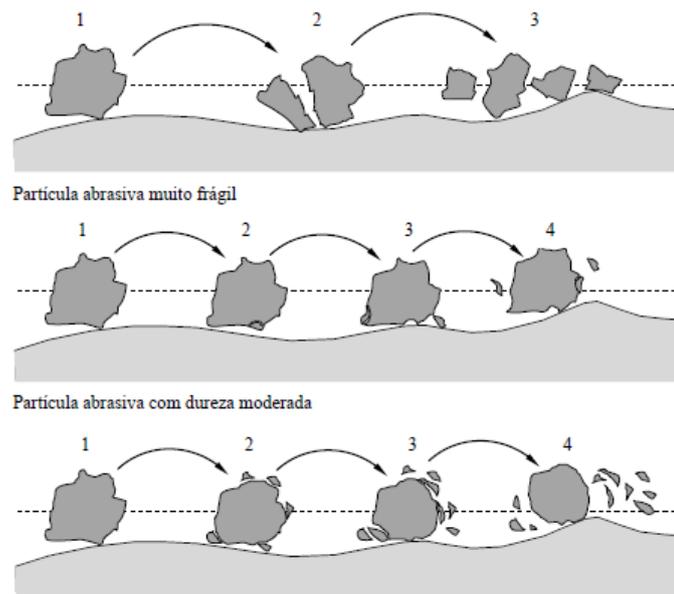


Figura 14 – Eficiência do abrasivo em função da dureza e da tenacidade.(ASHIUCHI, 2015).

Tamanho e geometria da partícula - O tamanho e a geometria das partículas atuam diretamente na taxa de desgaste. Partículas com diâmetro entre $5 \mu m$ e $500 \mu m$ estão relacionados aos processos de desgaste abrasivo (microabrasivo) e em desgaste erosivo. Partículas abaixo de $100 \mu m$ tendem a fazer com que a taxa de desgaste diminua (ASHIUCHI, 2015). Quanto maior o tamanho da partícula, maior será a taxa de desgaste (RIBEIRO, 2004).

Ao comparar dois abrasivos com partículas do mesmo tamanho, entretanto com geometria diferentes, o que possui a geometria mais irregular, cantos pontiagudos e superfícies com regiões angulares provoca uma taxa maior de desgaste (ASHIUCHI, 2015). Na figura 15 pode ser observado o efeito da partícula. Materiais mais duros apresentam geometria mais angulares e cortantes. O materiais dúcteis possuem geometria cilíndricas e curvas (RIBEIRO, 2004).

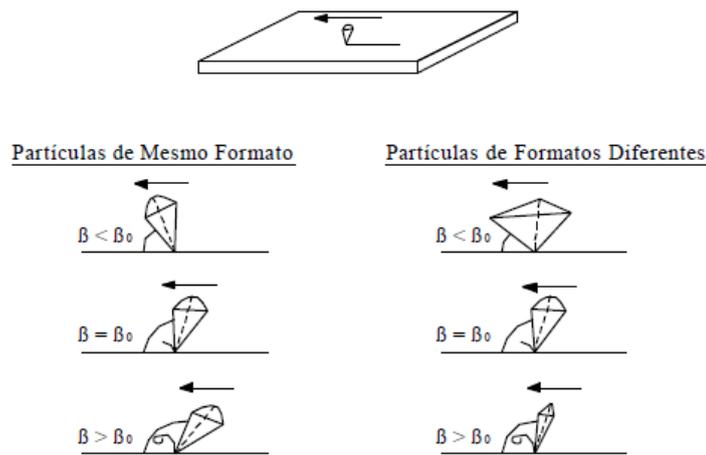


Figura 15 – Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo. (RIBEIRO, 2004).

Velocidade de deslizamento - O volume removido pelo processo de desgaste, aumenta rapidamente conforme a velocidade de deslizamento aumenta. Tendo seu limite em 2,5 m/s. A partir dessa velocidade a perda de volume permanece constante. Este fato ocorre devido a elevada temperatura de aquecimento da superfície que as partículas abrasivas causam pelo excesso de atrito. O aquecimento reduz as propriedades mecânicas do material (RIBEIRO, 2004).

Força de Compressão entre o material abrasivo e a superfície - Assim como a velocidade de deslizamento, a força de compressão também influencia de maneira linear na perda massa ou volume que as partículas abrasivas provocam. Essa força atua entre a superfície do material abrasivo e do corpo de prova. Essa linearidade permanece até certo ponto, pois conforme a força aumenta, a superfície do corpo de prova sofre aumento na deformação ou as partículas abrasivas se instabilizam e se rompem (RIBEIRO, 2004).

2.5.1.6 Parâmetros do desgaste abrasivo (microabrasivo)

No ensaio de desgaste microabrasivo, a escolha dos parâmetros de desgaste pode ajudar a compreender como os mesmos influenciam na intensidade do desgaste e como podem ser associados com o tempo de realização do ensaio de desgaste (ANICÉZIO, 2015).

1. Força Normal
2. Rotação da esfera de desgaste
3. Diâmetro da esfera de desgaste
4. Distância de deslizamento entre a esfera e o corpo de prova
5. Características das partículas abrasivas, tais como dureza, forma e formato.

6. Concentração da suspensão abrasiva

7. Vazão da suspensão abrasiva na região de contato da esfera com o corpo de prova

2.5.1.7 Equação de Archard para o desgaste abrasivo

Através da rotação de uma esfera de raio (R) em um amostra fixa, a cratera de desgaste formada na superfície do corpo de prova possui geometria circular. Pode-se calcular então o volume retirado, através do diâmetro ou pela profundidade da cratera. Para materiais homogêneos, a equação 2.1 desenvolvida por Rabinowicz é igual a equação de Archard para desgaste por deslizamento (SCHIMITEL; SANTOS, 2017).

$$V = k * L * w \quad (2.1)$$

V – Volume removido [mm^3]

L – Distância de deslizamento [m]

w – Carga normal [N]

k – Coeficiente de desgaste dimensional [$\text{mm}^3/(\text{mN})$]

A equação 2.1 diz que o volume desgastado está diretamente ligado a distância de deslizamento e também à carga normal. Utiliza-se o k como parâmetro, para análise do resultado que se obtém do material ao desgaste abrasivo (SCHIMITEL; SANTOS, 2017).

A equação 2.2 é utilizada para calcular o volume quando a cratera possui geometria esférica.

$$V = \pi * h^2 * R \quad (2.2)$$

Para determinar o coeficiente de desgaste k , Gobbi (2009) descreve a equação 2.3 da seguinte equação:

$$k = V / (L * Fn) \quad (2.3)$$

Fn - Força normal [N]

L - Distância de deslizamento [m]

V - Volume removido [mm^3]

E também pode ser obtida por:

$$k = K/H \quad (2.4)$$

K - Coeficiente de desgaste adimensional (Severidade de do desgaste)

H - Dureza Vickers [N/mm²]

Para determinados materiais e em situações definidas, a equação de Archard é reduzida para analisar a taxa de desgaste de acordo com a equação 3.1 (RIBEIRO, 2004):

$$Q = k * w \quad (2.5)$$

Ou

$$Q = V/S \quad (2.6)$$

Q - Taxa de desgaste [mm³/m]

k - Coeficiente de desgaste [[mm³/(Nm)]

W - Carga aplicada [N]

S - Distância de deslizamento

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais utilizados

O ensaio de desgaste abrasivo realizado neste trabalho foi o de Bloco sobre anel (Block on ring), que consiste em um disco vazado revestido por um abrasivo que gira em sentido horário com uma determinada rotação (rpm) que seja capaz de vencer o atrito e desgastar a amostra. A amostra de seção transversal retangular ou cilíndrica recebe sobre si uma carga (N) para aumentar a uniformidade dos riscos provocados pelo desgaste. A sua realização segue a norma ASTM G77-98. Para a realização do ensaio, foi necessário preparar as amostras. Os corpos de prova foram cortados a partir de barras cilíndricas em tamanhos aproximados com diâmetro de teste de 6 mm, diâmetro das extremidades de 10 mm, comprimento de garra de 30 mm, comprimento de calibre de 30 mm, comprimento total de 100 mm e raio de filete de 6 mm. Os tratamentos térmicos de têmpera, revenido e tratamentos criogênicos nos diferentes tempos foram realizados seguindo a metodologia utilizada por [Teixeira \(2017\)](#).

3.2 Preparação das amostras para o ensaio de desgaste abrasivo

Logo após os tratamentos térmicos, os corpos de prova foram cortadas no laboratório de caracterização de materiais da Faculdade UnB Gama, através da Cortadeira Metalográfica PANCUT 100 atingindo determinados valores de diâmetro e comprimento. Na preparação da superfície para o ensaio de desgaste, foram utilizadas lixas com granulometria de 400, 600, 800 e 1200. Utilizou-se uma morsa, como mostra a figura 16 para a fixação das amostras e o lixamento foi realizado à mão.



Figura 16 – Amostra fixada na morsa.

Dividiu-se as amostras em quatro grupos, duas amostras para cada grupo.

Grupo 1 - Como recebido – CR – Amostras sem nenhum tipo de tratamento, ou seja, material conforme recebido do fabricante.

Grupo 2 – Tratamento Convencional de têmpera e revenido – TC – Consiste em amostras aquecidas a (850°C), com tempo de encharque de 25 minutos e resfriamento em óleo seguido de revenido na temperatura de (200°C) por tempo de 25 minutos.

Grupo 3 – Tratamento Criogênico Profundo 15h - TCP15h - Consiste em amostras aquecidas a (850°C), com tempo de encharque de 25 minutos e resfriamento em óleo seguido de imersão do corpo de prova em nitrogênio líquido por tempo de 15 horas e revenido na temperatura de (200°C) por tempo de 25 minutos.

Grupo 4 – Tratamento Criogênico Profundo 24h - TCP24h - Consiste em amostras aquecidas a (850°C), com tempo de encharque de 25 minutos e resfriamento em óleo seguido de imersão do corpo de prova em nitrogênio líquido por tempo de 24 horas e revenido na temperatura de (200°C) por tempo de 25 minutos.

Na figura 17 pode-se observar as amostras antes e depois da preparação da superfície. Foram preparadas oito amostras.



Figura 17 – Amostra antes do lixamento (embaixo) e após o lixamento (acima).

Na figura 18 tem-se a finalização do processo de preparação das amostras. Foram levadas ao torno mecânico para serem faceadas deixando todas as faces perpendiculares à superfície lateral, sem inclinações.



Figura 18 – Faceamento das amostras.

Após o processo de faceamento foi utilizado um Paquímetro digital 150 mm PD 150 - VONDER para a medição do comprimento e do diâmetro de cada amostra, conforme observado na figura 5.

Todas as amostras foram preparadas no Laboratório de Caracterização de Materiais (LabCMat) e no laboratório de Processos de Fabricação (LPF) da Universidade de Brasília – Faculdade do Gama.

Tabela 5 – Dimensões das amostras.

Grupo	Amostra	Diâmetro [mm]	Comprimento [mm]
CR	1	12,8	17,98
CR	2	12,77	17,9
TC	1	12,8	17,98
TC	2	12,83	17,88
TCP15h	1	12,8	17,81
TCP15h	2	12,9	18,02
TCP24h	1	12,9	18,12
TCP24h	2	12,78	15,73

Fonte: Próprio autor.

3.3 Calibração sistema tribológico

Para a realização do ensaio de desgaste abrasivo, foi utilizado um tribômetro, projetado no laboratório de processo de fabricação da universidade de Brasília. O tribômetro é composto por um motor elétrico (Indução gaiola) 380/220 V e 2.07/1.20 A, uma correia acoplada na polia do motor elétrico e na polia do eixo com a função de transmitir potência. O eixo está preso por dois mancais (figura 19a).

Na ponta direita do eixo, foi adaptado um Rebolo que foi utilizado como abrasivo. O tribômetro possui um braço e um alavanca paralelos entre si na horizontal, suspensos por duas hastes. No braço, está acoplado uma célula de carga, que faz a medição da força

de atrito gerado entre o rebolo abrasivo (contra-corpo) e a amostra (corpo). Na ponta da alavanca prende-se a amostra para que a mesma esteja em contato com o rebolo (figura 19c).

Acima do suporte aonde fixa-se a amostra tem-se um parafuso, acoplando-se à ele a carga utilizada no ensaio, prendendo-a com uma porca. É necessário que a alavanca esteja em equilíbrio na horizontal. Para isso colocou-se uma certa quantidade de massa na ponta oposta à amostra até que a alavanca estivesse em equilíbrio com o peso da amostra (figura 19c).

Para que o eixo assumisse uma rotação fixa de 35 rpm, foi necessário atribuir ao inversor de frequência uma determinada frequência (Hz). Foram feitos testes e chegou-se às frequências de 2,8 Hz para a carga de 500 g e 3,16 Hz para a carga de 1000 g, mantendo constante a rotação transmitida ao motor .

A célula de carga, responsável por medir a força de atrito, envia os dados à uma caixa de aquisição dos dados. Essa caixa possui um fator de calibração necessário para este tipo de ensaio, o fator de calibração utilizado foi de 420 (figuras 19b e 19d). Os dados podem ser mostrados simultaneamente no visor da caixa de aquisição (figura 19d). A coleta de dados acontece a cada meio segundo e então é lido um valor de força de atrito. Os dados são enviados e salvos em formato TXT no computador (figura 19d). O detalhamento descrito acima pode ser observado através da figura 19 abaixo.

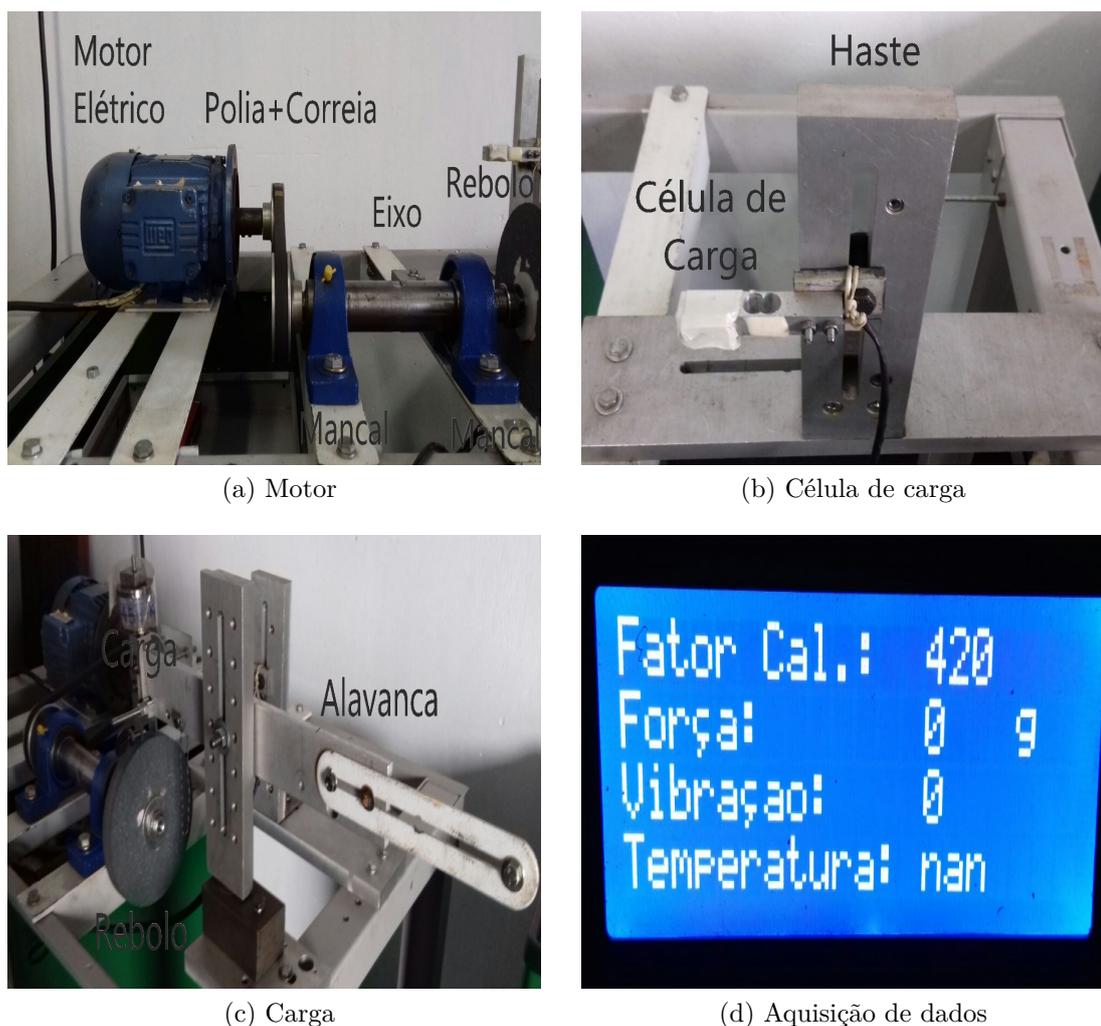


Figura 19 – Sistema de ensaio de desgaste.

3.4 Parâmetros de ensaio de desgaste abrasivo

A norma (ASTM G77 - 98) permite ao usuário escolher os parâmetros, contudo partir dos trabalhos de Lima, Labiapari e Oliveira (2015) que estudou o **Desenvolvimento do método de ensaio de desgaste abrasivo por deslizamento** e Paula et al. (2007) que analisou a **Inflência da taxa de solidificação, tamanho do abrasivo e carga no desgaste abrasivo de um ferro fundido branco**, foi possível basear-se a respeito dos parâmetros para ensaio de desgaste abrasivo.

O abrasivo escolhido para o ensaio, conforme a figura 20, foi rebolo de metal duro ART FE 39C120 K da NORTON SAINT – GOBAIN. Produzido em óxido de alumínio de alta resistência ao desgaste. Indicados para aços de baixa liga para desbaste, rebarbação e afiação. Há duas observações a serem feitas na utilização do rebolo como material abrasivo:

Observação I - Algumas partículas do material que entrará em contato com ele poderá fixar-se em sua granulometria, por isso é necessário que haja um processo de

limpeza no rebolo com uma determinada periodicidade durante a realização do ensaio. Para a realização dos ensaios deste trabalho foi utilizado um pincel de cerdas macias cada vez que o ensaio era interrompido.

Observação **II** - Para manter a durabilidade do rebolo e restaurar a sua habilidade de corte é necessário que o mesmo seja dressado antes de sua utilização.



Figura 20 – Rebolo de metal duro ART FE 39C120 K da NORTON SAINT – GOBAIN.

A escolha do abrasivo foi feita diante do conhecimento das características que são fornecidas na tabela 6.

Tabela 6 – Características do Rebolo.

Características do abrasivo	Unidade
Diâmetro	152,4 [mm]
Espessura	19 [mm]
Rotação Máxima	4135 [rpm]
Granulometria	120
Módulo de elasticidade	696 [kPa]
Dureza	67 [HRC]
Densidade	15700 [kg/m ³]

Fonte: (FERRAGENS, 2017).

Mediante a leitura dos trabalhos citados anteriormente, foi possível chegar a conclusões à respeito da escolha dos parâmetros para a realização do ensaio. A tabela 7 apresenta os parâmetros escolhidos.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste abrasivo Bloco sobre anel (*Block on ring*).

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2
Carga [N]	5	10
Rotação [rpm]	35	35
Tempo [s]	1950	1950
Abrasivo	Rebolo (metal duro)	Rebolo (metal duro)

Fonte: Próprio autor.

3.5 Ensaio de desgaste abrasivo (*Block on ring*)

De acordo com [Anicézio \(2015\)](#), o ensaio pode ser realizado de dois métodos: 1 – Única cratera e 2 – Diversas crateras. No caso 1 é feita apenas uma cratera, parando o ensaio em tempos estabelecidos para avaliar a cratera de desgaste. Contudo, possuindo algumas desvantagens como ter apenas uma cratera para análise e ter que reposicionar a amostra. No caso 2, tem-se uma cratera para cada tempo de ensaio. São feitas análises para cada tempo, contudo o tempo de realização do ensaio é maior.

As amostras inicialmente ensaiadas foram as classificadas como amostra 1 (A1) e amostra 2 (A2). As amostras do tipo A1 foram ensaiadas com carga de 500 g e as amostras do tipo A2 com carga de 1000 g. O ensaio foi realizado no formato de várias crateras, com cinco crateras em cada amostras, referente aos tempos de 130, 260, 390, 520, 650 (em segundos) e após cada tempo, desligava-se o motor para que fosse medido a massa perdida, utilizando uma balança analítica de precisão e os diâmetros maior (D_{ma}) e menor (D_{me}) da calota elíptica através de um Paquímetro digital 150 mm PD 150 - VONDER.

Foi realizado triplicatas em cada medição, para obtenção da média e do desvio padrão. Cada vez que o ensaio era interrompido para realização das medições, limpava-se a superfície do rebolo, pois algumas partículas do rebolo abrasivo poderiam se quebrar, dependendo de sua geometria, tornando-se um terceiro corpo e mudando o tipo de ensaio de desgaste abrasivo à dois corpos (deslizamento) para desgaste abrasivo à três corpos (rolamento) e também foi realizado processo de dressamento para que sua habilidade de corte fosse restaurada. Todos os ensaios foram realizados em um sala com temperatura de 22°C. A figura 21 mostra o formato geométrico da cratera obtida após o ensaio.



Figura 21 – Cratera de desgaste.

3.6 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica muito utilizada em estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, e principalmente na especificação e comparação de materiais. Para o conceito de dureza são atribuídos diferentes significados, tais como medida de resistência do material devido à ações mecânica sobre sua superfície, resistência à penetração, à deformação plástica e ao risco.

O ensaio realizado foi feito de maneira similar para todas amostras, do tipo 1 e do tipo 2, para todos os grupos (CR, TC, TCP15h e TCP24h). O ensaio foi realizado utilizando o Durômetro Win - D Plus Mitutoyo no LabCMat da Universidade de Brasília - Faculdade do Gama. Foi utilizado ponta de diamante e carga de 150 kgf, caracterizando-o como dureza Rockwell C.

3.7 Medição do volume removido

Foram utilizadas duas técnicas para a obtenção do volume que foi perdido através do ensaio de desgaste abrasivo. A primeira consiste no método mais simples através da relação massa/densidade, de acordo com a equação 3.1. Para o segundo método foi utilizado o software CATIA V5R20, simulando o ensaio de desgaste para a obtenção da cratera. Após obter a variação do volume perdido, comparou-se os resultados de ambos os métodos para poder validá-los e escolher o de maior precisão.

$$V = m/\rho \quad (3.1)$$

A simulação foi feita utilizando as mesmas propriedades geométricas e características do material da amostra real, para manter a fidelidade dos resultados e compará-las de maneira correta. A figura 22 mostra o resultado da simulação, destacando em vermelho a cratera obtida após uma das simulações. Foram obtidas cinco crateras em cada amostra de acordo com cada tempo de ensaio (120, 260, 390, 520, 650 segundos). Para que a cratera tivesse a geometria mais próxima do valor real, utilizou-se os valores D_{ma} e D_{me} .



Figura 22 – Simulação da cratera de desgaste.

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise do ensaio de dureza

Após a realização da metodologia descrita, foi possível obter os resultados fornecidos pelo ensaio. Primeiramente, para poder compreender os resultados adquiridos foi necessário analisar a dureza obtida através do ensaio de dureza, comparando a dureza de cada amostra. A tabela 8 expõe a dureza HRC para os quatro grupos de amostras do tipo A1 e A2.

Tabela 8 – Dureza HRC das amostras

Grupo	Amostra	Dureza [HRC]
CR	1	30,5±0,57
CR	2	29,5±0,57
TC	1	51,5±2,08
TC	2	51±2,39
TCP15h	1	52±1,15
TCP15h	2	54,5±0,57
TCP24h	1	50,5±2,51
TCP24h	2	51±0,57

Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores de dureza apresentados na tabela 8 observa-se que as amostras do tipo A1 e A2 do grupo TCP15h apresentaram maior dureza média, 52±1,15 para a amostra do tipo A1 e 54,5±2,51 para a amostra do tipo A2. Esse aumento representou cerca de 70% e 84,70% respectivamente em relação às amostras do grupo CR.

De acordo com a literatura, o aumento da dureza das amostras (H_s) é importante para reduzir a relação H_a/H_s , pois modifica o regime de desgaste. O regime de desgaste é classificado em moderado, em transição e severo. É através do regime de desgaste que pode-se entender o quanto o material perde de volume pela distância de deslizamento (taxa de desgaste). Na tabela 9 é apresentado o regime de desgaste de cada amostra do tipo A1 e A2 para todos os grupos. O abrasivo utilizado possui dureza (H_a) de 67 HRC.

Tabela 9 – Relação de dureza Ha/Hs para amostras do tipo A1 e A2.

Grupo	Amostra	Relação Ha/Hs	Regime de desgaste
CR	A1	2,196721	Severo
	A2	2,271186	Severo
TC	A1	1,300971	Transição
	A2	1,313725	Transição
TCP15h	A1	1,288462	Transição
	A2	1,229358	Transição
TCP24h	A1	1,326733	Transição
	A2	1,313725	Transição

Fonte: Próprio autor.

Como foi observado na tabela 9 as amostras que apresentaram regime de desgaste em "transição" tiveram a redução da relação Ha/Hs provocado pelos tratamentos de têmpera/revenido e o tratamento criogênico profundo que aumentaram a dureza Hs das amostras. O resultado da mudança do regime atingi diretamente a taxa de desgaste, reduzindo a intensidade em que a mesma ocorre.

4.2 Análise do volume Removido

Após comparar o volume obtido pelos métodos explicados na metodologia, concluiu-se que o método que relaciona massa/densidade foi mais satisfatório devido a sua precisão. Apesar dos valores terem sido próximos, software CATIA possui menor precisão por fazer arredondamento com poucas casas decimais. A tabela 10 apresenta os valores de volume perdido para as amostras do tipo A1 de todos os grupos para cada tempo de ensaio e distância de deslizamento.

Tabela 10 – Volume removido de cada amostra do tipo A2 para todos os grupos pelo tempo de ensaio e a distância de deslizamento.

Tempo [s]	Distância de Deslizamento [m]	Volume CR [mm ³]	Volume TC [mm ³]	Volume TCP15h [mm ³]	Volume TCP24h [mm ³]
0	0	0	0	0	0
130	35,66	1,67939	0,22901	0,03817	0,0000
260	71,5	0,38168	0,21628	0,21628	0,34351
390	107,33	0,64885	0,43257	0,35623	0,49618
520	143	0,38168	0,39440	0,31807	0,35623
650	178,83	0,52129	0,43257	0,27989	0,55979
1950	536,32	3,61289	1,70489	1,20864	1,75571

Fonte: Próprio autor.

Através da tabela 10 observa-se que existe uma relação entre o volume removido e o aumento da distância de deslizamento, entretanto esta relação não é proporcional.

O volume total removido da amostra do grupo CR foi de 3,61289 mm³, representando o maior valor. Esse resultado já era esperado, pois essa amostra possui uma dureza

média de 30,5 HRC. Comparado às amostras do tipo A1 dos outros grupos, possui menor dureza.

A amostra do grupo TCP15h perdeu 1,20864 mm³, representando a menor quantidade de volume perdido, o que era esperado devido ter o maior valor de dureza média entre as amostras do tipo A1, 52 HRC.

Para melhor compreensão dos resultados de perda de volume por distância de deslizamento, o gráfico 23 compara as curvas de volume removido das amostras do tipo A1 em relação à todos os grupos (CR, TC, TCP15h e TCP24h).

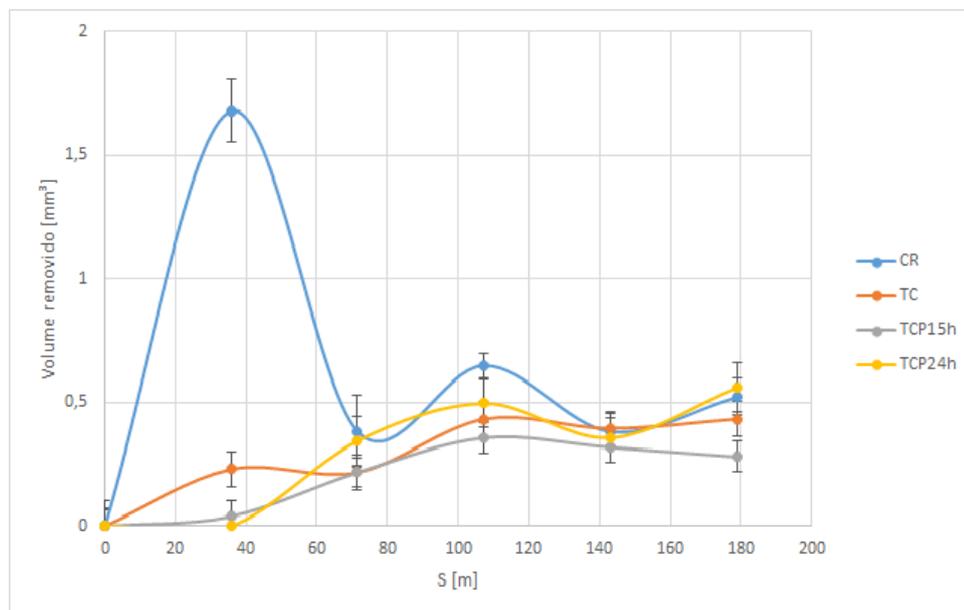


Figura 23 – Comparação das curvas de volume perdido por distância de deslizamento para amostras do tipo A1.

Pelo fato do volume removido ser inversamente proporcional a distância de deslizamento, como já falado anteriormente, observou-se através da figura 23 que há variações na perda de volume e esse período transiente permanece para as amostras de todos os grupos. Contudo, a partir de aproximadamente 107 m de distância de deslizamento, essas variações tornaram-se menores, atingindo o regime permanente de desgaste para as amostras dos grupos TC e TCP15h. Para as amostras do grupo CR e TCP24h, que possuem menor valor de dureza entre todos os grupos, ainda observa-se pequenas variações, justamente porque essas amostras perdem maior quantidade de volume. Enquanto que as amostras do grupo TC e TCP15h, começam a entrar em regime permanente, tendo uma variação insignificante, ou seja, a perda de volume é irrelevante.

Os resultados obtidos para as amostras do tipo A2 foram semelhantes àqueles que foram apresentados para as amostras do tipo A1, tendo como fator modificar a alteração da carga de 5 N para 10 N. A tabela 11 apresenta os valores de volume perdido para

as amostras do tipo A2 de todos os grupos para cada tempo de ensaio e distância de deslizamento.

Tabela 11 – Volume removido de cada amostra do tipo A2 para todos os grupos pelo tempo de ensaio e a distância de deslizamento.

Tempo [s]	Distância de Deslizamento [m]	Volume CR [mm ³]	Volume TC [mm ³]	Volume TCP15h [mm ³]	Volume TCP24h [mm ³]
0	0	0	0	0	0
130	35,66	0,6743	0,52162	0,47073	0,61068
260	71,5	2,72264	0,55979	0,5089	0,57252
390	107,33	1,5776	0,81424	0,55979	0,59796
520	143	1,75572	0,75063	0,6743	0,53435
650	178,83	2,03562	0,7888	0,6743	0,75063
1950	536,32	8,76588	3,43508	2,88802	3,06614

Fonte: Próprio autor.

A tabela 11 apresenta o volume removido para as amostras do tipo A2. Ao comparar esses valores com os da tabela 10, percebe-se um certo aumento em relação ao volume total que foi removido. Este fato ocorreu devido a alteração da carga de 5 N para 10 N e também de acordo com a tabela 8 os valores de dureza das amostras do tipo A2 para os grupos CR e TC foram menores do que das amostras do tipo A1, influenciando diretamente no resultado.

Os resultados obtidos para as amostras do tipo A2, mostraram que o grupo CR perdeu maior quantidade de volume, 8,76588 mm³ e o grupo TCP15h perdeu menor quantidade, 2,88802 mm³. Este fato se deu devido a amostra do tipo A2 do grupo TCP15h ter o maior valor médio de dureza, 54,5 HRC. Apesar das amostras do tipo A2 para os grupos TC e TCP24h terem obtido valores médios aproximados de dureza, 51 e 51 HRC, a amostra do grupo TC perdeu maior quantidade de volume, 3,43508 mm³. Enquanto que a amostra do grupo TCP24h perdeu 3,06614 mm³.

Todos os resultados serão expostos em forma de gráficos, na figura 24, para que sejam observados o comportamento da curva de volume removido pela distância de deslizamento devido a influência da mudança de carga.

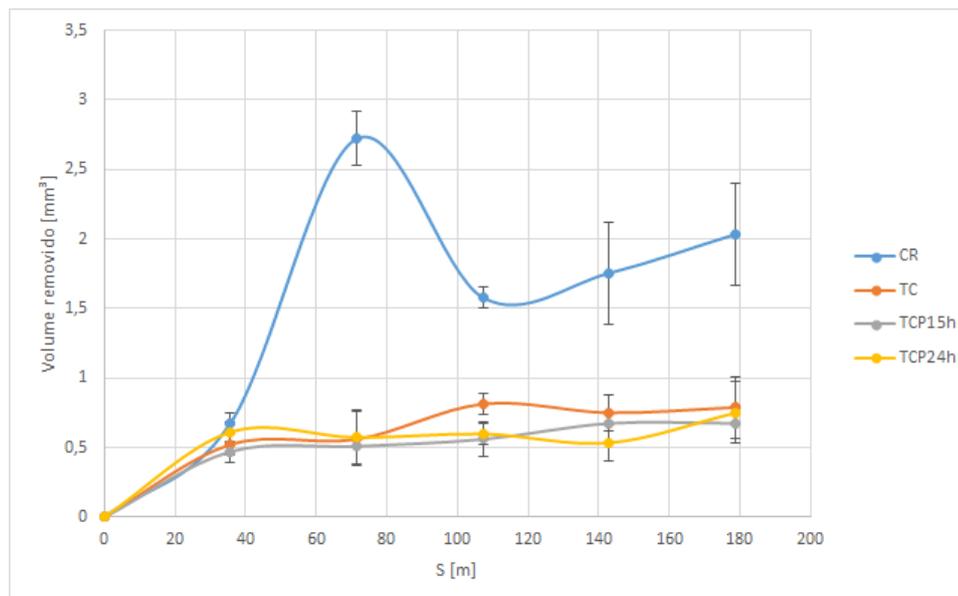


Figura 24 – Comparação das curvas de volume perdido por distância de deslizamento para amostras do tipo A2.

Apesar das amostras do tipo A2 terem perdido maior quantidade de volume, tiveram variações menores comparado com as amostras do tipo A1 principalmente para os grupos TCP15h e TCP24h. A partir do gráfico da figura 24 foi possível observar que em aproximadamente 143 m de distância de deslizamento a perda de volume entra em regime permanente, fato que não foi possível constatar para os demais grupos.

Tozetti (2013) destaca em seu estudo sobre **Efeito da carga e do tamanho do grão abrasivo no desgaste do ferro fundido branco 19,9% cromo e 2,9% carbono**, ao estudar o efeito da carga no desgaste abrasivo de ligas de ferro fundido branco com carboneto M_3C em diferentes taxas de solidificação, que a perda de massa aumenta com a elevação da carga. Tozetti (2013) utilizou cargas de 4,6 N e 2,0 N, pressão de 0,28 MPa, lixas de óxido de alumínio (Al_2O_3) de tamanho médio de 36 μm e 16 μm .

Foram feitos estudos e pesquisas por diversos autores, tanto com materiais homogêneos como heterogêneos, o resultados encontrados foram o mesmo para ambos, que o volume perdido através do desgaste aumenta conforme o aumento da carga. Entretanto, esse aumento não acontece de forma linear como foi possível observar através deste projeto de graduação, algo antevisto por intermédio da equação de Archard.

4.3 Análise do coeficiente de desgaste da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito

4.3.1 Coeficiente de desgaste

O coeficiente de desgaste é uma constante responsável por quantificar um determinado sistema deslizante relacionando o volume perdido, distância de deslizamento e carga normal. O volume de material perdido pelo desgaste deve ser proporcional à distância deslizamento e se a carga normal for variada, então a taxa de desgaste deve variar proporcionalmente (HUTCHINGS IAN E SHIPWAY, 2017).

Segundo Cozza (2006) o coeficiente de desgaste pode ser calculado de acordo com a equação 2.3. Para desgaste micro-abrasivo, k varia de 1.10^{-6} a $2,5.10^{-4}$ mm^3/Nm e para o desgaste abrasivo varia de 1.10^{-2} a $1,2.10^{-1}$ mm^3/Nm . Entretanto, a literatura diz que o tipo de desgaste (abrasivo ou micro-abrasivo) tem uma ligação maior com o tamanho da partícula abrasiva do que especificamente com o coeficiente de desgaste. Partículas com tamanho médio entre 3 a 6 μm geralmente são utilizadas em ensaio de desgaste micro-abrasivo, e para o desgaste abrasivo entre 50 e 250 μm (COZZA, 2006).

As tabelas 12 e 13 apresentam os valores de coeficiente de desgaste em mm^3/Nm para cada grupo de amostras, do tipo A1 e do tipo A2, respectivamente.

Tabela 12 – Valor médio do coeficiente de desgaste em $[\text{mm}^3/\text{Nm}]$ para amostras do tipo A1 de cada tempo de ensaio em [s].

Tempo/Grupo	CR	TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,00942	0,00128	0,00021	0,00000
260	0,00107	0,00060	0,00060	0,00096
390	0,00121	0,00081	0,00066	0,00092
520	0,00053	0,00055	0,00044	0,00050
650	0,00058	0,00048	0,00031	0,00063

Fonte: Próprio autor.

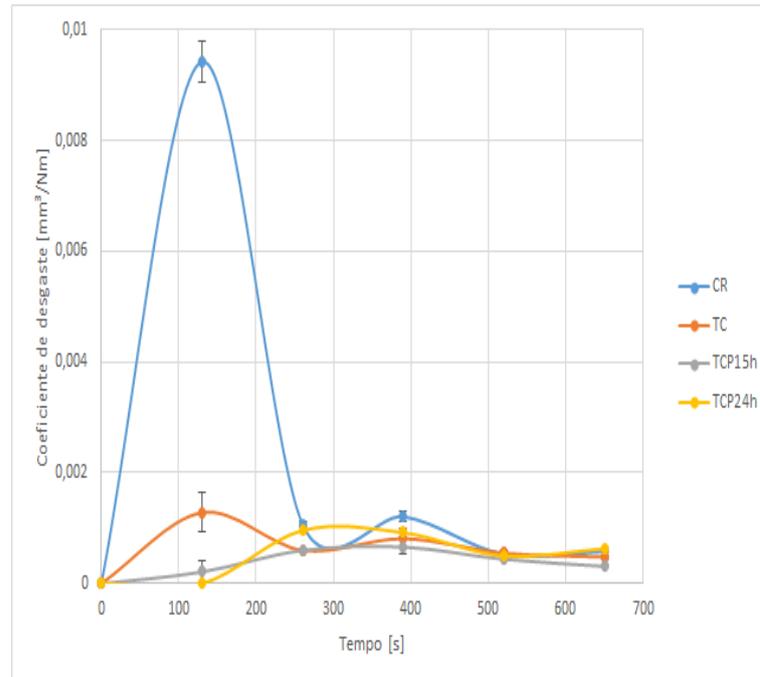
Tabela 13 – Valor médio do coeficiente de desgaste em $[\text{mm}^3/\text{Nm}]$ para amostras do tipo A2 de cada tempo de ensaio em [s].

Tempo/Grupo	CR	TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,00094	0,00146	0,00132	0,00171
260	0,00381	0,00078	0,00071	0,00080
390	0,00147	0,00076	0,00052	0,00056
520	0,00123	0,00053	0,00047	0,00037
650	0,00114	0,00044	0,00038	0,00042

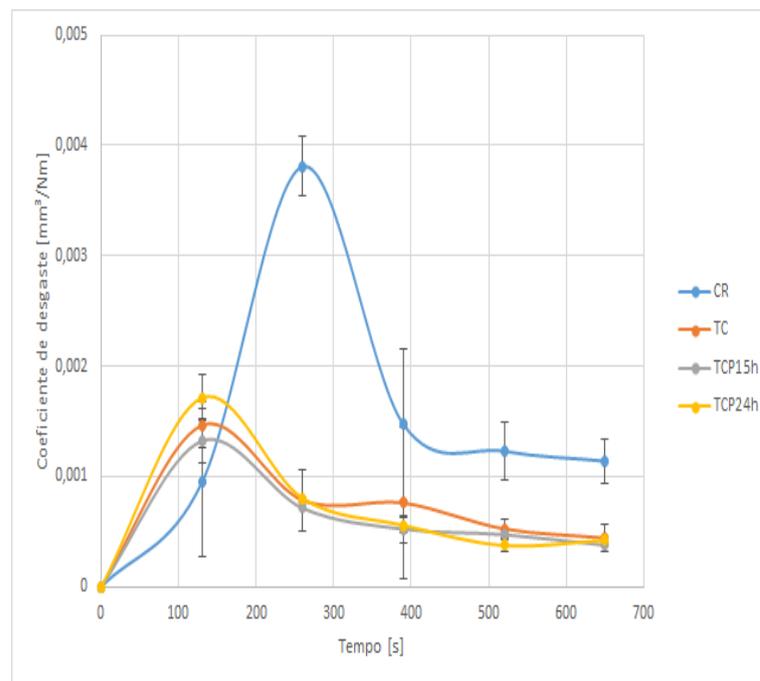
Fonte: Próprio autor.

Os valores obtidos de coeficientes de desgaste apresentado nas tabelas 12 e 13 encontram-se na faixa de indicação para desgaste micro-abrasivo. Todavia, a literatura diz que o valor do coeficiente de desgaste não é suficiente para definir o tipo de desgaste, e sim o tamanho da partícula abrasiva.

A figura 25 expõe os gráficos de comparação da variação do coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para cada grupo, para as amostras do tipo A1 (figura 25a) e A2 (figura 25b).



(a) Comparação da variação do coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A1.



(b) Comparação da variação do coeficiente de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A2.

Figura 25 – Comparação da variação do coeficiente de desgaste entre amostras do tipo A1 e A2.

Ao comparar os gráficos da figura 25a e 25b foi possível observar uma redução do coeficiente de desgaste. Esse fato é comprovado pela equação 2.3 e por Bello e Wood (2005) citado por Cozza (2006) em seu estudo sobre o **Comportamento do coeficiente de desgaste e de modos de desgaste abrasivo em ensaio de desgaste micro-**

abrasivo, que através de ensaios utilizando substratos de aço carbono revestidos com PA-11 (poliamida - 11) com espessura de $400 \mu\text{m}$ relataram a redução do coeficiente de desgaste com o aumento da carga. A equação de Archard defende a ideia de que mesmo com o aumento da distância de deslizamento ou do tempo de ensaio as curvas do coeficiente de desgaste não apresentam comportamento linear. Apenas as amostras do grupo CR mostraram um pico superior ao demais nos tempos de aproximadamente 130 s, para a amostra do tipo A1, e 260 s para a amostra do tipo A2. Este fato está relacionado com a perda de volume, pois o coeficiente de desgaste é proporcional ao volume removido.

O tamanho da partícula abrasiva utilizada neste ensaio foi de $120 \mu\text{m}$ enquadrando-se na faixa de valores para desgaste abrasivo. Independentemente se os valores obtidos de coeficiente de desgaste tenham sido muito baixos.

4.3.2 Taxa de desgaste

A taxa de desgaste é definida como a quantidade de volume que é removido da superfície por distância de deslizamento ou a quantidade de massa perdida por tempo de ensaio. A equação de Archard (equação 3.1) diz que a taxa de desgaste é proporcional à carga aplicada, entretanto isso não acontece de forma linear.

Para o cálculo da taxa de desgaste foi utilizado a relação do volume pela distância de deslizamento e a equação de Archard, encontrando para ambas o mesmo resultado.

As tabelas 14 e 15 apresentam os valores que foram calculados de taxa de desgaste em mm^3/m em cada tempo de ensaio.

Tabela 14 – Valorr médio da taxa de desgaste em $[\text{mm}^3/\text{m}]$ para amostras do tipo A1 em cada tempo [s] de ensaio.

Tempo/Grupo	CR	TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,04708	0,00642	0,00302	0,00000
260	0,00534	0,00302	0,00332	0,00480
390	0,00605	0,00403	0,00222	0,00462
520	0,00267	0,00276	0,00157	0,00249
650	0,00292	0,00242	0,00300	0,00313

Fonte: Próprio autor.

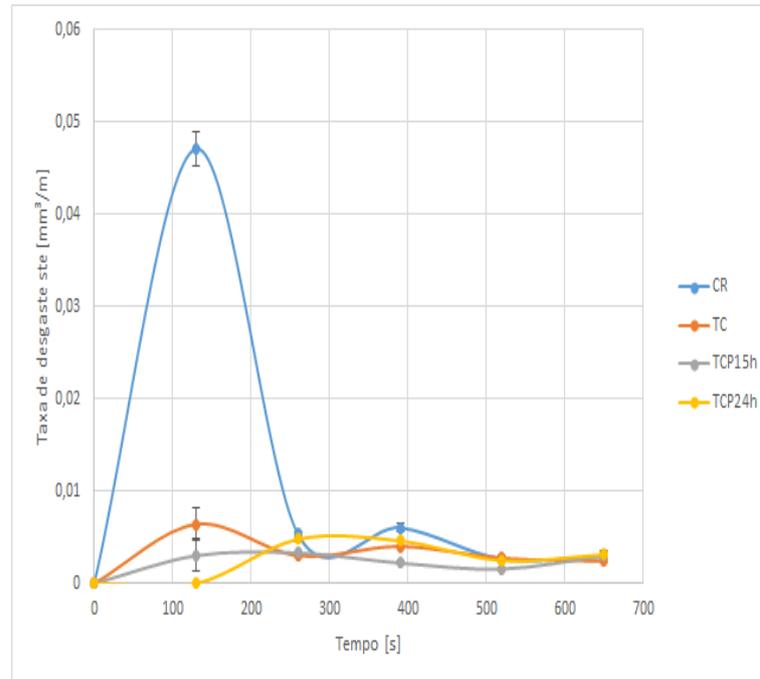
Tabela 15 – Valor médio da taxa de desgaste em $[\text{mm}^3/\text{m}]$ para amostras do tipo A2 em cada tempo [s] de ensaio.

Tempo/Grupo	CR	TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,00943	0,01462	0,01320	0,01712
260	0,03808	0,00783	0,00712	0,00801
390	0,01470	0,00759	0,00522	0,00557
520	0,01228	0,00525	0,00472	0,00374
650	0,01138	0,00441	0,00420	0,00420

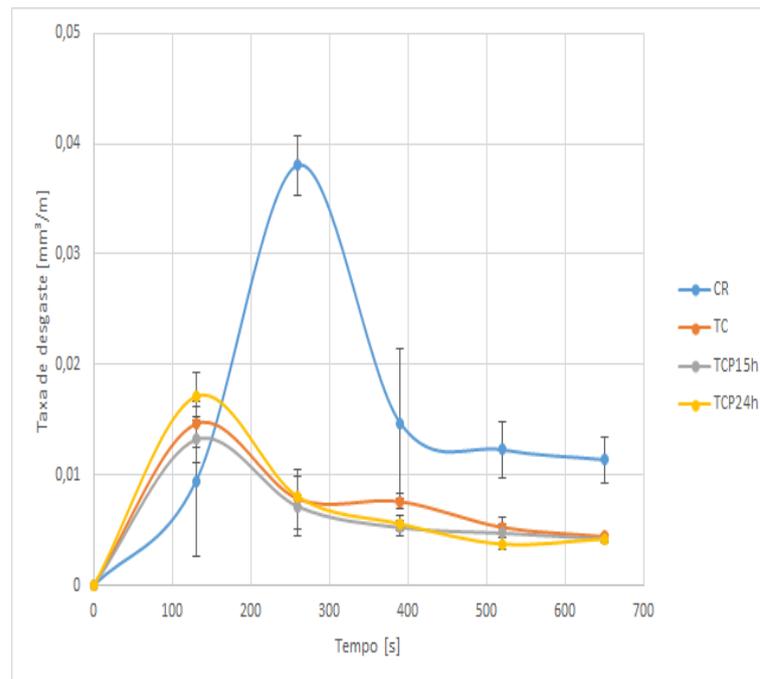
Fonte: Próprio autor.

Os valores apresentados nas tabelas 14 e 15 mostraram um crescimento da taxa de desgaste das amostras do tipo A2, visto que a taxa de desgaste é diretamente proporcional ao aumento da carga. Contudo, para a amostra do tipo A1 do grupo CR a taxa de desgaste foi maior, $4,708.10^{-2}$ do que a amostra do tipo A2 para o mesmo grupo, $9,43.10^{-3}$. O motivo que explica esse fato é o a perda de volume que para as amostras do grupo em questão influenciam no resultado da taxa de desgaste.

A figura 26 apresenta dois gráficos que compara o comportamento da curva de taxa de desgaste por tempo de ensaio, para as amostras do tipo A1 (figura 26a) e do tipo A2 (figura 26b).



(a) Comparação do comportamento da taxa de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A1.



(b) Comparação do comportamento da taxa de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A2.

Figura 26 – Comportamento da taxa de desgaste pelo tempo de ensaio para amostras do tipo A1 e A2.

A partir dos gráficos das figuras 26a e 26b observa-se que inicialmente há uma variação na taxa de desgaste e conforme o tempo de ensaio aumenta essa variação diminui. Esse período inicial encontra-se na literatura como *Running-in*. O *Running-in* acontece uma vez que há um contato entre duas superfícies, onde uma acomoda-se na outra, pois

cada superfície tem uma rugosidade específica, então busca-se uma estabilidade entre essas rugosidades. De acordo com (ARANGO, 2010), o conceito de *Running-in* está relacionado com a afirmação de uma área real de contato estabelecendo uma relação constante evidenciado ao atingir uma força de atrito aproximadamente constante.

Running-in pode ser relacionado ao atrito e ao desgaste, para último, também pode ser chamado de *Break-in* e *Wear-in*. Considera-se que o aumento da perda de massa por tempo de ensaio comporta-se de forma indeterminada influenciada pelo mecanismos de desgaste.

Mediante os resultados das curvas de taxas de desgaste que foram obtidas, constatou-se que o *Running-in* dura até aproximadamente 520 s e após este período obteve-se o regime permanente para as amostras dos tipos A1 e A2. Notou-se também que a taxa de desgaste aumentaram tanto para o período transiente quanto em regime permanente, pois a taxa de desgaste é proporcional ao aumento da carga.

4.3.3 Coeficiente de atrito

A relação entre o contato e o movimento relativo entre as superfícies de um corpo e de um contra-corpo produz forças tangenciais que geram atrito. Essas forças também podem ser chamadas de força de atrito. Curi et al. (2017) afirma que para um sistema que ocorre o desgaste abrasivo, a força de atrito é responsável por expressar as características mais importantes sobre os modos de desgaste e a variação da rugosidade da superfície.

O coeficiente de atrito para superfícies secas depende dos materiais que estão em contato. Defini-se coeficiente de atrito como a razão entre a força de atrito (FA) e uma força normal aplicada sobre o corpo (FN).

Foi possível obter o coeficiente de atrito para amostras do tipo 1 e 2 de cada grupo através da força de atrito coletadas pela célula de carga. A carga normal utilizada no ensaio foi de 5 N (amostras do tipo A1) e 10 N (amostras do tipo A2). A tabela 16 mostra a variação do coeficiente de atrito, apresentando um valor mínimo e máximo para cada grupo de amostras em todos os tempos de ensaio.

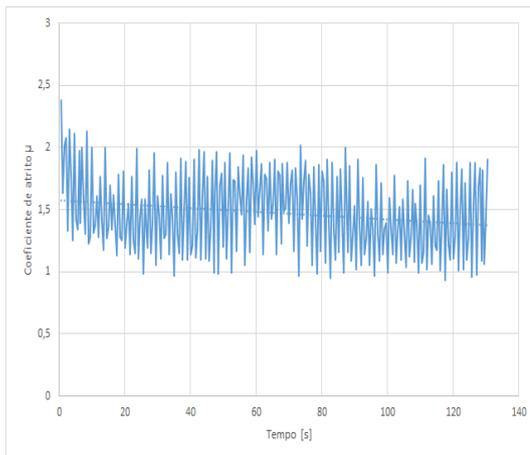
Tabela 16 – Variação entre o valor mínimo e máximo do coeficiente de atrito para amostras do tipo A1 e A2 de cada grupo.

Tempo/Grupo	CR	Amostra 1		
		TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,963 - 2,384	0,832 - 2,098	0,872 - 2,11	0,960 - 2,198
260	0,756 - 2,384	0,796 - 2,06	0,912 - 2,028	0,898 - 2,294
390	0,756 - 2,384	0,932 - 2,06	0,804 - 1,984	0,878 - 2,130
520	0,756 - 2,384	0,792 - 2,16	0,672 - 1,962	0,864 - 2,132
650	0,564 - 2,384	0,516 - 1,95	0,736 - 1,982	0,736 - 2,044
Tempo/Grupo	CR	Amostra 2		
		TC	TCP15h	TCP24h
0	0	0	0	0
130	0,604 - 1,162	0,453 - 1,411	0,071 - 0,915	0,652 - 1,412
260	0,377 - 1,245	0,694 - 1,244	0,611 - 1,543	0,594 - 1,461
390	0,538 - 1,336	0,473 - 1,269	0,598 - 1,290	0,615 - 1,314
520	0,631 - 1,515	0,588 - 1,312	0,608 - 1,497	0,619 - 1,212
650	0,657 - 1,392	0,380 - 1,205	0,380 - 1,205	0,398 - 1,512

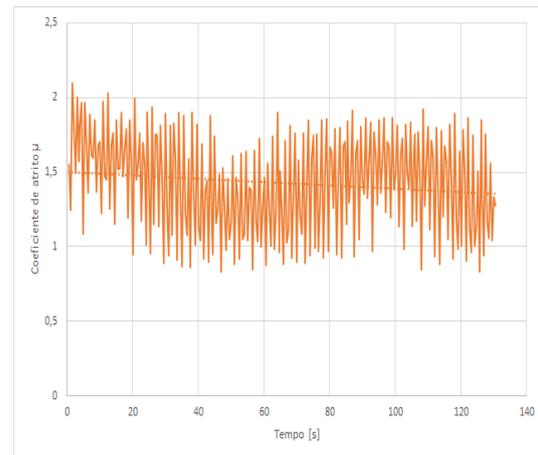
Fonte: Próprio autor.

Foi observado através da tabela 16 que os valores de coeficiente de atrito não tiveram uma mudança significativa entre um grupo e outro, contudo houve alteração entre as amostras do tipos A1 e A2. Matematicamente, pela relação das forças, entende-se que o coeficiente de atrito pode diminuir ou elevar-se conforme aumenta-se ou se reduz a carga, todavia Hutchings Ian e Shipway (2017) destaca que a força de atrito é proporcional à carga aplicada, entretanto o coeficiente de atrito é independente. O coeficiente de atrito dependem da força de atrito e conforme foi dito anteriormente, a força de atrito depende das superfícies que estão em contato.

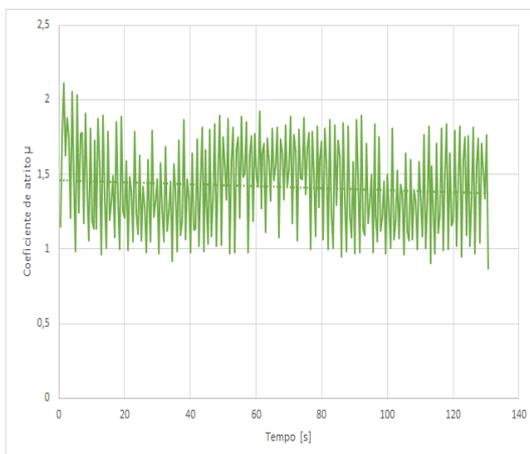
O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado em formato de várias crateras e em cada amostras foi gerada crateras para intervalo de tempo de 130, 260, 390, 520, 650 s, totalizando cerca de 40 crateras. Para cada cratera foi obtido um gráfico do coeficiente de atrito pelo tempo. Na figura 27 será apresentado quatro gráficos representativos para amostras do tipo A1 e na figura 28 para amostras do tipo A2.



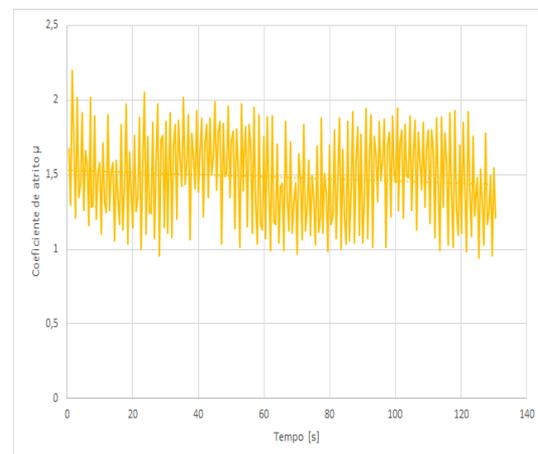
(a) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A1 do grupo CR.



(b) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A1 do grupo TC.



(c) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A1 do grupo TCP15h.



(d) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A1 do grupo TCP24h.

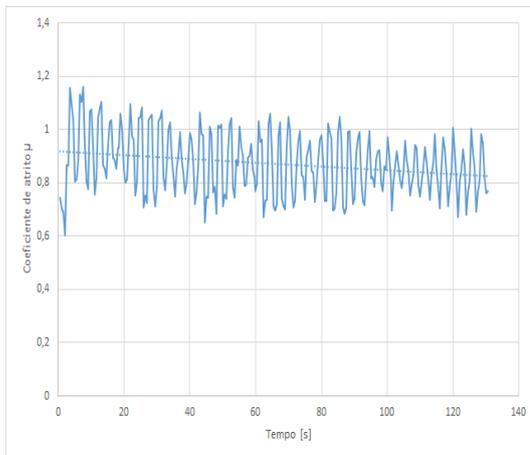
Figura 27 – Variação do coeficiente de atrito no intervalo de 130 s para amostras do tipo A1.

Através da figura 27 observa-se que para o intervalo de tempo de 130 s e carga de 5 N o comportamento do coeficiente de atrito foi semelhante para o grupo CR (figura 27a e TCP15h (figura 27c), ou seja, apresentaram rugosidade superficial parecidas). Os grupos TC (figura 27b) e TCP24h (figura 27d) também apresentaram comportamento semelhante, contudo apenas a partir de 80 s.

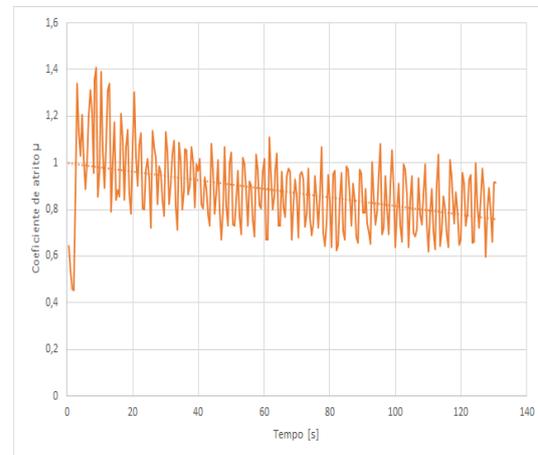
Foi possível analisar apenas o período transiente do comportamento do coeficiente de atrito, pois a força de atrito não entrou em regime permanente, ou seja, não se tornou constante a partir de determinado período.

Como o coeficiente de atrito é uma característica da interação das superfícies do abrasivo e da amostra, o comportamento irregular das curvas apresentadas está ligado diretamente com a rugosidade do material. Entende-se que não houve equilíbrio entre a

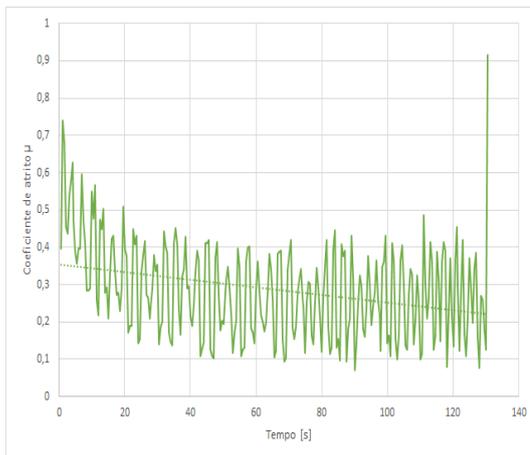
rugosidade das superfícies.



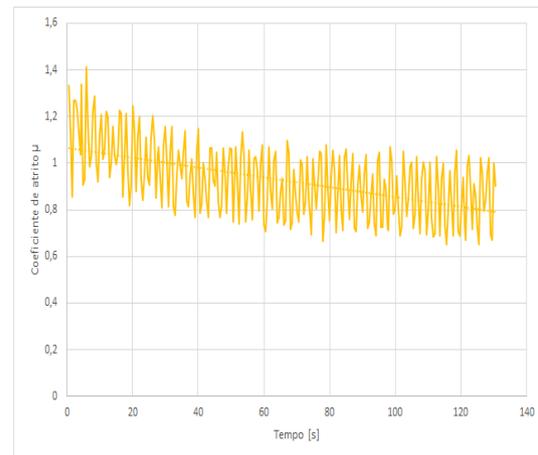
(a) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A2 do grupo CR.



(b) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A2 do grupo TC.



(c) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A2 do grupo TCP15h.



(d) Variação do coeficiente de atrito pelo tempo de ensaio para a amostra do tipo A2 do grupo TCP24h.

Figura 28 – Variação do coeficiente de atrito no intervalo de 130 s para amostras do tipo A2.

Os gráficos da figura 28 mostraram o comportamento das curvas de coeficiente de atrito para o intervalo de 130 s com carga de 10 N. Diferentemente dos gráficos apresentados para amostras do tipo A1 (Carga de 5 N), foi observado que a partir de um determinado tempo de ensaio, atingiu-se o regime permanente. Para o grupo CR, constatou-se que a partir de aproximadamente 40 s os valores de coeficiente de atrito tendem à um valor médio de 0,9. Para o grupo TC é atingido um valor médio de 0,8 em aproximadamente 60 s. Para o grupo TCP15h a partir de 40 s o valor médio é de aproximadamente 0,25. Para o grupo TCP24h a partir de 60 s o valor médio é de aproximadamente 0,85. A literatura diz que para materiais que sofrem desgaste sem lubrificação (à seco) geralmente

os valores de de coeficiente de atrito ficam entre 0,5 e 1,6, entretanto a amostras do grupo TCP15h teve um valor médio menor.

Para condições de ensaio mais severas, como a utilização de uma carga elevada, aumento na velocidade de deslizamento as variações nos coeficientes de atrito seriam poucas, reduzindo o período transiente e influenciando na mudança dos micromecanismos de desgaste.

4.4 Identificação e análise dos micromecanismos de desgaste abrasivo

O desenvolvimento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de elétrons retroespalhados favoreceu a análise detalhada de aspectos relacionados ao desgaste abrasivo. Através da utilização do MEV pertencente ao laboratório GS9 da mecânica da Universidade de Brasília (UnB) foi possível observar os micromecanismos de desgaste. Estes são muito importantes na análise do desgaste abrasivo, pois quantificam a perda de massa/volume.

Para observar os micromecanismos que atuantes foi utilizado uma ampliação de 1000 vezes, pois foi a que possibilitou o melhor foco para análise das imagens.

Como o foram obtidas várias crateras durante ensaio de desgaste abrasivo, escolheu-se para a obtenção da imagens via MEV as crateras referente ao tempo de ensaio de 650 s para amostras do tipo A1 e A2, comparando-as entre todos os grupos (CR, TC, TCP15h e TCP24h).

A imagens das figuras 29 a 32 (amostras do tipo A1) e das figuras 33 a 36 (amostras do tipo A2) mostram a atuação dos micromecanismos, identificados conforme a definição da literatura.

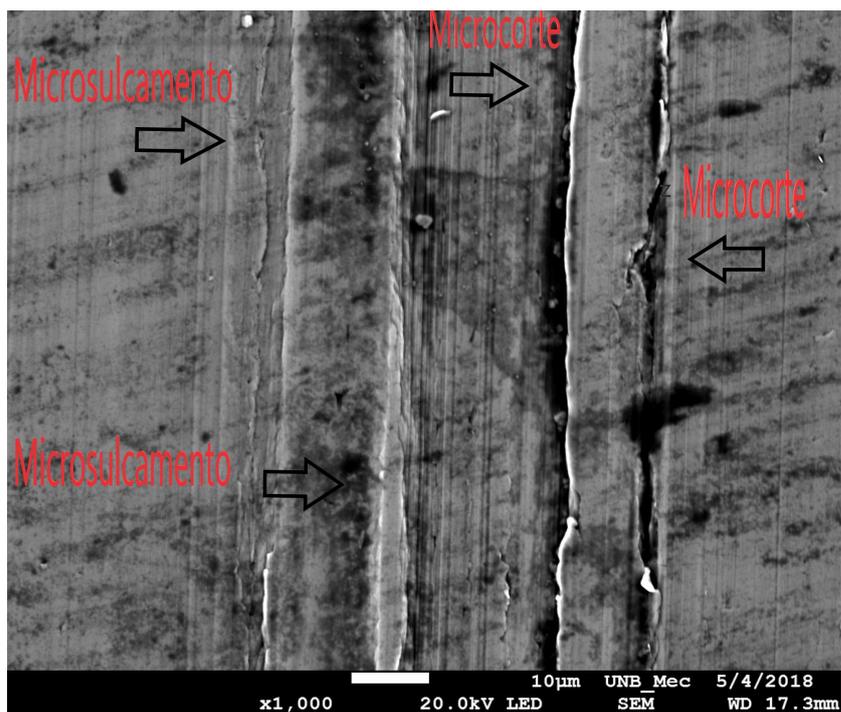


Figura 29 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo CR.

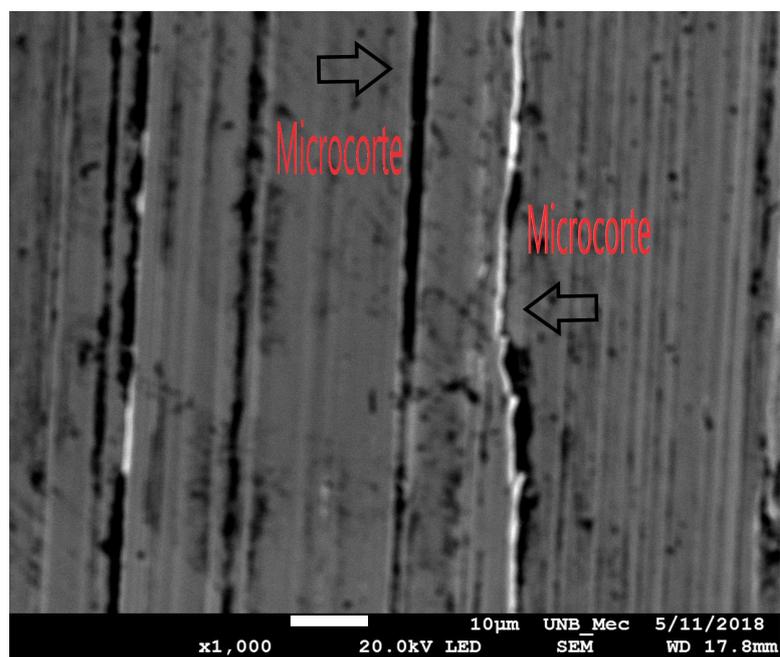


Figura 30 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TC.

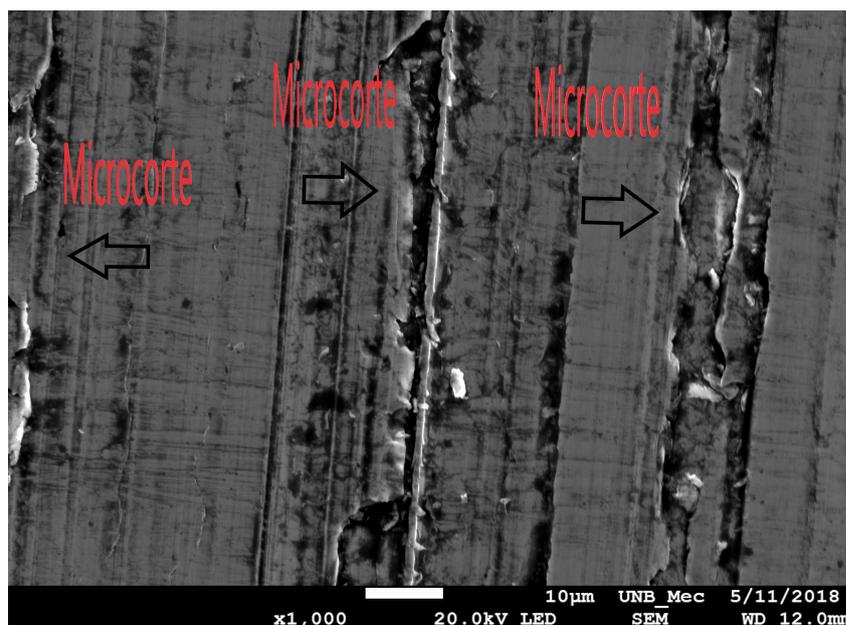


Figura 31 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TCP15h.

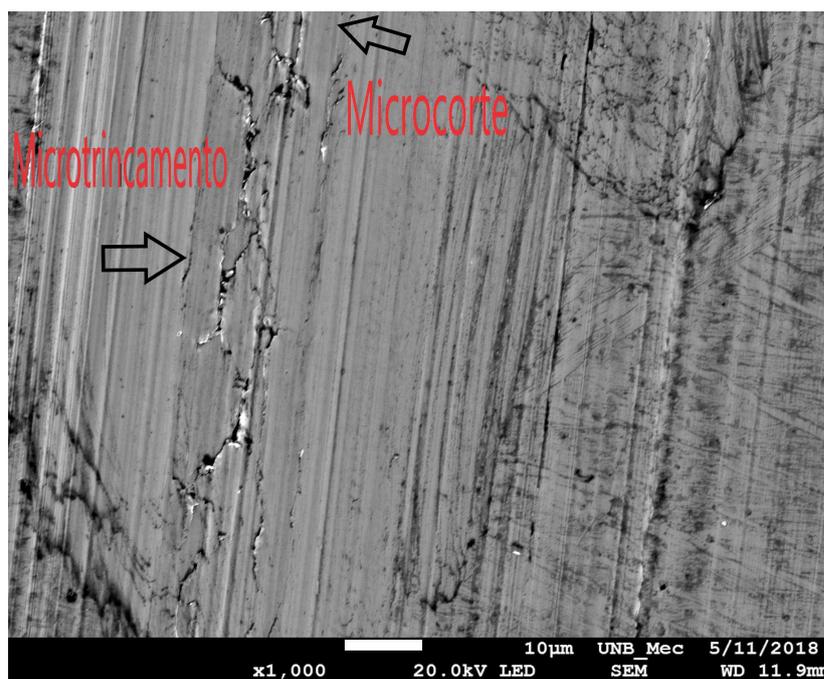


Figura 32 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A1 grupo TCP24h.

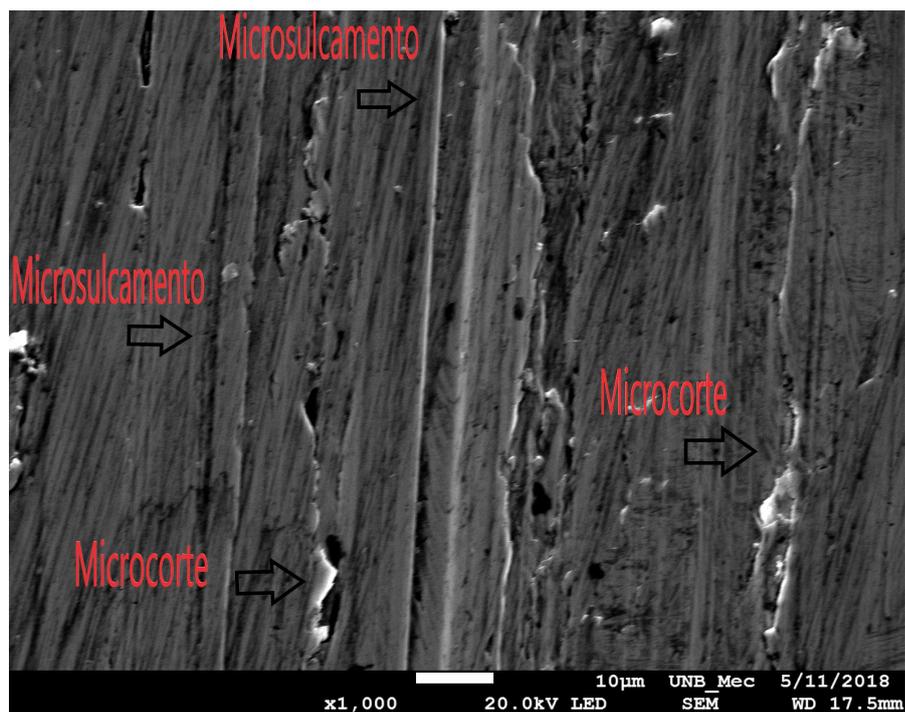


Figura 33 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo CR.

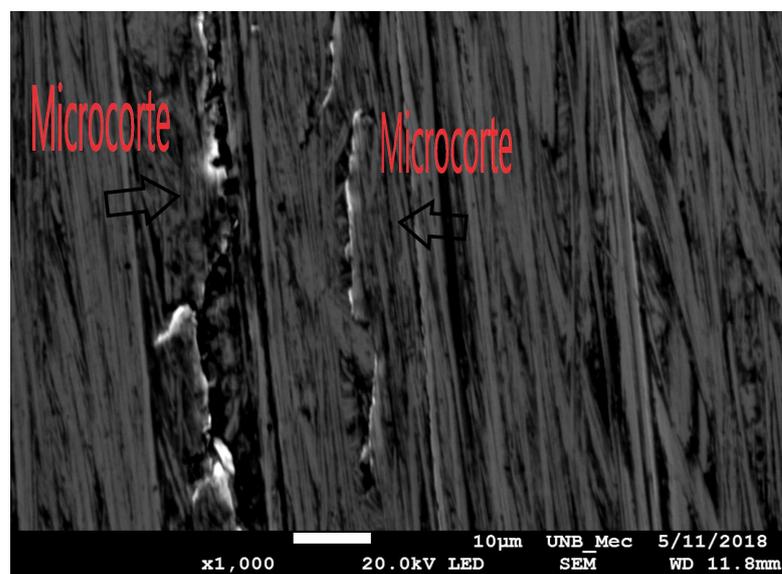


Figura 34 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TC.

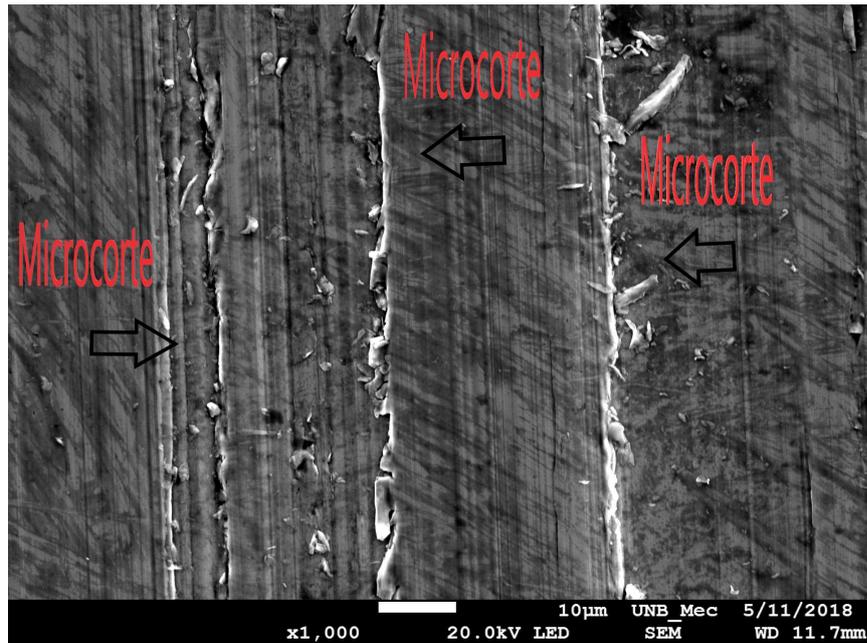


Figura 35 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TCP15h.

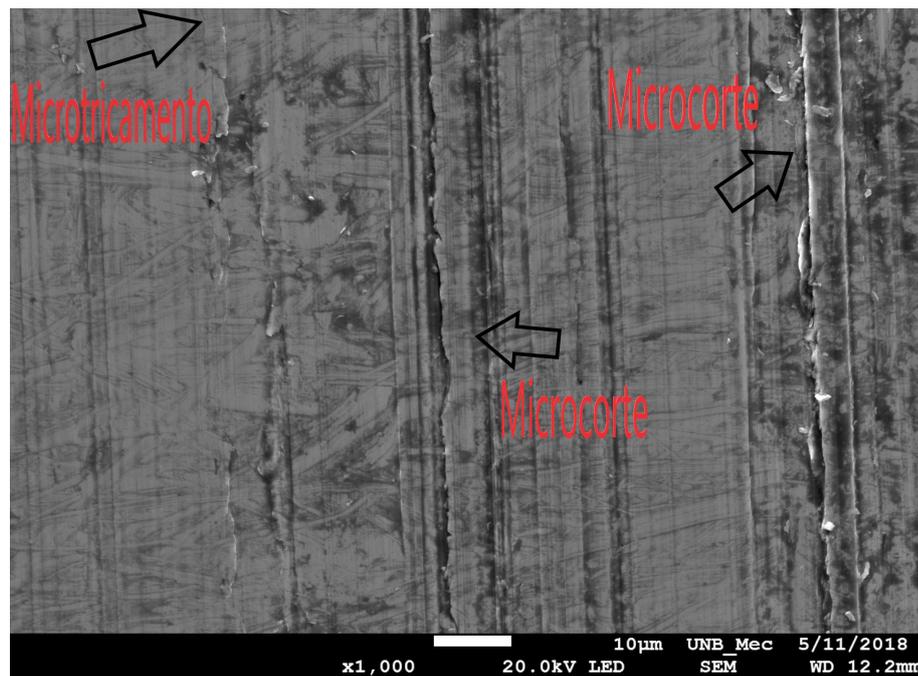


Figura 36 – Micromecanismo de desgaste abrasivo amostra A2 grupo TCP24h.

As imagens obtidas pelo MEV mostraram que houve uma transição dos micromecanismos de desgaste. Foram identificados os micromecanismos de microsulcamento, microcorte e microtrincamento. De acordo com as ranhuras provocadas pelas partículas do rebolo, observou-se que as amostras do grupo CR (figura 29) e (figura 33) foram as únicas que apresentaram o micromecanismo de microsulcamento identificado pelo deslizamento e transição de material formando bordas laterais pelo excesso de volume. Constatou-se

também o micromecanismo de microcorte apresentando riscos com profundidade e arrancamento de lascas. A atuação de ambos quantificou a perda de volume, comprovando o que foi observado e discutido anteriormente na seção sobre análise do volume removido, visto que o grupo CR foi o que perdeu quantidade de volume superior as demais. As amostras do grupo TC (figuras 30 e 34) e TCP15h (figuras 31 e 35) apresentaram o mesmo micromecanismo, o de microcorte. Nota-se que esses dois grupos possuem dureza superior aos dos grupos CR e TCP24h, fato que inibe a atuação do micromecanismo de microsulcamento, impedindo a movimentação de material, produzindo apenas riscos com formato de "corte".

A amostra do grupo TCP24h (figura 32) assim como a amostra do grupo CR apresentou dois micromecanismos, de microcorte e microtrincamento. O mecanismo de microtrincamento geralmente é identificado em superfícies de materiais frágeis, como é o caso da amostra do grupo TCP24h. Outra particularidade observada nas amostras desse grupo foi a identificação de mais de um micromecanismo, comprovando que esse fato acontece apenas em materiais com menor valor de dureza.

Não foi observado uma diferença significativa no comportamento ou na transição dos micromecanismos para as amostras do tipo A2. Todavia, foi constatado que há uma intensidade maior (riscos mais profundos) provocada pela carga, no aparecimento dos micromecanismos de microcorte para amostras dos grupos CR, TC e TCP15h, evidenciado pelo aparecimento das lascas que foram arrancadas por ações abrasivas.

Como já foi destacado, os micromecanismos de desgaste são influenciados por fatores como material (propriedades mecânicas), ensaio (parâmetros), meio ambiente (condições climáticas) e lubrificação (tipo de lubrificante). Para este projeto de graduação o único fator não utilizado foi o de lubrificação, pois os ensaios foram realizados à seco. Como foram usadas cargas diferentes nos ensaios (5 e 10 N) e não notou-se a influencia da mesma na transição dos micromecanismos, acredita-se que as propriedades do material e a lubrificação (ou ausência) são os fatores mais preponderantes, no processo de transição e identificação dos micromecanismos de desgaste abrasivo.

5 Conclusão

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência do tratamento criogênico no desgaste abrasivo do aço SAE 4340. Foram realizados ensaios de desgaste abrasivos e a partir dos resultados obtidos foi possível chegar nas seguintes conclusões a seguir.

5.1 Conclusões Específicas

5.1.1 Dureza das amostras

Conforme já esperado, as amostras do tipo A1 e A2 do grupo CR apresentaram valores de baixa dureza por se tratar da amostra "pura", sem tratamento térmico.

Na indústria não se utiliza o aço na sua forma "pura" tendo como tratamento térmico mais utilizado a têmpera seguido de revenimento. Por este fato não foi relevante analisar as amostras do grupo CR em relação aos grupos TCP15h e TCP24h. Contudo, comparado com as amostras do grupo TC, os valores de dureza das amostras com tratamento criogênico apresentaram baixa superioridade.

O fator que mais influenciou nos resultados do tratamento criogênico foi o tempo de imersão no nitrogênio líquido, pois as amostras do grupo TCP15h (com tratamento criogênico feito em 15h) apresentaram dureza mais elevado do que as amostras TCP24h (com tratamento criogênico feito em 24h).

5.1.2 Influência da carga e do tratamento criogênico no ensaio de desgaste abrasivo

A perda de volume das amostras foi inversamente proporcional a dureza obtida. As amostras com dureza elevada, apresentaram menor perda de volume.

A mudança de carga, que foi constatado ser diretamente proporcional a perda de volume, aumentou a quantidade de volume removido. Confirmando o que diz a Lei de Archard.

Não foi constatado diferença no comportamento das curvas de coeficiente de desgaste entre amostras com tratamento criogênico profundo e tratamento de têmpera com revenimento pelo fato de ambas possuírem valores de dureza semelhantes. Contudo a carga mostrou-se mais eficiente neste quesito porque o aumento da carga reduziu os valores do coeficiente de desgaste e a partir de um certa distância de deslizamento, o regime permanente foi atingido.

A mesma influência que a carga impôs sobre o coeficiente de desgaste foi observado pelas curvas da taxa de desgaste, pois a taxa de desgaste foi obtida através do coeficiente de desgaste e do parâmetro de carga, de acordo com a equação de Archard. O comportamento da taxa de desgaste apresentou um grande período de *running-in* proporcionado pela rugosidade das superfícies das amostras e do abrasivo.

Não foi identificada influência do tratamento criogênico nos coeficientes de atrito, contudo a carga fez a curva do coeficiente de atrito atingir o regime permanente.

5.1.3 Micromecanismos de desgaste

As amostras do material puro (CR) foram as únicas que apresentaram o micromecanismo de microsulcamento. De acordo com a literatura, este micromecanismo apresenta-se apenas em material com maior perda de volume.

Amostras do grupo TC e TCP15h apresentaram apenas o micromecanismo de microcorte.

As amostras com tratamento criogênico feito em 24h (TCP24h), mostraram maior transição dos micromecanismos de desgaste, onde foram identificados os micromecanismos de microcorte e microtrincamento.

A literatura diz que quanto maior a dureza maior é a transição dos micromecanismos, de microsulcamento até o de microtrincamento.

Apesar dos parâmetros de ensaio influenciarem no ensaio de desgaste abrasivo, as amostras do tipo A1 e A2, para cada grupo, não apresentaram diferenças em relação aos micromecanismos que foram identificados via MEV. Ou seja, os valores de cargas escolhidos para a realização do ensaio não foram suficientes para influenciar na transição e na identificação dos micromecanismos, apenas na intensidade na qual os riscos foram feitos.

5.2 Conclusão Geral

Encontra-se na literatura inúmeras incertezas à respeito da influência do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas dos aços, contudo este estudo revelou que é possível utilizar o tratamento criogênico para impedir a atuação do desgaste (abrasivo).

A literatura sugere que para reduzir a quantidade de massa/volume perdido por um material que está sujeito ao desgaste abrasivo é necessário diminuir a relação H_a/H_s , ou seja, aumentar a dureza H_s do material.

Através do ensaio de desgaste abrasivo, o tratamento criogênico profundo mostrou-se mais eficiente quando imerso durante 15 horas do que em 24 horas. Porém, é necessário

pesquisas mais profundas para entender como o tempo de imersão pode ser eficaz nos resultados do tratamento criogênico.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Hipótese 1: Modificar a temperatura de austenitização e o tempo de imersão no nitrogênio líquido e analisar como o tratamento criogênico pode influenciar no desgaste abrasivo.

Hipótese 2: Medir a temperatura na superfície da amostra no momento do ensaio para analisar sua influência.

Hipótese 3: Modificar os parâmetros (abrasivo, carga, tempo, distância) do ensaio.

Hipótese 3: Fazer os tipos de ensaio, por deslizamento e rolamento, e analisar qual a influência deles na transição dos micromecanismos de desgaste abrasivo.

Referências

- ABDALLA, A. et al. Estudo de fluência em aços 4340 com diferentes microestruturas e tratamento de carbonitretação a plasma. In: *19 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat*. Campos do Jordão - São Paulo - Brasil: [s.n.], 2010. p. 1–8. Citado na página 24.
- ALBANO, F. B. L. *Influência de tratamento criogênico nas propriedades termomecânicas de ligas NiTi*. 2013. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- ANAZAWA, R. M. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300m submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 31, n. 1-2, p. 32–37, 2012. Citado na página 24.
- ANICÉZIO, T. M. F. d. *Avaliação da resistência ao desgaste microabrasivo da liga Ti-12Cr revestida por filmes finos de TiN e CrN*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília - Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília-DF, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 9, 37, 39, 40, 43, 45 e 54.
- ARANGO, C. *Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)—Universidade de Sao Paulo, 2010. Citado na página 68.
- ASHIUCHI, E. S. *Efeitos do tratamento criogênico profundo e do revestimento de CrN por PVD na microabrasão da liga de alumínio AA 6101-T4*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de engenharia mecânica, Brasília-DF, Julho 2015. Citado 8 vezes nas páginas 9, 19, 32, 35, 36, 42, 43 e 44.
- BARBOSA, T. D. *Estudo sobre métodos paliativos contra a fadiga por fretting e desgaste microabrasivo sobre o AL 6101*. 2013. Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica -. Citado 3 vezes nas páginas 9, 35 e 39.
- BARROS, R. A. *Influência das microestruturas bainítica e martensítica nas propriedades tribológicas do par aço AISI/SAE 4340 e liga bronze-alumínio 630*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 26.
- BHUSHAN B; WINBIGLER, H. D. *Introduction to Tribology*. Second. Ohio - EUA: The Ohio State University Columbus, 2013. Citado na página 33.
- CALLISTER, W. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 5. Citado na página 25.
- CARDOSO, A. d. S. M. *Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após a soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, USP, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 23.

- CCBA. *Construção em aços estruturais*. 2017. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Citado na página 21.
- CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. São Paulo: ABM, 1988. Citado 9 vezes nas páginas 9, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29.
- COLETTA, M. A. D. *Comparação do desempenho à abrasão dos aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300M nitretados por plasma em diferentes condições*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2000. Citado na página 18.
- COZZA, R. C. *Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgastes micro-abrasivo*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 33, 35, 39, 62 e 64.
- CURI, E. I. M. et al. Medição do coeficiente de atrito e de desgaste para o aço 1000 dp utilizando um tribômetro com princípio basculante através da técnica de extensometria. *Revista Ciência e Tecnologia*, v. 20, n. 36, 2017. Citado na página 68.
- EBONI, G. A. *Efeito do processamento criogênico na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE M2 temperado e revenido*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Engenharia Mecânica, 2010. Citado na página 31.
- ECHEVERRI, A.; ANDERSON, E. *Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas durante o processo de têmpera de cilindros de aço AISI 1045, 4140 e 4340*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Citado na página 28.
- FARINA, P. F. d. S. et al. Tratamento criogênico e de alívio de tensões em um aço aisi d2. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração*, v. 9, n. 2, p. 140, 2012. Citado na página 31.
- FERRAGENS, A. *Abrasivos*. 2017. Disponível em: <<http://www.aristeuferragens.com.br/produto/rebolo-norton-8-x-1-art-fe-39c120-k>>. Citado na página 53.
- GASPARINI, J. H. B.; JUSTEN, M. M. *Avaliação do desgaste de camadas de carbonetos e boretos produzidas no aço aisi 4340 por meio de tratamento termo-reativo*. Dissertação (B.S.thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Citado na página 34.
- GOBBI, V. J. *Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília - DF, Agosto 2009. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 46.
- GÓMEZ, V. A. O. *Efeito da distribuição do tamanho das partículas abrasivas sobre as taxas e modos de desgaste para o ensaio de microabrasão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.
- HANDBOOK, A. *Tecnologia de atrito, lubrificação e desgaste*. [S.l.: s.n.], 1992. Citado na página 18.

HUTCHINGS IAN E SHIPWAY, P. *Tribologia: atrito e desgaste de materiais de engenharia*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 69.

LIMA, J. H. d. A.; LABIAPARI, W. d. S.; OLIVEIRA, T. R. d. Desenvolvimento de método de ensaio de desgaste abrasivo por deslizamento. *15 ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*, v. 14, n. 15, 2015. Citado na página 52.

MOREIRA, J. et al. Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento abnt 52100 temperado. *Revista matéria*, v. 14, n. 3, p. 932–946, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

OLIVEIRA, A. d. *Estudo comparativo do desgaste de navalhas de aço AISI S1 e SAE 4340 durante o corte de sucata*. Dissertação (Mestrado) — universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 9, 34 e 35.

PAULA, L. D. et al. Influência da taxa de solidificação, tamanho do abrasivo e carga no desgaste abrasivo de um ferro fundido branco. *Encontro de Iniciação Científica do LFS*, p. 49–56, Maio 2007. Citado na página 52.

RAMOS et al. Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo "pin-on-disc" (design e construção de um banco de pin-on-disc para teste de desgaste). *Cerâmica*, v. 60, p. 443–448, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 33, 35, 36 e 38.

REBECHI, J. G. *Correlações numéricas entre taxas de resfriamento microestruturais e propriedades mecânicas para tratamento do aço AISI/SAE 4140*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 27.

RIBEIRO, R. *Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-C-Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho- UNESP, Ilha Solteira-SP, 2004. Citado 9 vezes nas páginas 9, 34, 35, 38, 41, 42, 44, 45 e 47.

SANT, R. D. *Estudo da transformação da austenita retida em martensita induzida por deformação plástica em aços multifásicos*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2010. Citado na página 24.

SCHIMITEL, T. A.; SANTOS, W. H. *Ensaio de microabrasão e esclerometria da superliga Co-30Cr-19Fe*. 2017. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Citado 8 vezes nas páginas 9, 32, 35, 36, 37, 38, 39 e 46.

SEVALE, L. G. *Estudo da influência de tratamentos térmicos nas variações microestruturais do aço sae 4340*. 2014. Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília. Citado 5 vezes nas páginas 21, 26, 27, 28 e 29.

SILVA, S. E. D. *Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade estadual

do norte fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.

SOUSA, F. E. V. *Efeito dos tratamentos térmicos sobre a microestrutura do aço a333 grau 8*. 2014. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico. Citado na página 28.

SOUZA, G. A. d. *Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008. Citado na página 24.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. *Engineering tribology*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

TEIXEIRA, L. B. *Tratamento criogênico nas propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4340*. 2017. Bacharel em Engenharia Automotiva - Universidade de Brasília. Citado na página 48.

TIER, M. A. D. *Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Outubro 1998. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

TOZETTI, K. D. Efeito da carga e do tamanho do grão abrasivo no desgaste do ferro fundido branco 19, 9% cromo e 2, 9% carbono. Universidade Federal do Espírito Santo, 2013. Citado na página 61.

VLACK, L. H. V. *Princípio de ciência dos materiais*. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.