

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DIANDRA VIELMO DE DEUS

**EFEITO DOS TRATAMENTOS SUB-ZERO E CRIOGÊNICO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO AÇO RÁPIDO ABNT M2**

Alegrete

2016

DIANDRA VIELMO DE DEUS

**EFEITO DOS TRATAMENTOS SUB-ZERO E CRIOGÊNICO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO AÇO RÁPIDO ABNT M2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier

Alegrete

2016

DIANDRA VIELMO DE DEUS

**EFEITO DOS TRATAMENTOS SUB-ZERO E CRIOGÊNICO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO AÇO RÁPIDO ABNT M2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de Julho de 2016.
Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
UNIPAMPA

Prof. Dr. Ana Cláudia Costa de Oliveira
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus heróis, minha
mãe Marcia e meu pai Flavio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por me permitir chegar até aqui e ter me protegido sempre.

Gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador o Professor Marco Tier, que não só me ajudou a realizar este trabalho, mas esteve comigo durante um bom pedaço da minha jornada acadêmica. Muito obrigada por todos ensinamentos, pela paciência e pela dedicação que o senhor teve comigo. Eu aprendi muitas coisas, mas acredito que a principal delas foi de nunca desistir e isso com certeza irei levar para resto da vida.

Ao Mestre Dieison Fantineli que durante o desenvolvimento deste trabalho e durante outros me ajudou e ensinou muito. Muito obrigada.

À empresa Hurth Infer por realizar a têmpera nas amostras deste trabalho.

Ao Professor Flávio da URI e ao Professor Inácio da UFSM, os quais cederam seus laboratórios para realização dos ensaios de Impacto e dureza, respectivamente. Muito obrigada.

À minha família que sempre esteve ao meu lado me dando forças e coragem nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Marcia e Flávio, meu irmão Alexandre e meu namorado Matheus que estiveram comigo em todas as etapas da graduação, nos momentos de desespero, dúvidas, angústias e claro nos momentos de felicidade. Muito obrigada por sofrerem junto comigo e por sempre acreditarem em mim mais do que eu mesma, se hoje estou finalizando esta etapa vocês são um dos motivos.

E aos meus amigos, muito obrigada por simpatizarem com essa pessoa antipática e agradeço pelos bons finais de semana que vivenciamos juntos. Acredito que sem vocês a faculdade não teria graça. Muito obrigada pelo apoio, cervejas e risadas.

RESUMO

Os aços ferramentas possuem uma larga escala de aplicações na indústria metal mecânica, variando desde matrizes e brocas até fresas helicoidais. Aços ferramentas são bastante utilizados na fabricação de ferramentas de corte que trabalham em altas velocidades e a altas temperaturas. É imprescindível que estas ferramentas, quando em serviço, sejam altamente duras e resistentes sem qualquer suscetibilidade a deformações em condições extremas. A obtenção de tais propriedades mecânicas é feita através dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Estes processos resultam em uma microestrutura de alta dureza e boa tenacidade. Contudo aços ferramenta são bastante suscetíveis a retenção de austenita retida durante tratamentos térmicos, o que não é desejável para este tipo de aço. Com o intuito de aprimoramento, começou-se a estudar as consequências que a adição de tratamentos a baixo de zero trariam aos aços, estes tratamentos são conhecidos como Sub-zero e Criogênico, sendo aproximadamente -80°C e -196°C , respectivamente, as temperaturas de realização destes tratamentos. O presente trabalho visa comparar e avaliar as propriedades mecânicas e tribológicas do aço rápido M2 quando submetido aos tratamentos criogênico e sub-zero. Os resultados foram obtidos a partir dos ensaios mecânicos de dureza, microdureza, impacto e desgaste, bem como através de análises microestruturais realizadas em microscópio óptico, microscópio eletrônico de varredura e espectroscopia Raman. Os ensaios e análises mostraram que a adição dos tratamentos sub-zero e criogênico beneficiam o material com relação a dureza, microdureza, tenacidade e precipitação de carbeto. Sendo estes resultados mais perceptíveis nas amostras que utilizaram a criogenia.

Palavras chaves: Tratamento térmico, tratamento a baixas temperaturas, sub-zero, criogenia.

ABSTRACT

The steel tools have a wide scale of applications in the metal mechanics industry, ranging from matrices and drills to helical end mills. Steel tools are widely used to fabrication of cutting tools which work in high speeds and high temperatures. It's essential that tools, when in service, be highly hard and resistant without any susceptibility to deformations under extreme conditions. The obtainment of such mechanical properties is made through heat treatment by quenching and tempering. These processes result in a microstructure with high hardness and good toughness. However steel tools are quite susceptible to retention of austenite retained during heat treatment, which isn't desirable for this type of steel. With the enhancement intention, began study of the consequences that addition of the treatments below zero would bring the steel. These treatments are known as Sub-zero and Cryogenic, be approximately -80°C and -196°C , respectively, the temperatures of realization of these treatments. This study aims to compare and evaluate the mechanical and tribological properties of high steel M2 when subjected to cryogenic and sub-zero treatment. The results were obtained from mechanical tests of hardness, microhardness, impact and wear, and through microstructural analysis realized by optical microscope, electron microscope and Raman spectroscopy. Tests and analyzes showed that the addition of sub-zero and cryogenic treatments benefiting the material with respect to hardness, microhardness, tenacity and carbide precipitation. These being more noticeable results on the samples that used cryogenics.

Key Words: Heat treatment, cold treatment, retained austenite, shallow treatment, cryogenic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ferramentas produzidas com aço rápido M2.....	19
Figura 2 - Endurecimento secundário do aço M2.....	23
Figura 3 - Influência do teor de carbono nas temperaturas de formação da martensita.....	24
Figura 4 - Equipamento utilizado para a realização da criogenia por nebulização direta.....	27
Figura 5 - Equipamento usado na imersão direta.....	28
Figura 6 - Norma para ensaio Charpy.....	31
Figura 7 – Dimensões das amostras (medidas em mm).....	32
Figura 8 - Máquina de corte.....	32
Figura 9 - (a) Equipamento para o tratamento criogênico, (b) Controlador.....	33
Figura 10 - Controlador durante tratamento sub-zero.....	34
Figura 11 – Forno Mufla INTI.....	34
Figura 12 - Durômetro.....	36
Figura 13 - Microdurômetro.....	36
Figura 14 - (a) Policorte. (b) Embutidora.....	37
Figura 15 - Equipamento Phoenix.....	38
Figura 16 - Esquema de funcionamento da máquina de desgaste.....	38
Figura 17 - Balança de precisão.....	39
Figura 18 - Equipamento para ensaio de impacto Charpy.....	40
Figura 19 - Equipamento de espectroscopia Raman.....	41
Figura 20 - Microscópio Óptico.....	42
Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	42
Figura 22 - Processo de limpeza das amostras no Ultrassom.....	43
Figura 23 - Gráfico com os resultados de dureza.....	45
Figura 24 - Gráfico com a comparação de dureza entre T/2R e T/SZ/2R e T/DCT/2R.....	46
Figura 25 - Gráfico com os resultados de microdureza Vickers.....	48
Figura 26 - Gráfico com os resultados do ensaio de impacto Charpy.....	50
Figura 27 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste com lixa 220.....	52
Figura 28 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste para rotas com duplo revenido.....	52
Figura 29 - Comparativo entre as rotas T/SZ/1R e T/DCT/1R em relação a T/2R.....	54
Figura 30 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento convencional.....	56

Figura 31 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento Sub-Zero.	57
Figura 32 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento Criogênico.....	57
Figura 33 - (a) T (b) T/SZ (c) T/DCT.....	58
Figura 34 - (a) T (b) T/SZ (c) T/DCT.....	60
Figura 35 - (a)T/2R (b) T/SZ/2R (c) T/DCT/2R	61
Figura 36 - (a) T/2R (b) T/SZ/2R (c) T/DCT/2R.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos aços rápidos da série M.....	20
Tabela 3 - Rotas de tratamentos.	35
Tabela 3 - Composição química em % de peso aço M2.....	44
Tabela 4 - Resultados de Dureza.	45
Tabela 5 - Comparação de dureza entre T/2R e T/SZ/2R e T/DCT/2R	46
Tabela 6 - Resultados de microdureza.....	47
Tabela 7 - Comparações de microdureza entre as rotas com 1R e 2R em relação a rota T/2R.	49
Tabela 8 - Resultados do ensaio de impacto.....	51
Tabela 9 - Resultados do ensaio de desgaste com lixa 220.....	51
Tabela 10 - Análise estatística dos resultados de desgaste para rotas com duplo revenido.	53
Tabela 11 - Resumo dos resultados.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas

DCT – Deep Cryogenic Treatment

DP – Desvio Padrão

Fe₃C – Composição química da cementita

HC – Célula unitária hexagonal compacta

M2 – Aço ferramenta da série M

M₂C – Carbetos secundários

MC – Carbetos primários

M_i – Massa inicial

M_f – Massa Final

NBR – Normas Brasileiras

ST – Shallow Treatment

T – Têmpera

R – Revenido

SZ – Sub-Zero

TCC – Célula unitária tetragonal de corpo centrado

TTT – Curvas de transformação, Temperatura, Tempo e Transformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Aços Ferramenta	18
2.1.1	Aços Rápidos	19
2.2	Tratamentos Térmicos em Aços Rápidos	21
2.2.1	Têmpera	21
2.2.2	Revenido	22
2.3	Endurecimento Secundário	23
2.4	Austenita Retida	24
2.5	Tratamento Criogênico	24
2.6	Tratamento Sub-zero	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Usinagem das Amostras	31
3.2	Tratamentos Térmicos	32
3.3	Ensaio Mecânicos	35
3.3.1	Ensaio de Dureza	35
3.3.2	Ensaio de Microdureza	36
3.3.3	Ensaio de Desgaste	37
3.3.4	Ensaio de Impacto Charpy	39
3.4	Análise Microestrutural	40

3.4.1	Espectroscopia Ramam	40
3.4.2	Microscopia Óptica (MO)	41
3.4.3	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1.	Composição do Aço Rápido ABNT M2.....	44
4.2.	Ensaio de Dureza.....	44
4.3.	Ensaio de Microdureza	47
4.4.	Ensaio de Impacto Charpy	50
4.5.	Ensaio de Desgaste	51
4.6.	Resumo dos Resultados.....	54
4.7.	Análise Microestrutural.....	55
4.7.1.	Espectroscopia Raman	56
4.7.2.	Microscopia Óptica.....	58
4.7.3.	MEV	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
5.1.	Conclusões.....	64
5.2.	Sugestões Para Trabalhos Futuros	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Aços ferramenta são utilizados em grande escala na indústria metal mecânica. Ferramentas de corte e componentes de máquinas são exemplo de sua aplicação. Os tratamentos térmicos são empregados com a finalidade de modificar sua microestrutura e melhorar suas propriedades mecânicas e tribológicas. Estas variações são feitas de acordo com a aplicação a qual será submetida a ferramenta. Os tratamentos térmicos baseiam-se no aquecimento e resfriamento do material de forma controlada.

Com o desenvolvimento dos processos de tratamentos térmicos, surgiram técnicas que além de aquecer também submetiam o material a baixas temperaturas (menores que 0°C). Inicialmente, conseguia-se alcançar temperaturas próximas a -80°C , tratamento conhecido como sub-zero, o qual beneficia os aços pela quase total eliminação da austenita retida, (Barron-1989 e Farina-2011). Com o surgimento de novas tecnologias foi possível o controle das taxas de resfriamento, e assim começaram a ser realizados tratamentos onde se alcançavam temperaturas próximas a do nitrogênio líquido (-196°C), o conhecido tratamento criogênico. O estudo sobre o efeito da criogenia aos ciclos de tratamentos térmicos, vem apresentando resultados positivos aos aços.

Um dos pioneiros na realização de estudos de tratamentos térmicos com adição da criogenia foi Meng (1994). Suas pesquisas foram baseadas no aço ferramenta Fe-12 Cr-Mo-V-1,4C. Através da difração de raio-X e microscopia eletrônica de transmissão, Meng verificou que, diferente do tratamento sub-zero, no tratamento criogênico há a precipitação de finos carbeto, os quais deixam a matriz martensítica mais resistente e dura, resultando em uma maior resistência ao desgaste.

A literatura apresenta os vários benefícios que a criogenia e o tratamento sub-zero trazem aos aços, como maior resistência ao desgaste e em alguns casos maior tenacidade e dureza. Apesar das evidências de que o uso da criogenia proporciona melhorias nas propriedades mecânicas e tribológicas dos aços, o processo ainda precisa ser melhor estudado e as mudanças microestruturais melhor investigadas.

1.1 Justificativa

As pesquisas realizadas por Molinari (2001), Amini (2010), Senthilkumar (2011), Huang (2003) e muitos outros estudiosos, comprovam a eficiência dos tratamentos criogênicos em melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas dos aços. Contudo, existem controvérsias quanto as causas dos benefícios. Alguns autores reportam que a melhora da resistência ao desgaste se deve basicamente a transformação da austenita retida em martensita durante os tratamentos sub-zero e criogênico. Outros trabalhos mencionam que durante os tratamentos realizados próximos a temperaturas do nitrogênio líquido (-196°C) (tratamento criogênico) ocorre a nucleação de carbeto extremamente finos e que esta seria a principal razão para o ganho de resistência ao desgaste. Além disso, alguns artigos citam o aumento de dureza após o tratamento criogênico, enquanto outros citam que não ocorre aumento de dureza/microdureza, apesar do ganho de resistência ao desgaste.

Esses resultados controversos merecem ser melhor estudados, sendo esta a proposta do presente trabalho. Na hipótese de que os benefícios obtidos estejam fortemente associados com a fina precipitação de carbeto espera-se que o tratamento criogênico resulte em melhores propriedades, em relação ao tratamento sub-zero, uma vez que na temperatura próxima ao nitrogênio líquido é esperada uma precipitação mais refinada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é comparar os efeitos do tratamento sub-zero e criogênico nas propriedades mecânicas e tribológicas do aço rápido ABNT M2.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analisar e comparar a dureza e microdureza entre as diferentes rotas de tratamentos;
2. Avaliar e comparar resistência ao desgaste das amostras;
3. Analisar as diferenças microestruturais resultantes de cada tratamento;
4. Avaliar a tenacidade das amostras através do ensaio Charpy.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

Capítulo 1 - Introdução: contém uma contextualização do tema abordado, para um melhor entendimento do leitor. É abordado também o objetivo geral, os objetivos específicos a serem alcançados, assim como, a justificativa para a realização do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta um embasamento teórico, onde é descrito e explicado os assuntos referentes ao trabalho. É relatado o que já foi feito na área, os resultados encontrados por pesquisadores e as inconsistências entre as conclusões.

Capítulo 3 – Metodologia: são apresentados os métodos que foram utilizados para realizar o procedimento experimental, o material utilizado e a descrição dos ensaios necessários para se alcançar os objetivos.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: são apresentados os resultados obtidos e comparações com a literatura

Capítulo 5 – Considerações Finais: neste capítulo estão mostradas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados conceitos básicos e a fundamentação a respeito dos assuntos que são tratados e utilizados na realização deste trabalho, como: aços rápidos, tratamentos térmicos e as principais pesquisas na área de criogenia aplicada a aços rápidos. Este embasamento teórico teve como referências artigos, teses, livros e apostilas.

2.1 Aços Ferramenta

Os aços ferramentas são um conjunto de aços utilizados na fabricação de ferramentas, como fresas, matrizes e bits. Os primeiros aços possuíam em sua composição a adição apenas do carbono, só a partir de 1868 é que foram desenvolvidos aços que continham elementos de liga.

As propriedades de um aço ferramenta são bastante particulares, dentre elas se pode citar: resistência a deformação a quente, resistência ao choque térmico, dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, elevada resistência ao desgaste, resistência ao impacto, resistência mecânica, usinabilidade e temperabilidade. Estas propriedades são obtidas pela adição dos elementos de liga e tratamentos térmicos específicos.

A classificação dos aços ferramentas é feita por famílias, de acordo com suas aplicações:

W - Temperáveis em água;

S - Resistentes ao choque;

Aços para fins especiais

L – Tipo baixa liga;

F – Tipo carbono-tungstênio;

P – Aços para moldes;

Para trabalho a frio

O – Aços temperáveis em óleo;

A – Aços temperáveis ao ar;

D – Aço alto carbono, alto cromo;

Para trabalho a quente

H1 – H19 – Ao cromo;

H20 – H39 – Ao tungstênio;

H40 – H59 – Ao molibdênio;

Aços rápidos

T - Ao tungstênio;

M - Ao molibdênio.

2.1.1 Aços Rápidos

O grupo dos aços rápidos é bastante conhecido na engenharia e na indústria. Está atrelado a fabricação de ferramentas de usinagem de alta resistência. A figura 1 mostra algumas aplicações do aço rápido M2. É característico destes aços possuir elevadas durezas a altas temperaturas, pois em condições de elevadas temperaturas não pode haver o ‘amolecimento’ das ferramentas. É importante também citar a boa resistência ao desgaste e significativa tenacidade. A combinação destas propriedades dentre outras, é o que faz com que o aço rápido seja bastante requisitado.

Figura 1 - Ferramentas produzidas com aço rápido M2.



Os aços rápidos são divididos em séries M, aços rápidos ao molibdênio, e T, aços rápidos ao tungstênio. A principal diferença que existe entre as classes é na quantidade de molibdênio, onde na série M este é adicionado em maiores quantidades para substituir o tungstênio, mas possui a mesma função: de formar carbeto. A concentração de W (tungstênio)

na série T é relativamente alta, varia de 11% a 21%, e a de Mo (molibdênio) é encontrado de 0,4% a 1,25%, já na série M o W possui concentrações menores, variando de 1% a 6% e o Mo varia de 4,25% a 9,2%.

Os aços rápidos da série M, são aços bastante utilizados na fabricação de ferramentas de corte para uso em altas velocidades, como: brocas, machos para roscas, fresas e tem mostrado uma grande aceitação no mercado, atualmente representam 95% de aços rápidos produzidos nos Estados Unidos. O molibdênio adicionado nesta classificação é mais caro que o tungstênio, mas seu peso atômico é aproximadamente a metade, o que resulta em duas vezes mais átomos de molibdênio para uma mesma quantidade tungstênio. Assim o aço rápido ao molibdênio contém tanto o molibdênio quanto o tungstênio, mas esse em quantidades menores, quando comparadas a série T. (SILVA, 2010).

A adição do molibdênio nestes aços além de formar carbeto, garantem a dureza a quente do aço em serviço.

Na tabela 1 estão apresentadas todas as variações de aços da série M e suas respectivas composições químicas (% peso).

Tabela 1 - Composição dos aços rápidos da série M.

ELEMENTO	C		Mn		P	S		Si		Cr		V		W		Mo		Co	
TIPO	min	máx	min	máx	máx	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	
M1	0,78	0,88	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,50	3,50	4,00	1,00	1,35	1,40	2,10	8,20	9,20	-	-	
M2	0,78	0,88	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,50	1,75	2,20	5,50	6,75	4,50	5,50	-	-	
M2 alto C	0,95	1,05	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,50	1,75	2,20	5,50	6,75	4,50	5,50	-	-	
M3 classe 1	1	1,10	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,50	2,25	2,75	5,00	6,75	4,75	6,50	-	-	
M3 classe 2	1,15	1,25	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,50	2,75	3,25	5,00	6,75	4,75	6,50	-	-	
M4	1,25	1,40	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,75	3,75	4,50	5,25	6,50	4,25	5,50	-	-	
M6	0,75	0,85	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,45	3,75	4,50	1,30	1,70	3,75	4,75	4,50	5,50	11,00	13,00	
M7	0,97	1,05	0,15	0,40	0,03	0,03	0,20	0,55	3,50	4,00	1,75	2,25	1,40	2,10	8,20	9,20	-	-	

Fonte: NBR NM 116 – 1(p.5, 2005).

2.2 Tratamentos Térmicos em Aços Rápidos

Quando se deseja obter propriedades mecânicas específicas para determinada utilização dos aços se recorre a tratamentos térmicos, pois o aço normalmente é encontrado em estado recozido, e dessa forma possui baixa dureza e resistência mecânica. Os tratamentos térmicos são um conjunto de tratamentos realizados através do aquecimento e resfriamento do material, tendo como objetivo melhorar as características dos aços, para este alcançar melhor desempenho durante a execução de sua função.

Para cada classe dos aços ferramentas são realizados tratamentos distintos, pois as propriedades que se deseja obter são diferentes. Como os aços rápidos são utilizados para fabricação de ferramentas de corte em geral que serão usadas em altas velocidades, as propriedades requeridas por estes materiais são: alta resistência ao desgaste, boa tenacidade, dureza, dureza a quente, baixa ductilidade e temperabilidade.

2.2.1 Têmpera

A têmpera é realizada no aço rápido M2, para que este apresente alta dureza e resistência mecânica. Com apenas este tratamento não se obtêm o conjunto final das propriedades necessárias, após a têmpera o aço ganha em dureza e resistência mecânica, mas tem uma perda significativa em tenacidade. Esta é corrigida com o revenido.

No aço M2 a têmpera é feita aquecendo o material entre as linhas A1 e Acm e resfriando rapidamente até a temperatura ambiente. Neste resfriamento rápido deve-se ter cuidado, pois um resfriamento muito brusco gera tensões residuais no material, mas deve ser suficientemente rápido para que não haja formação de nenhuma outra microestrutura que não seja a martensita (Strohaecker, 2013). A austenitização do aço rápido M2 é feita em normalmente a 1200°C. Alguns trabalhos que tratam deste assunto mostram a variância da temperatura de austenitização, Éboni (2010) utilizou em seus experimentos a temperatura de 1190°C. No estudo feito por Fantineli (2015) os melhores resultados encontrados foram com uma temperatura de austenitização de 1200°C.

Após atingir a temperatura de austenitização o aço rápido é mantido nesta temperatura apenas o tempo suficiente para a homogeneização da temperatura, e então é resfriado rapidamente, em banho de sais a uma temperatura de aproximadamente 600°C. Então o aço é resfriado novamente até a temperatura ambiente. Estas duas etapas de resfriamento são realizadas para que não seja gerado empenamento no material.

Durante o rápido processo de transformação, o carbono e os elementos de liga dissolvidos na matriz austenítica, ficam aprisionados nos interstícios da austenita, gerando uma distorção na estrutura cristalina. Esta distorção forma a martensita, com estrutura cristalina TCC, a qual possui elevada dureza e resistência mecânica.

Para aços com alto teor de carbono, como o ABNT M2, após realizada a têmpera, a microestrutura pode não se apresentar totalmente martensítica, formando assim uma microestrutura composta por martensita e austenita retida. Para aplicações do aço M2 isso não é bom, pois a austenita possui alta ductilidade, o que não é esperado neste tipo de aço.

Ao realizar a têmpera são geradas muitas tensões, a peça se encontra com dureza elevada e extremamente frágil, desta forma não é viável colocar a ferramenta em serviço, uma vez que a mesma pode romper com facilidade. Para evitar que isso aconteça o revenido é efetuado após a têmpera. É importante ressaltar que o revenido sempre é realizado após a têmpera.

2.2.2 Revenido

O revenido é o reaquecimento do material após a têmpera até uma temperatura onde ocorra a difusão dos elementos de liga e carbono de modo a precipitar carbeto na microestrutura. Normalmente são realizados mais de um revenido, geralmente duplo, o primeiro para o alívio de tensões e transformação da austenita retida e o segundo revenido tem o objetivo de reverter a martensita formada no primeiro revenido (Silva, 2010).

No aço M2 o revenido é realizado em temperaturas acima de 500°C, pois é a partir deste ponto que os carbeto começam a precipitar. Firouzdor (2007) realizou revenido em seu trabalho com temperatura de 600°C durante 2 horas, Fantineli (2015) utilizou revenido duplo a 550°C durante 120 minutos cada.

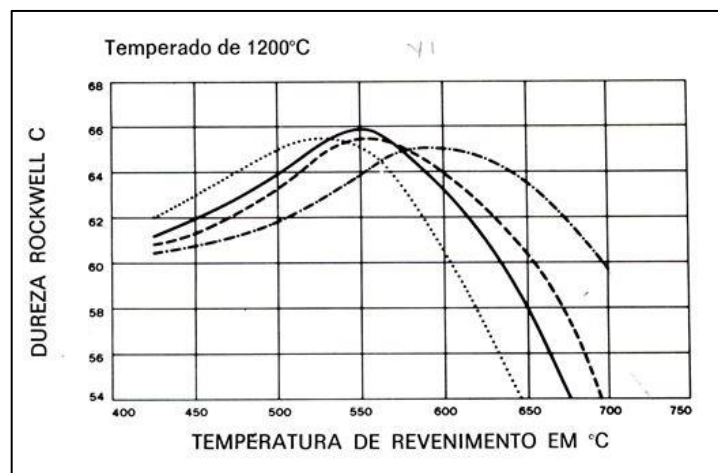
Ao precipitarem os carbeto de elementos de liga, estes não possuem um padrão quando se trata de tamanho e distribuição na matriz martensítica. Amini (2010), mostrou que a porcentagem de carbeto precipitados após o revenido varia de 3,8 a 4% e que estes não estão homogeneamente distribuídos na martensita, assim ele e muitos outros estudiosos acrescentaram às rotas de tratamentos, temperaturas abaixo de zero, para conseguir corrigir estes problemas.

2.3 Endurecimento Secundário

O endurecimento secundário, é um fenômeno onde ocorre aumento na dureza no material durante o revenido. O aço ao ser temperado apresenta uma alta dureza, este fenômeno é conhecido como endurecimento primário, mas seu pico máximo de dureza é atingido ao se realizar o primeiro revenido. O endurecimento secundário depende de muitas variáveis, como a precipitação dos elementos de liga, temperatura e tempo de revenido, composição da liga (Fantineli, 2015).

Para o aço ABNT M2, acima dos 500°C precipitam finos carbeto do tipo MC e M2C, nas discordâncias e contornos da martensita (Silva, 2001). No momento em que estes finos carbeto precipitam a dureza atinge seu pico. A figura 2 mostra o pico de dureza do aço M2.

Figura 2 - Endurecimento secundário do aço M2.



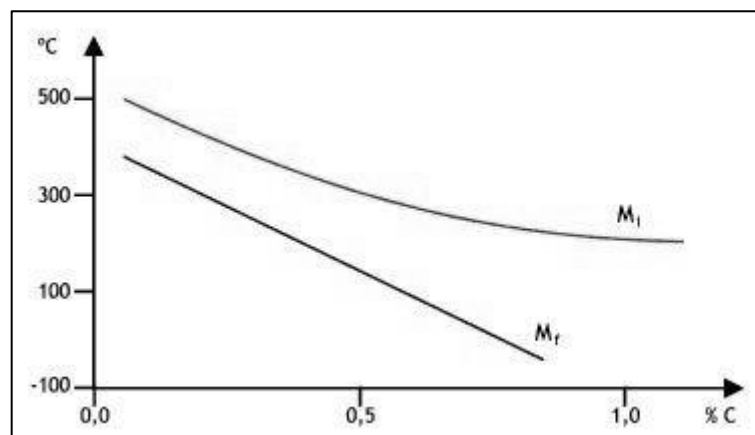
Fonte: Aços Vilares.

2.4 Austenita Retida

A austenita retida encontrada muitas vezes na microestrutura do aço é resultado da austenita que não se transformou durante o processo de têmpera. Isso ocorre principalmente em aços de alta temperabilidade, como aços ferramenta, e pode ocorrer devido ao resfriamento não suficientemente rápido, altas porcentagens de carbono que resultam no retardo das temperaturas de início e fim da martensita. A figura 3 mostra este o retardo influenciado pelo carbono.

Essa austenita pode ser eliminada através de revenidos múltiplos ou por meio de tratamentos que utilizam baixas temperaturas.

Figura 3 - Influência do teor de carbono nas temperaturas de formação da martensita.



Fonte: MSPC

2.5 Tratamento Criogênico

Durante muitos anos joalheiros suíços foram conhecidos por produzirem o melhor e o mais resistente aço para a fabricação de relógios. Submeter suas delicadas partes as baixas temperaturas dos Alpes durante um longo período de tempo, era o segredo dos melhores relógios da época.

Existem relatos de experimentos utilizando baixas temperaturas realizados durante e antes da segunda guerra mundial. Naquela época ainda não era possível ter o controle da

temperatura, nem se tinha acesso a elementos mais eficazes e seguros a realização. Um exemplo, foi o trabalho realizado por Gulyaev (1937), citado por Éboni (2010), na antiga URSS, usado para eliminação da austenita presente nos aços temperados. Gulyaev utilizou uma caixa revestida de cobre, isolada externamente com aço, o espaço entre os materiais era constituído de dióxido de carbono sólido (gelo seco), metano ou freon (fluidocarboneto), onde através desses elementos ele conseguia atingir temperaturas entre -80°C e -100°C .

Clarence Zenes executou suas pesquisas em Watertown Arsenal durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), onde por não obter controle da temperatura, mergulhava as peças diretamente em nitrogênio líquido. Zenes percebeu que ao serem colocadas em serviço muitas peças trincavam ou quebravam com facilidade, entretanto as que não se apresentavam dessa forma, obtinham uma vida útil muito mais longa.

Após a Segunda Guerra Mundial abandonou-se as pesquisas relacionadas a criogenia, sendo retomada apenas nos anos 1960. A partir do momento em que se conseguiu controlar a temperatura e não houve mais materiais prejudicados pelo choque térmico, as pesquisas com o uso da criogenia começaram a se desenvolver, com destaque nos Estados Unidos. Como resultado, os materiais que foram submetidos ao tratamento criogênico, obtiveram aumento em sua vida útil e melhoras em suas propriedades mecânicas.

Baron (1974), citado por Éboni (2010), desenvolveu um processo chamado Per-O-Bonding que consistia em resfriar a amostra até -196°C por vinte horas, aquecer lentamente até a temperatura ambiente, e aquecer novamente até $+196^{\circ}\text{C}$, para haver o alívio de tensões. Com isso Baron verificou que a vida útil das amostras submetidas ao tratamento melhoraram em 600%.

Taylor (1978), realizou o tratamento criogênico em fresas e matrizes, onde utilizou duas etapas: na primeira as peças ficavam sob o efeito do nitrogênio gasoso por três horas, como um pré-resfriamento, e após eram imergidas no nitrogênio líquido a -196°C por dez horas. Taylor notou que o tempo de vida das fresas aumentou em 200% e das matrizes em 600%.

A criogenia é um processo adicionado aos tratamentos térmicos convencionais de têmpera e revenido, com o objetivo de eliminar a austenita retida presente após a têmpera e melhorar as propriedades mecânicas do material. Para sua realização é necessário dispor de temperaturas baixas, assim se utiliza o nitrogênio, onde em sua forma líquida atinge

aproximadamente -196°C . Outros elementos também podem atingir esta temperatura, como o hélio, o oxigênio e o metano, porém são altamente inflamáveis, oxidantes além de serem muito caros. Dessa forma o nitrogênio é a melhor opção.

A literatura apresenta um número considerável de autores, em que vários pontos são comuns a eles, mas ainda há muitos conflitos entre os resultados. Autores relatam que a criogenia beneficia os aços em termos de aumento de dureza, aumento de vida útil, diminuição da taxa de resistência ao desgaste e eliminação da austenita retida.

Molinari *et al.* (2001) utilizaram o aço ferramenta M2 para realizar seus estudos com tratamento criogênico, mostrando que ao adicionar a criogenia aos tratamentos convencionais houve aumento da dureza, redução do consumo da ferramenta e aumento na resistência ao desgaste que ele atribuiu ao aumento da dureza, sendo que a taxa de desgaste para amostra criogênica foi de 1,8% ($\text{g/m} \times 10^{-6}$) e para amostra com tratamento convencional de 3,7 % ($\text{g/m} \times 10^{-6}$).

No estudo realizado por Huang *et al.* (2003), eles afirmaram que quando se adiciona a criogenia as rotas de tratamentos térmicos do aço M2 a formação de carbeto é facilitada, tanto que aumenta sua população e sua fração de volume na martensita. Huang cita também que a distribuição dos carbeto se apresenta de forma mais homogênea. Reforçando o estudo de Huang, Firouzdor (2007) também citou que a criogenia facilita a precipitação destes finos carbeto, resultando em maior vida útil da ferramenta. Utilizando brocas de aço M2, Firouzdor mostrou que elas obtiveram melhor resistência ao desgaste, devido a precipitação dos finos carbeto e a transformação da austenita retida em martensita, após o tratamento criogênico.

Zhirafar (2007) avaliou o efeito do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas e na microestrutura do aço ABNT 4340, concluindo que a dureza nas amostras criogênicas aumentou apenas 1,48% com relação as amostras do tratamento convencional. Ele atribuiu este aumento a transformação da austenita retida em martensita e a precipitação de carbeto. Já a energia de impacto absorvida foi menor quando comparada as amostras tratadas convencionalmente. Leskovsek (2006) cita que para o aço ferramenta ABNT M2 a resistência a fratura não varia, da mesma forma que a dureza para as amostras nas quais foi adicionada a criogenia aos tratamentos térmicos.

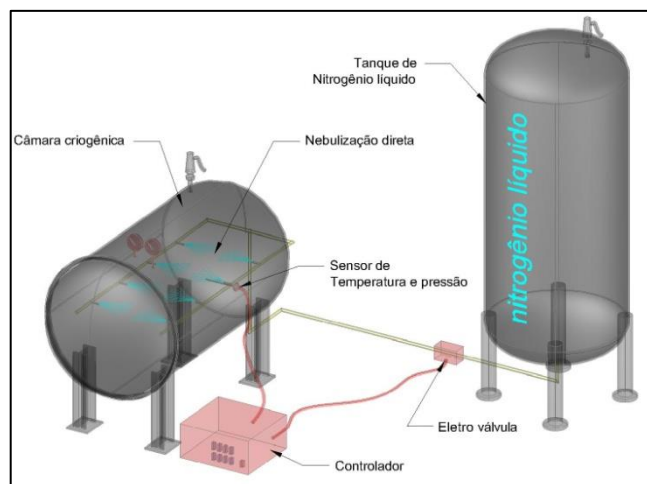
Sistemas para a Realização do Tratamento Criogênico

O tratamento criogênico é realizado colocando a peça dentro de uma câmara onde será inserido o nitrogênio líquido aos poucos, para que as peças não sofram os efeitos do choque térmico. Esta câmara geralmente é um tanque com boa vedação e com controle de temperatura.

Ao longo do desenvolvimento e descobertas em relação ao tratamento criogênico, existiram várias formas de realizá-lo. Como já foi citado, no princípio onde não havia o controle de temperaturas a peça era apenas mergulhada no nitrogênio, porém ao coloca-la em serviço está rapidamente quebrava ou apresentava defeito. Pode-se citar cinco maneiras de realizar o tratamento criogênico: nebulização direta, imersão gradual direta, imersão direta, sistema híbrido e trocador de calor. A seguir cada um desses procedimentos será descrito.

- **Nebulização Direta:** a peça fica em uma câmara onde o nitrogênio é nebulizado para dentro e por meio um ventilador o nitrogênio é distribuído para toda a câmara. A temperatura atingida chega bem próxima a -196°C . A figura 4 mostra este mecanismo.

Figura 4 - Equipamento utilizado para a realização da criogenia por nebulização direta.



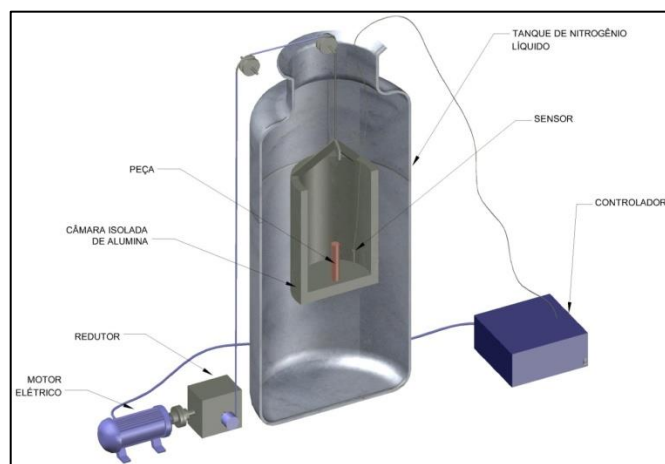
Fonte: FANTINELI (p.45, 2015)

- **Imersão Gradual Direta:** consiste em mergulhar a peça diretamente no nitrogênio líquido, este processo causa choque térmico, pelo fato da peça estar na temperatura ambiente e em poucos segundos estar a -196°C , a vantagem é que a peça atinge a mesma temperatura do

nitrogênio. Este processo é pouco utilizado devido as suas desvantagens, pois é um processo caro e no entanto prejudica mais a peça do que beneficia.

- **Imersão Direta:** a peça a ser tratada é colocada em uma câmara onde, o conjunto peça/câmara, é mergulhado em um tanque com nitrogênio líquido, o material do qual é feita a câmara é um material especial para que ele possa transmitir a temperatura para a peça. A figura 5 mostra um esquema do equipamento para imersão direta.

Figura 5 - Equipamento usado na imersão direta.



Fonte:FANTINELI (p.46, 2015).

- **Sistema Híbrido:** este sistema é composto por duas etapas: na primeira as peças são nebulizadas da temperatura ambiente até uma temperatura de -157°C e após são mergulhadas no nitrogênio líquido para atingirem os -196°C , assim não há o risco de ocorrer o choque térmico.
- **Trocador De Calor:** o nitrogênio passa por meio dos trocadores, mas diferentemente das outras maneiras, aqui o nitrogênio não entra em contato com a peça.

2.6 Tratamento Sub-zero

O tratamento Sub-Zero (SZ), ou Shallow Treatment como é conhecido, é um tratamento que tem sido utilizado há bastante tempo. Empresas de tratamentos térmicos o utilizam mais do que o tratamento criogênico por ser um processo relativamente mais fácil de ser aplicado.

O tratamento sub-zero é semelhante ao tratamento criogênico, diferindo na temperatura de realização, onde atinge -80°C e é utilizado com principal objetivo de transformar a austenita retida, que não se modificou durante o processo de têmpera. Assim, como o tratamento criogênico, consiste em resfriar o aço lentamente em uma câmara até uma temperatura de aproximadamente -80°C , através do nitrogênio líquido.

Muitos estudiosos fazem comparativos entre os benefícios que o tratamento sub-zero e o tratamento criogênico apresentam aos aços. Amini (2010) fez essa comparação e concluiu que ambos os tratamentos diminuem a porcentagem de austenita retida presente na martensita, sendo o tratamento criogênico mais eficiente, apresentando menos de 1% de austenita retida enquanto o tratamento sub-zero apresentou 6%. Amini concluiu que, além da diminuição da austenita retida, o tratamento criogênico promove um aumento na porcentagem de carbeto e uma distribuição mais homogênea destes. Já Farina (2011) afirma que mais austenita retida é transformada em martensita no tratamento sub-zero do que no tratamento criogênico, sendo assim o tratamento sub-zero mais eficiente para a eliminação da austenita retida. Farina também cita que quando o tratamento criogênico é realizado entre a têmpera e o revenido há uma maior fração volumétrica de carbeto.

Barron (1982) realizou estudos voltados para a resistência ao desgaste em vários tipos de aços, inclusive em aços ferramenta, e concluiu que os aços ferramenta são mais suscetíveis a retenção de austenita retida durante os tratamentos térmicos. Com isso ele mostrou que o uso de tratamentos à baixas temperaturas a austenita retida é totalmente eliminada afetando diretamente na resistência ao desgaste da ferramenta, que sofre um aumento. A temperatura de -196°C é preferível para este efeito. Barron também menciona que os tratamentos sub-zero e criogênico não influenciaram na dureza de nenhum dos materiais.

Meng *et al.* (1993) avaliou a resistência ao desgaste de um aço ferramenta utilizando as temperaturas de -50°C e -180°C , concluindo que as amostras com tratamento criogênico

apresentaram a menor taxa de resistência ao desgaste e ao contrário do tratamento sub-zero, também promove a precipitação de carbeto finos.

Senthilkumar (2011) reafirmou o que Meng já havia mencionado, de que o tratamento criogênico aumenta a resistência ao desgaste. Afirmou que o tratamento sub-zero também promove este efeito, sendo o aumento de 118,38% para o sub-zero e 214,94% para o criogênico quando comparados com o tratamento convencional. Senthilkumar atribuiu este aumento na resistência ao desgaste à transformação da austenita retida em martensita.

Como pode ser visto não há um padrão nas conclusões dos pesquisadores em relação aos efeitos dos tratamentos sub-zero e criogênico. Dessa forma, é interessante fazer um estudo comparativo entre os processos, já que os resultados existentes são bastante controversos. Um dos focos principais deste trabalho é justamente obter conclusões a respeito de qual o tratamento é mais efetivo na melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas do aço ABNT M2.

3. METODOLOGIA

Nesta seção estão apresentados os procedimentos e ensaios realizados nas amostras para posterior análise.

3.1 Usinagem das Amostras

Para a realização deste trabalho as amostras precisaram ser usinadas, pois a barra do aço M2 é vendida com seção transversal circular de diâmetro $\frac{5}{8}$ polegadas ($\approx 15,88$ mm), e era necessária uma barra com 10x10 mm de seção transversal e 55 mm de comprimento conforme a norma NBR NM281-1 padrão para o ensaio de impacto Charpy, como mostrado nas figuras 6 e 7. Não foi utilizado o entalhe como descrito na norma, pois este material é muito frágil e com o entalhe a medição de absorção de energia é imensurável.

Figura 6 - Norma para ensaio Charpy.

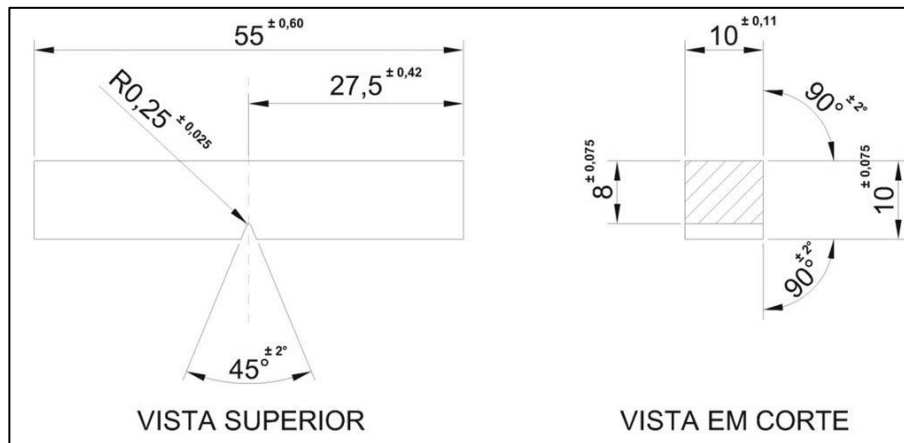
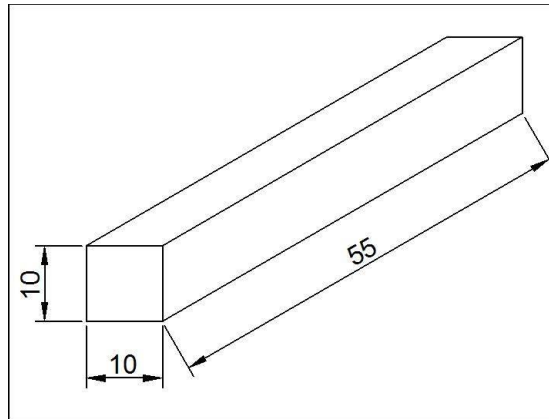


Figura 7 – Dimensões das amostras (medidas em mm).



Primeiramente foram cortadas 20 (vinte) amostras, na máquina de corte da marca Teclago, modelo CM 60, Figura 8, com 55 mm de comprimento. Após o corte as amostras foram encaminhadas para a empresa IDEMA, localizada em Santa Maria/RS onde foi realizada a usinagem para a obtenção da seção transversal quadrada.

Figura 8 - Máquina de corte.



3.2 Tratamentos Térmicos

A têmpera foi realizada pela empresa Hurth Infer Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda em Sorocaba/SP. Foram realizados os seguintes procedimentos:

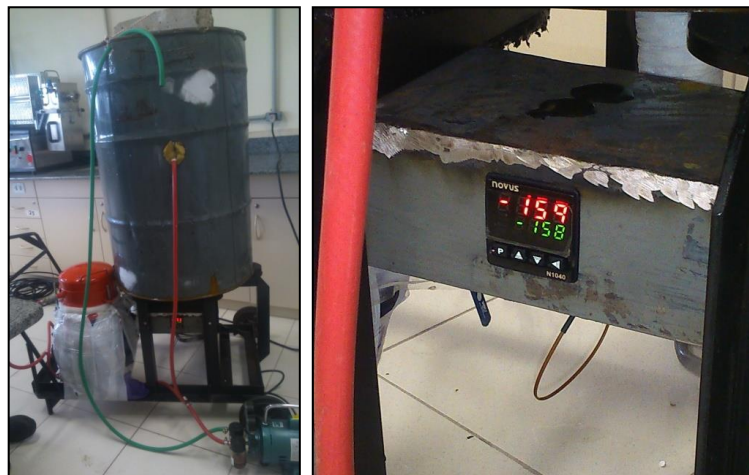
- Aquecimento: 450°C;

- Pré-Aquecimento: 880°C;
- Austenitização: 1200°C;
- Resfriamento: 520°C, em banho de sais.

Com todas as amostras temperadas, estas foram submetidas ou ao tratamento sub-zero: -80°C por 6 horas ou ao tratamento criogênico: -196°C por 24 horas (sistema híbrido), ambos utilizaram uma taxa de resfriamento: 0,5°C/min, ou no caso do tratamento convencional as amostras após a têmpera foram submetidas ao revenido. Após ser realizada a criogenia ou o tratamento sub-zero se realizou o duplo revenido a 550°C por 2 horas cada.

O tratamento criogênico foi realizado no Laboratório de Química e Metalografia, pertencente a Unipampa, em uma máquina criada e produzida pelos engenheiros mecânicos da Unipampa Cleber e Dieison, assim este tratamento foi realizado pela autora. O equipamento possui controle de temperatura, onde foram utilizadas 4,5 horas para fazer a rampa, da temperatura ambiente (24°C) até -159°C, após as amostras foram imersas em um tanque de nitrogênio líquido (-196°C) rapidamente, onde permaneceram por 24 horas e foram aquecidas até a temperatura ambiente em ar calmo. A Figura 9 mostra o equipamento utilizado para o tratamento criogênico e o controlador marcando a temperatura final da rampa.

Figura 9 - (a) Equipamento para o tratamento criogênico, (b) Controlador.



(a)

(b)

O tratamento sub-zero foi realizado no mesmo equipamento do tratamento criogênico, porém se manteve a temperatura em -80°C durante 6 horas. Após este período as amostras permaneceram dentro do tanque até atingir a temperatura ambiente. A Figura 10 mostra o controlador a -80°C .

Figura 10 - Controlador durante tratamento sub-zero.



A última etapa realizada foi o revenido duplo. O mesmo foi realizado no Laboratório de Química e Metalografia pertencente a Unipampa, Campus Alegrete, em um forno Mufla da marca INTI modelo 1300/7E, á 550°C . A Figura 11 mostra o forno utilizado.

Figura 11 – Forno Mufla INTI.



Na tabela 3 estão exibidas as rotas de tratamentos térmicos que foram realizadas.

Tabela 2 - Rotas de tratamentos.

Tratamento	Nomenclatura	Quantidade de Amostras	Total de Amostras
Convencional	T	1	6
	T/1R	1	
	T/2R	4	
Criogenia	T/DCT	1	7
	T/DCT/1R	1	
	T/DCT/2R	5	
Sub-Zero	T/SZ	1	7
	T/SZ1R	1	
	T/SZ/2R	5	

T= têmpera; R= revenido; DCT= tratamento criogênico; SZ= tratamento sub-zero;
1R=revenido simples; 2R=duplo revenido.

Para cada rota do tratamento convencional foram fabricadas 6 amostras e 7 para os tratamentos criogênico e sub-zero, como mostrado na tabela 3, isso para facilitar as avaliações estatísticas dos resultados.

3.3 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados foram de dureza, microdureza, impacto e ensaio de desgaste.

3.3.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro da marca Härtemeßgerät, modelo HP 250 que utiliza escala Rockwell C, carga de 150 kg, no Laboratório de Metalurgia Física da UFSM. A Figura 12 mostra esse equipamento.

Figura 12 - Durômetro.



Foram realizadas oito medições em cada amostra, para que pudesse ser realizada uma média e desvio padrão.

3.3.2 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado apenas em escala Vickers, pois experiências anteriores se mostraram inapropriado utilizar a escala Knoop, por apresentar um desvio padrão maior que o aumento de dureza, não permitindo ser obtida nenhuma conclusão. Os ensaios foram feitos com cargas de 1kg, 0,5kg e 0,2kg. Seis repetições foram feitas em cada amostra.

O microdurômetro utilizado é pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa, da marca Buehler modelo MicroMet 6010 e está apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Microdurômetro.



Para a realização deste ensaio foi necessário que as amostras fossem embutidas em baquelite, e lixadas até obter uma superfície espelhada. A sequência de procedimentos utilizados foi:

- Corte das amostras com aproximadamente 1,6 mm de espessura, realizada na policorte de precisão da marca Buehler, modelo ISOMET 4000, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Unipampa, Campus Alegrete. A policorte está mostrada na Figura 14 (a);
- Embutimento em baquelite, utilizou-se o equipamento da marca Fortel, modelo 30, o qual utiliza pressão de 1000lbf/pol². A embutidora está mostrada na Figura 14 (b);
- O lixamento utilizou lixas de granulometria: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 grãos/pol².

Figura 14 - (a) Policorte. (b) Embutidora.



(a)



(b)

Com exceção do corte das amostras todos os outros procedimentos foram realizados no Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa, Campus Alegrete.

3.3.3 Ensaio de Desgaste

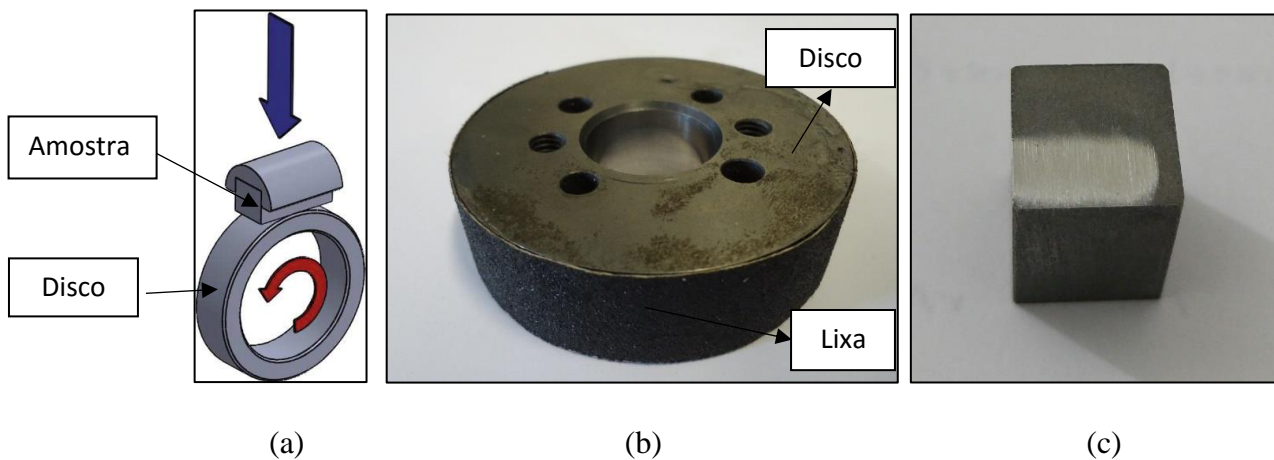
Para a realização do ensaio de desgaste, foi utilizado o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, mostrado na figura 15, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Unipampa. Este equipamento utiliza o princípio de bloco sobre anel, onde a peça

exerce uma força sobre um disco, ocasionando o desgaste. O esquema de funcionamento está mostrado na Figura 16 (a). A figura 16 (c) mostra a amostra depois de realizado o ensaio.

Figura 15 - Equipamento Phoenix.



Figura 16 - Esquema de funcionamento da máquina de desgaste.



Para este ensaio foi necessário que as amostras fossem cortadas com um comprimento de aproximadamente 13 mm, para isto foi utilizada a Policorte de precisão, mostrada na Figura 14 (a).

Os parâmetros utilizados para a realização deste ensaio foram:

- Rotação de 50 rpm na superfície do disco ($\cong 9\text{m/s}$);
- Carga de 287 N;

- 300 ciclos;

Foi necessária a colocação de uma lixa com granulometria de 120 grãos/pol² no disco, para obter resultados mensuráveis. A Figura 16 (b) apresenta a lixa posta em cima do disco. Porém, os resultados obtidos a partir deste ensaio não se apresentaram de forma conclusiva, assim se optou por aumentar a granulometria da lixa, sendo esta de 220 grãos/pol².

Para medir o desgaste foi utilizada uma balança de precisão, da marca Shimadzu com resolução de 0,001g, mostrada na Figura 17. A massa das amostras foi mensurada antes e depois do teste, e através da diferença foi calculada a perda de massa pela equação 1.

$$\text{Perda de massa} = m_i - m_o \quad (1)$$

Onde m_i é a massa inicial e m_o é a massa final da amostra.

Figura 17 - Balança de precisão.



3.3.4 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio Charpy foi realizado para avaliar a tenacidade das amostras, foi realizado na URI, Campus Santo Ângelo. O equipamento utilizado foi o RMU Testing Equipment com martelo de 150J, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Equipamento para ensaio de impacto Charpy.



Para a realização deste ensaio foi necessário que as amostras fossem fabricadas com seção transversal quadrada 10x10 mm e 55 mm de comprimento.

Por ser um ensaio destrutivo, este foi o primeiro ensaio a ser realizado, para após as amostras poderem ser fracionadas em tamanhos específicos para os outros ensaios como microdureza e desgaste.

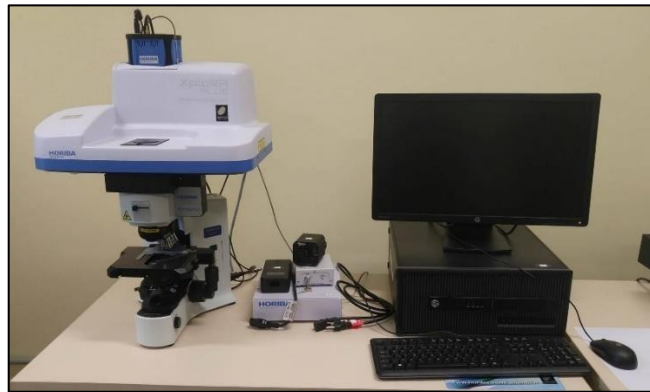
3.4 Análise Microestrutural

Através da análise microestrutural, foi possível investigar a precipitação dos finos carbetos, a energia de ligação entre os elementos químicos e tamanho de grão.

3.4.1 Espectroscopia Ramam

A espectroscopia Raman foi utilizada para a obtenção da intensidade da energia de ligação entre os elementos químicos presentes. Realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa e foi utilizado o equipamento da marca Horiba Scientific, modelo Xplora Plus. A Figura 19 mostra o equipamento.

Figura 19 - Equipamento de espectroscopia Raman.



3.4.2 Microscopia Óptica (MO)

A microscopia óptica foi utilizada para fazer análises dos tamanhos de grãos na microestrutura das amostras, que foram mensuradas através do método da intersecção linear. O microscópio óptico utilizado é pertencente ao Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa, modelo IM 713 da Marca Kontrol, como apresentado na Figura 20. Para a realização deste ensaio também foi necessário ser efetuado o mesmo procedimento de preparação das amostras descrito para o ensaio de microdureza, porém ao término do lixamento foi feito o polimento em uma pasta diamantada de alumina $9\mu\text{m}$. Para finalizar as amostras foram submetidas ao ataque químico com o reagente de peróxido de hidrogênio e ácido fluorídrico 95:5 ($\text{H}_2\text{O}_2\text{HF}$) por aproximadamente 40 segundos.

Para esta análise foram apenas utilizadas as rotas T, T/SZ e T/DCT, ou seja, as rotas que não continham nenhum revenido, pois com o revenido fica difícil visualizar no microscópio o contorno de grão.

Figura 20 - Microscópio Óptico.



3.4.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para análises de alta resolução microestrutural e análises dos mecanismos de fratura presente nas amostras que utilizaram tratamentos completos (como: T/DCT/2R) foi utilizado o MEV, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, modelo EVO MA10 da Marca Zeis, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



Para que as amostras pudessem ser analisadas pelo MEV, elas primeiramente passaram pelo processo de limpeza, para que a superfície de fratura estivesse livre de pequenas impurezas,

que prejudicariam as análises. Para isso as amostras foram lavadas com sabão e água abundante e após foram imersas no álcool durante vinte minutos dentro do equipamento de ultrassom da marca UltraCleaner modelo 1400A, que através de vibração elimina as impurezas. Após as amostras ficarem imersas no álcool, elas também foram mergulhadas durante vinte minutos em acetona. A Figura 22 (a) e (b) mostra o processo de limpeza das amostras.

Figura 22 - Processo de limpeza das amostras no Ultrassom.



(a)

(b)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e análises microestruturais realizadas no aço ABNT M2.

4.1. Composição do Aço Rápido ABNT M2

Através da espectroscopia de emissão óptica foram obtidas as médias dos elementos químicos constituintes do aço M2, os quais estão apresentados na tabela 3. E dessa forma se pode confirmar que o aço de estudo era o aço rápido M2.

Tabela 3 - Composição química em % de peso aço M2.

Composição química do aço ABNT M2					
Elemento	C	Cr	V	W	Mo
% peso	0,87	3,75	2,05	7,65	4,71

4.2. Ensaio de Dureza

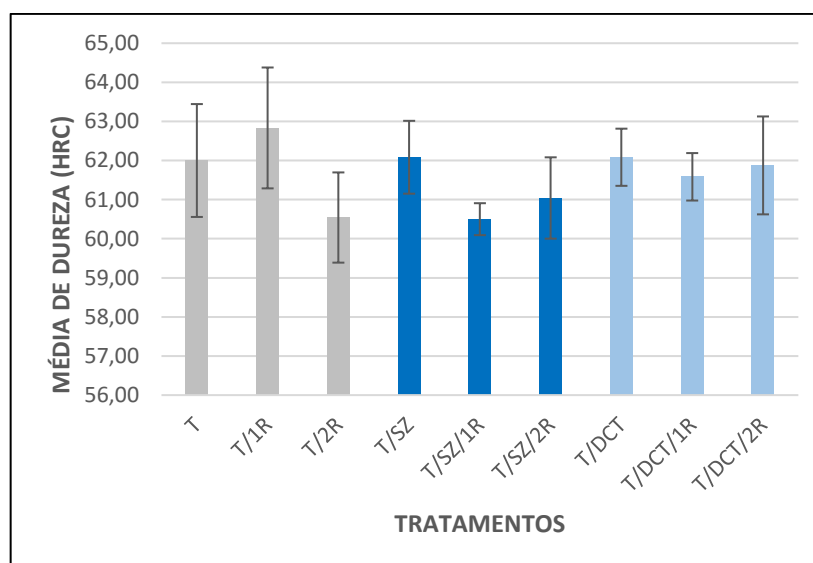
Os resultados das médias do ensaio de dureza estão mostrados na tabela 4, assim como os desvios padrão e a taxa de variação das medições. Foram realizadas oito repetições em cada amostra, sendo eliminadas a maior e a menor medição.

Tabela 4 - Resultados de Dureza.

ROTA	MÉDIA HRC	DP	TAXA VARIACÃO
T	62,00	1,44	2,33%
T/1R	62,83	1,55	2,46%
T/2R	60,54	1,15	1,91%
Média	61,79	1,38	
T/SZ	62,08	0,93	1,50%
T/SZ/1R	60,50	0,41	0,67%
T/SZ/2R	61,04	1,04	1,70%
Média	61,20	0,46	
T/DCT	62,08	0,73	1,18%
T/DCT/1R	61,58	0,61	0,99%
T/DCT/2R	61,88	1,25	2,02%
Média	61,84	0,86	

Nota-se, pela tabela 4, que a maioria dos tratamentos quando comparados com o tratamento de têmpera, apresentou uma dureza menor, com exceção das rotas T/SZ e T/DCT, onde a dureza apresenta um aumento, devido a precipitação de carbeto. Percebe-se também o fenômeno do endurecimento secundário na rota T/1R. Na Figura 23, os resultados são apresentados na forma de gráfico.

Figura 23 - Gráfico com os resultados de dureza.



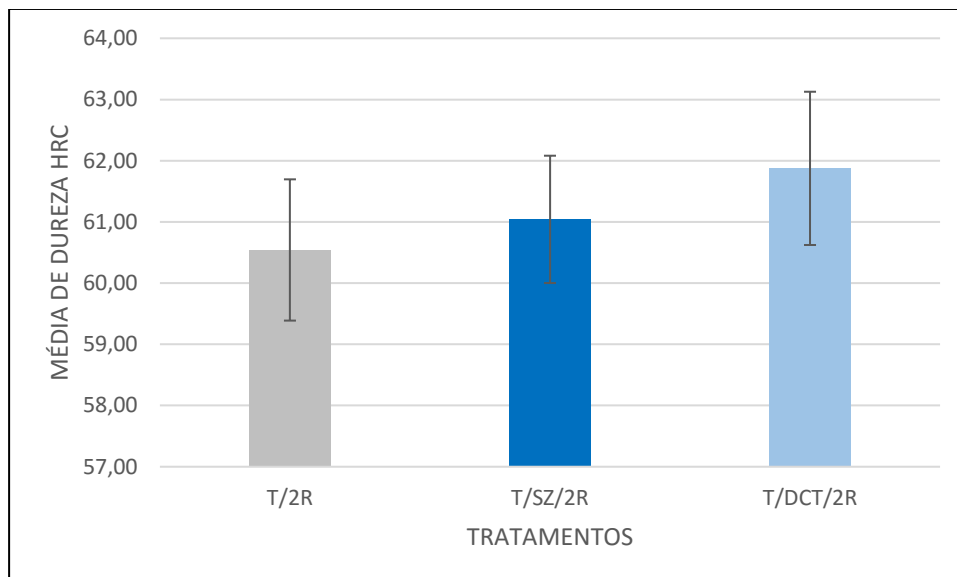
Para dizer que houve aumento de dureza entre as rotas, foi utilizada uma análise estatística em comparação com a rota T/2R, que é como o aço rápido M2 é comercializado. As rotas que possuem algum tratamento criogênico seguidos de um revenido não apresentam aumento na dureza, pois a variação de dureza é inferior ao coeficiente de variação. Contudo se pode afirmar que com apenas um revenido após os tratamentos sub-zero e criogênico existe uma diminuição do desvio padrão sem interferência dos valores de dureza

A tabela 5 e a Figura 24, mostram a comparação feita com as rotas de duplo revenido em relação ao tratamento convencional (T/2R).

Tabela 5 - Comparação de dureza entre T/2R e T/SZ/2R e T/DCT/2R

Rota	Média 2	DP	Coeficiente de Variação	Aumento de Dureza
T/2R	60,54	1,15	1,91 %	0,83 %
T/SZ/2R	61,04	1,04	1,70 %	
T/2R	60,54	1,15	1,91 %	2,20 %
T/DCT/2R	61,88	1,25	2,02 %	

Figura 24 - Gráfico com a comparação de dureza entre T/2R e T/SZ/2R e T/DCT/2R



Com base na Tabela 5 e na Figura 24, pode-se concluir que existe um aumento na dureza para ambas as rotas, tanto a que utiliza tratamento sub-zero quanto a que utiliza criogenia, porém apenas a rota T/DCT/2R apresenta efetivamente aumento na dureza, pois sua taxa de aumento de dureza é maior que os coeficientes de variação. Todavia, esta variação na dureza é de 60,54 HRC para 61,88 HRC. Zhirafar (2007) explica que esse pequeno aumento na dureza é consequência da transformação de uma certa quantidade de austenita retida em martensita, Zhirafar cita que o tratamento criogênico encoraja a precipitação de carbeto, o que também resulta em um aumento de dureza.

4.3. Ensaio de Microdureza

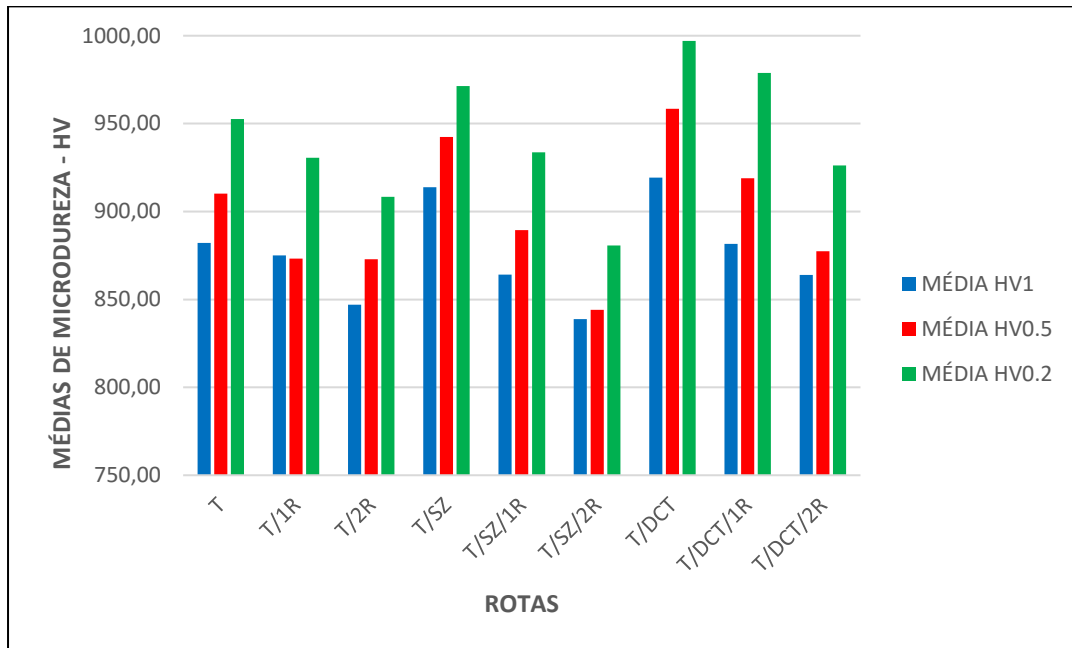
Os resultados das medições de microdureza estão apresentados na

Tabela 6, bem como na Figura 25. Foram realizadas seis medições em cada amostra se excluindo o maior e menor valor.

Tabela 6 - Resultados de microdureza.

ROTAS	MÉDIA HV1	DP	MÉDIA HV0.5	DP	MÉDIA HV0.2	DP
T	882,23	3,09	910,10	4,82	952,53	4,98
T/1R	874,98	10,75	873,23	4,08	930,60	2,83
T/2R	846,98	16,82	872,90	10,82	908,36	28,69
T/SZ	913,75	6,91	942,33	10,84	971,38	12,71
T/SZ/1R	864,05	4,43	889,50	4,60	933,75	2,60
T/SZ/2R	838,74	11,07	844,02	19,42	880,64	13,21
T/DCT	919,38	5,73	958,40	6,88	997,03	9,77
T/DCT/1R	881,55	3,64	918,85	4,78	978,78	4,79
T/DCT/2R	864,00	16,92	877,36	14,97	926,14	27,84
Média	876,18	8,82	898,52	9,03	942,13	11,94

Figura 25 - Gráfico com os resultados de microdureza Vickers.



Através da figura 25, pode-se notar que conforme a carga é diminuída a microdureza aumenta. Isso acontece, porque a endentação diminui conforme a diminuição da carga, e desta forma há possibilidade da endentação atingir tanto carbeto quanto a matriz, assim com a diminuição da carga existe maior sensibilidade aos carbeto. Conclui-se que cargas entre 0,5kg e 0,2kg são mais apropriadas para a obtenção dos resultados de microdureza.

Realizou-se análises comparativas com a amostra T/2R e as amostras com tratamentos sub-zero e criogênico com um e dois revenidos. Para a carga de 1kg ambas as rotas com um revenido e a rota T/DCT/2R obtiveram aumento na microdureza. Para a carga de 0,5kg houve aumento de microdureza apenas para as rotas com um revenido. E para a carga de 0,2kg a única rota que obteve aumento na microdureza foi a T/DCT/1R, sendo este o maior aumento de microdureza (7,75% maior que a rota T/2R).

Outro parâmetro analisado, comparando-se as rotas com um e dois revenidos, foi que para um revenido os resultados apresentaram uma média de microdureza maior e um desvio padrão consideravelmente menor que as rotas com duplo revenido

Na Tabela 7, está mostrado uma comparação dos resultados de microdureza das rotas com um e dois revenidos e se estes apresentam ou não aumento de microdureza quando comparados ao tratamento convencional (T/2R). Pela Tabela 7, os maiores resultados se

referem as rotas em que houve o maior aumento de microdureza, os resultados intermediários são aqueles em que também houve aumento da microdureza, porém estes são menores que os obtidos nos maiores resultados e os menores resultados são aquelas rotas em que não houve aumento de microdureza.

Tabela 7 - Comparações de microdureza entre as rotas com 1R e 2R em relação a rota T/2R.

HV1	T/DCT/1R	T/SZ/1R T/DCT/2R	T/SZ/2R
HV0.5	T/DCT/1R	T/SZ/1R	T/DCT/2R T/SZ/2R
HV0.2	T/DCT/1R		T/SZ/1R T/DCT/2R T/SZ/2R
	Maiores Valores	Valores Intermediários	Menores Valores

Como é notável, para todas as cargas utilizadas a rota T/DCT/1R apresentou aumento na microdureza e um desvio padrão médio de 4,4. Para a rota T/SZ/1R houve aumento de microdureza para as cargas de 1kg e 0,5kg e esta rota apresentou um desvio padrão tão baixo quanto da rota T/DCT/1R. O mesmo não aconteceu para as rotas com duplo revenido, pois apenas a rota T/DCT/2R apresentou aumento de microdureza para a carga de 1kg e ainda assim seu desvio padrão foi bastante alto, sendo de 16,92.

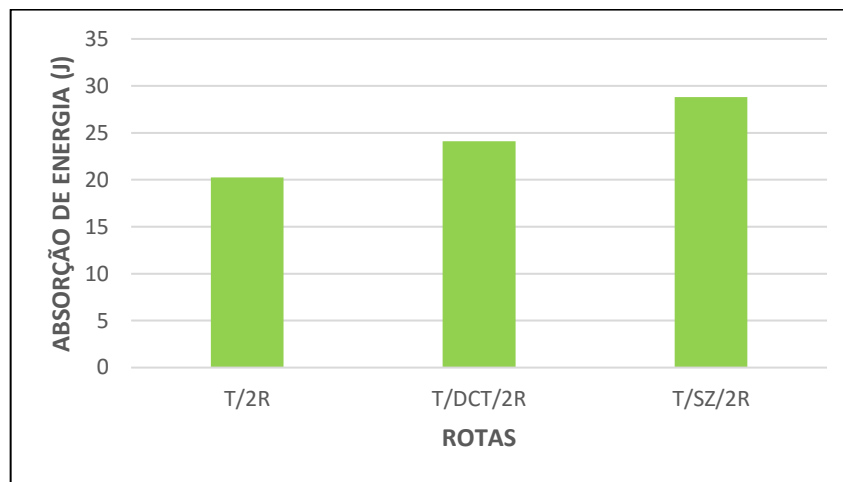
Pode-se concluir de toda a análise da microdureza que a utilização de temperaturas criogênicas, tanto o tratamento criogênico quanto o tratamento sub-zero, mostram uma tendência ao aumento de microdureza e apresentam uma consideravelmente diminuição no desvio padrão. A utilização de apenas um revenido e cargas entre 0,5kg e 0,2kg apresentam os melhores resultados para estes parâmetros. Das (2009) também percebeu que as amostras tratadas com criogenia seguidas de um revenido apresentaram um aumento na microdureza e diminuição no desvio padrão, fenômenos os quais ele cita terem acontecido devido a precipitação de carbeto secundários, indicando assim uma melhor homogeneização da

microestrutura. Molinari *et al.* (2001) percebeu o mesmo em suas análises onde o desvio padrão apresentou uma significativa diminuição com a utilização do tratamento criogênico.

4.4. Ensaio de Impacto Charpy

A Figura 26 apresenta a média da energia absorvida a partir do ensaio de impacto Charpy. Este ensaio foi realizado apenas com rotas que possuíam o duplo revenido.

Figura 26 - Gráfico com os resultados do ensaio de impacto Charpy.



Observa-se que com o uso do tratamento sub-zero ou criogênico houve redução do desvio padrão entre as amostras e um aumento na absorção de energia, sendo esta maior nas amostras com tratamento sub-zero. Este aumento sugere uma maior tenacidade ao impacto, o que pode ter sido resultado da diminuição da tetragonalidade da martensita após a precipitação de carbeto, onde esta perde carbono e sua estrutura cristalina (TCC) apresenta uma diminuição.

A redução no desvio padrão das amostras ocorre devido a microestrutura se apresentar de forma mais homogênea, pela precipitação de carbeto. A Tabela 8 mostra a análise estatística das amostras, onde a rota T/SZ/2R apresenta estatisticamente aumento na absorção de energia, pois este aumento foi maior que as taxas de variação.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de impacto.

ROTA	MÉDIA	DP	TAXA DE VARIAÇÃO	AUMENTO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA
T/2R	20,25	7,685	37,95 %	42,22 %
T/SZ/2R	28,8	4,032	14,00 %	
T/2R	20,25	7,685	37,95 %	19,01 %
T/DCT/2R	24,1	3,382	14,03 %	

4.5. Ensaio de Desgaste

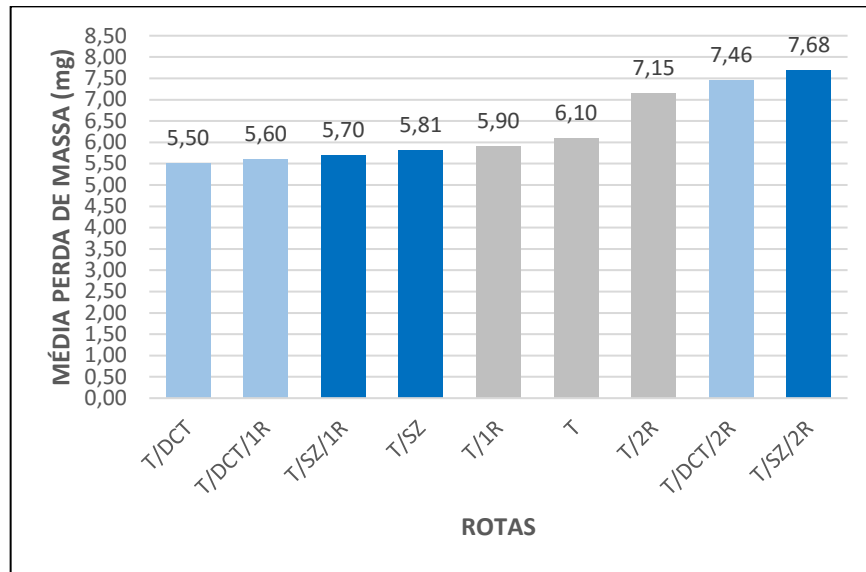
Estão apresentados na Tabela 9 os resultados obtidos do ensaio de desgaste realizado com lixa de granulometria 220 grãos/pol², bem como na Figura 27. Os resultados estão dispostos em ordem crescente.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de desgaste com lixa 220.

ROTAS	MÉDIA PERDA DE MASSA (mg)
T/DCT	5,50
T/DCT/1R	5,60
T/SZ/1R	5,70
T/SZ	5,81
T/1R	5,90
T	6,10
T/2R	7,15
T/DCT/2R	7,46
T/SZ/2R	7,68

A partir da Tabela 9 se percebe que os tratamentos com duplo revenido foram os que obtiveram a maior perda de massa. Confrontando esses resultados as rotas que utilizaram apenas um revenido apresentam uma diminuição na perda de massa.

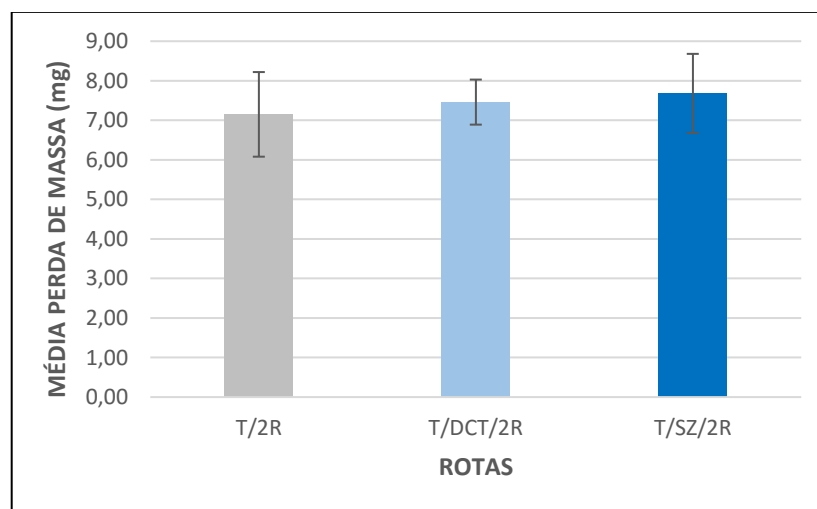
Figura 27 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste com lixa 220.



Pelos dados apresentados na Figura 27, fica mais evidente o quanto aumenta a perda de massa nas rotas criogênicas com duplo revenido quando comparadas com o tratamento convencional (T/2R). O contrário acontece com T/SZ/1R e T/DCT/1R quando comparadas com T/2R.

A Figura 28 mostra a média dos resultados do ensaio de desgaste e seus respectivos desvios padrão, considerando as rotas com duplo revenido.

Figura 28 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste para rotas com duplo revenido.



É possível perceber que as adições dos tratamentos sub-zero e criogênico aumentaram a perda de massa, mas diminuíram os desvios padrão, sendo o que o desvio padrão do tratamento sub-zero (T/SZ/2R) é 6,54 % menor que o desvio padrão do tratamento convencional e o tratamento criogênico (T/DCT/2R) 46,72 % menor. A tabela 10 mostra uma análise estatística entre os resultados das rotas com duplo revenido.

Tabela 10 - Análise estatística dos resultados de desgaste para rotas com duplo revenido.

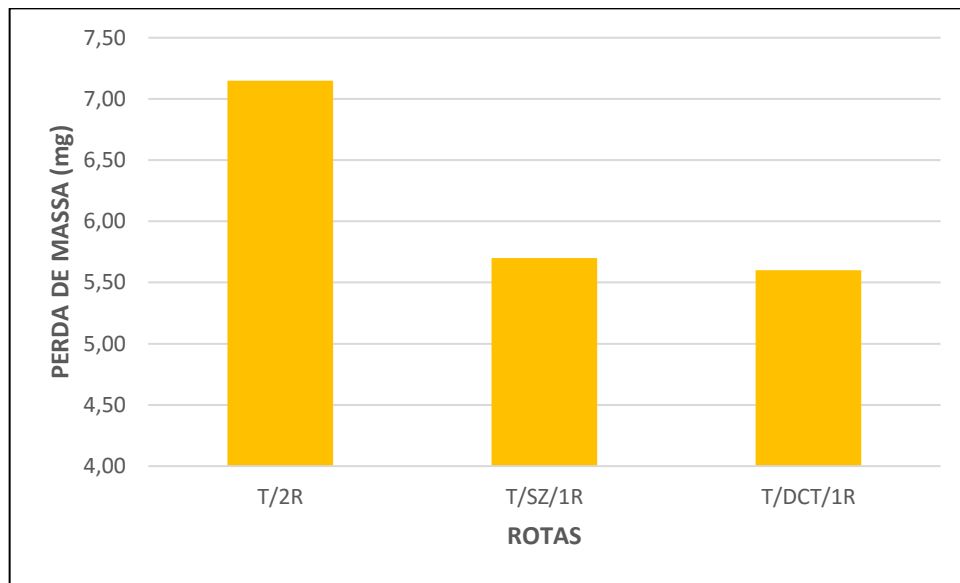
ROTAS	MÉDIA PERDA DE MASSA (mg)	DP	TAXA DE VARIAÇÃO	VARIAÇÃO DE PERDA DE MASSA
T/2R	7,15	1,07	14,965 %	7,413 %
T/SZ/2R	7,68	1	13,021 %	
T/2R	7,15	1,07	14,965 %	4,336 %
T/DCT/2R	7,46	0,57	7,641 %	

Através das análises da Tabela 10 não se pode concluir que houve aumento na resistência ao desgaste, pois a variação de perda de massa foi menor que as taxas de variação, indicando não haver aumento. Entretanto, como já foi afirmado, os tratamentos sub-zero e criogênico diminuem o desvio padrão, sendo o tratamento criogênico mais eficaz neste caso.

Zum Gahr citado por Silva (2006) explica que dependendo dos parâmetros usados, como a carga, a granulometria e o tipo de abrasivo, quantidade e forma dos carbeto e o aumento da quantidade de austenita retida são fatores que podem levar ao aumento ou diminuição da taxa de desgaste de aços. Molinari *et al.* (2001) utilizou em seu ensaio de desgaste o teste de pino sobre disco, uma carga de 100N e uma rotação de 400 rpm. Ele verificou em suas análises uma diminuição na taxa de desgaste tanto para as amostras com um revenido quanto para as amostras com duplo revenido após a criogenia, comparando-as ao tratamento convencional (têmpera e duplo revenido).

Uma comparação entre as rotas com um revenido em relação ao tratamento convencional foi realizada, como mostra a Figura 29. É perceptível a grande redução da perda de massa para estas rotas.

Figura 29 - Comparativo entre as rotas T/SZ/1R e T/DCT/1R em relação a T/2R.



Fica evidente nas rotas de tratamentos sub-zero e criogênico com apenas um revenido a redução na perda de massa, porém, entre estes tratamentos os valores obtidos foram praticamente os mesmos, 5,7mg e 5,6mg, respectivamente. Molinari *et al.* (2001) e Leskovsek (2006) também notaram esta diminuição para as rotas com um revenido. Molinari, cita que a resistência ao desgaste e a dureza estão relacionados, visto que uma variação na dureza ocasiona uma maior resistência a abrasão e a capacidade de carga do material. Contudo no presente estudo isso se verificou para a rota T/DCT/1R, a qual obteve variação na dureza (T/2R: 60,54 HRC – T/DCT/1R: 61,58 HRC) e redução na perda de massa (T/2R: 7,15mg – T/DCT/1R: 5,6 mg). Leskovsek utilizou em todas as suas rotas com criogenia apenas um revenido, e a temperatura de 550°C mostrou uma diminuição significativa na perda de massa, comparada ao tratamento convencional.

4.6. Resumo dos Resultados

A Tabela 11 mostra a relação final entre os ensaios mecânicos. Considerando nesta tabela que os melhores resultados se referem as rotas em que houve aumento no caso de dureza e microdureza, em que houve a maior absorção de energia no caso do ensaio Charpy e onde houve a menor perda de massa no caso do ensaio de desgaste. Os piores resultados são os que

não apresentam variação nos valores de dureza e microdureza, rota que menos absorveu energia no ensaio Charpy e rotas em que houve as maiores perdas de massa no ensaio de desgaste. Todos os resultados são em comparação a rota T/2R.

Tabela 11 - Resumo dos resultados.

ENSAIO DE DUREZA	T/DCT/2R		T/SZ/2R T/SZ/1R T/DCT/1R
ENSAIO DE MICRODUREZA	T/DCT/1R	T/SZ/1R	T/SZ/2R T/DCT/2R
ENSAIO DE IMPACTO: CHARPY	T/SZ/2R	T/DCT/2R	T/2R
ENSAIO DE DESGASTE	T/DCT/1R	T/SZ/1R	T/SZ/2R T/DCT/2R
	MELHORES RESULTADOS	RESULTADOS INTERMEDIARIOS	PIORES RESULTADOS

Através da Tabela 11 fica mais claro perceber as relações entre os ensaios mecânicos, de onde se pode tirar algumas conclusões.

- T/DCT/2R - Rota que obteve a maior dureza e a maior perda de massa no ensaio de desgaste.
- T/DCT/1R - Rota que obteve a maior microdureza, a dureza se manteve e a menor perda de massa.
- T/SZ/2R – Rota que obteve a maior absorção de energia, dureza e microdureza se mantiveram sem alteração e obteve a maior perda de massa no ensaio de desgaste.
- T/SZ/1R – Considerando os ensaios de dureza, microdureza e desgaste esta rota apresentou resultados intermediários, onde a dureza se manteve, obteve-se algum ganho em microdureza e a perda de massa ligeiramente maior que a rota T/DCT/1R.

4.7. Análise Microestrutural

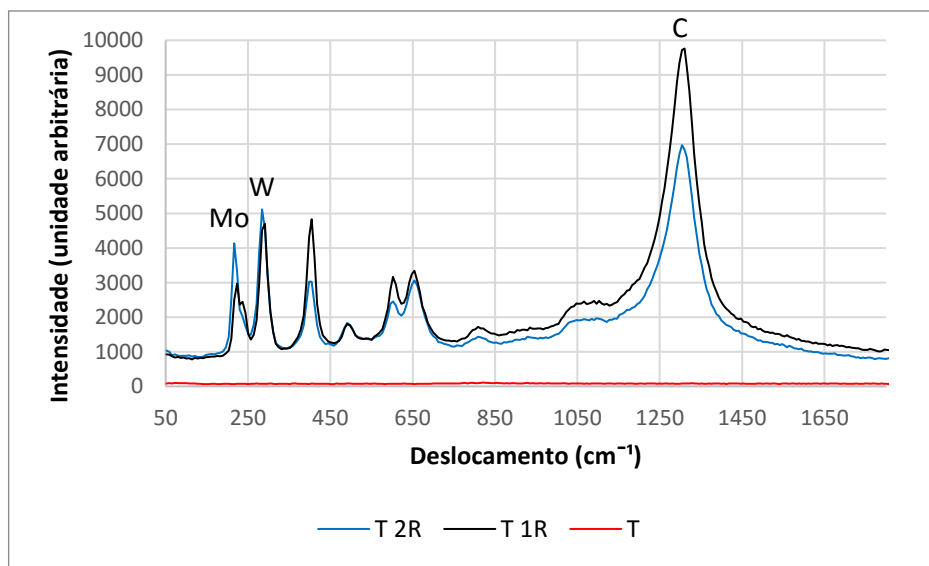
A partir das análises microestruturais, foi possível ser mensurado o tamanho de grão e serem analisadas a microestrutura e as energias de ligação entre seus componentes.

4.7.1. Espectroscopia Raman

A partir da espectroscopia Raman foi possível analisar e comparar as energias de ligação entre os elementos constituintes do aço ABNT M2 após submetido a diferentes tratamentos térmicos.

A figura 30 mostra um comparativo entre as rotas: T, T/1R e T/2R. Nota-se que na amostra apenas temperada a energia de ligação entre os elementos é baixa, pois existem apenas ligações metálicas. O contrário acontece nas rotas com revenido, onde as ligações são iônicas e os elementos apresentam interação, havendo picos de carbono (1300 cm^{-1}), tungstênio (260 cm^{-1}) e molibdênio (240 cm^{-1}), indicando existir a presença de carbetos.

Figura 30 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento convencional.



As figuras 31 e 32 mostram os resultados da espectroscopia para as rotas de tratamento sub-zero e criogênico, respectivamente.

Figura 31 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento Sub-Zero.

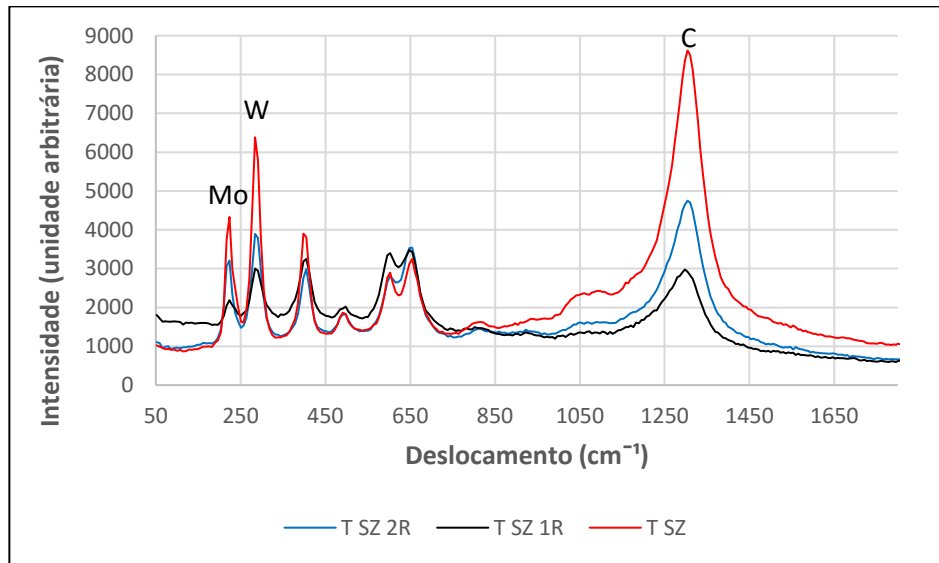
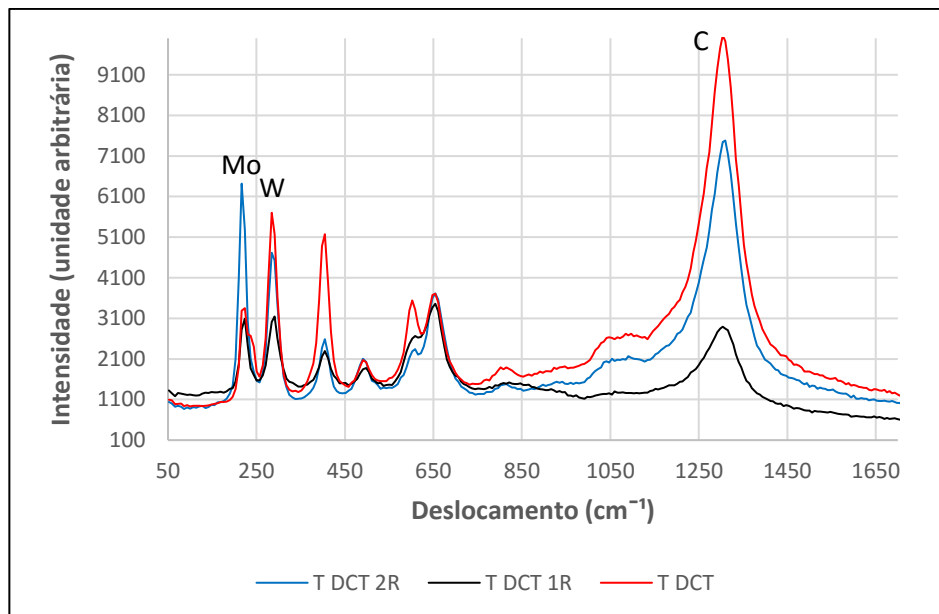


Figura 32 - Resultados da espectroscopia para as rotas do tratamento Criogênico.



Os maiores picos de carbono (1300 cm^{-1}) e tungstênio (260 cm^{-1}) presentes nas figuras 31 e 32 ocorrem nas rotas sem revenido (linhas vermelhas), indicando existir uma maior precipitação de carbeto formado por estes elementos, durante os tratamentos sub-zero e criogênico. Ratificando estes resultados a dureza e microdureza para estas rotas apresentaram um aumento, onde os resultados de microdureza foram maiores para o tratamento criogênico e

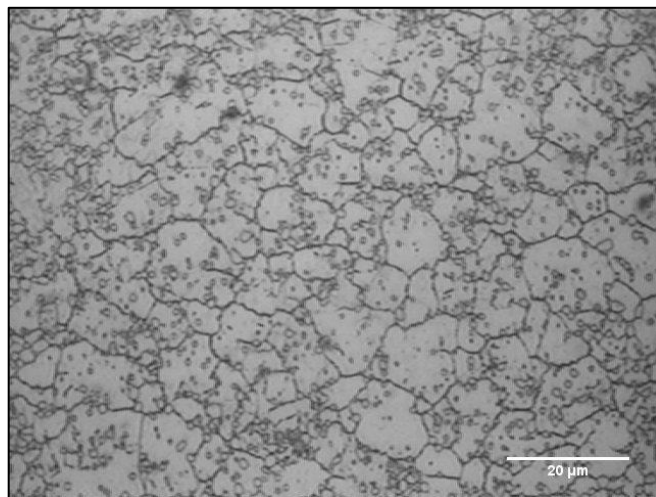
com carga de 0,2kg, mostrando haver existência de carbeto finos, os quais a endentação feita por esta carga é mais sensível. Com a realização do primeiro revenido as energias de ligações diminuíram (linhas azuis) assim como a dureza e a microdureza destas rotas, o que pode ter sido consequência do coalescimento dos carbetos.

Houve discrepância nos resultados das rotas com duplo revenido, mas é perceptível que ao realizar o segundo revenido há um aumento nas energias de ligações e o pico de molibdênio foi bastante acentuado para a rota com criogenia, mostrando haver carbeto secundários deste elemento o que pode ter ocasionado o aumento de dureza para esta rota.

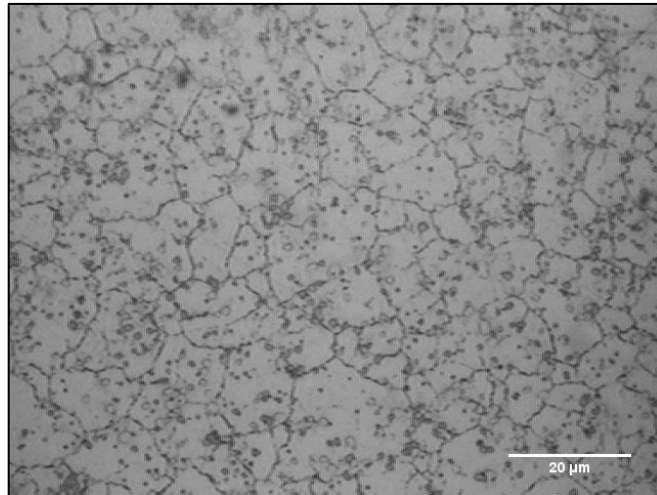
4.7.2. Microscopia Óptica

As imagens da Figura 33 mostram a microestrutura do aço rápido M2 após a têmpera, a têmpera seguida do tratamento sub-zero e têmpera seguida da criogenia. Nestas imagens fica claro o contorno de grão, sendo assim possível calcular o tamanho dos grãos.

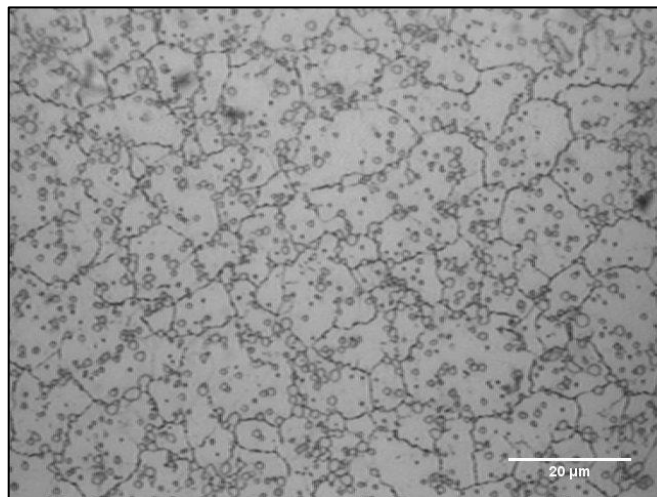
Figura 33 - (a) T (b) T/SZ (c) T/DCT



(a)



(b)



(c)

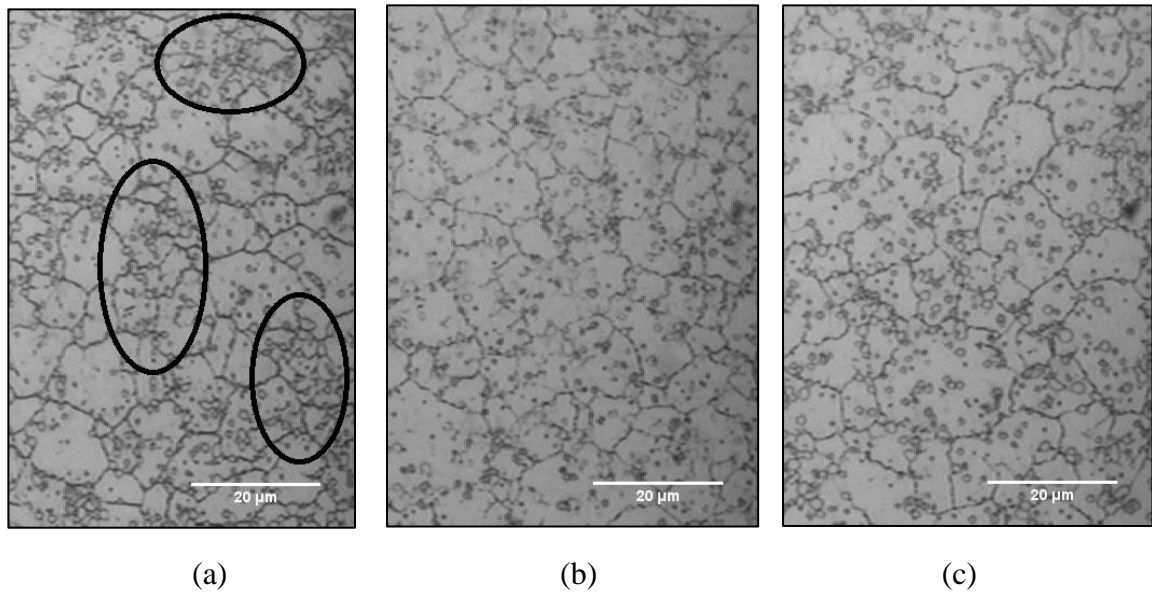
As médias do tamanho de grão para cada tratamento foram:

- T: 10,19 μm ;
- T/SZ: 9,72 μm ;
- T/DCT: 10,44 μm .

Os valores de tamanho de grão foram bem próximos, uma vez que a utilização dos tratamentos sub-zero e criogênico não modificam o tamanho de grão da microestrutura.

Também é perceptível nestas imagens os carbeto, os quais são os pequenos pontos em destaque na Figura 34. Nos tratamentos sub-zero e criogênico estes carbeto se apresentaram de forma mais homogênea, quando comparados com o tratamento convencional.

Figura 34 - (a) T (b) T/SZ (c) T/DCT.



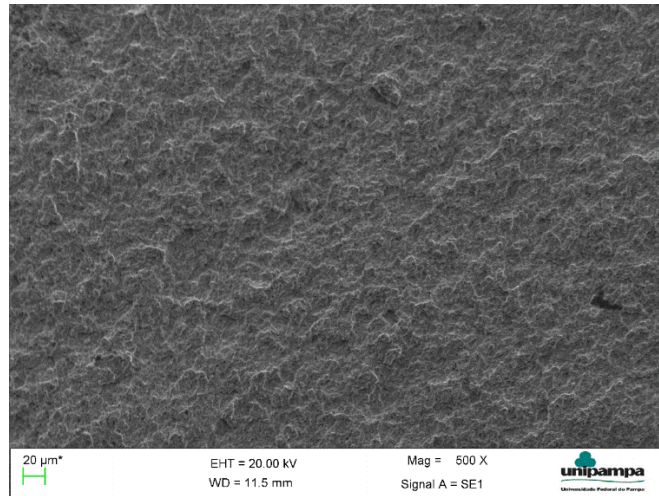
Huang *et al.* (2003), assim como Firouzdor (2008) declaram que o tratamento criogênico não só facilita a formação de carbeto e aumenta a população destes, como também faz com que a precipitação dos carbeto seja mais homogênea.

Senthilkumar (2011) explica que a redução da temperatura reduz os defeitos de rede e instabiliza termodinamicamente a martensita, o que leva os carbonos e elementos de liga para as proximidades destes defeitos. Estes agrupamentos funcionam como núcleos de formação de finos carbeto.

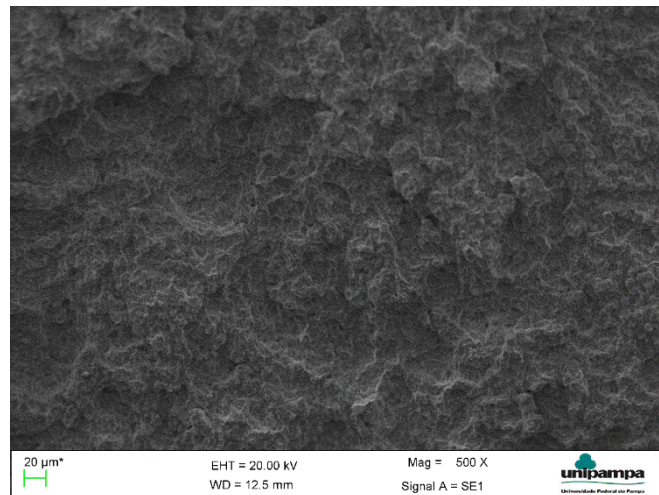
4.7.3. MEV

Através das análises microestruturais do MEV, pode-se perceber uma consequência do resultado obtido no ensaio de impacto: Charpy, onde as amostras submetidas ao tratamento sub-zero e criogênico apresentaram maior absorção de energia. A Figura 35 mostra estas comparações.

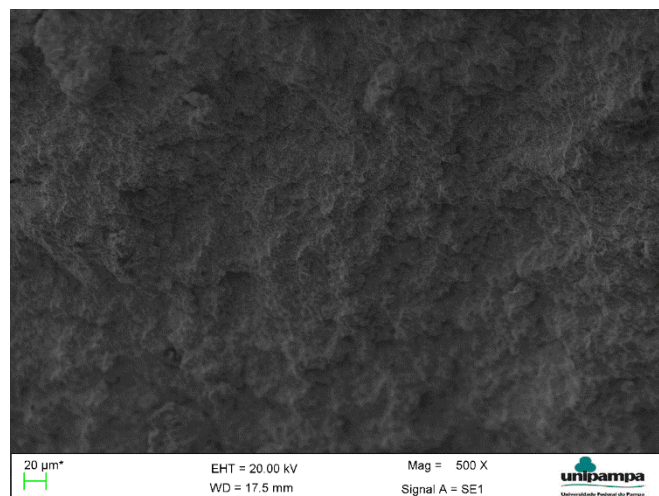
Figura 35 - (a)T/2R (b) T/SZ/2R (c) T/DCT/2R



(a)



(b)

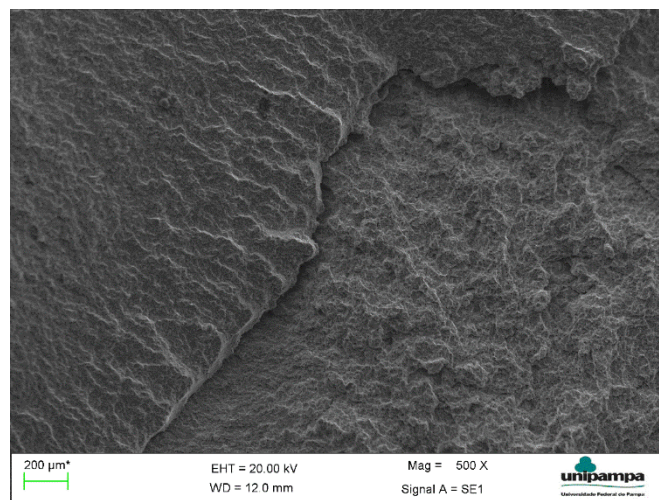


(c)

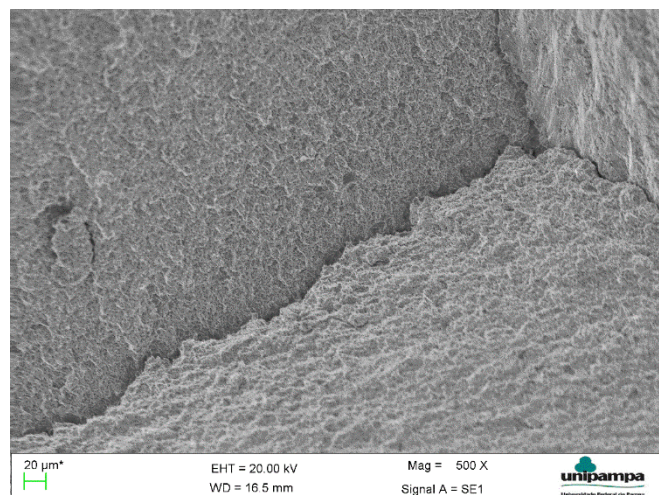
Pela figura 36 se percebe que a amostra com tratamento convencional (a) apresenta uma microestrutura de fratura frágil por se mostrar bastante lisa, já nas amostras com tratamento sub-zero (b) e criogênico (c) as fraturas apresentam cavidades, o que pode ser resultado do aumento na absorção de energia, indicando uma maior tenacidade.

Das análises realizadas no MEV também foram obtidas imagens referentes às fraturas existentes. Como mostrados na Figura 36.

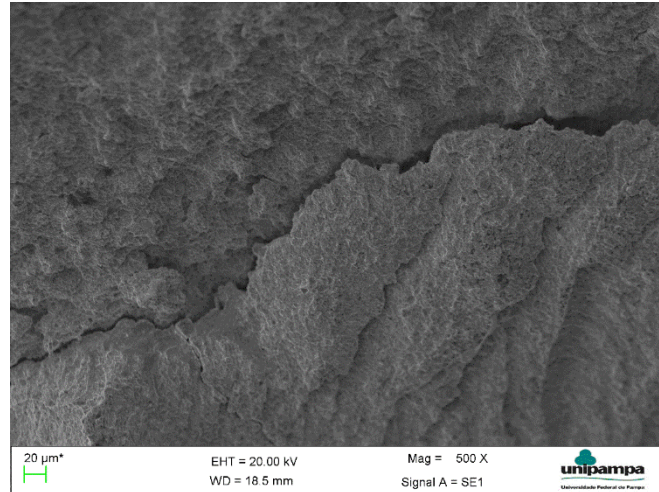
Figura 36 - (a) T/2R (b) T/SZ/2R (c) T/DCT/2R.



(a)



(b)



(c)

É possível observar que as fraturas referentes ao tratamento sub-zero (b) e ao tratamento criogênico (c) mostram uma fratura mais superficial comparada a amostra com tratamento convencional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Ao final das análises e estudos sobre os benefícios dos tratamentos sub-zero e criogênico no aço rápido M2, pode-se inferir algumas conclusões.

No ensaio de dureza as médias obtidas nas rotas com tratamento criogênico foram maiores que no tratamento sub-zero. Ambos os tratamentos sub-zero e criogênico diminuem o desvio padrão dos resultados, sendo mais significativo nas rotas com apenas um revenido.

Nas medições de microdureza, o tratamento criogênico resultou em valores mais elevados seguido do tratamento sub-zero. Em ambos os casos o desvio padrão foi consideravelmente reduzido.

T/DCT/1R foi a rota que apresentou aumento de microdureza para todas as cargas, seguida da rota T/SZ/1R que obteve aumento de microdureza para as cargas de 1 e 0,5kg.

A utilização de cargas entre 0,5 e 0,2 kg são mais apropriadas para ensaios de microdureza, uma vez que não há dificuldade em aferi-las e estas apresentam baixo desvio padrão e uma alta sensibilidade aos carbeto, indicando haver um refinamento na microestrutura.

No ensaio de impacto Charpy ambos os tratamentos sub-zero e criogênico, proporcionaram aumento na absorção de energia, promovendo um aumento na tenacidade ao impacto, sendo que no tratamento sub-zero esse aumento foi mais significativo.

Nas análises de fratura em MEV, as amostras com o tratamento sub-zero e tratadas com criogenia apresentaram uma superfície com tendência a uma fratura não tão frágil, quanto as amostras com tratamento convencional. As superfícies de fratura das amostras com tratamento sub-zero se apresentaram de forma mais regular que as superfícies das amostras com tratamento criogênico.

A partir do ensaio de desgaste foi observado que as rotas com duplo revenido apresentaram as maiores perdas de massa enquanto as rotas com um revenido as menores.

A perda de massa das rotas T/SZ/1R e T/DCT/1R foram semelhantes, sendo de 5,7mg e 5,6 mg, respectivamente. Tanto o tratamento sub-zero quanto o tratamento criogênico diminuem o desvio padrão dos resultados do ensaio de desgaste, chegando a ser até 46 % menor, no caso da criogenia, comparado ao tratamento convencional.

A espectroscopia Raman sugere um aumento de carbeto precipitados com o uso da criogenia. Entre as rotas com duplo revenido o tratamento criogênico apresentou picos de energia de ligação do carbono, tungstênio e molibdênio mais acentuados, indicando haver um maior percentual de carbeto destes elementos na microestrutura, o que provavelmente resultou no aumento de dureza dessa amostra.

Em um contexto geral, avaliando o tratamento sub-zero e o criogênico, os resultados foram similares entre si e em ambos os casos melhores que o tratamento convencional, porém, o tratamento criogênico se sobressai na maioria dos resultados.

A adição dos tratamentos sub-zero e criogênico as rotas de tratamentos térmicos do aço rápido ABNT M2 beneficiam o mesmo, em termos de dureza, microdureza, precipitação de carbeto e tenacidade, principalmente o tratamento criogênico seguido de um revenido.

5.2. Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Analisar as rotas com um revenido dos tratamentos sub-zero e criogênico em relação a absorção de energia;
- Modificar os parâmetros do ensaio de desgaste: utilizar uma lixa com granulometria maior;
- Avaliar diferentes temperaturas de revenido;
- Realizar a difração de Raio-X para verificar as porcentagens de austenita retida e martensita presente na microestrutura final de cada rota.

REFERÊNCIAS

- AÇOS VILARES. **Catálogo Aços Rápidos VWM2**. Disponível em <<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Rapidos/VWM2>>. Acesso em 5 de julho 2016.
- AMINI, K., NATEGH, S., SHAFYEI, A. Influence of Different Cryotreatments Tribological Behavior of 80CrMoo12 5 Cold Work Tool Steel. **Materials & Design**, 2010.
- BARRON, R.F. Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance. **Cryogenics**, p3. 1989.
- CALLISTER, Jr; WILLIAM, D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- DAS, D.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. **Optimization of the Duration of Cryogenic Processing to Maximze Wear Resistence of AISI D2 Steel**. *Cryogenics*. p. 176 – 184. 2009.
- ÉBONI, G. A. **Efeito do Processamento Criogênico na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço SAEM2 Temperado e Revenido**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- FANTINELI, D. G. **Estudo da Influência do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas e tribológicas do aço ABNT M2**. Dissertação de mestrado em Engenharia, Área de concentração: Tecnologia de Materiais, Universidade Federal do Pampa, 2015.
- FARINA *et al.* Tratamento Criogênico e de Alívio de Tensões em um Aço AISI D2. **Tecnol. Metal. Mater Miner.** p. 140-147. 2012.
- FARINA, P. F. S. **Efeito das Adições de Tratamentos Criogênicos e de Alívio de Tensões no Ciclo Térmico do Aço Ferramenta AISI D2**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- FIROUZDOR, V.; NEJATI, E.; KHOMAMIZADEH, F. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance and Tool Life of M2 HSS Drill. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 467-472. 2007

- HUANG *et al.* Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel. **Materials Science and Engineering A** **339**. P. 241-244. 2003
- IOST, A. BIGOT, R. Indentation Size Effect: Reality or Artefact?. **Journal of Materials Science**. p. 3573-3577. 1996.
- LESKOVSEK, V. KALIN, M. VIZINTIN, J. Influence of Deep-Cryogenic Treatment on Wear Resistance of Vacuum Heat-Treated HSS. **Vacuum**. p. 507-518. 2006
- MENG *et al.* Role of Eta-carbide Precipitations in the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment. **ISIJ International**. p. 205-210. 1993
- MOLINARI *et al.* Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Tool Steels. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 350-355. 2001
- MSPC – Informações técnicas: Ferros e Aços. Disponível em <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco150.shtml>>. Acesso em 22 jun. 16.
- NBR NM 116 – 1: **Aços rápido – Parte 1: Classificação, designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2005.
- NBR NM 281-1: **Materiais Metálicos. Parte 1: Ensaio de Impacto por Pêndulo Charpy**. Rio de Janeiro, 2003.
- OPPENKOWSKI, A. WEBER, S. THEISEN, W. Evaluation of Factors Influencing Deep Cryogenic Treatment That Affect the Properties of Tool Steels. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 1949-1965. 2010.
- SENTHILKUMAR, D.; RAJENDRAN, I. Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En 19 Steel. **Journal of Iron and Steel Research, International**. p. 53-59. 2011.
- SILVA, A. L. C; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais – 3ª ed.** Revista – São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- SILVA, F.J. *et al.* Performance of Cryogenically Treated HSS Tools. **Elsevier**. p. 674-685. 2006.
- SILVA, W. S. **Estudo da Tenacidade à Fratura do Aço Rápido M2 Fundido, Modificado e Tratado Termicamente**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

SPRING LINK. Disponível em
<http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-22647-2_144>. Acesso em 14 de novembro de 2015.

STROHAECKER, T. R.; FRAINER, V. J.; TIER, M. D. **Princípios de Tratamentos Térmicos em Aços e Ferros Fundidos**,2013.

TYSHCHENKO, A. I. *et al.* Low-Temperature Martensitic Transformation and Deep Cryogenic Treatment of a Tool Steel. **Materials Science and Engineering A**. p. 7027-7039. 2010.

ZENES, C. Controlled Thermal Proessing, Inc.Disponivel em <<http://www.metal-wear.com/Heat%20Treating%20Progress%20Article.htm>>.Acessoem 4 de novembro de 2015.

ZHIRAFAR, S.; REZAEIAN, A.; PUGH, M. Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of 4340 Steel. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 298-303. 2007.