

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO AÇO  
ABNT M2 SUBMETIDO AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E CRIOGÊNICO**

**Alegrete  
2019**

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO AÇO  
ABNT M2 SUBMETIDO AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E CRIOGÊNICO**

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: Dr. Marco Antônio Durlo Tier

**Alegrete  
2019**

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO  
AÇO ABNT M2 SUBMETIDO AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E  
CRIOGÊNICO**

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: 03 de Julho de 2019.

Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier  
Orientador (UNIPAMPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhoft  
(UNIPAMPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tonilson de Souza Rozendo  
(UNIPAMPA)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S586e Silva, Enrique Leal

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DO  
AÇO ABNT M2 SUBMETIDO AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E  
CRIOGÊNICO / Enrique Leal Silva.

50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA,  
2019.

"Orientação: Marco Antônio Durlo Tier".

1. Tratamento Térmico. 2. Criogenia. 3. Aço rápido  
ABNT M2. I. Título.

Dedico este trabalho ao meu pai Ademir,  
minha mãe Luciara, meu irmão Bernardo  
e minha namorada Jéssica.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me permitir chegar até aqui e nunca ter saído do meu lado. Agradeço aos meus pais Ademir e Luciara por todo suporte, amor e incentivo durante toda a minha formação, e ao meu irmão Bernardo por estar sempre me apoiando independentemente da situação. A minha namorada Jéssica por me incentivar durante toda a caminhada, estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis da graduação e com amor diminuindo minhas angústias e receios.

Gostaria de agradecer ao meu orientador o professor Marco Tier e ao PET-CTC, por terem me dado a oportunidade dessa pesquisa e por todos ensinamentos, valores, dedicação para o desenvolvimento desse trabalho e, principalmente, por ensinar que devemos acreditar em nós mesmos e que somos capazes de qualquer coisa. Ao Mestre Dieison Fantineli que ajudou muito durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos grandes amigos que essa etapa da vida me proporcionou, Vagner Lima, Alan Almeida, Hezry Gomes e Pricila Cottica por estarem junto comigo em todo esse caminho, tanto fora, como dentro da universidade. Sem vocês eu não teria chegado até aqui, muito obrigado por todo apoio, incentivo e conhecimento que vocês passaram.

À empresa METALTÉCNICA – Tratamentos Térmicos de Metais de Cachoeirinha-RS por realizar a têmpera nas amostras deste trabalho e ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSM que cedeu o laboratório para a realização do ensaio Charpy.

Aos colegas e amigos, Luiz Felipe Leonardi e Deividi Mengotti por toda colaboração na concretização deste trabalho.

À UNIPAMPA que proporcionou um grande curso de graduação com todo o conhecimento necessário para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

Martin Luther King

## RESUMO

Aços rápidos são comumente utilizados para fabricação de ferramentas, são empregados em condições severas, tem dureza elevada, boa resistência ao desgaste e tenacidade alta. Por isso, é importante estudar inovações de tratamentos térmicos tais como a criogenia. Estudos recentes trazem esse novo tratamento que utiliza temperaturas extremamente baixas, pois na faixa de  $-80^{\circ}\text{C}$  a  $-190^{\circ}\text{C}$  ocorre a transformação da austenita retida em martensita e a precipitação de finos carbeto. Dessa maneira, a combinação de tratamentos térmicos convencionais junto ao tratamento criogênico desempenha um papel importante na melhoria da qualidade dos aços rápidos. Por essa razão, o presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho da combinação de têmpera, revenido e criogenia variando os parâmetros de tempo, temperatura e quantidade de tratamentos para investigar quais aspectos influenciam as propriedades mecânicas e tribológicas do aço rápido ABNT M2. A metodologia utilizada no trabalho foi a pesquisa experimental, onde as rotas de tratamentos foram variados em: Sem, simples e dupla criogenia e revenido simples e duplo. As amostras foram austenitizadas a  $1180^{\circ}\text{C}$  e resfriadas em óleo, a criogenia atingiu  $-181^{\circ}\text{C}$  durante 24h com rampa de resfriamento e aquecimento mantendo  $-0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e o revenido a  $550^{\circ}\text{C}$  por 2h. Em seguida, foram realizados os ensaios mecânicos de dureza, microdureza, charpy e desgaste e os testes metalográficos de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura para análise da microestrutura e fratura do material. Os resultados obtidos indicam que as amostras que receberam a combinação de dupla criogenia e duplo revenido após a têmpera conseguiram melhora nas suas propriedades mecânicas e tribológicas.

Palavras-Chave: Criogenia. Tratamento Térmico. Aço rápido.

## ABSTRACT

Rapid steels are commonly used for tool making and are used under severe conditions, have high hardness, good wear resistance and high toughness. For this, it is important to study innovations in thermal treatments such as cryogenics. Recent studies bring this new treatment that uses extremely low temperatures, since in the range of  $-80^{\circ}\text{C}$  to  $-190^{\circ}\text{C}$  occurs the transformation of the retained austenite in martensite and the precipitation of fine carbides. In this way, the combination of conventional heat treatments together with cryogenic treatment plays an important role in improving the quality of mechanical components. For this reason, the present work aims to compare the performance of the combination of quenching, tempering and cryogenic varying the parameters of time, temperature and quantity of treatments to investigate which aspects influence the mechanical and tribological properties of ABNT M2 high speed steel. The methodology used in the study was experimental research, where the samples were austenitized at  $1180^{\circ}\text{C}$  and quenched in oil, cryogenically treated at  $-181^{\circ}\text{C}$  during 24h with a ramp of  $-0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  and the tempering was done at  $550^{\circ}\text{C}$  for 2h. After that, were done the mechanical tests of hardness, microhardness, abrasion and Charpy and the metallographic tests of optical microscopy and scanning electron microscopy to analyze the material's microstructure and fracture. The steel that received double cryogenic treatment before double tempering obtained the best improvement in their mechanical and tribological properties.

Keywords: Cryogenics. Heat treatment. Fast Steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição química dos aços rápidos série M. ....	19
Figura 2 - Curva de Revenimento para aço ABNT M2.....	22
Figura 3 – Rota Tradicional do Tratamento Criogênico.....	25
Figura 4 – Mapa Conceitual.....	27
Figura 5 – Sequência de procedimentos.....	27
Figura 6 – (a) Recipiente das amostras (b) Tratamento criogênico.....	28
Figura 7 – Forno SANCHIS.....	29
Figura 8 - Durômetro.....	30
Figura 9 - Microdurômetro.....	30
Figura 10 - Equipamento Ensaio Charpy.....	31
Figura 11 – Equipamento para ensaio de desgaste.....	31
Figura 12 – Funcionamento do Ensaio de Desgaste.....	32
Figura 13 – Balança de precisão.....	32
Figura 14 – Microscópio Óptico.....	33
Figura 15 – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	34
Figura 16 – Resultados do Teste de Dureza.....	36
Figura 17 – Resultados do Teste de Microdureza.....	37
Figura 18 – Resultados do Teste Charpy.....	38
Figura 19 – Resultados do Teste de Desgaste.....	40
Figura 20 – Rota T/R (800x).....	41
Figura 21 – Rota T/2R (800x).....	41
Figura 22 - Rota T/DCT/R (800x).....	42
Figura 23 - Rota T/DCT/2R (800x).....	42
Figura 24 – Rota T/2DCT/R (800x).....	43
Figura 25 - Rota T/2DCT/2R (800x).....	43
Figura 26 – Rota T/R Microestrutura.....	44
Figura 27 – Rota T/R Fratura.....	44
Figura 28 – Rota T/2R.....	45
Figura 29 – Rota T/2DCT/R.....	45
Figura 30 – Rota T/2DCT/2R (a) 100x (b) 50x.....	46
Figura 31 – Rota T/DCT/2R (a) 100x (b) 50x.....	47

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Classificação dos Aços .....	17
Tabela 2 – Rotas de Tratamentos .....	29
Tabela 3 – Resultados do Teste de Dureza .....	35
Tabela 4 – Resultados do Teste de Microdureza .....	36
Tabela 5 – Resultados do Teste Charpy .....	38
Tabela 6 – Resultados do Teste de Desgaste .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas

*Apud* – citado por

DCT – *Deep Cryogenic Treatment*

DP – Desvio Padrão

*et al.* – e outros

M2 – Aço ferramenta da série M

M2C – Carbetto secundário

MC – Carbetto primário

mm – milímetro

µm - micrometro

MO – Microscopia Ótica

Mo – Molibdênio

NBR – Normas Brasileiras

T – Têmpera

R – Revenido

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivos .....	15
1.2 Hipóteses .....	15
1.3 Justificativa .....	16
1.4 Estrutura do Trabalho .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 Aços .....	17
2.1.1 Aços Rápidos .....	18
2.2 Tratamentos Térmicos .....	19
2.2.1 Têmpera .....	20
2.2.2 Revenido .....	21
2.2.2.1. Endurecimento secundário.....	22
2.3 Criogenia .....	23
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1 Questionamentos da Pesquisa .....	26
3.2 Delineamento da Pesquisa .....	26
3.3 Forma de coleta de dados.....	27
3.3.1 Ensaios Mecânicos .....	29
3.3.2 Análise Microestrutural .....	32
3.3.2.1 Microscopia Ótica .....	33
3.3.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	33
3.4 Forma de tratamento dos dados.....	34
3.5 Validações.....	34
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
4.1. Ensaio de Dureza .....	35
4.2. Ensaio de Microdureza.....	36
4.3. Ensaio Charpy .....	38
4.4. Ensaio de Desgaste .....	39
4.5. Análise Microestrutural.....	40
4.5.1. Microscopia Óptica .....	40
4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	44
4.6. Resumo dos Resultados.....	47
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O âmbito industrial no Brasil passa por constante desenvolvimento. O tratamento térmico contribui para a otimização das propriedades dos materiais que vão ser aplicados como ferramentas para todos os processos industriais. As pesquisas da área de tecnologia de materiais buscam utilizar os conceitos teóricos e técnicos a fim de elevar a qualidade dos materiais.

Os estudos a respeito de tratamentos térmicos em aços são de grande importância para a evolução das indústrias. A ideia central é melhorar as características dos materiais no que se refere a sua microestrutura e otimizar as propriedades mecânicas e tribológicas. Em definição, o tratamento térmico é considerado um processo baseado no aquecimento e resfriamento do material de modo controlado.

Para os processos de fabricação de componentes industriais, os aços rápidos estão constantemente presentes, pois tem características específicas como alta resistência a choques, dureza elevada e resistência ao desgaste. Dentro dos aços rápidos, o aço ABNT M2 é o mais utilizado pois possui tenacidade adequada e alta temperabilidade. De acordo com FANTINELI (2015) isto ocorre devido ao fato do material ter uma estrutura martensítica de alta estabilidade térmica aliada ao reforço de carbeto de liga.

O tratamento criogênico, segundo PODGORNIK (2015) é definido como um processo adicional ao tratamento térmico convencional, adicionado após o processo de têmpera e revenimento ou como processo suplementar entre têmpera e revenimento, envolvendo o resfriamento do material para cerca de  $-196^{\circ}\text{C}$  por até 40h e retorno a temperatura ambiente de maneira controlada.

Com os avanços científicos, descobriu-se uma variação do tratamento criogênico convencional, pois ultrapassava apenas a superfície do material e ficava no processo por um tempo maior, obtendo assim, resultados mais positivos. Esta nova técnica ficou conhecida como DCT (*Deep Cryogenic Treatment*), traduzida como tratamento criogênico profundo, esse novo procedimento tinha melhores propriedades pois, segundo AKHBARIZADEH (2009), a eliminação de austenita retida era maior e a distribuição de carbeto era mais homogênea.

Conforme SILVA (2006), as análises de ferramentas de aço rápido tratadas com criogenia mostram mudanças microestruturais no material que podem influenciar a vida útil das ferramentas e a produtividade. Porém, é relevante a necessidade de maiores investigações com o objetivo de aperfeiçoar o tratamento criogênico.

No que se trata da ordem dos tratamentos de têmpera, revenido e criogenia, FANTINELI (2015) diz que pesquisas do estado da arte na área, mostram que não se

considerou a influência que os parâmetros do tratamento térmico convencional têm no resultado final da peça tratada por criogenia. O tratamento criogênico é empregado em sequência a têmpera e o revenido, mas é importante estudar a variação da criogenia entre os tratamentos térmicos convencionais.

De acordo com PADMAKUMAR (2018), as pesquisas sobre criogenia estão em estágio inicial, pois os mecanismos por trás da melhorias nas propriedades ainda se encontram em debate, o autor destaca a melhora da taxa de desgaste geral e o aumento da dureza do material.

Para a verificação das propriedades mecânicas dos corpos de prova, serão realizados ensaios de dureza Rockwell C (HRC), microdureza Vickers (HV), Charpy e desgaste abrasivo. A metalografia do material, avaliada por microestrutura e fratura, foram analisadas por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O tema do trabalho engloba a tecnologia dos materiais envolvendo tratamentos térmicos, entretanto, é delimitado para a análise do tratamento criogênico profundo em aço ABNT M2. Este estudo procura responder o seguinte questionamento, a utilização do tratamento criogênico profundo em aços rápidos ABNT M2 contribui para melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas do material?

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste estudo é comparar o desempenho da criogenia no aço rápido ABNT M2 combinada aos tratamentos de têmpera e revenido em relação ao aço apenas com tratamentos convencionais. Além disso, este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as propriedades tribológicas e a tenacidade do aço M2 em amostras sem DCT, DCT duplo e DCT simples através dos ensaios de desgaste e Charpy;
- Avaliar as microestruturas resultantes de cada variação dos tratamentos.
- Verificar a otimização dos parâmetros do material após todos os ensaios.

## **1.2 Hipóteses**

As hipóteses iniciais para o presente trabalho são:

- A combinação dos tratamentos térmicos convencionais e criogênico otimiza todas as características microestruturais do aço ABNT M2;
- O tratamento criogênico profundo duplo obtém melhores propriedades que apenas tratamentos térmicos convencionais;

- A microestrutura do aço ABNT M2 apresenta contornos de grão visíveis e precipitação de carbeto;
- O aço rápido tratado criogenicamente tem melhor resistência ao desgaste e tenacidade.

### **1.3 Justificativa**

No Brasil, existe a expectativa de aumento da produção industrial nos próximos anos. Com isso, as pesquisas relacionadas devem desenvolver-se a fim de elevar a qualidade das ferramentas utilizadas. Existe a necessidade de mais pesquisas na área, aumentar o nível de competitividade com os países mais desenvolvidos e tornar o mercado industrial brasileiro melhor conceituado. Todas as etapas de desenvolvimento dos materiais devem ser estudadas e analisadas a fim de ampliar a qualidade do serviço prestado. Neste contexto, é importante analisar as variáveis que melhoram a resistência das ferramentas de aço rápido, para a produção das fábricas se tornarem mais qualificada e mais eficiente. As pesquisas sobre tratamento criogênico ainda tem várias divergências, por esse motivo, é pertinente buscar parâmetros ótimos para obter-se alta dureza e melhor resistência ao desgaste.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

Capítulo 1 - Introdução: Aborda o contexto do tema escolhido. É mencionado também o objetivo geral, os objetivos específicos e as hipóteses iniciais, assim como, a justificativa para a efetivação do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: expõe uma base a respeito da teoria estudada, abordando definições e conceitos que se referem ao trabalho, onde é elucidado o que já foi pesquisado na área, mostrando os resultados e contradições encontrados.

Capítulo 3 – Metodologia: são exibidos os métodos que foram empregados para praticar o procedimento experimental, o material aproveitado e a definição dos ensaios utilizados.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: são apresentados os resultados obtidos com foco nas propriedades mecânicas e tribológicas do material.

Capítulo 5 – Considerações Finais: neste capítulo estão indicadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo busca apresentar as informações a respeito do tema, com base no encontrado nas referências, partindo de uma análise dos tipos de aços, definições a respeito dos tratamentos térmicos e as principais pesquisas sobre tratamento criogênico.

### 2.1 Aços

Esta etapa traz uma análise geral dos aços, porém com uma explicação mais sucinta a respeito dos aços rápidos. O aço é o material mais aproveitado das ligas de metal, é o material mais utilizado quando se procura melhor tenacidade, dureza elevada e resistência ao desgaste mais eficiente, condições mínimas de um efetivo uso industrial. Dentro deste contexto, é importante definir a importância do aço ferramenta, que segundo FANTINELI (2015), ao contrário dos aços de construção mecânica, são considerados por tipo de tratamento térmico, arranjo químico e modo de utilização. De acordo com PODGORNIK (2016), o tipo e a composição química do aço-ferramenta afetam diretamente como o tratamento criogênico profundo altera as propriedades mecânicas e tribológicas do material. Os aços ferramenta comumente aproveitados são classificados de acordo com seu emprego, composição ou meio de resfriamento. Conforme VIELMO (2016) a classificação dos aços ferramenta pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos Aços

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

Fonte: Adaptado de VIELMO(2016).

### 2.1.1 Aços Rápidos

A principal utilização desse tipo de aço no mercado é em ferramentas de usinagem, pois tem resistência elevada e trabalham com altas temperaturas. Segundo PARCIANELLO(2016), esse material tem capacidade de conter elevada dureza mesmo quando utilizado em grandes velocidades de corte, a microestrutura é feita de carbeto primários, que concedem proteção contra o desgaste abrasivo e uma matriz de martensita revenida reforçada por finos carbeto secundários.

A ferramenta de aço rápido tem capacidade de se manter eficiente e não alterar a temperatura do gume, mesmo em situações de alto atrito. De acordo com TIER(1998), os aços rápidos, em alta temperatura de trabalho, tem uma característica chamada “dureza a quente”, onde esse material consegue reter a dureza e permanecer em operação de usinagem.

CHIAVERINI (2008) diz que utilizar a têmpera nos aços, com resfriamento em banho de sais ou em óleo, facilita o endurecimento do aço rápido devido a sua composição química. Com base nessa ideia, a intenção é diminuir as chances de problemas como fadiga, ruptura e empenamento no resfriamento, desde que se tenha todos os cuidados necessários durante a realização do tratamento térmico.

A classificação dos aços rápidos é de acordo com a porcentagem de dois elementos químicos: molibdênio e tungstênio. Os aços rápidos M tem uma maior quantidade de molibdênio para melhorar a formação de carbeto. Segundo VIELMO (2016) na série M o tungstênio possui concentrações menores, variando de 1% a 6% e o Mo varia de 4,25% a 9,2%. Por outro lado, os aços rápidos da série T possuem tungstênio de 11% a 21%, e a de Mo (molibdênio) varia entre 0,4% a 1,25%.

Conforme SILVA (2010), os aços rápido da série M tem uma maior gama de aplicação no setor de fabricação de ferramentas de corte que são utilizadas em velocidades mais elevadas, como por exemplo fresas, brocas e machos para roscas. O molibdênio tem um preço mais alto que o tungstênio, porém, o peso atômico cai pela metade, o que resulta em duas vezes mais átomos de molibdênio para uma mesma quantidade tungstênio. Assim o aço rápido da série M contém porcentagens dos dois elementos, o que permite melhorar características como temperabilidade, tenacidade e dureza.

De acordo com FANTINELI (2016), os aços rápidos tem alta dureza a quente, superior a 58 HRC a 550° C, elevada resistência ao desgaste, por causa do teor carbono ativo e aos elementos de liga que são geradores de carbeto, bem como tornam o material tenaz e com estabilidade de dimensões. Este material tem capacidade de resistir

à ação do calor, permitindo a utilização de altas velocidades de corte em operações de usinagem. É a principal classe de aços usados em ferramentas de corte devido à alta dureza no estado temperado/revenido e, principalmente, pela capacidade de operar em condições que elevam excessivamente a temperatura da ferramenta.

Para melhor entendimento do porquê da escolha do aço rápido ABNT M2, pode-se observar na Figura 1, as variações de composição química de cada elemento dentro da série M.

Figura 1 – Composição química dos aços rápidos série M.

ELEMENTO	C		Mn		P	S	Si		Cr		V		W		Mo	
TIPO	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Max.	Max.	Mín.	Max.								
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
<b>M2</b>	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

Fonte: Adaptado de NBR NM 116 – 1(p.5, 2005).

## 2.2 Tratamentos Térmicos

São um conjunto de procedimentos realizados por meio do aquecimento e resfriamento do material, na maioria das vezes, em aços. A principal finalidade destes tratamentos é qualificar as propriedades dos aços, obter desempenho eficiente durante a aplicação da sua função. Todavia, para cada categoria dos aços ferramentas são efetuados tratamentos diferentes, pois as características que se deseja alcançar são distintas. Segundo VIELMO (2016) os aços rápidos são empregados para fabricação de ferramentas de corte que geralmente serão utilizadas em velocidades elevadas. As propriedades necessárias para estes materiais são: alta resistência ao desgaste, boa tenacidade, dureza, dureza a quente, baixa ductilidade e temperabilidade.

Para PARCIANELLO (2016) os tratamentos térmicos têm como desígnio transformar a microestrutura dos metais e são aproveitados para aperfeiçoar as propriedades mecânicas e tribológicas dos aços ferramenta. No aço rápido M2 a ideia é alcançar uma microestrutura com distribuição homogênea de finos carbeto numa matriz de martensita revenida.

### 2.2.1 Têmpera

Este tratamento térmico tem como finalidade endurecer a peça por meio da obtenção da martensita, submetendo o aço a um arrefecimento brusco e obrigando-o a passar pelo seu ponto eutetóide, a temperatura onde a austenita se encontra instável. Ajusta a melhor combinação de resistência mecânica, tenacidade e dureza e pode-se fazer um resfriamento rápido em óleo, ar ou banho de sais.

De acordo com FANTINELI (2015) a temperatura de austenitização ideal, na têmpera, do aço ABNT M2 é de 1200° C, desse modo, para temperaturas abaixo da recomendada, não ocorre a formação da quantidade ideal de carbeto para o fornecimento de carbono à austenita. Entretanto, elevadas temperaturas causam um aumento do grão austenítico, o que leva a uma tenacidade menor e a redução da resistência à abrasão.

Conforme PARCIANELLO (2016), após o início da têmpera, quando o material chega perto da temperatura de austenitização, aproximadamente 850°C, ocorre a transformação de fases, ou seja, a austenita se transforma em martensita. O processo comum de têmpera em aços rápidos não suprime toda a austenita presente no material, por esse motivo, justifica-se aplicar o Tratamento Criogênico. Os tratamentos térmicos obtidos depois da têmpera precisam garantir uma redução ou eliminação total da austenita retida.

CHIAVERINI (2008) explica que a temperatura de austenitização é um parâmetro que tem grande influência no comportamento dos materiais durante os tratamentos, pois age diretamente na transformação de austenita em martensita e na produção de carbeto nos contornos de grãos. O autor também esclarece que em temperaturas superiores a 1200°C, existe alta presença de carbono e elementos de liga, o que leva a decair os valores de dureza do aço. Porém, em temperaturas menores que 1175°C, o aço não alcança os valores máximos de dureza.

Segundo VIELMO (2016) a têmpera no aço ABNT M2 serve para aumentar a dureza e a resistência mecânica do material. Todavia, com somente este processo não se consegue o conjunto final ideal das propriedades. Depois da têmpera o aço tem mais dureza e resistência mecânica, mas tem uma perda significativa em tenacidade, o que pode ser corrigido com outros tratamentos, como a criogenia e o revenido. Ainda conforme o autor, a austenita retida localizada na microestrutura do aço é resultado da austenita que não se transformou durante o tratamento. Isso acontece principalmente em aços com temperabilidade elevada, como por exemplo, os aços rápidos. O motivo de tal situação se deve ao resfriamento lento e porcentagens elevadas de carbono que ocorrem no atraso das temperaturas de início e fim da martensita.

Os tratamentos que podem ser realizado depois da têmpera e antes dos revenidos (duplo ou triplo) são: Resfriamento subzero e Criogênico profundo (DCT). Muitas pesquisas (BALDISSERA, 2008; AKHBARIZADEH, 2009; GILL, 2011; IDAYAN, 2014; PODGORNIK, 2015; FANTINELI, 2015) foram abordadas nesta área afim de se conhecer as rotas e níveis de parâmetros ideais, tais como temperatura, tempo de tratamento e taxa de resfriamento para obter uma microestrutura de dureza e tenacidade altas.

### 2.2.2 Revenido

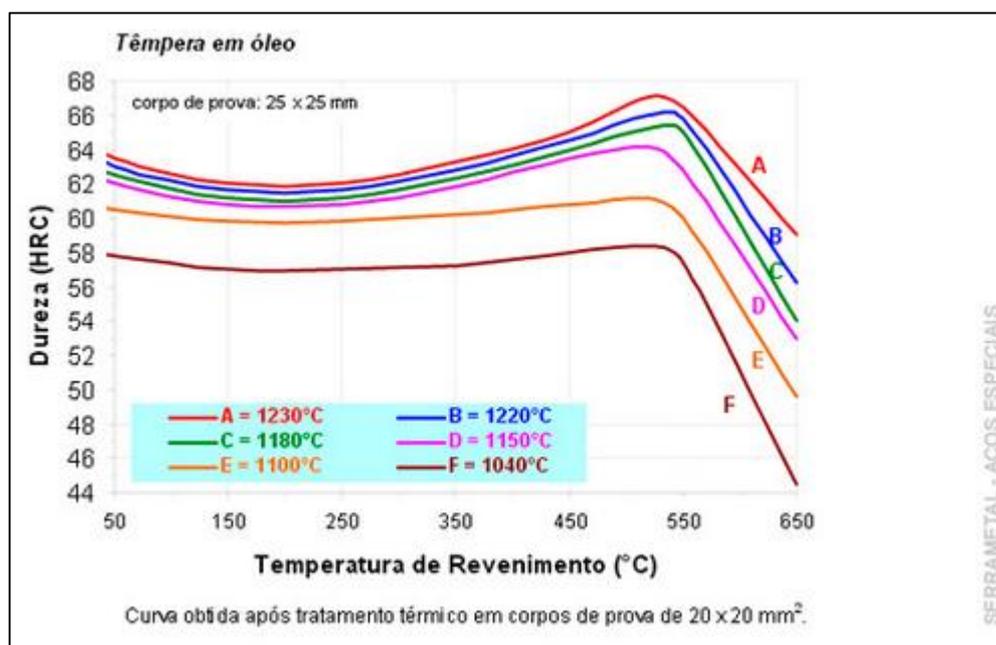
O revenido é o tratamento térmico que consiste no reaquecimento do material após a realização da têmpera, sem atingir a temperatura de início da formação austenítica. Promove a difusão dos elementos de liga e de carbono de modo que sejam gerados carbeto na microestrutura. Comumente são realizados mais de um revenido, geralmente duplo, o que segundo FANTINELI (2015), o primeiro processo serve para aliviar tensões e decompor a austenita retida e o segundo revenido tem como função reverter a martensita formada na primeira etapa. O passo de revenimento é essencial, pois a martensita recém formada pela têmpera é frágil, o que fica mais evidente pela expansão do volume.

De acordo com PARCIANELLO (2016) *apud* CESCÓN (1990), no revenido entre 500 -570° C ocorre o fenômeno denominado de endurecimento secundário. Nessa faixa acontece uma precipitação alta de carbeto dos elementos de liga, principalmente na estrutura de discordâncias que vem da martensita.

Para aços rápidos, o revenido é efetivado em temperaturas maiores de 500°C, uma vez que é a partir deste ponto que os carbeto iniciam a precipitar. FANTINELI (2015), VIELMO (2016) e PARCIANELLO (2016) utilizaram revenido duplo a 550°C durante 120 minutos cada.

A Figura 2 mostra como se relacionam a temperatura de austenitização e a temperatura de revenido na dureza do aço ABNT M2. É possível observar que com o acréscimo da temperatura de austenitização, a dureza também é aumentada.

Figura 2 - Curva de Revenimento para aço ABNT M2



Fonte: SERRAMETAL Aços Especiais. Disponível em: <<http://serrametal.com.br/aco-m2/>> Acesso em: 15/10/2018

### 2.2.2.1. Endurecimento secundário

O tratamento do revenido convém para alívio de tensões, mas também é importante para transformar a austenita retida em martensita, conferindo uma dureza maior do aço. Quando o material é endurecido pelo tratamento térmico de têmpera, pode ser chamado de endurecimento primário, após isso, durante o revenido, acontece um aumento de dureza, que alivia as tensões residuais, denominado endurecimento secundário. Segundo FANTINELI (2015) este fator depende dos parâmetros de composição química do aço, temperatura de austenitização, temperatura e tempo de revenido.

CHIAVERINI (2008) explica que uma das únicas causas do endurecimento secundário ocorre durante a retenção da austenita e sua transformação em martensita. Entretanto, a precipitação de carbeto de liga também influenciam nesse processo, elementos como molibdênio, tungstênio, titânio e vanádio são formadores de carbeto e favorecem o endurecimento secundário

No aço ABNT M2, de acordo com VIELMO (2016), para temperaturas de revenido superiores a 500°C surgem finos carbeto do tipo MC e M<sub>2</sub>C nas discordâncias da martensita. No momento em que estes finos carbeto precipitam a dureza atinge seu ápice. Desta maneira, um segundo revenido torna-se necessário para aliviar as tensões da martensita.

### 2.3 Criogenia

O tratamento térmico da criogenia pode ser definido, segundo FANTINELI (2015), como o resfriamento de um material a temperaturas bem baixas, da ordem de  $-80^{\circ}\text{C}$  à  $-196^{\circ}\text{C}$ , manter o material nesta temperatura baixa por um período de tempo e a elevação da sua temperatura até atingir a temperatura ambiente. O autor ainda cita que a imersão direta em nitrogênio líquido é uma técnica ideal, pois, não tem umidade e consegue chegar na temperatura desejada devido aos materiais entrarem em contato direto com o nitrogênio. Todavia, este processo tem uma elevada taxa de resfriamento, o que acarreta em materiais mais frágeis e choque térmico.

A criogenia é um procedimento extra aos tratamentos térmicos convencionais de têmpera e revenido, a fim de conferir à austenita retida a têmpera e melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas do material.

Em relação as pesquisas referentes ao tratamento criogênico, PADMAKUMAR *et al.* (2018) explica que os estudos ainda estão em estágio inicial, pois os mecanismos por trás da melhoria nas propriedades ainda está em debate, porém, sabe-se que é alcançado melhores taxas de desgaste e maiores valores de dureza do metal.

DA SILVA *et al.* (2006) utilizaram difração por raios X para avaliar a porcentagem da austenita retida. As amostras não tratadas por DCT apresentaram um volume de 25% de austenita retida, enquanto que nas amostras tratadas o volume ficou próximo de 0%.

BALDISSERA (2008) define o tratamento criogênico como um resfriamento gradual do componente até a temperatura definida, mantendo-o por um tempo de congelamento com o objetivo de alcançar características desejadas, tais como, transformação completa da austenita retida em martensita, precipitação de carbeto dispersos finos e remoção de tensões residuais. O autor também explica que os parâmetros típicos do processo que devem ser analisados são: temperatura mínima, tempo de espera e taxa de resfriamento e aquecimento.

Segundo AKHBARIZADEH (2009), as amostras que são tratadas criogenicamente apresentam maior resistência ao desgaste devido a eliminação da austenita retida e a distribuição homogênea de carbeto, bem como à maior porcentagem de carbeto de cromo. O autor também explica que as amostras que ficaram mantidas por períodos mais longos (40 h em vez de 20 h) a temperaturas criogênicas, tiveram maior resistência ao desgaste e maior dureza.

De acordo com LI *et al.* (2018) o tratamento criogênico pode modificar microestruturas e propriedades mecânicas de ferramentas de corte de metal duro, melhorar significativamente a resistência ao desgaste da ferramenta, reduzir o coeficiente

de atrito e melhora a vida útil. Ainda conforme os autores, os parâmetros ótimos são obtidos com temperatura criogênica  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , taxa de resfriamento  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , tempo de imersão 90min e temperatura de revenimento de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Conforme GU *et al.* (2018), a criogenia é um método de modificação microestrutural eficaz, pois melhora a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas abrangentes dos aços. A criogenia logo após a têmpera fornece um alto grau de superesfriamento, o que pode induzir a baixa temperatura martensítica. Os autores dizem que atualmente, o tratamento criogênico tem sido amplamente adotado para melhorar o desempenho dos aços nas indústrias.

ZHOU *et al.* (2018) mostraram a importância de utilizar o tratamento criogênico. Os autores fizeram o tratamento em uma liga de titânio TC6 com tempo de imersão de 18 horas e tiveram resultados de otimização, tais como a microdureza da superfície e a resistência à tração das amostras que aumentaram em 28,11% e 28,71%, respectivamente, e melhores propriedades mecânicas. Tudo isso beneficiado pelo efeito da tensão residual compressiva.

KUMAR *et al.* (2016) avaliou o tratamento criogênico em um tipo de material diferente, o processo aconteceu em um compósito com matriz de metal polimérico reforçado com fibra de vidro, onde a ideia foi melhorar as propriedades físicas e mecânicas, tais como desgaste, abrasão, erosão/corrosão, resistividade, durabilidade e estabilidade. O autor explica que existe uma melhoria na resistência à corrosão do material devido à ligação firme entre as estruturas de grão do material, em comparação com o material compósito fabricado não tratado.

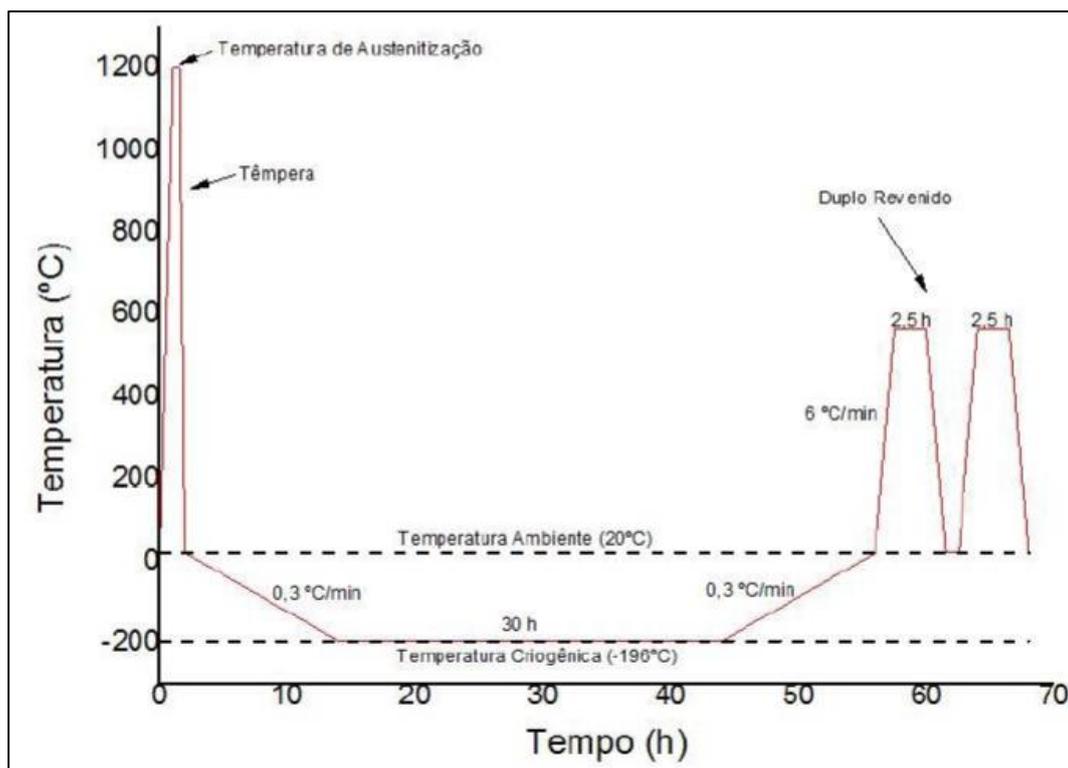
A criogenia realizada por IDAYAN *et al.* (2014) teve melhores resultados de dureza, foi aumentada em 7% quando submetido ao DCT e as porcentagens de austenita retidas dessas amostras foram de 29%, 8% e 5,7%. VILLA (2017) esclarece que o tratamento criogênico é um passo intermediário no endurecimento de aços carbono, mas que ainda pode ser mais otimizado, adaptando o programa de temperatura e exercendo mais controle dos parâmetros de resfriamento.

GILL *et al.* (2011) destacam que a criogenia em aços rápidos, como por exemplo, o M2, pode ser aplicada após a têmpera e revenimento ou imediatamente após a têmpera. Seus resultados com amostras tratadas criogenicamente imediatamente após a têmpera foram melhores do que após têmpera e revenido. Independentemente da rota, os materiais podem ter suas propriedades melhoradas, logo, o tratamento criogênico é uma boa alternativa para melhorar a produtividade.

Para buscar um melhor entendimento de como funciona o tratamento criogênico, é interessante analisar a Figura 3, que segundo PARCIANELLO (2016), mostra uma rota

em que são apontadas as etapas tradicionais, têmpera e o revenido, somada a criogenia entre a têmpera e o duplo revenido. Deste modo, a proposta do presente trabalho é avaliar o efeito do tratamento criogênico no aço rápido ABNT M2 em conjunto com a variação de aplicação da têmpera e do revenido. Para isso, utilizou-se para aplicação do DCT um sistema com controle da taxa de resfriamento e aquecimento.

Figura 3 – Rota Tradicional do Tratamento Criogênico



Fonte: PARCIANELLO (p. 39, 2016).

Ainda de acordo com PARCIANELLO (2016) as mudanças microestruturais determinadas pelos acontecimentos do tratamento criogênico proporcionam as seguintes modificações nas propriedades mecânicas:

- Dureza: em muitos casos obteve-se um aumento da dureza na ordem de 1 a 3 pontos HRC.
- Tenacidade: aumentos de tenacidade foram evidenciados em diversos estudos, mas esses resultados muitas vezes apresentam um grande desvio padrão.
- Resistência ao desgaste: Um ganho considerável na resistência ao desgaste é notado comparando-se com tratamentos térmicos convencionais.
- Estabilidade dimensional: aumento da estabilidade dimensional. Sendo esta a proposta inicial dessa modalidade de tratamento, em que se buscava eliminar a austenita retida (fase instável).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são expostos os métodos e procedimentos seguidos para o desenvolvimento do trabalho. Para avaliar como o procedimento de criogenia vai influenciar nas características mecânicas do aço rápido M2, e como esses resultados vão contribuir para o mercado industrial dos aços, existem alguns métodos que podem comprovar cada etapa, porém, entende-se que a pesquisa experimental é a maneira ideal para alcançar os objetivos propostos.

O método utilizado será quantitativo, que, segundo FONTELLES *et al.*(2009), é aquele que opera com variáveis expressas sob a forma de dados numéricos e aplica recursos e técnicas estatísticas para classificar e analisar, tais como a porcentagem, a média e o desvio padrão.

GIL (2008) diz que pesquisa experimental é caracterizado quando se determina um objeto de estudo, seleciona-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, define-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

#### 3.1 Questionamentos da Pesquisa

Q1 – Como a combinação de tratamentos térmicos convencionais e criogênicos melhora as propriedades mecânicas e tribológicas o aço ABNT M2?

Q2 – Realizar a dupla criogenia gera melhores resultados?

Q3 – Como fica a microestrutura do aço ABNT M2 após todos tratamentos?

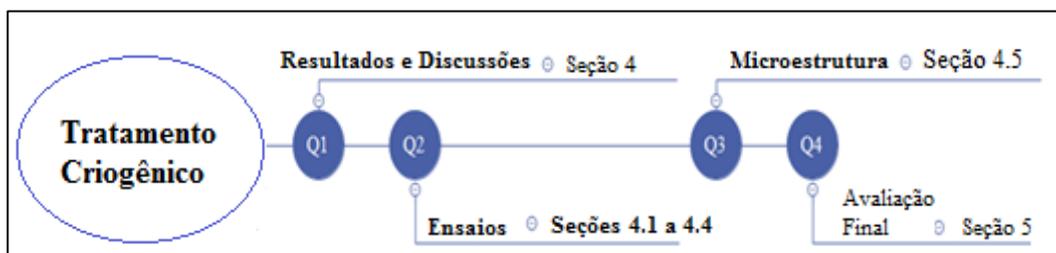
Q4 – A melhoria das propriedades do aço ABNT M2 desenvolve a aplicabilidade no mercado industrial?

#### 3.2 Delineamento da Pesquisa

O tema deste trabalho foi escolhido devido à dificuldade das indústrias metalúrgicas em estabelecer uma melhor qualidade dos seus aços rápidos de ferramentas. A motivação aparece em mostrar que essa associação entre os tratamentos térmicos convencionais e criogênico pode ser benéfica para evoluir a produtividade e contribuir com o crescimento do mercado. As hipóteses criadas foram questionadas e analisadas até chegar em um consenso final sobre o tema. Os resultados esperados serão exibidos para certificar a veracidade das suposições iniciais questionadas.

A estratégia utilizada para explicar o delineamento da pesquisa é a esquematização da Figura 4 através de um mapa conceitual, onde Q1, Q2, Q3 e Q4 são os questionamentos de pesquisa que foram referidos anteriormente.

Figura 4 – Mapa Conceitual

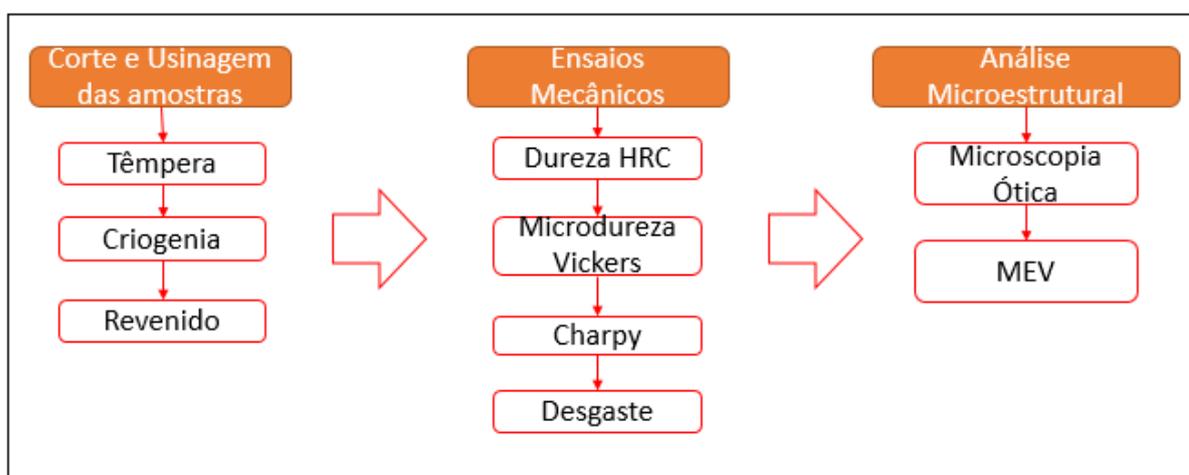


Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 Forma de coleta de dados

Como ferramentas de coleta das informações, foram avaliados artigos, teses e livros que abordam, de alguma forma, tratamentos térmicos, criogenia e aços rápidos. Os dados serão obtidos a partir de uma pesquisa experimental. O norte do trabalho é analisar como a variação das rotas de tratamentos térmicos vai influenciar nas propriedades mecânicas do aço ABNT M2. Para um melhor entendimento de como serão trabalhadas as amostras de aço é interessante analisar a sequência de procedimentos realizados na Figura 5.

Figura 5 – Sequência de procedimentos



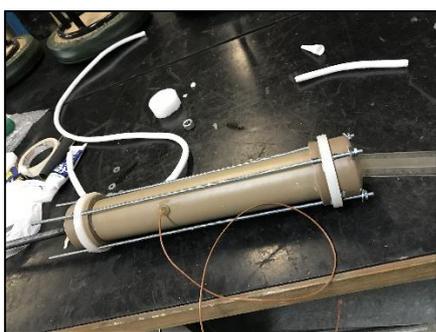
Fonte: Próprio Autor.

Foram cortadas cerca de 30 amostras com os exemplares de aço ABNT M2 disponibilizados na UNIPAMPA, que são de barras circulares de aproximadamente 15mm de diâmetro.

As amostras foram usinadas para o formato padrão quadrado 10x10mm com comprimento de 55mm. Todo o processo de usinagem foi realizado nas dependências da Unipampa – Campus Alegrete, as amostras foram cortadas na cortadora metalográfica e depois finalizadas no centro de usinagem CNC. Após isso, as amostras foram enviadas para a empresa METALTÉCNICA – Tratamentos Térmicos de Metais – Cachoeirinha-RS, para realização da têmpera, com temperatura de austenitização de 1180°C, tempo de encharque de 10 minutos e resfriamento em óleo.

O próximo passo foi o tratamento criogênico, que consistiu em realizar por imersão através de um protótipo de cápsula elaborada pelo grupo de pesquisa, que pode ser vista na Figura 6 (a), no tanque de nitrogênio no laboratório da UNIPAMPA – Campus Alegrete. O protótipo consiste em um cápsula feita de PVC e poliuretano para ser utilizado como recipiente das amostras, a ideia é que a cápsula colabore para uma lenta transição de resfriamento nas amostras. Foram combinadas 6 (seis) rotas de tratamentos térmicos, a criogenia foi atingida até -181°C com duração de 24 horas. A taxa de resfriamento obtida pela cápsula dentro do tanque atingiu o esperado de -0,5°C/min, de modo que impediu choque térmico nas amostras. O tratamento criogênico pode ser visto na Figura 6 (b).

Figura 6 – (a) Recipiente das amostras (b) Tratamento criogênico



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor.

Em etapa posterior, foram realizados revenido duplo e simples, dependendo da rota escolhida, com temperatura de 550°C e com resfriamento ao ar. Esta fase foi realizada no forno marca SANCHIS, que se encontra no Laboratório de Construção Civil da UNIPAMPA – Campus Alegrete como exibido na Figura 7.

Figura 7 – Forno SANCHIS



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 2 explana quais foram as rotas escolhidas para este trabalho e qual a maneira de distribuição dos tratamentos. É um ponto fundamental do trabalho, pois orientou a sequência dos tratamentos, dos ensaios mecânicos e da metalografia.

Tabela 2 – Rotas de Tratamentos

ROTA	TRATAMENTOS	CÓDIGO
1	Têmpera + Revenido	T/R
2	Têmpera + Revenido + Revenido	T/2R
3	Têmpera + Criogenia + Revenido	T/DCT/R
4	Têmpera + Criogenia + Revenido + Revenido	T/DCT/2R
5	Têmpera + Criogenia + Criogenia + Revenido	T/2DCT/R
6	Têmpera + Criogenia + Criogenia + Revenido + Revenido	T/2DCT/2R

Fonte: Próprio Autor

### 3.3.1 Ensaios Mecânicos

Depois de todas rotas concluídas, foram realizados os ensaios mecânicos (Dureza, Microdureza, Charpy e Desgaste) e o estudo microestrutural, lembrando que os ensaios foram realizados na UNIPAMPA-Campus Alegrete, com exceção do Charpy que foi efetivado na UFSM. Para medição de dureza, foi empregado o durômetro marca *Beijing TIME High Technology*, modelo TH500, em escala Rockwell C segundo mostra a Figura 8. Foram concretizadas quatro medições de dureza em cada corpo de prova por etapa. Para o ensaio da microdureza, a escolha foi o microdurômetro *Buehler*, modelo Micromet

6010 como exibe a Figura 9. Foi utilizado uma carga de 1,0kg e escolhida a escala Vickers para os resultados.

Figura 8 - Durômetro



Fonte: Próprio Autor.

Figura 9 - Microdurômetro



Fonte: Próprio Autor.

O ensaio Charpy, um teste importante para analisar o nível de absorção de energia das amostras, foi realizado no laboratório de engenharia mecânica da UFSM. Com a ideia de medir a tenacidade das amostras, a Figura 10 expõe a máquina de fabricação alemã da empresa *VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig* utilizada nos testes.

Figura 10 - Equipamento Ensaio Charpy



Fonte: Próprio Autor.

No último ensaio mecânico, de desgaste, foi utilizado o equipamento da marca *Phoenix Tribology*, modelo TE 53 SLIM, exposto na Figura 9. Este aparelho usa o princípio de bloco sobre anel, onde a peça exerce uma força sobre um disco, gerando o desgaste. Este princípio de funcionamento do sistema pode ser melhor compreendido ao analisar a Figura 11. Os parâmetros utilizados foram: Número de ciclos igual a 300; Anel de diâmetro de 60 mm com a face de contato revestida com lixa 120 grãos/pol<sup>2</sup>; Velocidade angular de 50 rpm; Carga de 49 N (5 kg) sobre a amostra.

Figura 11 – Equipamento para ensaio de desgaste



Fonte: Próprio Autor.

Figura 12 – Funcionamento do Ensaio de Desgaste



Fonte: FANTINELI (p. 60, 2015).

A caracterização do desgaste foi realizada por meio da perda de massa da amostra, verificada após o ensaio de desgaste. A perda de massa foi calculada por meio de uma subtração simples, a massa inicial menos a massa final da amostra. O equipamento aproveitado foi a balança da marca Marte, modelo AY220 indicada na Figura 13 e que tem resolução de 0,0001g.

Figura 13 – Balança de precisão



Fonte: Próprio Autor.

### 3.3.2 Análise Microestrutural

Para estudar a estrutura metalográfica das amostras utilizadas no experimento, foi escolhido a Microscopia Ótica (MO) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Através destes ensaios, foi admissível averiguar a precipitação dos finos carbeto e o tamanho de grão.

### 3.3.2.1 Microscopia Ótica

No caso da análise microestrutural das amostras, foram estudados a distribuição dos carbeto e o tamanho de grão através da microscopia óptica. Para tal, uma fração das amostras foi embutida em baquelite, lixada com lixas de granulometria: 120, 220, 400, 600, 800, 1200, 2000 e 2500 grãos/pol<sup>2</sup>. O ataque químico foi feito com reagente Nital 3% por 60 segundos. A limpeza feita com álcool etílico e a secagem, com ar quente forçado. Prontamente, foram suprimidos os restos do reagente com água corrente, para finalmente visualização da microestrutura na microscópio óptico da marca Kontrol, modelo IM713, como exposto na Figura 14.

Para este diagnóstico foram estudadas todas as rotas, porém, as rotas que possuem apenas um revenido (rotas 2, 3 e 6) têm uma visualização melhor dos contornos de grão. Por outro lado, as amostras que sofreram duplo revenido possuem uma difícil visualização microscópica dos contornos de grão.

Figura 14 – Microscópio Óptico



Fonte: Próprio Autor.

### 3.3.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para um estudo mais detalhado da microestrutura e da fratura das amostras, foram analisados os mecanismos de fratura utilizando o microscópio da marca ZEISS, modelo EVO MA10, do laboratório de microscopia eletrônica da Unipampa, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Próprio Autor.

### 3.4 Forma de tratamento dos dados

Os artigos e a teses citados nas referências bibliográficas tiveram uma análise com foco no estado da arte, ou seja, no que há de melhor dentro da área de tecnologia de materiais, no que diz respeito a tratamentos térmicos convencionais e criogênicos. Sendo cada parte indispensável para a estruturação deste estudo e essenciais no desenvolvimento desse trabalho. Após serem coletados todas as informações necessárias por meio dos ensaios e experimentos, todos os dados recolhidos serão melhores explicados na seção seguinte, por meio de gráficos, tabelas e comparações das rotas, a fim de evidenciar os resultados obtidos. É importante também salientar que os resultados finais foram comparados da teoria com a prática feita em laboratório, a fim de concluir a hipótese final que confirme que a combinação dos tratamentos térmicos obtêm melhores resultados.

### 3.5 Validações

Para validar os dados coletados, foram feitas análises dentro da pesquisa experimental, tais como uma comparação do estudado nas revisões bibliográficas e conferências em livros renomados. Ao final, todas as hipóteses serão avaliadas a fim de ter um veredito concreto e comprovar as ideias estabelecidas inicialmente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de dureza, microdureza, charpy e ensaio de desgaste e dos ensaios metalográficos através da análise microestrutural em MO e de fratura no MEV, realizadas conforme o método experimental descrito no Capítulo 3. A tabela completa dos dados dos ensaios mecânicos pode ser vista no ANEXO I.

### 4.1. Ensaio de Dureza

Os resultados das médias do ensaio de dureza HRC estão mostrados na Tabela 3, assim como os desvios padrão e a taxa de variação dos dados obtidos. Cada rota tinha cinco amostras e cada amostra foi medida cinco vezes. Obteve-se a média de cada amostra e, após isso, a média final de dureza para cada rota.

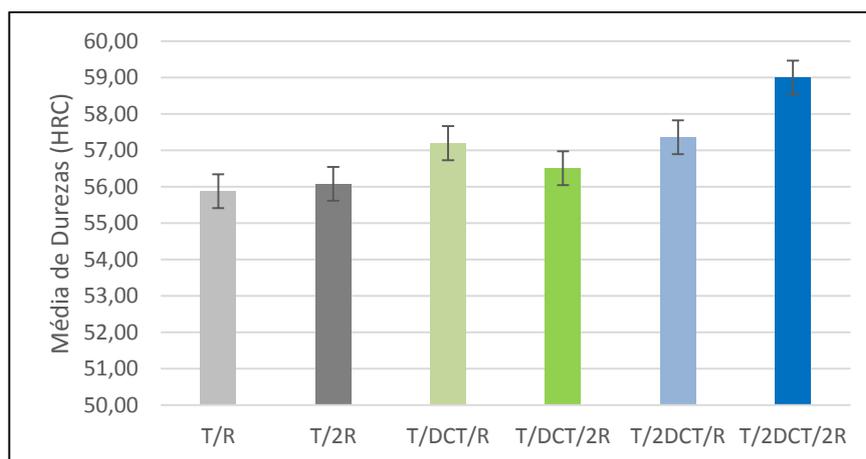
Tabela 3 – Resultados do Teste de Dureza

ROTA	Média Dureza (HRC)	DP	Coefficiente Variação (%)	Aumento de Dureza (%) em relação à T/2R
T/R	56,08	1,30	2,32	0,36
T/2R	55,88	2,17	3,88	--
T/DCT/R	57,20	1,32	2,31	2,36
T/DCT/2R	56,51	1,47	2,60	1,13
T/2DCT/R	57,36	0,55	0,97	2,65
T/2DCT/2R	59,00	0,60	1,02	5,58

Fonte: Próprio Autor.

Pode-se notar, pela Tabela 3 que os valores médios de dureza encontrados são bem próximos, mas ainda assim mostram que o tratamento criogênico implica em um acréscimo de dureza devido a precipitação de carbeto. Também é possível observar uma redução do desvio padrão nas rotas 3 e 4 (dupla criogenia), o que indica que o material está mais homogêneo. Na Figura 16, os resultados são expostos graficamente. A variação entre as rotas é pequena devido a competição entre dois fenômenos antagônicos, enquanto o tratamento térmico eleva os números da dureza, a martensita de baixa temperatura colabora para uma redução desses valores de dureza.

Figura 16 – Resultados do Teste de Dureza



Fonte: Próprio Autor.

Pela Tabela 3 e Figura 16, pode-se afirmar que o maior aumento na dureza com a utilização do tratamento criogênico ocorreu na rota T/2DCT/2R. As rotas com duplo DCT obtiveram os valores mais altos, porém, o melhor valor obtido advém da rota com dupla criogenia e duplo revenido. BALDISSERA (2008) explica que o aumento da dureza vem por meio da transformação austenita retida em martensita e precipitação de carbeto finos. Os dados têm pouca variação, mas é visível que as rotas sem criogenia, tem valores menores em relação aos que tiveram tratamentos convencionais e criogênico combinados.

#### 4.2. Ensaio de Microdureza

Os resultados das médias do ensaio de microdureza HV estão mostrados na Tabela 4, assim como os desvios padrão e a taxa de variação dos dados obtidos. A quantidade de repetições das medições foi a mesma utilizada anteriormente.

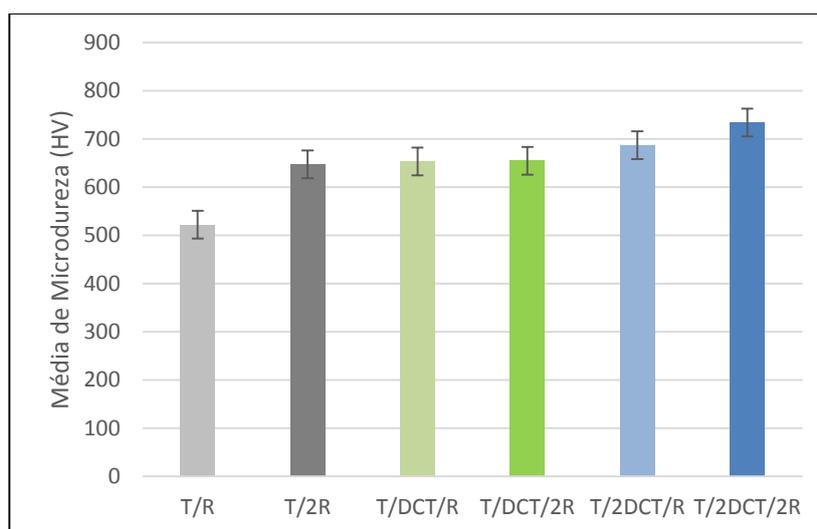
Tabela 4 – Resultados do Teste de Microdureza

ROTA	Média Microdureza (HV)	DP	Coefficiente Variação (%)	Aumento de Microdureza (%) em relação à T/2R
T/R	522,07	73,58	52,04	-19,40
T/2R	647,753	38,64	28,13	--
T/DCT/R	653,56	49,76	39,44	1,12
T/DCT/2R	655,02	38,17	28,47	0,90
T/2DCT/R	687,2	41,67	29,68	6,09
T/2DCT/2R	734,353	54,93	29,68	13,37

Fonte: Próprio Autor

Como padrão foi estabelecido que a carga utilizada seria de 1,0kg, pode-se observar também valores altos de desvio padrão. Diferente do teste de dureza, nota-se que os valores tiveram uma variação maior, porém, o tratamento criogênico duplo aliado ao duplo revenido segue sendo a rota com maior valor alcançado. Na Figura 17, os resultados são mostrados na forma gráfica.

Figura 17 – Resultados do Teste de Microdureza



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que nesse ensaio os valores obtidos nas rotas T/R e T/2R conseguiram ter resultados melhores do que as rotas com criogenia simples, isso ocorre porque existe grande variação do desvio padrão entre as rotas. ZHOU *et al.* (2018) elucidam que o aumento da microdureza a partir do tratamento criogênico é um efeito do aumento da tensão residual compressiva do material.

A análise da microdureza no aço ABNT M2 tratado criogenicamente mostra uma tendência ao aumento desse parâmetro para carga de 1,0 kg. De acordo com cada acréscimo e/ou combinação de tratamento térmico, o material tende a aumentar a microdureza. Segundo FANTINELI (2015) esse acréscimo de microdureza se deve ao fato da precipitação de carbeto secundários, o que leva a uma melhor homogeneização da microestrutura. Pode-se avaliar pela Tabela 4 que o tratamento criogênico aumentou os valores de microdureza em 13,37% da rota T/2DCT/2R em relação a rota referência T/2R.

### 4.3. Ensaio Charpy

Estão expostos na Tabela 5 os resultados de absorção de energia obtidos do ensaio Charpy. A ideia é avaliar a tenacidade do material de acordo com a quantidade de energia que ele consegue absorver durante o impacto.

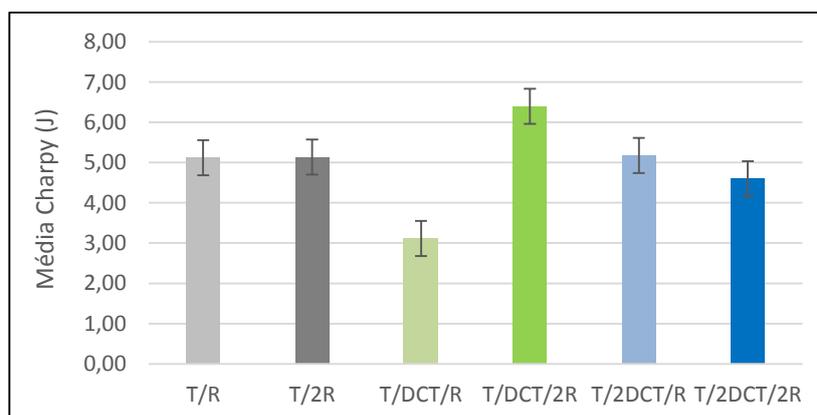
Tabela 5 – Resultados do Teste Charpy

ROTA	Média Charpy (J)	DP	Coefficiente Variação (%)	Aumento de Tenacidade (%) em relação à T/2R
T/R	3,97	0,15	3,85	-5,92
T/2R	4,22	1,14	27,05	--
T/DCT/R	2,12	0,43	20,09	-49,76
T/DCT/2R	5,70	2,69	47,14	35,07
T/2DCT/R	4,27	1,17	27,49	1,18
T/2DCT/2R	3,73	0,12	3,09	-11,61

Fonte: Próprio Autor

Os resultados sugerem um aumento de tenacidade com o uso de criogenia para as rotas T/DCT/2R e T/2DCT/R. Contudo, não é possível afirmar com segurança pois os valores de aumento são menores que os respectivos coeficientes de variação. Pode-se observar a partir desses resultados que diferente dos ensaios de dureza e microdureza, a o maior valor de energia absorvida está na rota T/DCT/2R, com 35,07% em relação a rota T/2R. Fazendo uma comparação entre revenido simples e revenido duplo, pode-se chegar que as amostras com revenido simples tem 3,45J de média, porém, as rotas com revenido duplo tem média de 4,55J. O duplo revenido tem 31,88% a mais de tenacidade, logo é possível sugerir que esse tratamento colabora com o aumento da tenacidade do material.

Figura 18 – Resultados do Teste Charpy



Fonte: Próprio Autor.

O acréscimo de tenacidade ao impacto no material que ocorre depois da combinação dos tratamentos pode ter sido efeito da redução da tetragonalidade da martensita após a precipitação de carbeto. Pode-se avaliar pela Tabela 5 que a rota T/DCT/2R teve um aumento de tenacidade, porém, nas rotas T/DCT/R e T/2DCT/2R obteve-se valores menores do que a rota referência de comparação (T/2R). Supõe-se a hipótese de que essas diferenças podem estar atreladas a instabilidade do equipamento.

#### 4.4. Ensaio de Desgaste

Estão expostos na Tabela 6 os resultados obtidos do ensaio de desgaste realizado com lixa de granulometria 120 grãos/pol<sup>2</sup>, 50 rpm e 300 ciclos. Os resultados mostraram a importância de se analisar as propriedades tribológicas do aço ABNT M2.

Tabela 6 – Resultados do Teste de Desgaste

ROTA	Média Perda de Massa (mg)	DP	Coefficiente Variação (%)	Aumento de Desgaste (%) em relação à T/2R
T/R	5,5650	0,0085	0,1527	-27,44
T/2R	7,6700	0,0587	0,7649	--
T/DCT/R	4,0400	0,0238	0,5881	-47,33
T/DCT/2R	2,4870	0,0216	0,8685	-67,57
T/2DCT/R	3,6200	0,0389	1,0743	-52,80
T/2DCT/2R	1,4330	0,0034	0,2387	-81,32

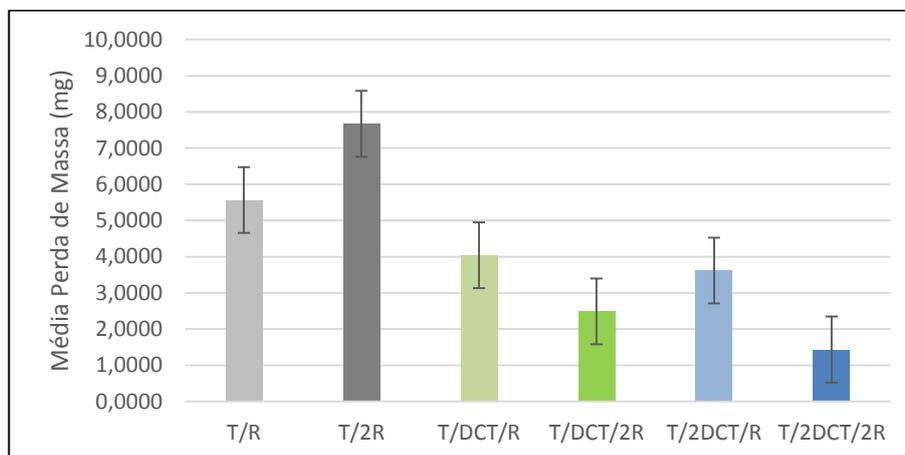
Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a Tabela 6, pode-se notar que T/2DCT/2R teve a menor redução de massa dentro das rotas ensaiadas. A comparação de redução de perda de massa pode ser vista pela porcentagem de menos perda de massa, onde as amostras com Duplo DCT tiveram um decréscimo de 52,80% e de 81,32% e simples DCT um decréscimo de 47,33% e 67,57% em relação a rota de referência de comparação (T/2R).

Pelos dados expostos na Figura 19, fica mais evidente o quanto diminui a perda de massa com aplicação do tratamento criogênico simples e duplo quando comparadas com as rotas com apenas tratamento convencional, inclusive com uma grande variação percentual. Também é possível observar que os valores dos desvio padrão se mantiveram próximos em todas as rotas.

A forma gráfica permite uma melhor visualização da importância do tratamento criogênico. De maneira geral, mostra o aumento da resistência ao desgaste quando reduz-se a perda de massa, especialmente quando o é realizado duplo DCT e duplo revenido.

Figura 19 – Resultados do Teste de Desgaste



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 19 mostra os resultados graficamente, para uma melhor avaliação do ensaio mecânico. Com isso, GAHR *apud* SILVA (2006) esclarece que de acordo com os parâmetros escolhidos, tais como a carga, a granulometria da lixa e o número de ciclos, quantidade da precipitação de carbeto e o aumento da quantidade de austenita retida são pontos importantes nos valores de resistência ao desgaste dos aços.

#### 4.5. Análise Microestrutural

Nesta subseção dos resultados, pode-se analisar como se comportou a microestrutura do aço ABNT M2 após a combinação dos tratamentos térmicos convencionais e criogênico. Com a avaliação da microestrutura foi possível medir tamanho de grão, mecânica da fratura e possíveis consequências nas propriedades mecânicas do material.

##### 4.5.1. Microscopia Óptica

Para considerar a microestrutura do material utilizado, convém analisar as figuras disponibilizadas a seguir. As Figuras 20 e 21 mostram a metalografia encontrada para as rotas T/R e T/2R, respectivamente. Nota-se que é possível ver contornos de grão e precipitação dos carbeto. Foi possível calcular a média do tamanho de grão para essas rotas.

➤ Média do Tamanho de Grão:

Rota T/R: 6,13  $\mu\text{m}$ ;

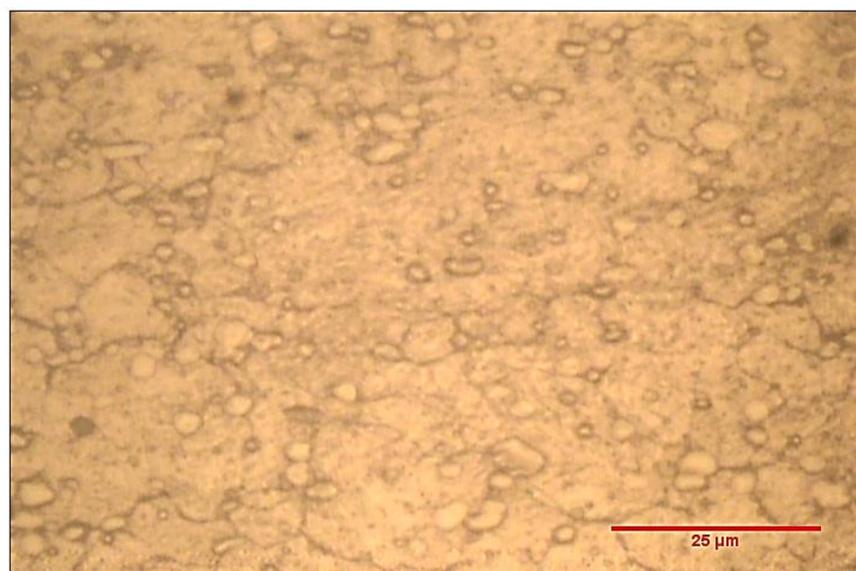
Rota T/2R: 6,93  $\mu\text{m}$ ;

Figura 20 – Rota T/R (800x)



Fonte: Próprio Autor.

Figura 21 – Rota T/2R (800x)



Fonte: Próprio Autor.

Após isso, é importante analisar a microestrutura das Figuras 22 e 23, que representam as rotas T/DCT/R e T/DCT/2R, respectivamente. Foi possível observar os contornos de grão do material, e com isso, também pode-se calcular a média do tamanho de grão. Também nota-se que, nas amostras que foram realizadas a criogenia, os carbeto

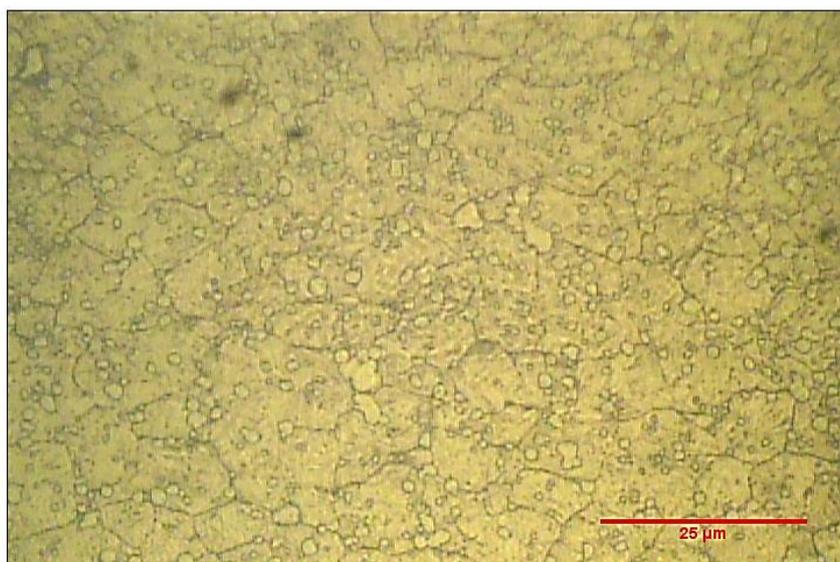
se apresentam em maior quantidade e de forma mais homogênea quando comparados as amostras sem tratamento criogênico.

➤ Média do Tamanho de Grão:

Rota T/DCT/R: 6,85  $\mu\text{m}$ ;

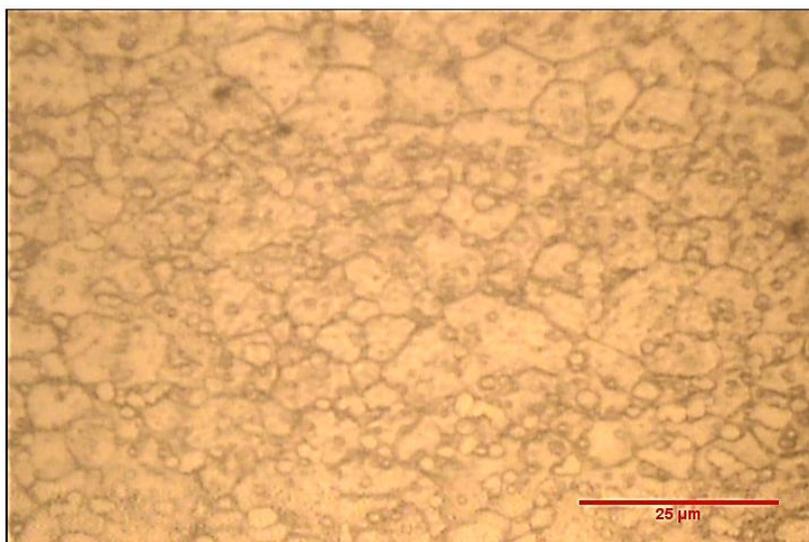
Rota T/DCT/2R: 6,08  $\mu\text{m}$ ;

Figura 22 - Rota T/DCT/R (800x)



Fonte: Próprio Autor.

Figura 23 - Rota T/DCT/2R (800x)



Fonte: Próprio Autor.

As Figuras 24 e 25 expõe a microestrutura do aço ABNT M2 para as rotas T/2DCT/R e T/2DCT/2R, respectivamente. Essas rotas são as que receberam o duplo

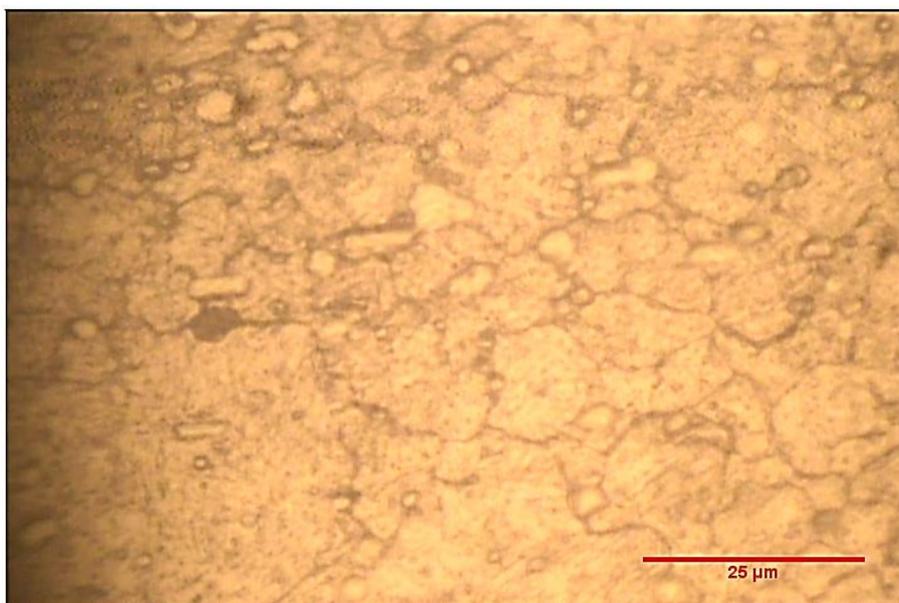
DCT (tratamento criogênico) entre a têmpera e o revenido. Também é possível ver a incidência de carbeto na microestrutura.

➤ Média do Tamanho de Grão:

Rota T/2DCT/R: 6,62  $\mu\text{m}$ ;

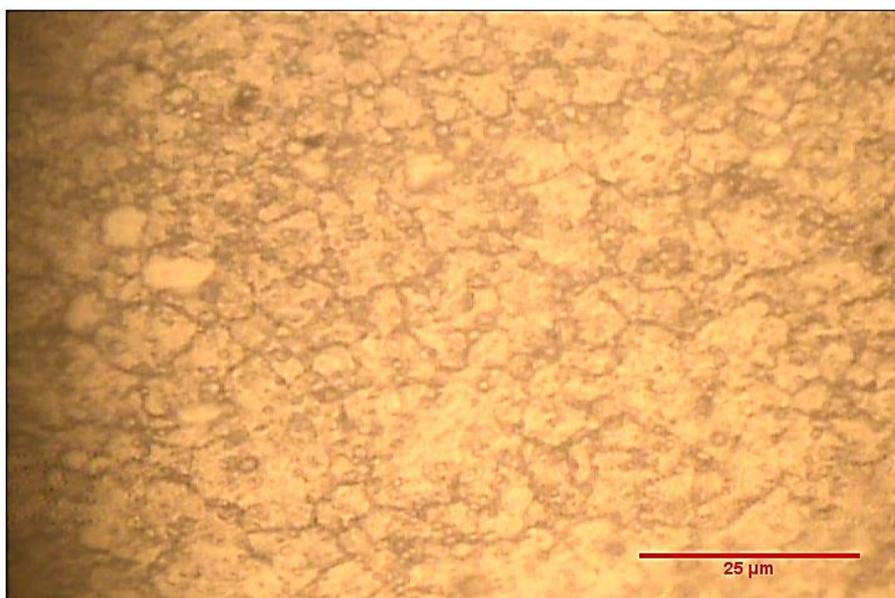
Rota T/2DCT/2R: 6,69  $\mu\text{m}$ ;

Figura 24 – Rota T/2DCT/R (800x)



Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 - Rota T/2DCT/2R (800x)



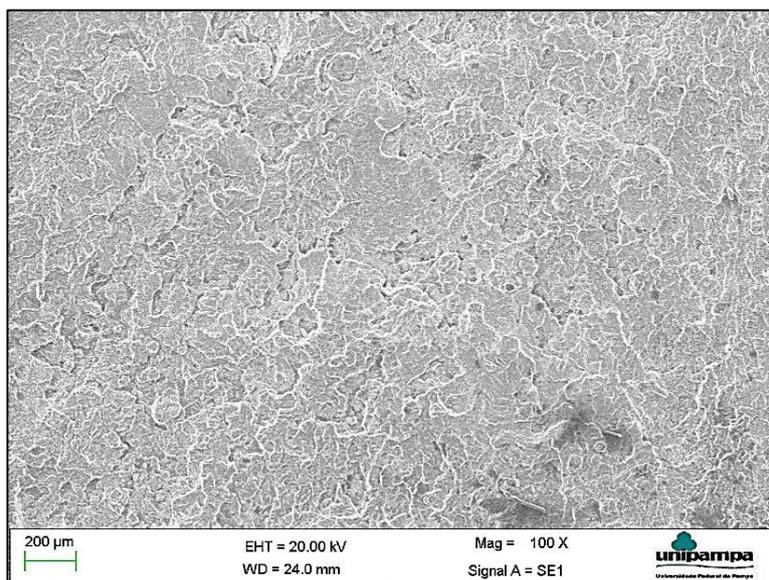
Fonte: Próprio Autor.

Com relação ao panorama geral dos dados obtidos de média do tamanho de grão, pode-se observar que os valores foram bem próximos em todas as rotas, pois o emprego do tratamento criogênico não faz grande alteração no tamanho de grão da microestrutura.

#### 4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

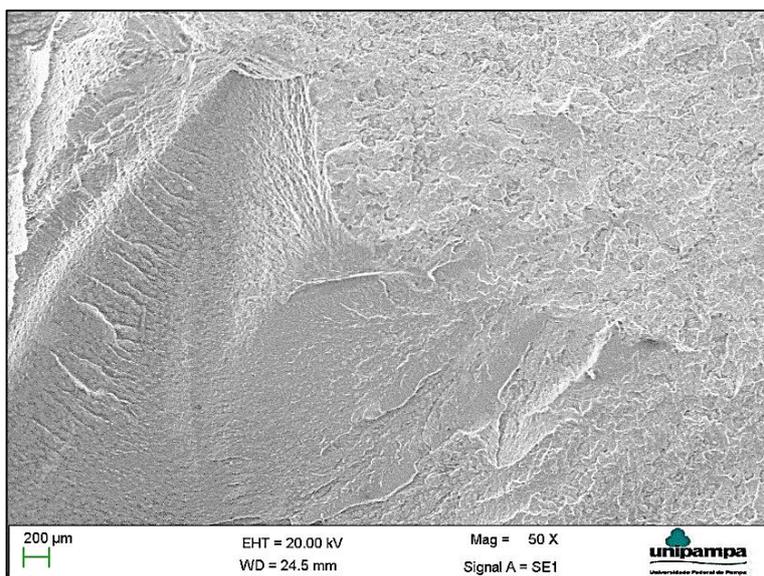
Por meio do MEV, foram feitas após o ensaio de Charpy, avaliou-se as trincas e deformações da microestrutura e como comportou-se a fratura após o impacto. A análise mostra que as amostras submetidas ao tratamento criogênico apresentaram maior absorção de energia. As Figuras 26 e 27 mostram como se comportou a rota T/R na microestrutura e na fratura. A rota T/2R está exposta na Figura 28.

Figura 26 – Rota T/R Microestrutura



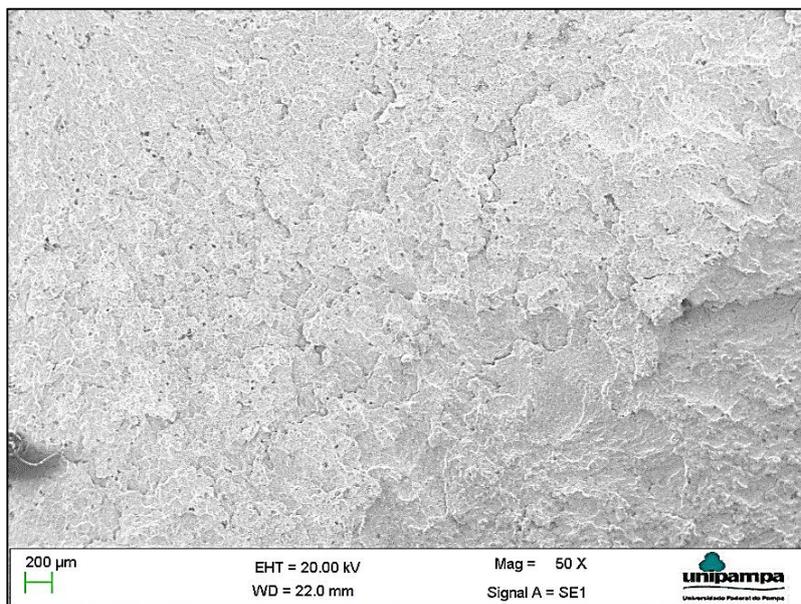
Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Rota T/R Fratura



Fonte: Próprio Autor.

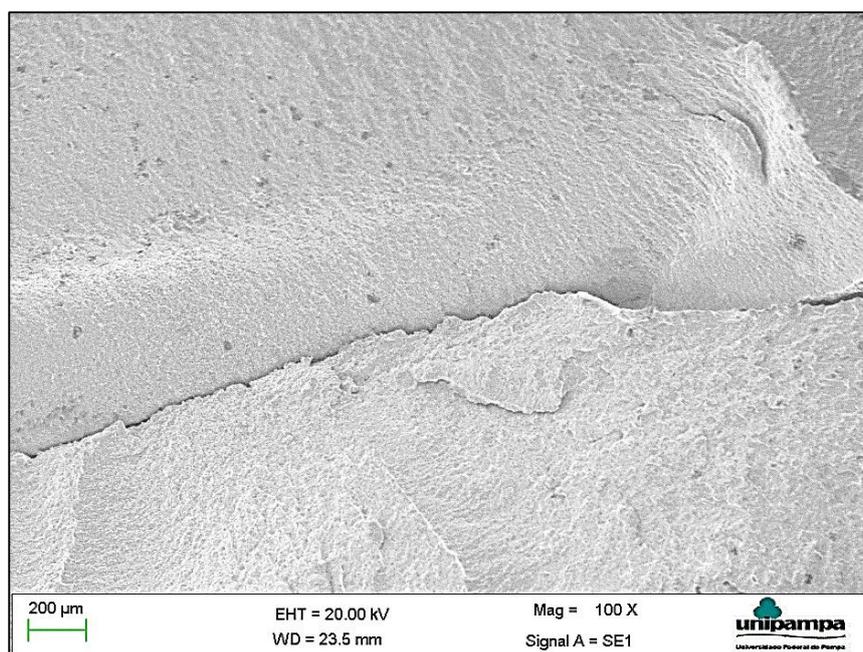
Figura 28 – Rota T/2R



Fonte: Próprio Autor.

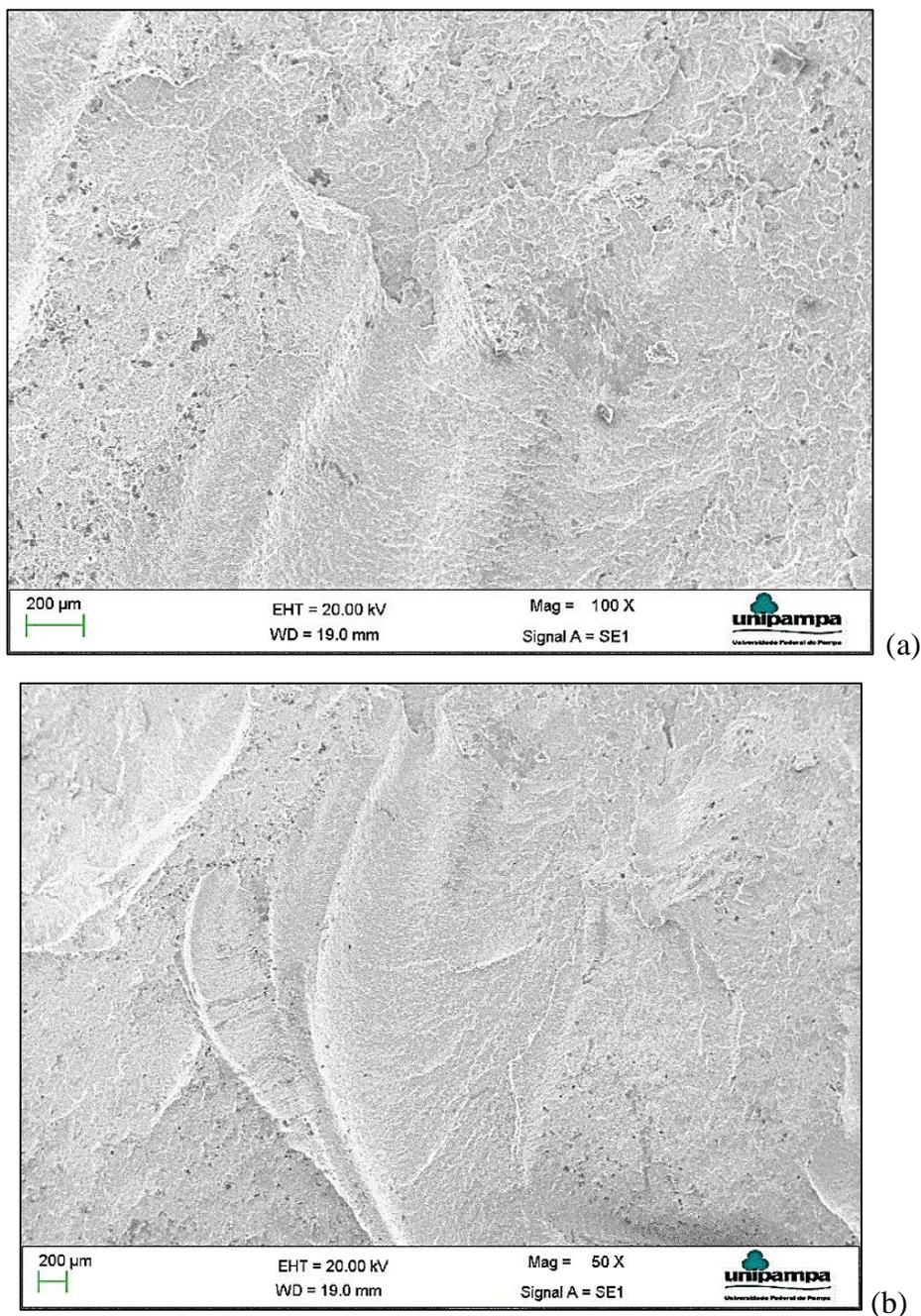
Nas rotas T/R e T/2R, pode-se perceber um mecanismo de fratura frágil de aspecto e uma tímida propagação inicial de trincas. Por outro lado, para as rotas que sofreram dupla criogenia, na combinação com revenido simples (T/2DCT/R), as trincas aparecem com maior destaque, isso pode ser analisado na Figura 29. A rota T/2DCT/2R, mostrou-se a mais eficiente no processo de fratura, pois não foi encontrada trincas, as fraturas apontam apenas cavidades, o que resultou em maior absorção de energia.

Figura 29 – Rota T/2DCT/R



Fonte: Próprio Autor.

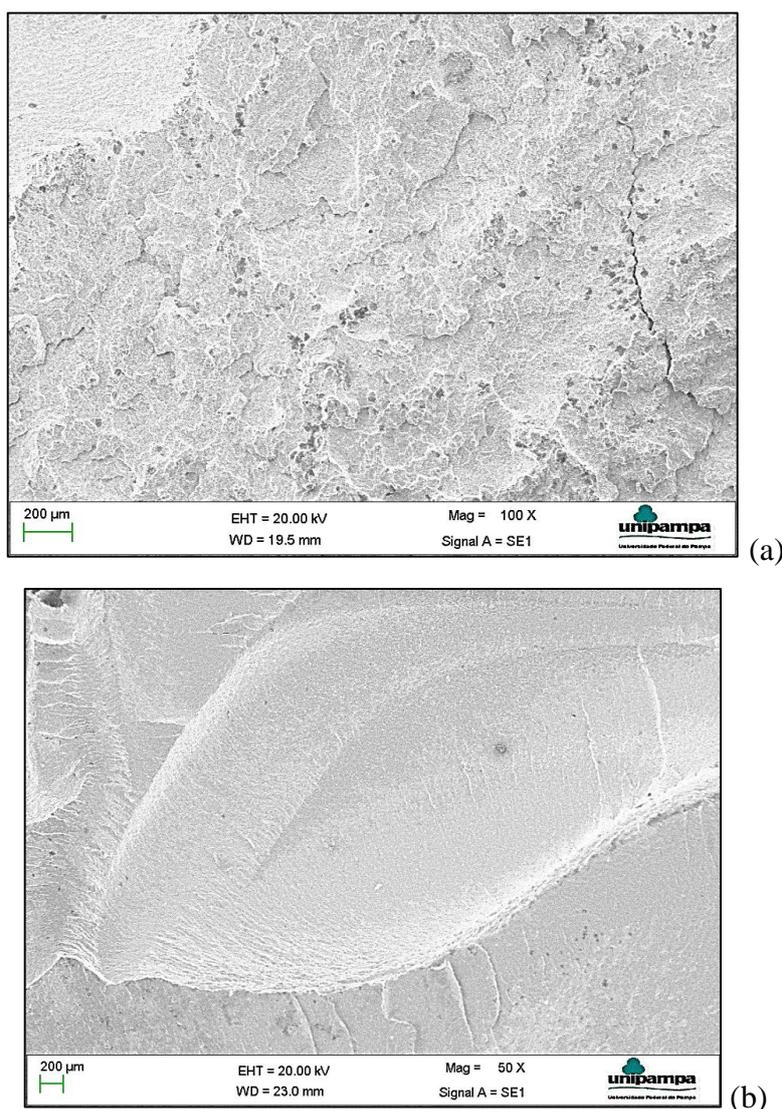
Figura 30 – Rota T/2DCT/2R (a) 100x (b) 50x



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se notar na Figura 30 que a rota T/2DCT/2R mostra uma fratura mais dúctil devido à aplicação da criogenia, indicando um material com maior tenacidade e menos frágil em comparação as outras rotas. Por fim, as amostras com tratamento criogênico simples tiveram trincas mais evidentes, o que pode ser observado pelas estrias que identificam a posição da ponta da trinca. A Figura 31 expõe a análise da rota T/DCT/R.

Figura 31 – Rota T/DCT/2R (a) 100x (b) 50x



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.6. Resumo dos Resultados

Esta subseção faz um balanço geral entre todos os ensaios, evidenciando quais rotas tiveram melhores resultados, tais como as que tiveram maiores valores médios de dureza e microdureza, as que absorveram maior energia no ensaio charpy, as que apresentaram menos trincas e defeitos nas fraturas e onde existiu a menor perda de massa no ensaio de desgaste.

Tabela 7 – Resumo dos Resultados

<b>Dureza</b>	Rota T/2DCT/2R
<b>Microdureza</b>	Rota T/2DCT/2R
<b>Charpy</b>	Rota T/DCT/2R
<b>Desgaste</b>	Rota T/2DCT/2R

Fonte: Próprio Autor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o trabalho desenvolvido, observou-se que os ensaios mecânicos e metalográficos mostraram que a opção pela variação do tratamento criogênico apresentou melhores valores de dureza e desgaste e sugerem benefícios no aumento de microdureza e tenacidade, o que confirma a importância de pesquisar este tratamento inovador. Observou-se que a sequência dos tratamentos térmicos tem grande influência nas propriedades finais do material.

- A experiência da aplicação da dupla criogenia antes do revenido foi de grande importância para mostrar a melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas do aço rápido ABNT M2.
- Nos ensaios de dureza e microdureza as melhores médias obtidas foram nas rotas T/2DCT/2R;
- A aplicação do tratamento criogênico diminuiu o desvio padrão dos resultados de dureza, indicando assim, um material mais homogêneo.
- Para o ensaio charpy, a maior média de absorção de energia foi na rota T/DCT/2R, de criogenia simples.
- Nas análises em MEV, a rota T/2DCT/2R apresentou uma superfície sem trincas e com tendência a uma fratura dúctil com relação as amostras com apenas tratamento convencional.
- As propriedades tribológicas tiveram uma melhoria, após o uso do tratamento criogênico, fato que pode ser comprovada através do ensaio de desgaste.
- As superfícies de fratura das rotas com 2DCT se apresentaram de forma mais regular que as superfícies das rotas DCT o que indica que o dupla criogenia resultou em um material mais resistente.

Para trabalhos futuros, sugere-se estudar a criogenia em outros tipos de aços e em outros tipos de materiais. Em seguida, explorar outros ensaios como Difração de Raio-X, Espectroscopia Raman, Tração e Flexão. Também seria interessante variar os ciclos de tratamento e os parâmetros, tais como tempo, temperatura e velocidade de resfriamento. Finalmente, é possível concluir que o tratamento criogênico é apropriado para aço rápido ABNT M2, tornando as aplicações deste material mais eficientes para o uso diário.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. NBR NM 116-1: **Aços-rápido – Parte 1: Classificação, designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2005.

AKHBARIZADEH, A; SHAFEYEI, M.A., **Effect of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel**. *Materials and Design* 30 p 3259-3264, 2009.

BALDISSERA, P; DELPRETE, C. **Deep cryogenic treatment: a bibliographic review**. *The open mechanical engineering journal* 2 p 1-11, 2008.

BALDISSERA, P; DELPRETE, C. **Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel**. *Materials and Design* 30, p 1435–1440, 2009.

CALLISTER, Jr; WILLIAM, D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 2008.

DA SILVA, F. *et al.*, **Performance of cryogenically treated HSS tools**. *Wear* 261 p 674-685, 2006.

FANTINELI, D. G. **Influência do Tratamento Criogênico nas Propriedades Mecânicas e Tribológicas do Aço ABNT M2**. 2015. Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/rii/777>>. Acesso em: 03/08/2018.

FONTELLES *et al.*, **Metodologia da Pesquisa Científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa**. *Revista Paraense de Medicina*, v. 23, n. 3, p. 1, 2009. Disponível em: <[https://cienciassaude.medicina.ufg.br/up/150/o/Anexo\\_C8\\_NONAME.pdf](https://cienciassaude.medicina.ufg.br/up/150/o/Anexo_C8_NONAME.pdf)> Acesso em: 28/08/2018.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GILL, S. S. *et al.*, **Metallurgical principles of cryogenically treated tool steel - a review on the current state of science**. *International journal of advanced manufacturing technology* 54 p 59-82, 2011.

GU, K. *et al.*, **Microstructure evolution in metastable  $\beta$  titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment**. *Materials Science & Engineering A* 723, 157–164. <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.003>> 2018.

IDAYAN, A. *et al.*, **Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of AISI 440C Bearing Steel**. *Procedia Engineering* 97, 1683 – 1691. 12th Global Congress On Manufacturing and Management, GCMM 2014.

KUMAR, G. H. *et al.*, **Effect of Deep Cryogenic Treatment on Composite Material for Automotive Ac System**. *Materials Today: Proceedings* 4, 3501–3505. 5th International Conference of Materials Processing and Characterization, ICMPC 2016.

LI, B. *et al.*, **Deep cryogenic treatment of carbide tool and its cutting performances in hard milling of AISI H13 steel**. *Procedia CIRP* 71, 35–40. 4th Conference on Surface Integrity, CSI 2018.

PADMAKUMAR, M. *et al.*, **Investigation of phase structure of cobalt and its effect in WC–Co cemented carbides before and after deep cryogenic treatment**. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 74, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.010>, 2018.

PARCIANELLO, C. T., **Estudo das propriedades mecânicas e tribológicas do aço modificado ABNT M2 através da otimização de tratamentos térmicos e criogênicos**. 2016. Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br:8080/handle/rii/791>> Acesso em: 10/08/2018.

PODGORNIK, B. *et al.*, **Deep cryogenic treatment of tool steels**. *Journal of Materials Processing Technology* 229, 398–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.045>, 2016.

SILVA, F.J. *et al.* **Perfomance of Cryogenically Treated HSS Tools**. Elsevier. p. 674-685. 2006.

TIER, M. A. D. **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma**. Tese de doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

VIELMO, D. D., **Efeito dos Tratamentos Sub-Zero e Criogênico Nas Propriedades Mecânicas e Tribológicas do Aço Rápido ABNT M2**. Trabalho de Conclusão de Curso, UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa, 2016.

VILLA, M. *et al.*, **Martensite formation in Fe-C alloys at cryogenic temperatures**. *Scripta Materialia* 141, 129–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.005>, 2017.

ZHOU, J. *et al.*, **Influence of cryogenic treatment prior to laser peening on mechanical properties and microstructural characteristics of TC6 titanium alloy**. *Materials Science & Engineering A* 718, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.094>, 2018.

## ANEXO I

## Tabelas - ensaios mecânicos

**DUREZA**

	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4	Rota 5	Rota 6
	56,75	58,60	57,40	58,00	56,40	58,40
	55,00	56,80	54,20	55,00	57,40	59,20
	55,20	58,60	55,60	52,60	57,80	59,80
	58,60	55,80	56,00	56,30	57,60	58,40
	57,00	56,20	57,20	57,50	57,60	59,20
Média	56,51	57,20	56,08	55,88	57,36	59,00
DP	1,47	1,33	1,30	2,17	0,55	0,60

**MICRODUREZA**

	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4	Rota 5	Rota 6
	498,48	638,29	647,10	614,58	674,66	694,32
	520,80	690,30	628,40	690,67	682,20	792,28
	463,18	638,12	607,34	667,54	653,24	683,00
	604,56	614,84	678,80	659,82	733,70	727,78
	523,34	657,21	706,24	642,50	692,20	774,38
Média	522,07	647,75	653,58	655,02	687,20	734,35
DP	52,04	28,13	39,44	28,47	29,68	48,06

**CHARPY**

	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4	Rota 5	Rota 6
	3,8	5,45	1,95	3,8	4	3,8
	4	4	2,6	7,6	3,25	3,8
	4,1	3,2	1,8	X	5,55	3,6
Média	3,97	4,22	2,12	5,70	4,27	3,73
DP	0,15	1,14	0,43	2,69	1,17	0,12

**DESGASTE**

	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4	Rota 5	Rota 6
	0,0287	0,0617	0,0087	0,0572	0,0087	0,0160
	0,1421	0,0496	0,0165	0,0236	0,0637	0,0166
	0,0593	0,0558	0,0494	0,0404	0,0363	0,0104
Média	0,0767	0,0557	0,0249	0,0404	0,0362	0,0143
DP	0,0587	0,0086	0,0216	0,0238	0,0389	0,0034