

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUIZ FELIPE STONA LEONARDI

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE E TENACIDADE DO AÇO
AISI M2 COM TRATAMENTO CRIOGÊNICO**

**Alegrete
2019**

LUIZ FELIPE STONA LEONARDI

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE E TENACIDADE DO AÇO
AISI M2 COM TRATAMENTO 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: Marco Antônio Durlo Tier

**Alegrete
2019**

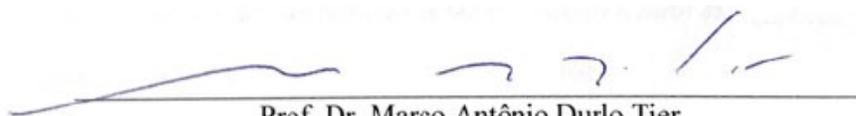
LUIZ FELIPE STONA LEONARDI

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE E TENACIDADE DO AÇO
AISI M2 TRATADO COM CRIOGENIA**

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).

L581a Leonardi, Luiz Felipe Stona
Avaliação da resistência ao desgaste e tenacidade
do aço AISI M2 com tratamento criogênico / Luiz
Felipe Stona Leonardi.
65 p.

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

"Orientação: Marco Antônio Durlo Tier".

1. Tratamento criogênico. 2. Criogenia. 3. Aço
ferramenta. 4. Aço rápido. I. Título.

Dedico este trabalho à Deus, minha mãe
Josceli, minha namorada e meus amigos.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço à Deus, pois Ele me deu força, saúde e persistência para alcançar meu objetivo.

Não menos importante, agradeço à minha mãe Josceli, que me deu todo suporte e apoio, para que esta etapa fosse concluída. Agradeço também ao meu pai, João Carlos (*in memorian*), o qual não tive a satisfação de conhecer, pois Deus o levou para junto de si.

À minha namorada, por todo apoio e paciência nos momentos, principalmente ruins, pois nos bons compartilhava felicidade comigo.

Ao meu orientador professor Dr. Marco Tier, pelo conhecimento passado e apoio técnico na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Aldoni, pelo apoio e auxílio na usinagem das amostras.

À empresa Metaltécnica, pela realização da têmpera nas amostras.

Ao engenheiro mecânico Dieison, e aos técnicos da Unipampa, pela disponibilidade prestada.

Ao professor Inácio da UFSM, pela disponibilidade do seu laboratório, para realização do ensaio de Charpy.

À meu amigo Caian (*in memorian*), pelas memórias das noites jogando vídeo game, e que deixou uma das lições mais importante que levarei para vida. **NUNCA DESISTIR NÃO IMPORTA A DIFICULDADE.**

Aos meus amigos Cássio e Daniel, pelas conversas em WhatsApp, onde apesar da distância, a amizade permanece, tornando o dia mais alegre e divertido.

À meus amigos Sander, Henrique, Leonardo e Marcelo, os quais são pessoas excepcionais, onde juntos enfrentamos diversos obstáculos nunca deixando o bom humor. Não esquecendo as pescarias e junções realizadas.

Enfim, à todos que de uma forma ou de outra prestaram auxílio direta ou indiretamente para que este sonho se tornasse realidade.

A solução não cai do céu, mas minha
força vem de lá.

Desconhecido

RESUMO

Aços rápidos são amplamente utilizados para fabricação de ferramentas para usinagem, sujeitos à diferentes esforços. A fim de aumentar a vida das ferramentas, os tratamentos criogênicos aliados aos tratamentos convencionais podem fornecer inúmeros benefícios, tais como aumento de dureza, microdureza, desgaste e tenacidade. Estudos recentes vem sendo realizados na área a fim de descobrir a melhor combinação dos tratamentos para determinado tipo de aplicação. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao desgaste e tenacidade do aço AISI M2 com tratamento criogênico. Após o tratamento convencional, foram estudados três rotas para criogenia: -120°C , -150°C e -180°C . A metodologia utilizada no trabalho foi a pesquisa experimental, buscando correlação com os trabalhos recentes da área. Os resultados obtidos indicaram que todas as rotas com criogenia, proporcionaram significativos ganhos de dureza, microdureza e resistência ao desgaste.

Palavras-Chave: Tratamentos criogênicos, criogenia, aços rápidos.

ABSTRACT

Rapid steels are widely used for manufacturing machining tools, subject to different efforts. In order to increase tool life, cryogenic treatments coupled with conventional treatments can provide numerous benefits, such as increased hardness, microhardness, wear and toughness. Recent studies have been carried out in the area in order to discover the best combination of treatments for a particular type of application. The present work aims to evaluate the wear resistance and toughness of the AISI M2 steel with cryogenic treatment. After the conventional treatment, three routes for cryogenics were studied: -120°C , -150°C and -180°C . The methodology used in the study was the experimental research, seeking correlation with the recent works of the area. The results indicated that all the cryogenic routes provided significant gains in hardness, microhardness and wear resistance.

Keywords: Cryogenic treatments, cryogenics, High Speed Steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do aço AISI M2.....	19
Figura 2 – Temperatura de austenitização do aço AISI M2.....	20
Figura 3 – Efeito da temperatura de austenitização sobre a dureza do material.	21
Figura 4 – Porcentagem da carbonetos presentes.....	22
Figura 5 – Curvas de diferentes temperaturas de revenimento x dureza.....	23
Figura 6 – Comparativo entre microdureza x temperatura de revenimento.....	24
Figura 7 – Estrutura cristalina do aço.....	25
Figura 8 – Micrografia do aço AISI M2.....	26
Figura 9 - Fluxograma das etapas realizadas.....	28
Figura 10 - Cortadora metalográfica.	29
Figura 11 - Centro de usinagem.	29
Figura 12 - Forno utilizado na têmpera.	30
Figura 13 - Equipamento utilizado para criogenia.	31
Figura 14 - Forno utilizado para o revenido.	32
Figura 15 - Durômetro.....	33
Figura 16 - Microdurômetro.....	33
Figura 17 - Máquina para ensaio de desgaste.....	34
Figura 18 - Balança de precisão.	35
Figura 19 - Máquina utilizada para ensaio de impacto Charpy.....	36
Figura 20 - Equipamento utilizado para espectroscopia Raman.	37
Figura 21 - Microscópio óptico.	38
Figura 22 - Cortadora de precisão.	38
Figura 23 - Embutidora.	39
Figura 24 - Lixadora manual.	39
Figura 25 - Valores de dureza obtidos.....	41
Figura 26 - Valores de microdureza	42
Figura 27 - Valores obtidos no ensaio de impacto Charpy.....	43
Figura 28 - Gráfico da perda de massa das amostras.	45
Figura 29 - Espectroscopia Raman.....	46
Figura 30 - Microestrutura após o tratamento convencional T/2R.....	47
Figura 31 - Microestrutura após tratamento criogênico de -120°C.....	47
Figura 32 - Microestrutura após tratamento criogênico de -150°C.....	48
Figura 33 - Microestrutura após tratamento criogênico de -180°C.....	48
Figura 34 - Programa utilizado para usinagem das amostras.	57
Figura 35 - Rampa de resfriamento para criogenia a -120°C.....	58
Figura 36 - Rampa de resfriamento para criogenia a -150°C.....	58
Figura 37 - Rampa de resfriamento para criogenia a -180°C.....	59
Figura 38 - Programa utilizado no ensaio de desgaste.	60
Figura 39 - Desenho esquemático da cápsula porta amostras.	61
Figura 40 - Valores obtidos para dureza.....	62
Figura 41 - Valores de microdureza encontrados.....	63
Figura 42 - Valores encontrados no ensaio de impacto Charpy.....	64
Figura 43 - Valores encontrados no ensaio de desgaste.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços conforme AISI.....	18
Tabela 2 - Nomes das rotas realizadas.....	30
Tabela 3 - Valores de dureza obtidos.	40
Tabela 4 - Valores de microdureza obtidos.	42
Tabela 5 - Valores obtidos no ensaio de impacto Charpy.	43
Tabela 6 - Perda de massa das amostras.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

“ – Polegadas

°C – Graus Celsius

AISI – Instituto Americano do Ferro e Aço

C – Carbono

CFC – Cúbica de Face Centrada

Cr – Cromo

DCT – Deep cryogenic treatment

et al – Entre outros

Fe – Ferro

J – Joule

kg – Quilograma

mg – miligrama;

min – minuto

mm – milímetro

Mo – Molibdênio

N – Newton

NASA – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

pol – Polegada

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

Ti – Titânio

TTT – Tempo, Temperatura e Transformação

UFES – Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

Va – Vanádio

W – Tungstênio

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Justificativa.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aço Ferramenta	17
2.1.1	Aços Rápidos	18
2.2	Tratamento Térmico dos Aços	19
2.2.1	Têmpera.....	20
2.2.2	Revenido	22
2.3	Endurecimento Secundário.....	23
2.4	Tratamento Criogênico.....	24
3	METODOLOGIA	28
3.1	Usinagem das Amostras	28
3.2	Tratamentos Térmicos	30
3.3	Ensaio Mecânicos	32
3.3.1	Ensaio de Dureza.....	32
3.3.2	Ensaio de Microdureza.....	33
3.3.3	Ensaio de Desgaste.....	34
3.3.4	Ensaio de Impacto Charpy	35
3.4	Análise Microestrutural	36
3.4.1	Espectroscopia Raman	36
3.4.2	Microscopia Óptica (MO).....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Ensaio de Dureza.....	40
4.2	Ensaio de Microdureza	41
4.3	Ensaio de Impacto Charpy	43
4.4	Ensaio de Desgaste	44
4.5	Análise Microestrutural	45
4.5.1	Espectroscopia Raman	45
4.5.2	Microscopia Óptica	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1	Conclusões.....	50
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	51
6	REFERÊNCIAS.....	52

7 APÊNDICES	57
7.1 APÊNDICE A – Programa Utilizado no Centro de Usinagem	57
7.2 APÊNDICE B – Rampas de Resfriamento do Tratamento Criogênico	58
7.3 APÊNDICE C – Parâmetros utilizados no software para ensaio de desgaste.....	60
7.4 APÊNDICE D – Esquema do cápsula porta amostras	61
7.5 APÊNDICE E – Valores de dureza encontrados.....	62
7.6 APÊNDICE F – Valores de microdureza encontrados.....	63
7.7 APÊNDICE G – Valores encontrados para ensaio de impacto.....	64
7.8 APÊNDICE H – Valores encontrados no ensaio de desgaste	65

1 INTRODUÇÃO

Os aços rápidos são comumente utilizados para confecção de ferramentas para usinagem em metais, tanto contínuo quanto intermitente, tais como brocas, alargadores, punções e matrizes, entre outros. Dentre eles se destaca o AISI M2 que possui alta temperabilidade e resistência ao desgaste e boa tenacidade, fato que se deve a microestrutura martensítica de elevada estabilidade térmica devido à presença de elementos de liga como o Cromo, Molibdênio, Tungstênio e Vanádio além da presença de carbeto de liga, conforme demonstra Fantinelli (2015).

Em aços carbono é difícil se obter alta dureza, em seções superiores a 25 mm. Todavia, com a presença de elementos de liga, aumenta-se a temperabilidade e o valor de dureza entre superfície e núcleo tende a se aproximar consideravelmente Silvano (2008). Além disso, a adição de elementos de liga permite um ganho de estabilidade térmica para o aço.

Apesar dos aços rápidos serem amplamente utilizados à ferramentas, onde o regime de trabalho é severo, é necessário ampliar a vida útil do mesmo. Para isso, somente a escolha adequada do material não é suficiente, é preciso aliar tratamentos adequados.

Tratamentos termoquímicos surgem como alternativa utilizada para aumentar a resistência superficial dos aços. A nitretação tem grande destaque para obtenção de alta dureza superficial, melhoramento no comportamento em fadiga e corrosão. Porém após a afiação da ferramenta elimina-se a camada superficial.

Em vista disso, a utilização de tratamentos criogênicos (DCT) surge como uma alternativa atrativa. Padgornik (2016) reporta que o tratamento pode melhorar desempenho do material, incluindo resistência à fratura e ao desgaste.

Conforme Gäård (2008), a superfície dos aços ferramentas está sujeita a uma combinação múltipla de cargas, levando o material à fadiga, lascamento e desgaste da ferramenta. De acordo com Sartori (2009), o método de tratamento criogênico, utilizado em conjunto com tratamentos térmicos convencionais, fornece grandes melhoramentos nas propriedades mecânicas, aumentando a vida útil de ferramentas.

Embora haja vantagens na utilização deste método, não se tem concordância dos benefícios causados pelo tratamento criogênico profundo próximo à temperatura do nitrogênio líquido (-196°C). Para Padgornik (2016) hipóteses foram criadas, uma delas

envolve a transformação da austenita em martensita. Outra suposição é baseada no reforço do material, através da precipitação de carbonetos submicroscópicos.

Vales (2010) também revela que, não há concordância a respeito dos benefícios do tratamento criogênico, fato que se deve à falta de pesquisa e uma melhor descrição do procedimento executado.

1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo geral avaliar a resistência ao desgaste e tenacidade do aço AISI M2 com e sem tratamento criogênico.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito do tempo e temperatura do tratamento criogênico, quanto as propriedades mecânicas das amostras;
- Avaliar a microestrutura e formação dos carbeto do aço AISI M2 após a realização dos tratamentos térmicos e criogênicos;
- Examinar a energia de ligação entre os elementos constituintes do aço;
- Definir, entre os parâmetros utilizados, o que apresentou melhor desempenho.

1.3 Justificativa

O trabalho se justifica por haver a necessidade de um estudo mais detalhado dos mecanismos que causam as modificações no aço AISI M2, onde propriedades como resistência ao desgaste e absorção de energia serão estudadas. O presente trabalho busca explicar os fenômenos envolvidos, contribuindo para futuras discussões na área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão apresentados os fundamentos teóricos através de uma revisão da bibliografia dos assuntos abordados na elaboração deste trabalho, tais como: Aço rápido, tratamentos térmicos e as principais pesquisas relacionadas à criogenia aplicadas aos aços rápidos. Tal fundamentação será de caráter exploratório, utilizando artigos, livros e teses.

2.1 Aço Ferramenta

Os aços ferramentas, até meados do século XIX eram do tipo aço carbono. Taylor¹ e White², desenvolveram tratamentos térmicos que permitiram um aumento significativo da velocidade de corte. Atualmente os aços ferramentas são caracterizados pela adição de grandes quantidades de elementos de liga, como W, Mo, Cr, V entre outros conforme Shackelford (2008). Com isso, proporcionam elevada dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade. Progressivos avanços vem sendo realizados nas propriedades mecânicas, quanto ao domínio e aprimoramento dos parâmetros envolvidos no tratamento térmico, e a busca pela melhor combinação de elementos de liga Silva (1999).

A nomenclatura dos aços ferramenta é estabelecida por sua composição, aplicação ou meio de resfriamento. Os sistemas de classificação em uso atribuem aos aços códigos de identificação, compostos em geral de combinações de letras e números, conforme Coutinho (1992). A Tabela 1, apresenta a classificação de acordo com a *American Iron and Steel Institute (AISI)*.

¹ Engenheiro mecânico norte-americano que juntamente com White desenvolveram o aço rápido quando trabalhavam na Bethlehem Steel.

² Metalurgista colega de Taylor na Bethlehem Steel.

Tabela 1 - Classificação dos aços conforme AISI.

	CLASSE	CARACTERÍSTICA
	W	Aços temperáveis em água (Water)
	S	Aços resistentes ao choque (Shock)
Aços para Trabalho à Frio	O	Aços temperáveis em óleo (Oil)
	A	Aços temperados ao ar (Air)
	D	Aços com alto Carbono e alto Cromo
Aços para Trabalho à Quente	H1 – H19	À base de Cromo
	H20 – H39	À base de Tungstênio
	H40 – H59	À base de Molibdênio
Aços para Moldes	P1 – P19	De baixo Carbono
	P20 – P39	Outros tipos
Aços para Fins Especiais	L	De baixa liga
	F	Carbono – Tungstênio
Aços Rápidos	T	À base de Tungstênio
	M	À base de Molibdênio

FONTE: Autoria própria.

2.1.1 Aços Rápidos

Estes aços permitem alta velocidade de usinagem mantendo a dureza mesmo à temperaturas elevadas de operação, sendo muito utilizados em equipamentos de alta produção Eboni (2010). Chiaverini (2008) reporta que devido a incidência de elementos de liga na sua composição, estes aços são facilmente endurecíveis por têmpera, tanto pelo resfriamento em óleo ou em banho de sais.

De acordo com a Tabela 1, os aços rápidos são divididos em dois grupos: classe M e classe T. Conforme Eboni (2010) o grupo T possui elementos como o cromo, vanádio, cobalto, carbono e tungstênio. Este último concede características como boa dureza a quente, melhorando o controle no crescimento de grão com maior proteção contra oxidação e decarbonetação.

No grupo M, o molibdênio substitui parcialmente o tungstênio. Comparando-se o desempenho de ambas as classes, os aços rápidos da série M possuem uma tenacidade um pouco maior, para a mesma faixa de dureza, como é explicado por Schlatter (2012).

Devido à ampla utilidade obtidos pelo uso destes aços, Costa e Silva e Mei (2010) relatam um estudo realizado pela *American Society for Metals* (ASM)³, que entre os anos 1950-1960 nos Estados Unidos, os aços da classe M representavam cerca de 70% dos aços rápidos utilizados, onde somente o M2 representava uma parcela em torno de 40%. Atualmente este série corresponde cerca de 95% do aço rápido utilizado nos Estados Unidos.

A Figura 1 apresenta a porcentagem de cada elemento para a série M dos aços rápidos.

Figura 1 – Composição do aço AISI M2

ELEMENTO	C		Mn		P		S		Si		Cr		V		W		Mo		Co	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	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	-	-	-	-
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: Adaptado da Norma NBR NM 116-1 (ABNT 2004, pg 3).

2.2 Tratamento Térmico dos Aços

O tratamento térmico de aços, segundo Chiaverini (2008) depende da estrutura, haja vista que a composição química permanece inalterada. Sua utilização fornece ganhos significativos de uma ou mais propriedades, conseqüentemente outras são prejudicadas.

Portanto, é necessário que o tratamento térmico seja bem escolhido e aplicado rigorosamente para que os inconvenientes sejam minimizados.

³ American Society for Metals – Sociedade Americana de Metais, é uma organização profissional para cientistas e engenheiros de materiais.

2.2.1 Têmpera

O processo de têmpera em aços convencionais se dá basicamente em resfriar o material, após a austenitização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas conforme Costa e Silva e Mei (2010). Existem variados tipos de têmpera, podendo ser de forma direta, seletiva, por spray, por nebulização, interrompida, entre outros. Contudo, o processo de têmpera direta é o mais empregado, devido ao fato do material entrar em contato diretamente com o meio escolhida.

Para o caso de aços ferramentas, a Figura 2 apresenta as temperaturas de austenitização.

Figura 2 – Temperatura de austenitização do aço AISI M2.

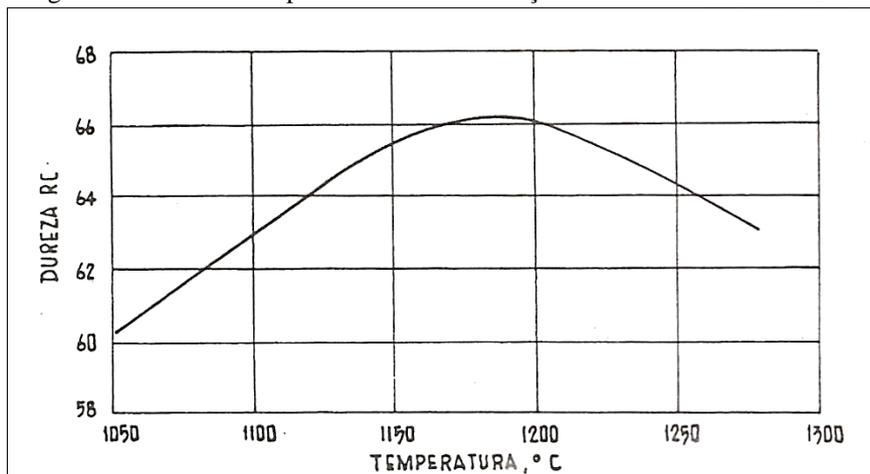
TIPO		TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO [° C]
AÇO RÁPIDO	M2	1190 - 1230
AÇO PARA TRABALHO A QUENTE	H 13	1000 - 1040
AÇO PARA TRABALHO A FRIO	D2	990 - 1030
AÇO CARBONO	1045	845

FONTE: Tabela técnica de aços ferramenta – FAVORIT AÇOS ESPECIAIS http://www.favorit.com.br/sites/all/themes/favorit/tabelas_html/acos_ferramentas.html Acessado em 01/07/2018.

Entretanto, em aço rápido, utiliza-se a têmpera como forma de minimizar a presença de carbonetos presentes no contorno de grão, formando martensita aumentando a resistência mecânica e dureza do material Poletto (2014).

A Figura 3, apresenta o efeito da temperatura de austenitização sobre a dureza do material, onde segundo Chiaverini (2008) abaixo de 1175°C, o aço não atinge a máxima dureza. Entretanto, a temperaturas superiores a 1200°C a dureza começa a cair, devido à presença da alta quantidade de carbono e elementos de liga e maior quantidade de austenita retida.

Figura 3 – Efeito da temperatura de austenitização sobre a dureza do material.



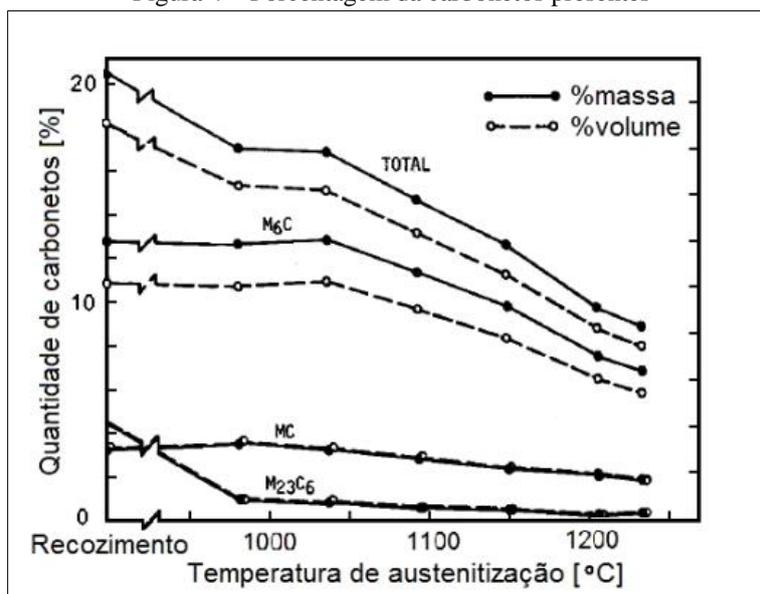
FONTE: Adaptado de Chiaverini (2008, pg 223).

No caso do aço AISI M2, Silva (2001) explica que devido à baixa condutividade térmica do material, decorrente da presença dos carbonetos, deve-se evitar o aquecimento rápido, o que poderia levar a distorções dimensionais, trincamento e uma estrutura heterogênea. Contudo, Chiaverini (2008) ressalta que para amostras pequenas e sem mudanças bruscas na geometria, podem ser levadas diretamente ao forno para austenitização, sem grandes riscos.

A temperatura de austenitização constitui um parâmetro importante dentro dos tratamentos térmicos, pois influencia diretamente na transformação de austenita em martensita. Esta temperatura apesar de ser alta, por volta de 1200°C para aços rápidos, não gera aumento do tamanho de grão. A elevada temperatura tem por objetivo quebrar a ligação entre os elementos de liga facilitando a dissolução dos carbonetos presentes nos contornos de grãos.

Segundo Schlatter (2012), a austenitização começa por volta de 760°C quando a quantidade de carbono na matriz ferrítica é mínima devido a sua baixa solubilidade. Logo após, na faixa de 730°C a 845°C compreende o pré-aquecimento, e não só são diminuídas as tensões de origem térmica, mas também as de transformação de fases. A Figura 4 apresenta quantidade de carbonetos no aço AISI M2 em função da temperatura de austenitização.

Figura 4 – Porcentagem da carbonetos presentes



FONTE: Adaptado de Schlatter (2012, pg 37).

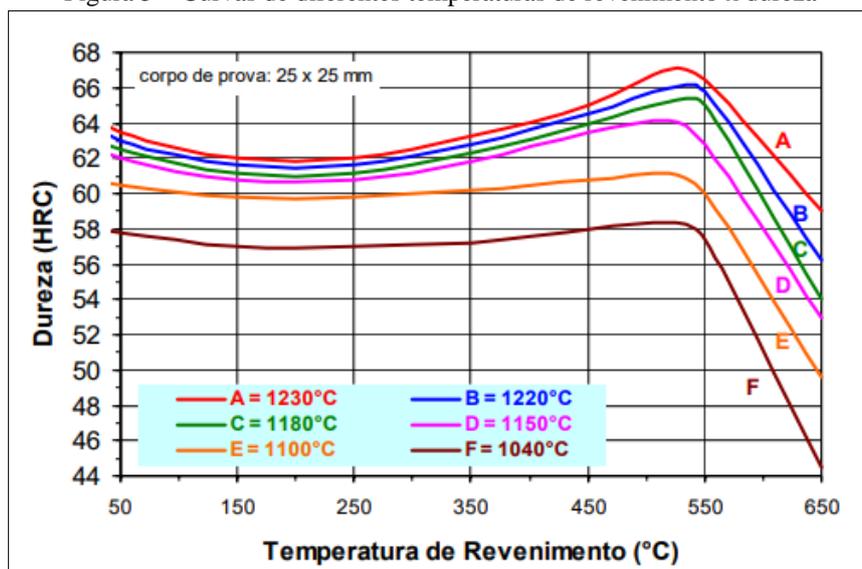
Pela Figura 4, percebe-se que para temperaturas mais altas, em torno de 1200°C, os aços ferramentas apresentam maiores porcentagens de carbonetos dissolvidos.

2.2.2 Revenido

Costa e Silva e Mei (2010) explicam que a martensita formada pela têmpera é extremamente dura e frágil, podendo chegar a um nível de tensão interna tal que, corre grande risco de trincar. Em aços rápidos, Fantineli (2015) expõe a utilização de duplo revenimento, sendo o primeiro para alívio de tensões da martensita e transformação da austenita retida em martensita, enquanto que o segundo é para alívio das tensões da martensita formada no primeiro revenido.

Para Sartori (2009), as temperaturas comumente utilizadas para os revenidos dependem da dureza esperada. A Figura 5 mostra diferentes curvas de dureza para aços austenitizados à temperaturas diferentes.

Figura 5 – Curvas de diferentes temperaturas de revenimento x dureza



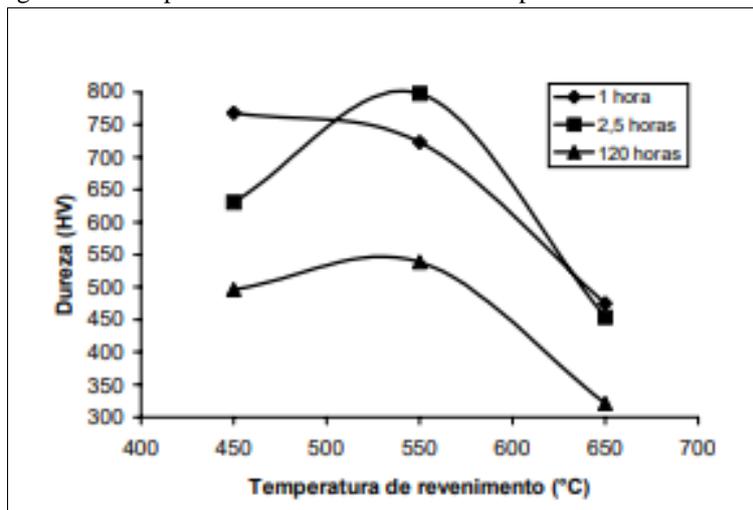
FONTE: Adaptado do Catálogo Villares Metals (2003, pg 2).

Embora o revenimento ser recomendado para ajuste de dureza e alívio de tensões, pode ocorrer um fenômeno chamado fragilidade do revenido, que segundo Chiaverini (2008) pode ser decorrente da impurezas presentes nos aços, tais como fósforo, estanho e arsênio. Os aços mais afetados são do tipo liga ao cromo, ao cromo-manganês, ao níquel e ao cromo-níquel. Aços com presença de molibdênio tendem a reduzir a fragilidade do revenido.

2.3 Endurecimento Secundário

Como descrito anteriormente, o revenido não serve apenas para alívio de tensões, mas também transformação da austenita retida em martensita, gerando um aumento de dureza do aço. Magnabosco, Júnior e Passos (1999), relatam que uma temperatura de revenido de até 350°C há redução na dureza devido à pouca precipitação da carbonetos de ferro. Porém, para temperaturas a partir de 400°C a dureza começa a aumentar, obtendo seu valor máximo em 550°C. A Figura 6 demonstra um comparativo entre microdureza x temperatura de revenimento. Percebe-se ainda, que para temperaturas superiores a 550°C há redução da microdureza.

Figura 6 – Comparativo entre microdureza x temperatura de revenimento



FONTE: Adaptado de Tratamento térmico do aço rápido ABNT M2 (1999, pg 8).

Porém, conforme Fantineli (2015), o endurecimento secundário depende de vários fatores, tais como, composição química do aço, temperatura de austenitização, temperatura de revenido e o tempo do revenido.

Entretanto Chiaverini (2008) esclarece que a presença de elementos de liga pode prejudicar o início de formação da martensita, porque esses carbonetos formados podem permanecer não dissolvidos na austenita, provocando efeito inverso, ou seja, redução de dureza, pelo fato de dissolver menos carbono.

Contudo, hoje se sabe que os elementos de liga presentes nos aços rápidos favorecem o endurecimento secundário, assim como o percentual de cromo em determinados aços conforme relatado por Fantinelli (2015).

2.4 Tratamento Criogênico

O tratamento criogênico consiste na utilização de temperaturas próximas à do nitrogênio líquido (-196 °C), com o propósito de se obter determinadas propriedades, tais como aumento de dureza, resistência ao desgaste e tenacidade Moreira *et al* (2009). Esta técnica apresenta grande vantagem em relação aos revestimentos, visto que altera a microestrutura global do aço, enquanto que revestimentos modificam superficialmente. Esta dureza superficial gerada pelas camadas depositadas, podem ser removidas caso o material passe por um processo de afiação da ferramenta.

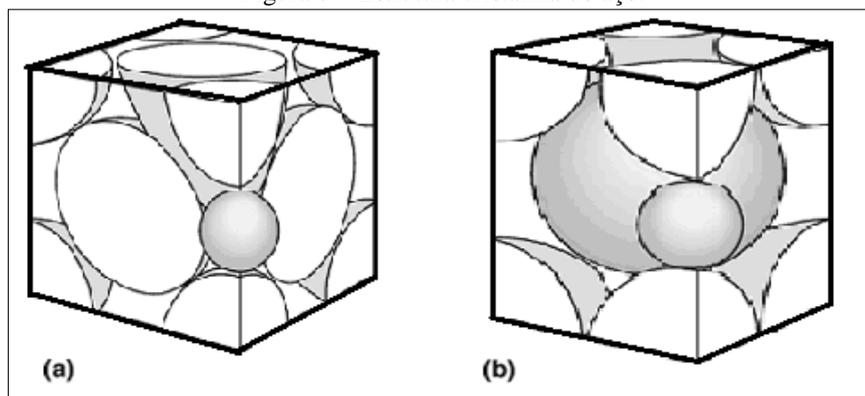
A muito tempo atrás relojoeiros suíços aproveitaram as baixas temperaturas dos alpes e perceberam melhoria no comportamento do aço, como explica Wurzbach e De Felice (2005). Ao passar dos anos, após a segunda Guerra Mundial, a tecnologia a respeito dos tratamentos térmicos foi se disseminando, sendo este fenômeno observado por cientistas da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) nos anos 1960 e 1970, que constataram que aeronaves que retornavam do espaço ficavam mais resistentes que originalmente, conforme exposto por Gobbi (2009).

Com isso vários estudos vem sendo realizados à respeito de tratamentos criogênicos, e percebe-se que há transformação metalúrgica na microestrutura do aço, onde a austenita retida é transformada em martensita que gera aumento de dureza de acordo com Wurzbach e De Felice (2005).

Oppenkowski *et al* (2010) investigaram diferentes parâmetros no processo, tais como temperatura de austenitização, taxa de resfriamento, tempo de espera, taxa de aquecimento e temperatura de revenimento, onde verificaram que temperatura de austenitização alta e baixa temperatura de revenimento melhoram a dureza e o comportamento ao desgaste.

Tier (1998) relata que, quanto ao desgaste abrasivo, a maior resistência é obtida com estrutura martensítica com carbonetos finamente distribuídos e uma pequena quantidade de austenita residual. Wurzbach e De Felice (2005) vão ao encontro de Tier (1998), onde a consistência a dureza é aumentada com tratamento criogênico, devido a precipitação dos carbeto o que aumenta a resistência da estrutura martensítica (TCC) que é diferente da austenita (CFC), mostrada na Figura 7, que para situações de desgaste exige mais energia para quebra-la. A imagem (a) retrata uma estrutura CFC característica da austenita, enquanto que (b) mostra a estrutura TCC da martensita.

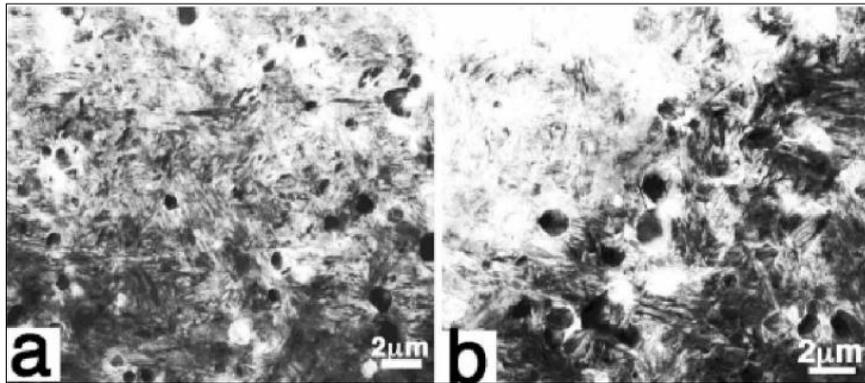
Figura 7 – Estrutura cristalina do aço.



FONTE: Adaptado de Totten (2002, pg 48).

Segundo Huang *et al* (2003) expõem que há mudança na microestrutura das amostras com e sem tratamento criogênico, originando uma alteração na fração volumétrica e variação de 6% a mais no tamanho dos carbonetos das amostras tratados com criogenia, conforme é evidenciado na Figura 8.

Figura 8 – Micrografia do aço AISI M2



FONTE: Adaptado de Huang *et al* (2003, pg 39).

A imagem (a) representa a micrografia do aço sem o tratamento, enquanto que em (b) é posterior ao tratamento. O tratamento criogênico pode ser executado em etapa única, com imersão em nitrogênio líquido, administrando-se a velocidade de resfriamento, a fim de se evitar o choque térmico, que pode causar imperfeições ou até mesmo trincas indesejáveis. Com o controle de temperatura garantido, os resultados gerados se mostram satisfatórios como aumento na resistência ao desgaste e na vida útil da ferramenta de 42 a 211% conforme Moreira *et al* (2009) *apud* Cohen e Kamody (1998).

Conforme Yun, Xiaoping e Hongshen (1998), as alterações provocadas pelo processo criogênico, tais como a decomposição da martensita e a precipitação de carbonetos ultrafinos, são semelhantes às obtidas no revenido convencional, diferindo apenas pelo fato que as transformações ocorrem à baixas temperaturas fazendo com que os precipitados sejam menores e mais difusos.

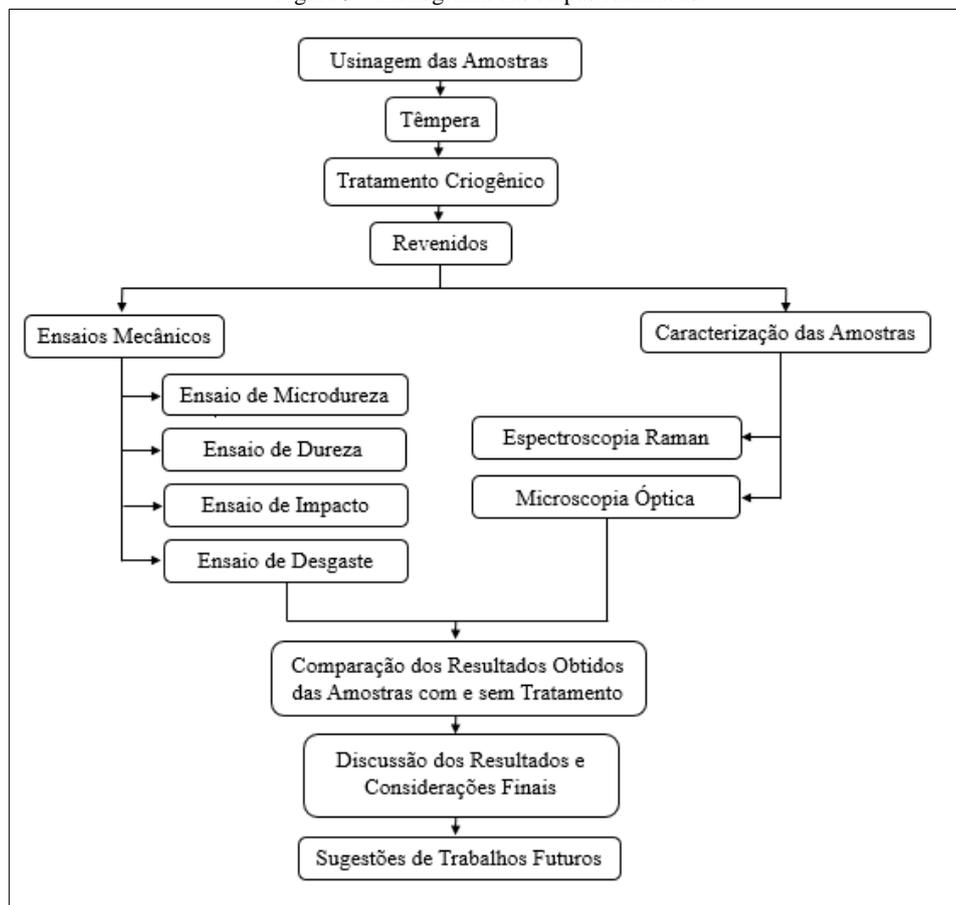
Vales (2010) demonstra que houve refino dos carbonetos do aço e aumento no volume da porcentagem dos carbonetos tratado com criogenia, originado à transformação da austenita retida. Entretanto Kelkar *et al* (2007) revelam que ainda há pouca informação científica na literatura à respeito do mecanismo das melhorias das propriedades mecânicas, principalmente quanto as características e dimensões dos precipitados.

O grande desafio de pesquisadores da área, é chegar em um consenso dos parâmetros e etapas adotados em todos os processos. A elaboração de um padrão dos tratamentos depende de vários fatores, e devido à moderado estudo na área, não consegue-se encontrar a metodologia ideal para propriedades mecânicas e tribológicas esperadas. Grande parte da divergência é atribuída à falta de informação detalhadas sobre os ciclos criogênicos.

3 METODOLOGIA

Nesta seção estão apresentadas as etapas realizadas na elaboração deste trabalho, conforme fluxograma mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma das etapas realizadas.



FONTE: Autoria própria.

3.1 Usinagem das Amostras

Para realização deste trabalho, as amostras precisaram ser usinadas, visto que as barras são comercializadas com seção cilíndrica de $\frac{5}{8}$ " polegadas ($\approx 15,88$ mm) e era necessário obter seção quadrada de 10x10 mm conforme Norma ABNT NBR ISO 148-1:2013 padrão para ensaio Charpy. Não foram utilizados entalhes, devido o material ser muito frágil.

Inicialmente foram cortadas 40 amostras com 55 mm de comprimento na cortadora metalográfica da marca TECLAGO modelo CM 60, que está alocado no Prédio C3 da Unipampa – Campus Alegrete, conforme Figura 10.

Figura 10 - Cortadora metalográfica.



FONTE: Autoria própria.

Após o corte, as amostras foram usinadas⁴ para obtenção da seção transversal quadrada. Foi utilizado o centro de usinagem da marca ROMI modelo D 800, conforme Figura 11, que está alocada na Tractebel sob posse da Unipampa.

Figura 11 - Centro de usinagem.



FONTE: Autoria própria.

⁴ Para a usinagem das amostras, utilizou-se o programa exposto no Apêndice A deste documento.

3.2 Tratamentos Térmicos

Para melhor compreensão dos resultados, nomeou-se as rotas conforme os tratamentos realizados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Nomes das rotas realizadas.

Rota	Tratamentos Realizados
T/2R	Têmpera + Duplo Revenido
T/DCT(-120)/2R	Têmpera + criogenia (-120°C) + Duplo Revenido
T/DCT(-150)/2R	Têmpera + criogenia (-150°C) + Duplo Revenido
T/DCT(-180)/2R	Têmpera + criogenia (-180°C) + Duplo Revenido

FONTE: Autoria própria.

Com as amostras no tamanho padrão, as mesmas foram enviadas para têmpera na empresa METALTÉCNICA, onde os parâmetros utilizados foram:

- Temperatura de Austenitização: 1180°C;
- Tempo de Encharque: 15 minutos;
- Resfriamento em óleo.

A Figura 12, ilustra o forno utilizado no processo, bem como os parâmetros utilizados.

Figura 12 - Forno utilizado na têmpera.



FONTE: Autoria própria.

Com todas amostras temperadas, estas foram submetidas as rotas de tratamento criogênico realizado no Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa – Campus Alegrete: -120°C , -150°C e -180°C , todos com rampa de resfriamento⁵ e aquecimento à uma taxa de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e 24 horas de imersão. A Figura 13 ilustra o equipamento utilizado para o tratamento criogênico. Foram utilizadas dez amostras para cada rota do tratamento criogênico.

A cápsula onde foram inseridas as amostras foi desenvolvida na própria Unipampa, pelos alunos integrantes do grupo de pesquisa. O dispositivo foi construído de maneira a se obter a taxa de resfriamento requerida, onde a composição final é dada por Policloreto de Vinila (PVC), Poliuretano (PU) e areia. O desenho esquemático da cápsula está exposto na Apêndice D.

Figura 13 - Equipamento utilizado para criogenia.



FONTE: Autoria própria.

Realizadas as rotas de criogenia, as amostras foram submetidas à duplo revenido, ambos de 550°C , no forno tipo mufla da Marca Sanchis, localizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Unipampa – Campus Alegrete. A Figura 14, mostra o forno utilizado.

⁵ Os gráficos ilustrativos da rampa de resfriamento estão expostos no Apêndice B deste documento.

Figura 14 - Forno utilizado para o revenido.



FONTE: Autoria própria.

3.3 Ensaios Mecânicos

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

3.3.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado no durômetro marca TIME modelo TH500 conforme ilustrado na Figura 15. O equipamento utiliza escala Rockwell C [HRC] e carga de 150 kg, e está localizado na sala 105 da Unipampa – Campus Alegrete.

Figura 15 - Durômetro

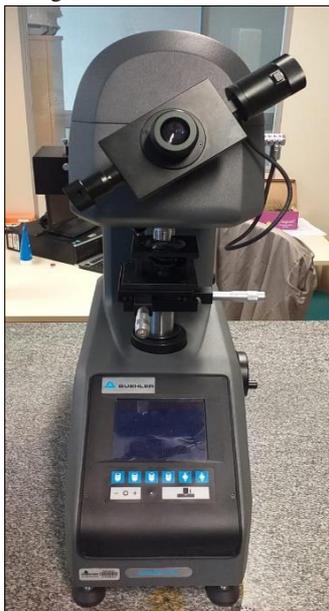


FONTE: Aatoria própria.

3.3.2 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado no microdurômetro da marca Buehler modelo Micromet 6010, ilustrado na Figura 16, localizado na sala 105 da Unipampa – Campus Alegrete. A escala utilizada foi Vickers [HV] com uma pré-carga de 1 kg.

Figura 16 - Microdurômetro.



FONTE: Aatoria própria.

3.3.3 Ensaio de Desgaste

Para o ensaio de desgaste, foi utilizado a máquina da marca Phoenix Tribology, modelo TE 53 Slim, conforme Figura 17. O equipamento está alocado no Laboratório de Máquinas no Prédio C3 da Unipampa – Campus Alegrete.

Figura 17 - Máquina para ensaio de desgaste.



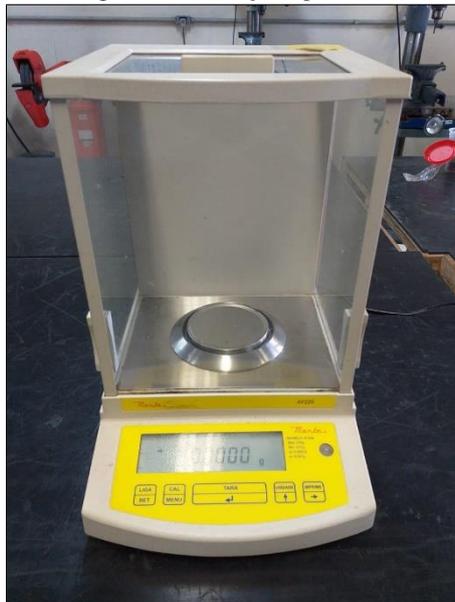
FONTE: Autoria própria.

O funcionamento do equipamento consiste em posicionar a amostra sobre um disco onde é fixado uma lixa. Na extremidade do braço é colocado uma massa, a fim de aumentar o contato entre a amostra e a lixa. Os parâmetros são introduzidos no software do equipamento, tal como ilustrado no Apêndice C. Abaixo segue um resumo dos parâmetros utilizados no ensaio:

- Anel de diâmetro 60 mm com face de contato revestida com lixa de granulometria de 120 grãos/pol²;
- Carga de 287 N sobre a amostra;
- Rotação de 50 rpm na superfície do disco (\cong 9 m/s);
- 300 ciclos.

Para se avaliar a perda de massa, foi utilizado a balança de precisão da marca Marte modelo AY 220, com resolução de 0,001g, mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Balança de precisão.



FONTE: A autoria própria.

A massa das amostras foi verificada antes e após o ensaio. Com isso, através da Equação 1 foi avaliado a perda de massa das amostras.

$$\text{Perda de Massa} = m_i - m_f \quad \text{Equação 1}$$

Onde: m_i – Massa inicial [g];

m_f – Massa final [g].

3.3.4 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no equipamento da marca Werkstoffprüfmaschinen, com carga de 150 kg.m. O ensaio foi realizado sob supervisão do Professor Inácio, que gentilmente cedeu o equipamento, ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Máquina utilizada para ensaio de impacto Charpy.



FONTE: Autoria própria.

Por tratar-se de um ensaio destrutivo, este foi o primeiro a ser executado. As peças resultantes da fratura foram adequadas para ensaios posteriores de dureza, microdureza e desgaste.

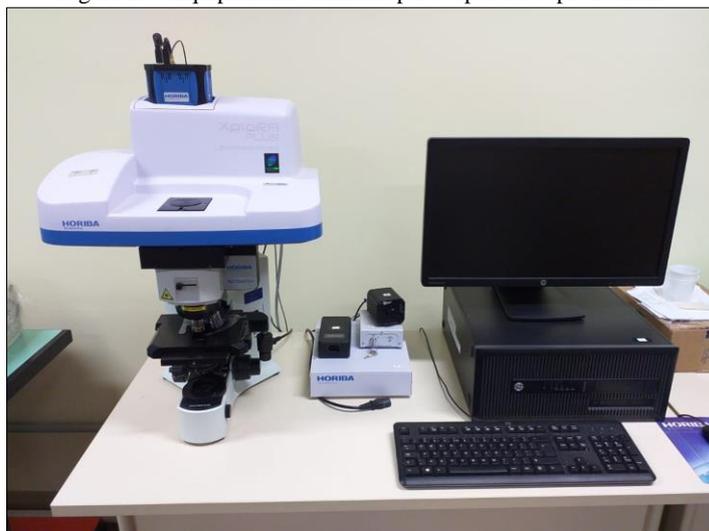
3.4 Análise Microestrutural

Através da análise microestrutural foi possível visualizar a precipitação do carbeto, tamanho de grão e a energia de ligação entre os átomos.

3.4.1 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman foi utilizada para obter informação química das amostras, através da incidência do laser que fornece diferentes comprimentos de onda, obtendo curvas características para cada material. A Figura 20 apresenta o equipamento da marca Horiba Scientific, modelo Xplora Plus utilizado para a análise.

Figura 20 - Equipamento utilizado para espectroscopia Raman.



FONTE: Autoria própria.

O equipamento está alocado na sala 123 da Unipampa – Campus Alegrete. O ensaio foi realizado sob supervisão do professor Luis Armas, responsável pelo equipamento.

3.4.2 Microscopia Óptica (MO)

A microscopia óptica foi realizada para obter o tamanho de grão das amostras, através do método da interseção linear. O microscópio utilizado da marca Kontrol modelo IM713, conforme Figura 21. O equipamento está alocado no Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa – Prédio C3.

Figura 21 - Microscópio óptico.



FONTE: Autoria própria.

Entretanto, para realização deste ensaio foi necessário a preparação das amostras. A ordem dos procedimentos realizados foram:

- (1) Corte longitudinal e transversal das amostras na cortadora de precisão marca Buehler modelo ISOMET 1000, conforme Figura 22.

Figura 22 - Cortadora de precisão.



FONTE: Autoria própria.

- (2) Embutimento em baquelite, realizado no equipamento da marca Fortel modelo 30, mostrado na Figura 23, utilizando uma pressão máxima de 1000 lbf/pol².

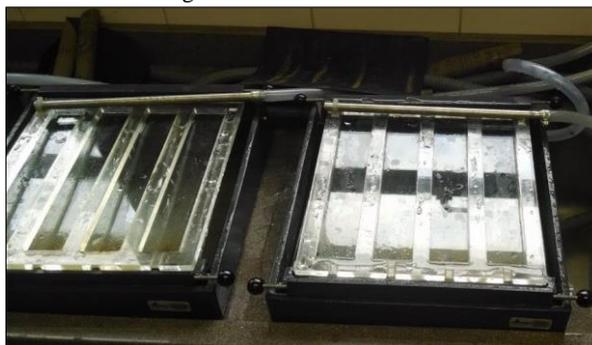
Figura 23 - Embutidora.



FONTE: Autoria própria.

- (3) Lixamento manual com diversas granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 2000, 2500 e 3000 grãos/pol². O procedimento foi realizado no equipamento ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Lixadora manual.



FONTE: Autoria própria.

Todos equipamentos desta etapa estão alocados na Prédio C3 da Unipampa – Campus Alegrete.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e na análise microestrutural do aço AISI M2.

4.1 Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza foram realizadas 8 medições, descartando a maior e a menor, obtendo assim 6 valores, totalizando 60 medições. Todos os valores encontrados estão dispostos no Apêndice E. A Tabela 3 apresenta os valores médios e desvio padrão.

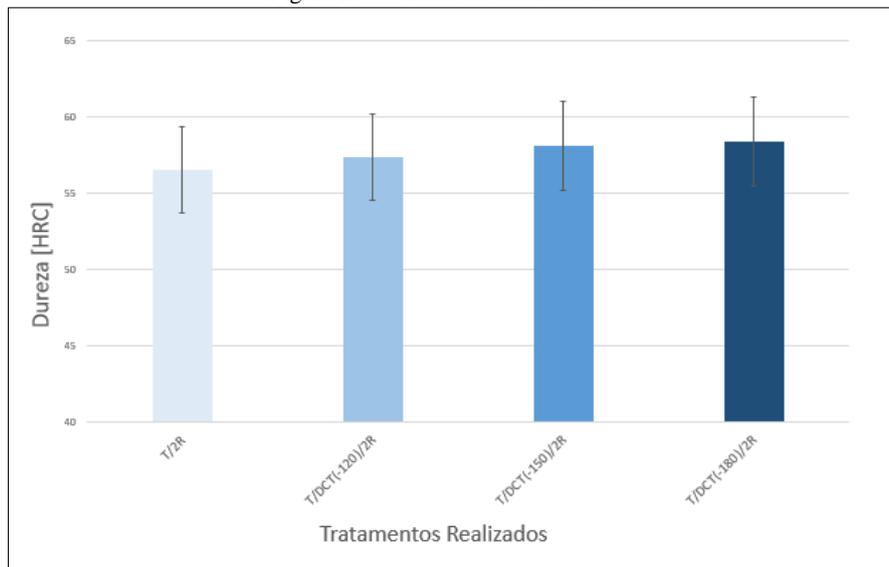
Tabela 3 - Valores de dureza obtidos.

Rota	Média [HRC]	Desvio Padrão	Taxa de Variação (%)	Aumento de Dureza (%)
T/2R	56,51	1,47	2,60	--
T/DCT(-120)/2R	58,25	2,18	3,22	3,07
T/DCT(-150)/2R	58,75	1,73	3,12	3,96
T/DCT(-180)/2R	58,89	1,59	2,61	4,21

FONTE: Autoria própria.

Com base na Tabela 3, constata-se que houve um pequeno aumento da dureza das amostras que possuíam DCT em relação à T/2R. Este fenômeno pode ser atribuído à maior transformação da austenita retida em martensita através do tratamento criogênico. A Figura 25 apresenta os valores em forma de gráficos.

Figura 25 - Valores de dureza obtidos.



FONTE: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 3 e a Figura 25 observa-se que, as amostras submetidas ao DCT(-180) possuem menor desvio padrão entre os tratamentos criogênicos, o que sugere uma microestrutura mais homogênea. É perceptível também que, as amostras submetidas ao DCT apresentaram menor taxa de variação comparadas à T/2R, sendo DCT(-180) seguida do DCT (-150) e finalmente o DCT (-120).

4.2 Ensaio de Microdureza

Para o ensaio de microdureza foram realizadas 8 medições, descartando a maior e a menor, obtendo 6 valores, totalizando 60 medições. Todos os valores encontrados estão dispostos no Apêndice F. A Tabela 4 apresenta os valores médios, desvio padrão, taxa de variação e aumento de dureza.

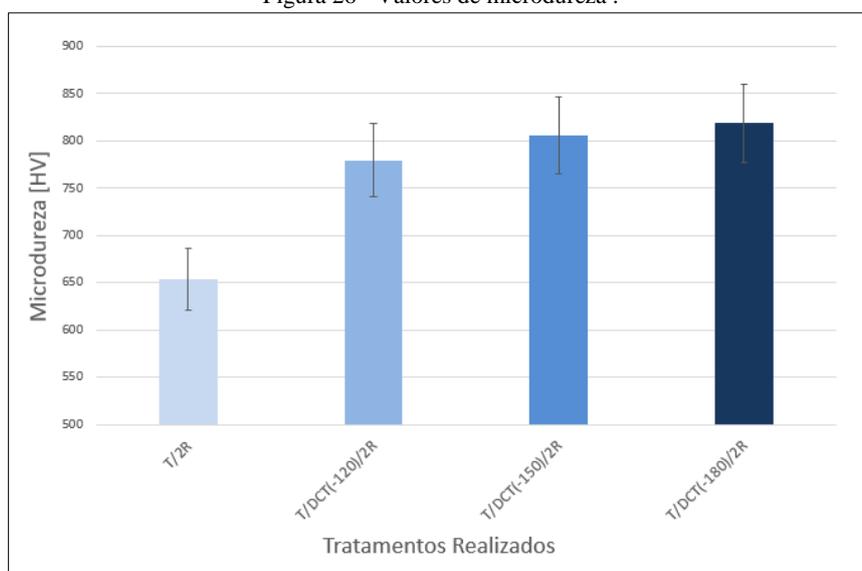
Tabela 4 - Valores de microdureza obtidos.

Rota	Média [HV]	Desvio Padrão	Taxa de Variação (%)	Aumento de Microdureza (%)
T/2R	653,56	40,63	6,21	--
T/DCT(-120)/2R	779,59	49,52	6,35	19,28
T/DCT(-150)/2R	805,83	46,86	5,81	23,29
T/DCT(-180)/2R	818,49	40,25	4,91	25,23

FONTE: Autoria própria.

Percebe-se pela Tabela 4 que, nas amostras que possuíam DCT, ocorreu redução do desvio padrão e da taxa de variação, quanto mais baixa temperatura. Observa-se também que, quanto mais baixa temperatura no DCT, maior o aumento de microdureza das amostras. A Figura 26 apresenta os valores em forma de gráfico.

Figura 26 - Valores de microdureza .



FONTE: Autoria própria.

Com base na Tabela 4 e Figura 26 observa-se que, nas amostras T/2R apresentaram microdureza inferior às amostras com DCT, fato que pode ser atribuído à presença de austenita retida. Portanto, os valores de microdureza vão ao encontro dos resultados obtido na dureza.

4.3 Ensaio de Impacto Charpy

Para o ensaio de impacto Charpy, a Tabela 5 apresenta a média e o desvio padrão da energia absorvida para cada rota. Todos os valores encontrados estão dispostos no Apêndice G.

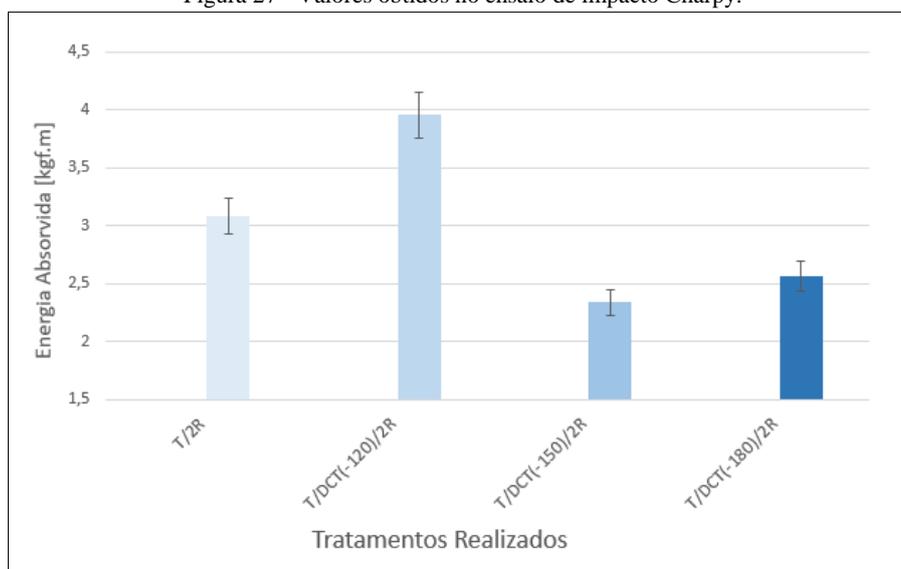
Tabela 5 - Valores obtidos no ensaio de impacto Charpy.

Rota	Média [kgf.m]	Desvio Padrão	Taxa de Variação (%)	Aumento de Energia Absorvida (%)
T/2R	3,08	1,63	53,16	--
T/DCT(-120)/2R	3,96	1,06	26,98	28,57
T/DCT(-150)/2R	2,34	0,46	19,68	-24,02
T/DCR(-180)/2R	2,57	0,67	26,12	-16,55

FONTE: Autoria própria.

Percebe-se pela Tabela 5 que, as amostras do T/DCT(-120)/2R apresentou os melhores resultados quanto ao aumento da tenacidade. Por outro lado, evidencia-se o maior desvio padrão e taxa de variação. A Figura 27 apresenta os valores de forma gráfica.

Figura 27 - Valores obtidos no ensaio de impacto Charpy.



FONTE: Autoria própria.

Contudo, a Figura 27 mostra que não houve ganho significativo para as amostras tratadas criogenicamente em relação às T/2R. De acordo com Cajner (2009), a tenacidade ao impacto é significativamente afetada apenas pela temperatura de austenitização, e que o tratamento criogênico profundo não tem influência significativa. Com isso, a energia de fratura diminui, fato que indica a influência da matriz na qual um grão cresce à medida que eleva-se a temperatura de austenitização.

4.4 Ensaio de Desgaste

Os valores médios de perda da massa, desvio padrão e taxa de variação encontrados para o ensaio de desgaste estão expostos na Tabela 6. A mesma lixa foi utilizada, granulometria de 120 grãos/pol², e os parâmetros utilizados para todos os ensaios estão descritos no item 3.3.3 deste documento. Todos os valores encontrados estão dispostos no Apêndice H.

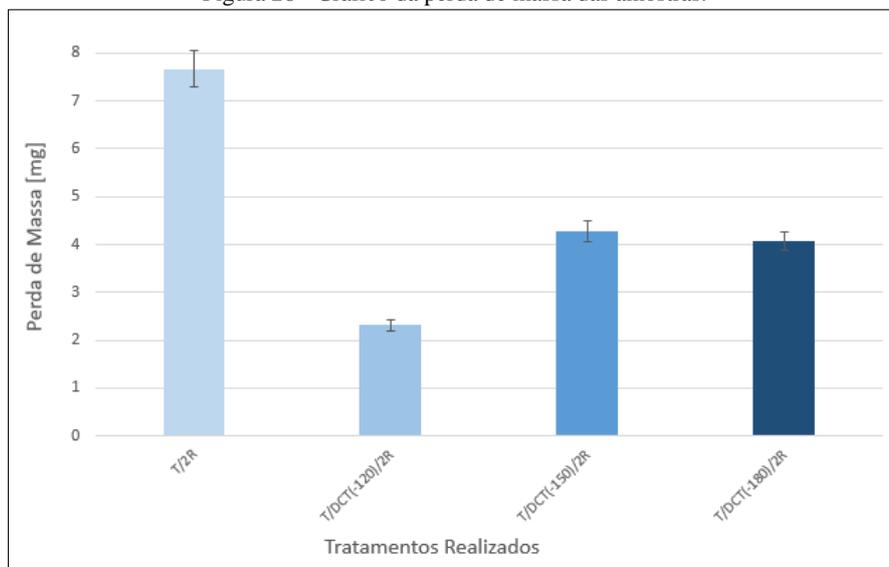
Tabela 6 - Perda de massa das amostras.

Rota	Média da Perda de Massa (mg)	Desvio Padrão	Taxa de Variação (%)	Ganho de Resistência ao Desgaste (%)
T/2R	7,67	5,86	76,49	--
T/DCT(-120)/2R	2,32	2,14	92,27	69,75
T/DCT(-150)/2R	4,27	0,60	14,08	44,32
T/DCT(-180)/2R	4,07	0,72	17,68	46,93

FONTE: Autoria própria.

Percebe-se através da Tabela 6 que, as amostras sem DCT apresentaram maior perda de massa, quando comparadas às tratadas criogenicamente. Entretanto, os altos valores da taxa de variação e desvio padrão, se devem aos valores obtidos durante o ensaio de perda de massa serem discrepantes para cada tratamento. Os valores podem ser atribuídos à erros no ensaio, tal como eliminação da lixa em contato com a amostra. A Figura 28 apresenta os valores em forma de gráfico.

Figura 28 - Gráfico da perda de massa das amostras.



FONTE: Autoria própria.

Contudo, é possível notar que as amostras submetidas à T/2R possuem maior taxa de desgaste, o que pode ser atribuído a carbeto grosseiros e deformações plásticas devido a presença de austenita retida. Com isso, a deformação plástica é o principal mecanismo de desgaste das amostras submetidas a este tratamento. De acordo com Gill (2011), o tratamento criogênico aumenta a resistência ao desgaste, mas o grau de aumento é dependente da carga aplicada.

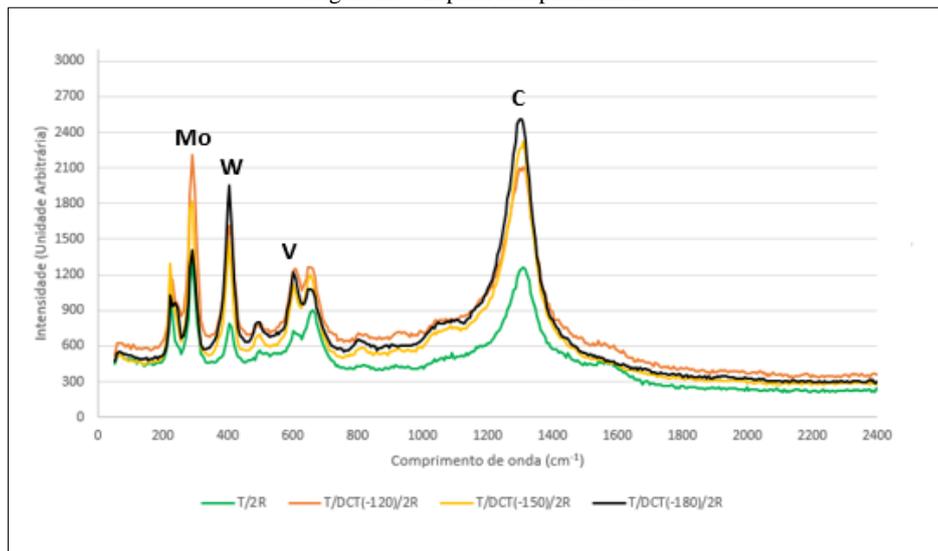
4.5 Análise Microestrutural

A partir das análises microestruturais, foi possível avaliar o tamanho de grão e a energia de ligação entre os constituintes.

4.5.1 Espectroscopia Raman

A análise microestrutural através da espectroscopia Raman, consiste em um laser incidido no material que é refletido com comprimento de onda (frequência) diferente. Com isso, obteve-se informações importantes sobre a composição química do material. A Figura 29 apresenta um comparativo entre os resultados das amostras sem tratamento e das diferentes rotas de criogenia.

Figura 29 - Espectroscopia Raman.



FONTE: Autoria própria.

Percebe-se pela Figura 29 que, os comprimentos de onda em torno de 1300 cm^{-1} indica a presença de Carbono. Já os picos em torno de 280 cm^{-1} , 400 cm^{-1} e 608 cm^{-1} , apontam a presença de elementos de liga, sendo Molibdênio, Tungstênio e Vanádio respectivamente.

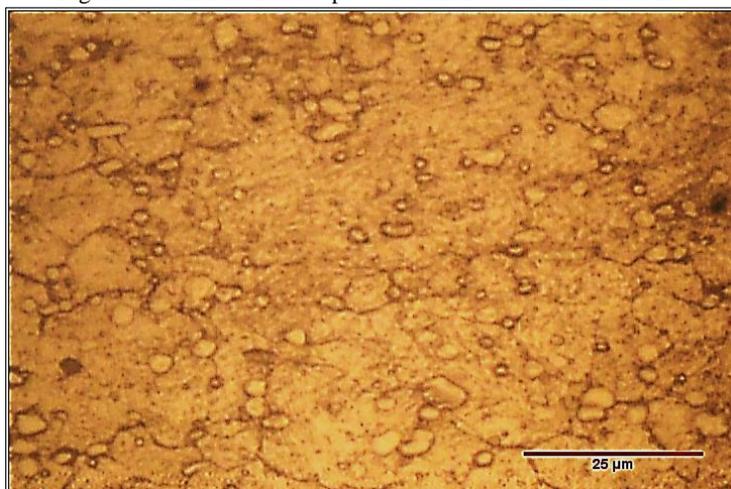
As amostras que não possuíam tratamento criogênico apresentaram energia de ligação menor comparadas às tratadas com criogenia. O pico mais alto indica a energia de ligação do carbono, a qual foi aumentada conforme a redução da temperatura criogênica, resultando em aumento de dureza.

Para a rota T/DCT(-180)/2R, os maiores picos foram de Carbono e Tungstênio, indicando haver uma maior precipitação dos carbeto. Na rota T/DCT(-120)/2R houve pico de Molibdênio, o que sugere uma maior resistência ao desgaste.

4.5.2 Microscopia Óptica

A Figura 30 apresenta a microestrutura do tratamento convencional, sendo da rota T/2R. A ampliação das imagens é de 800x.

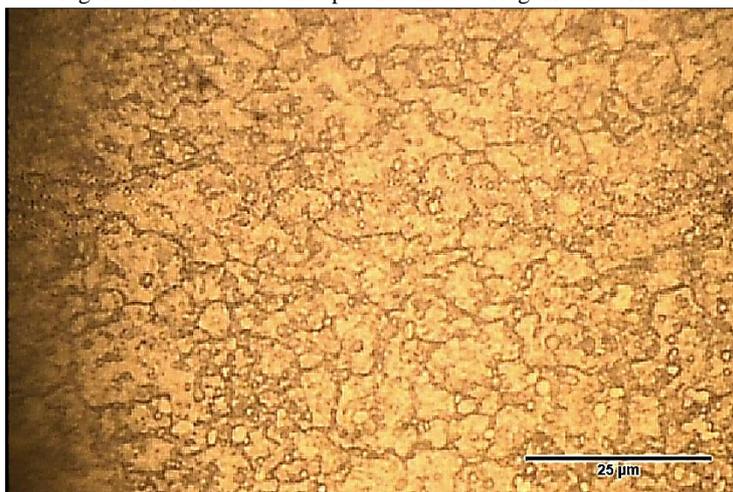
Figura 30 - Microestrutura após o tratamento convencional T/2R.



FONTE: Aatoria própria.

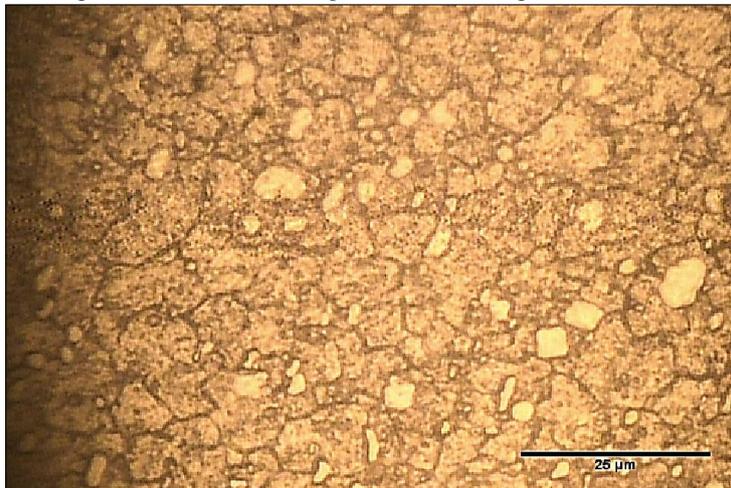
De acordo com a Figura 30, rota sem DCT, pode-se perceber uma grande concentração dos carbetos, os quais não foram dissolvidos. Os carbetos se apresentam de forma grosseira, com arranjo desordenado. A média do tamanho de grão foi de 6,93 μm .

Após a realização das rotas de DCT, obteve-se as Figuras 31, 32 e 33 que apresentam a microestrutura das rotas T/DCT(-120)/2R, T/DCT(-150)/2R e T/DCT(-180)/2R respectivamente.

Figura 31 - Microestrutura após tratamento criogênico de -120°C .

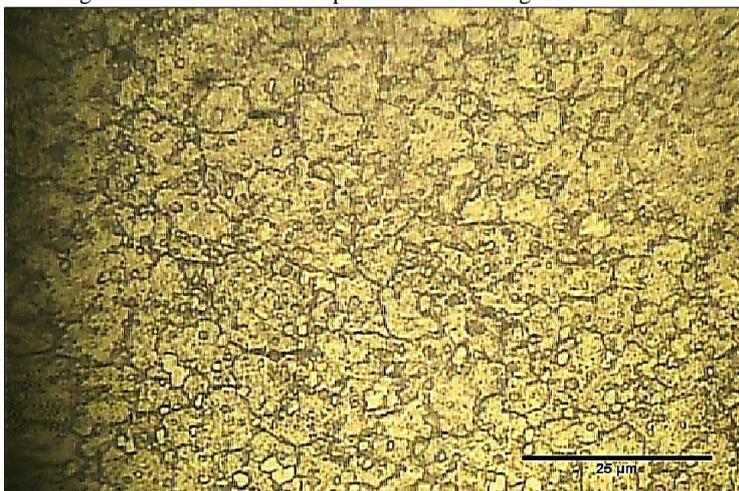
FONTE: Aatoria própria.

Figura 32 - Microestrutura após tratamento criogênico de -150°C .



FONTE: Aatoria própria.

Figura 33 - Microestrutura após tratamento criogênico de -180°C .



FONTE: Aatoria própria.

Analisando as Figuras 31, 32 e 33 a média do tamanho de grão é de:

- Rota T/DCT(-120)/2R: $4,42 \mu\text{m}$;
- Rota T/DCT(-150)/2R: $5,56 \mu\text{m}$;
- Rota T/DCT(-180)/2R: $6,92 \mu\text{m}$.

Identifica-se um pequeno aumento no tamanho do grão, conforme diminuição da temperatura de criogenia. Entretanto, os valores são próximos, não havendo mudanças consideráveis a ponto de modificar as propriedades mecânicas. Os valores de tamanho

de grão se aproximam, uma vez que o tratamento criogênico não o modifica de forma considerável.

Dentre as rotas que possuíam DCT, a T/DCT(-180)/2R apresentou melhor dissolução dos carbeto na matriz e de forma mais homogênea. Os carbeto são identificados pelos pontos menores nas imagens.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Este trabalho analisou três diferentes temperaturas de criogenia, consistindo nas rotas T/DCT(-120)/2R, T/DCT(-150)/2R e finalmente T/DCT(-180)/2R. Todos os resultados dos ensaios efetuados foram comparados à rota T/2R, a qual não possuía tratamento criogênico. Realizados o estudo e os ensaios descritos para o aço AISI M2, foi possível obter algumas conclusões.

Para o ensaio de dureza, a rota de -180°C apresentou melhores resultados, quando comparada às rotas envolvendo criogenia. Este fenômeno pode estar atribuído a transformação da austenita retida em martensita, com pouca contribuição dos carbeto finos. O desvio padrão foi diminuindo quanto mais baixas temperaturas de criogenia.

O ensaio de microdureza também se mostrou satisfatório, pois análogo ao de dureza, houve aumento dos valores de microdureza conforme diminuição da temperatura de criogenia. Apresentou também redução do desvio padrão e menor taxa de variação.

Para o ensaio de impacto Charpy os melhores resultados foram para a rota de -120°C. Entretanto, dentre as rotas, esta apresentou o maior desvio padrão e taxa variação. Com isso atribui-se a menor dissolução dos carbeto presentes.

O ensaio de desgaste revelou que há redução da perda de massa das amostras tratadas criogenicamente, porém esta é dependente de outros fatores, tais como as condições utilizadas durante o ensaio.

A espectroscopia Raman apresentou em todas as rotas de criogenia, aumento dos picos dos elementos, sendo o mais significativo para o carbono. As energias de ligação aumentaram, conforme diminuição da temperatura de criogenia, tornando-as do tipo iônica. O aumento da energia de ligação, justifica o aumento de dureza das amostras.

Quanto a microestrutura, não houve mudança significativa quanto ao tamanho de grão. Entretanto, para a rota T/DCT(-180)/2R houve expressiva dissolução dos carbeto na matriz, tornando mais homogêneo, contribuindo principalmente para elevação da dureza e microdureza.

Em contexto geral, o tratamento criogênico apresenta significativos benefícios, em termos de dureza, microdureza, precipitação dos carbeto e energia de ligação, principalmente nas amostras submetidas à T/DCT(-180)/2R. Este beneficiamento é

válido, visto que o DCT pode proporcionar uma melhoria significativa na qualidade e produtividade do produto e, portanto, na economia geral de usinagem. O processo de DCT é relativamente de baixo custo, e afeta toda a seção do corpo diferentemente de revestimentos aplicados à superfície.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos, algumas sugestões para trabalhos futuros poderão ser benéficas, contribuindo para avanço da ciência acerca de tratamentos criogênicos.

- Análise da microestrutura através da difração de Raio-X das rotas estudadas neste trabalho;
- Variação das temperaturas de austenitização e do(s) revenido(s) para investigação das propriedades obtidas;
- Realizar as rotas de tratamentos térmicos nas amostras, e coloca-las para trabalho efetivo em usinagem de diferentes materiais. Com isso, poderá ser verificado na prática o potencial melhoramento do aço AISI M2;
- Paralelo ao estudo efetivo de criogenia, efetuar uma melhor instrumentação acerca do controle de temperatura criogênica, buscando maior precisão nos resultados.

6 REFERÊNCIAS

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

BARROS, T, O, *et al.* **Influência do Revenimento Duplo Sobre as Propriedades de Aços-Ferramenta para Corte a Frio.** Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/revista/ccm/materia/2017/03/06/influencia_do_revenimento.html>. Acessado em: 22/04/2018.

CAJNER, F *et al.* **Effect of Deep-Cryogenic Treatment on High Speed Steel Properties.** *Materials and Manufacturing Processes*, 24: 743–746, 2009.

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

COUTINHO, C.B. **Materiais Metálicos para Engenharia.** Fundação Christiano Ottoni. Belo Horizonte, 1992.

EBONI, G. A., **Efeito do processamento criogênico na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE M2 temperado e revenido.** Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94334>>. Acessado em: 25/05/2018.

FANTINELLI, D. G. **Influência do Tratamento Criogênico nas Propriedades Mecânicas e Tribológicas do Aço ABNT M2.** Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/rii/777>>. Acessado em: 13/04/2018.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS LTDA. Tabela técnica de aços ferramentas. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/sites/all/themes/favorit/tabelas_html/acos_ferramentas.html>. Acesso em: 01/07/2013.

Gåård, A., *Wear in Sheet Metal Forming*, Phd Thesis. Karlstad University Studies, Karlstad (2008).

GILL, S. S., SINGH J., SINGH R., SINGH H., **Effect of cryogenic treatment on AISI M2 high speed steel: Metallurgical and mechanical characterization**, *Journal of Materials Engineering and Performance* 21 (2012) 1320–1326.

GLÓRIA, F.V., **Caracterização microestrutural e identificação das causas de trincas do aço ASTM A217-WC9 para lingoteiras utilizadas na fundição de zinco**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOpQAF/caracterizacao-microestrutural-identificacao-das-causas-trincas-aco-astm-a217-wc9-lingoteiras-utilizadas-na-fundicao-zinco?part=2>> Acessado em: 05/06/2018.

GOBBI, S. J. **Influência do tratamento criogênico na resistência ao desgaste do aço para trabalho a frio AISI D2**. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4272/1/2009_SilvioJoseGobbi.pdf>. Acessado em: 10/04/2018.

HUANG, J.Y.; ZHU, Y.T.; LIAO, X.Z.; BEYERLEIN, I.J.; BOURKE, M.A.; MITCHELL, T.E. **Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel**, *Material Science and Engineering*, pp. 241-244, 2003.

KELKAR, R., NASH, P., ZHU, Y. **Understanding the Effects Cryogenic Treatment on M2 Tool Steel Properties**. Disponível em: <<https://www.asminternational.org/documents/10192/1917604/htp00705p057.pdf/>>. Acessado em: 10/04/2018.

MAGNABOSCO, R., OLIVA-Jr, R. Z., PASSOS, R. R. S., **Tratamento térmico de aço rápido ABNT M2**. In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), 22 a 26 de novembro de 1999.

MEI, P. R, COSTA e SILVA, A. L. V. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª Edição. Editora Blucher, 2006.

MOREIRA, J.C. et al. **Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado**. *Revista matéria* 14 p 932-946, 2009.

OPPENKOWSKI, A; WEBER, S; THEISEN, W. **Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610002013>>. Acessado em: 11/04/2018.

PADGORNİK, B *et al.* Deep Cryogenic Treatment of Tool Steel. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615301515>>. Acessado em: 20/04/2018.

PARCIANELLO, C. T., **Estudo das propriedades mecânicas e tribológicas do aço modificado ABNT M2 através da otimização de tratamentos térmicos e criogênicos.** Disponível em: < <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/handle/riu/791>> Acessado em: 01/06/2018.

POLETTI, T., **Avaliação metalúrgica de tratamento criogênico em aço inoxidável martensítico DIN 1.4110.** Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/156499/001015681.pdf>>. Acessado em: 21/05/2018.

ROCHA, A. da S., **Influência do Estado Superficial Prévio na Nitretação a Plasma do Aço AISI M2.** Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/170120>> . Acessado em: 15/05/2018.

SARTORI, C. H., **Influência dos tratamentos térmicos e tratamentos criogênicos na tenacidade do aço rápido AISI M2.** Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-11052009-172021/pt-br.php>>. Acessado em: 22/05/2018.

SCHLATTER, D., **Efeito da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas e microestruturais de aços rápidos obtidos por processos convencionais e metalurgia do pó.** Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/101032/312827.pdf?sequence=1>>. Acessado em: 25/05/2018.

SHACKELFORD, J. F., **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6ª Edição, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.

SILVA, F. J. **Influência do Tratamento Criogênico no Desempenho de Ferramentas de Aço Rápido**. Disponível em: < <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/1999/pdf/AACABH.pdf>>. Acessado em: 15/04/2018.

SILVA, W. S. da, **Estudo da tenacidade à fratura do aço rápido M2 fundido, modificado e tratado termicamente**. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde.../SilvaWSDissertacaoMestrado2001.pdf>. Acessado em: 23/05/2018.

SILVANO, M. B. **Avaliação do Desempenho de Navalhas de Corte**. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13786>>. Acessado em: 18/04/2018.

SOUSA, P. A. de, SILVA, C. H. da, CUNHA, T. E., **Análise Comparativa Entre O Tratamento Térmico De Têmpera Realizado Em Forno A Vácuo E Banho De Sal Aplicado Aos Aços Ferramenta**. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/analise-comparativa-entre-o-tratamento-termico-de-tempera-realizado-em-forno-a-vacuoe-banho-de-sal-aplicado-aos-acos-ferramenta/>> Acessado em: 30/05/2018.

TIER, M. A. D. **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280935970_AVALIACAO_DA_RESISTENCIA_AO_DESGASTE_DO_ACO_AISI_M2_NITRETADO_A_PLASMA>. Acessado em: 12/04/2018.

TOTTEN G.E., NARAZAKI M, BLACKWOOD R.R., JARVIS L.M., **Failures Related to Heat Treating Operations**, ASM Metals Handbook, Failure Analysis and Prevention, V 11, p.399-480, 2002.

VALES, S. R., **Estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13**. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-21042011-153009/pt-br.php>> Acessado em: 08/06/2018.

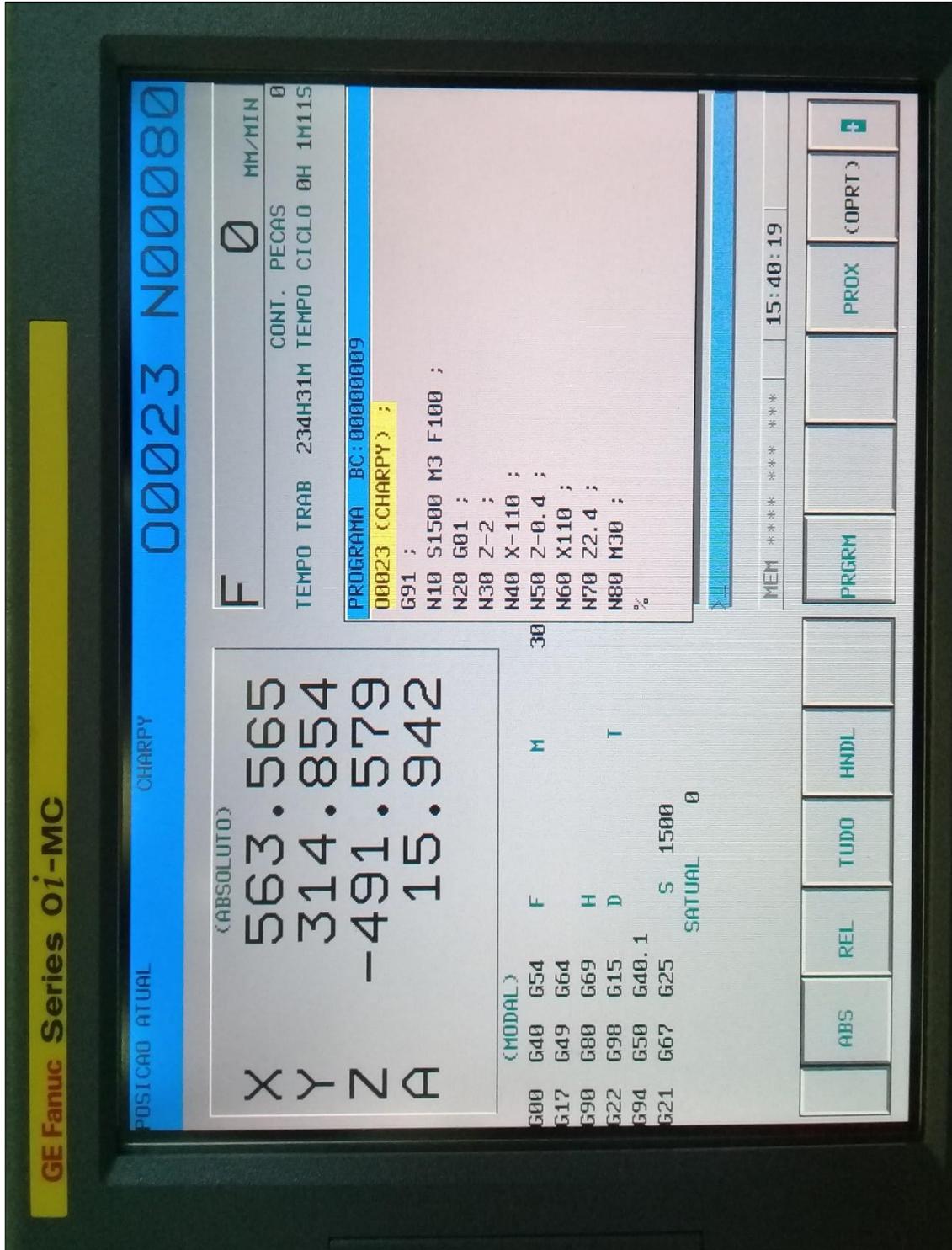
WURZBACH, R. N. **Improving Component Wear Performance Through Cryogenic Treatment.** Disponível em: < <http://cryoplus.com/pdf/improving-component-wear-performance-through-cryogenic-treatment.pdf>>. Acesso em: 15/04/2018.

YUN, D., XIAOPING, L., HONGSHEN, X., **Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism,** Heat Treatment of Metals, v. 2, pp. 55-59, March 1998.

7 APÊNDICES

7.1 APÊNDICE A – Programa Utilizado no Centro de Usinagem

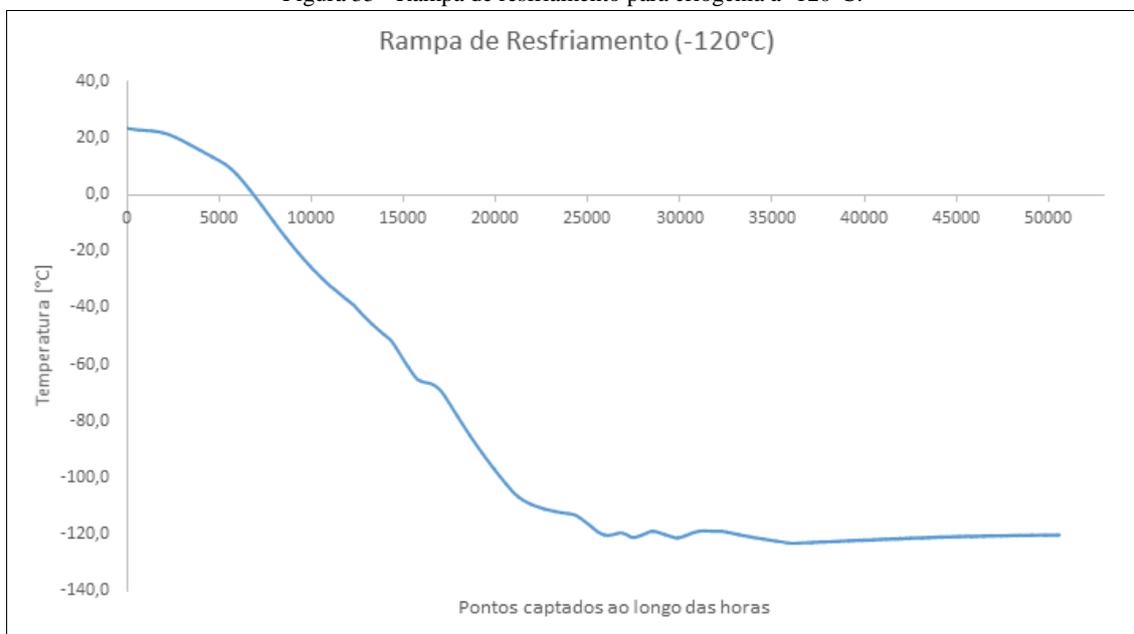
Figura 34 - Programa utilizado para usinagem das amostras.



FONTE: Autoria própria.

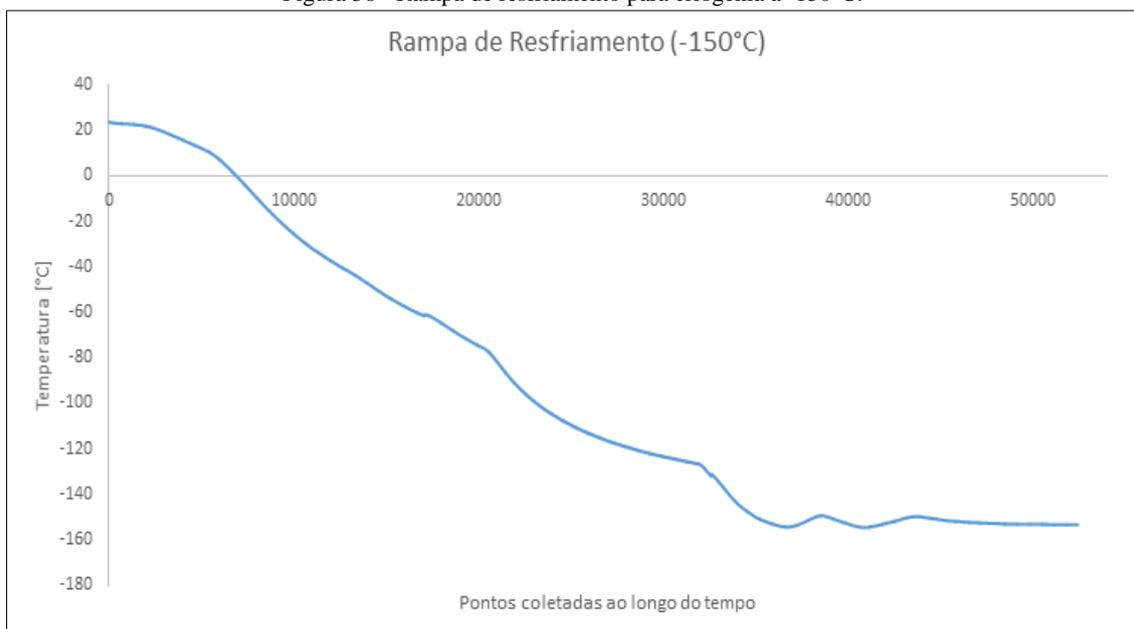
7.2 APÊNDICE B – Rampas de Resfriamento do Tratamento Criogênico

Figura 35 - Rampa de resfriamento para criogenia a -120°C .



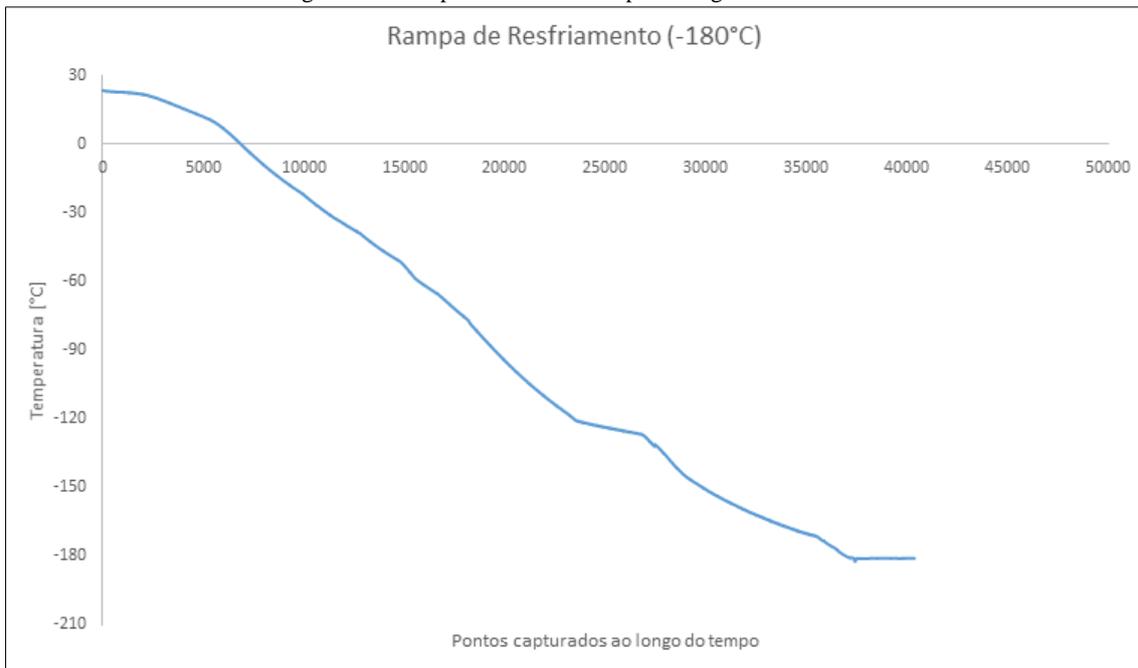
FONTE: Autoria própria.

Figura 36 - Rampa de resfriamento para criogenia a -150°C .



FONTE: Autoria própria.

Figura 37 - Rampa de resfriamento para criogenia a -180°C.



FONTE: Autoria própria.

7.3 APÊNDICE C – Parâmetros utilizados no software para ensaio de desgaste.

Figura 38 - Programa utilizado no ensaio de desgaste.

The screenshot displays the TESI UNIDIRECTIONAL SLIDING software interface. The main window is divided into several sections:

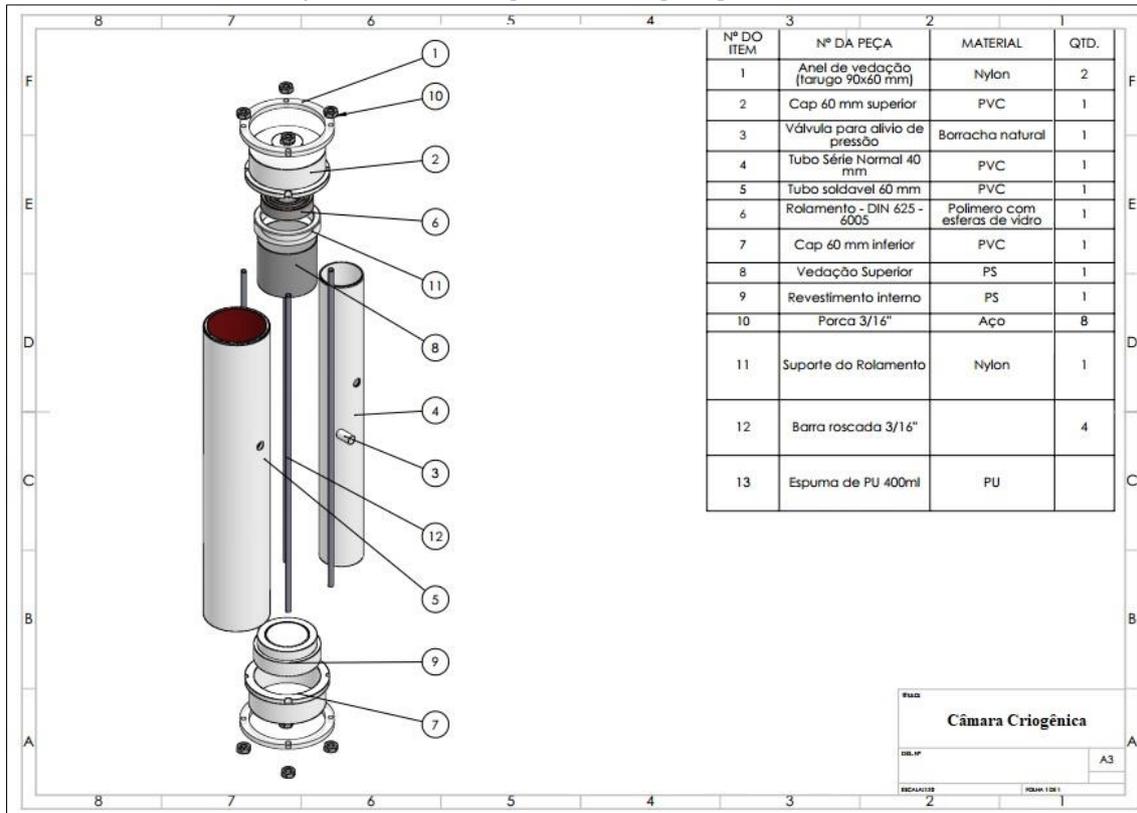
- Top Panel:** Shows 'Current Time' as 14:02:54 and 'Elapsed Test Time' as 0%.
- Parameter Grid:** A central area with 12 parameter boxes:
 - Speed SP: 50 rpm
 - Temperature SP: 0 °C
 - Applied Weights: 5000 g
 - Diameter: 60 mm
 - Wear Offset: 0 µm
 - Speed: 0 rpm
 - Fluid Temp: 25 °C
 - Load: 287 N
 - Friction: -5.4 N
 - Displacement: -401 µm
 - Velocity: 0 m/s
 - Distance: 57 m
 - F Power: 0 W
 - Friction Co-efficient: 0.02
 - Wear: -401 µm
 - Motor Enable: DISABLED
 - Heater Enable: DISABLED
 - Machine/Counter Reset: COUNT
 - Total Revs: 300 revs.
- Right Panel:** A table titled 'TESI UNIDIRECTIONAL SLIDING' with columns for Step No., Comment, and Next Step.

Step No.	Comment	Next Step
1	Start Machine	2
2	Apply Load, Zero Friction and Wear	3
3	Start Motor and run	4
4	Run Until Maximum Wear	5
5	Stop	6
6		7
7		8
8		9
9		10
10	Exit	
- Bottom Panel:** Includes a 'Test Control Panel' with buttons for START, STOP, PAUSE, and NEXT, and a 'Test File View' section.

FONTE: Autoria própria.

7.4 APÊNDICE D – Esquema do cápsula porta amostras

Figura 39 - Desenho esquemático da cápsula porta amostras.



FONTE: Adaptado do protótipo do bolsista MENGOTTI, D. A.

7.5 APÊNDICE E – Valores de dureza encontrados

Figura 40 - Valores obtidos para dureza.

	T/2R	T/DCT(-120)/2R	T/DCT(-150)/2R	T/DCT(-180)/2R
Amostra 1	56,8	53,0	58,5	54,5
	55,0	57,0	58,0	58,6
	55,2	55,0	59,5	59,0
	58,6	58,0	59,4	59,8
	57,0	58,0	55,0	58,3
Amostra 2	56,8	56,0	55,0	59,5
	55,0	58,0	57,9	59,6
	55,2	59,5	59,2	59,0
	58,6	59,5	59,0	59,0
	57,0	59,8	59,5	57,0
Amostra 3	54,0	53,3	59,4	58,3
	56,2	56,7	55,0	59
	57,3	58,9	56,3	58,8
	56,3	58,0	55,7	59,3
	55,8	58,5	55,0	57,5
Amostra 4	54,0	55,5	56,3	55
	58,1	58,0	55,8	58,8
	56,6	59,5	57,3	59,9
	55,3	58,8	57,4	59,6
	54,2	59,8	56,6	58,8
Amostra 5	56,9	58,8	55,0	58,9
	55,7	56,7	54,8	57,8
	56,0	55,0	58,2	57,9
	56,3	58,0	56,0	56,7
	57,7	58,5	58,5	59,5
Amostra 6	58,3	55,5	58,0	58,6
	55,5	58,0	59,5	59,0
	55,9	59,5	59,4	59,8
	56,3	58,8	55,0	58,3
	57,4	59,8	55,0	59,5
Amostra 7	56,8	57,5	55,7	56,7
	56,8	58,2	56,8	57,7
	54,9	56,8	57,3	57,8
	58,1	55,3	55,5	58,9
	57,6	56,7	55,0	59,3
Amostra 8	57,0	59,5	57,3	58,8
	56,5	57,8	56,7	58,8
	57,4	58,9	54,9	59,5
	58,0	56,3	57,5	59,9
	57,7	57,2	57,0	59,3
Amostra 9	58,2	57,8	57,3	58,6
	55,2	56,6	56,8	58
	56,6	58,8	55,5	54,5
	55,4	59,3	56,8	58,6
	54,2	56,7	57,8	59,0
Amostra 10	55,9	55,3	57,0	59,8
	56,9	55,8	57,5	58,3
	55,7	57,7	58,3	59,5
	58,1	57,0	58,5	58
	56,3	58,0	58,0	57,5
Amostra 11	57,7	59,6	59,5	57,7
	58,0	59,5	59,4	59,2
	56,0	58,8	55,0	59,4
	55,9	59,8	55,0	59,4
	55,8	59,1	58,3	54,5
Amostra 12	56,8	58,6	58,3	58,6
	58,0	58	57,5	59,9
	55,2	57,8	56,8	59,8
	58,6	59,2	57,3	58,3
	56,5	56,3	58,3	59,3
MEDIA	56,51	58,25	58,8	58,89
DESVIO PADRAO	1,47	2,18	1,73	1,59
TAXA DE VARIAÇÃO	2,6	3,22	3,12	2,61

FONTE: Próprio autor.

7.6 APÊNDICE F – Valores de microdureza encontrados

Figura 41 - Valores de microdureza encontrados.

	T/2R	T/DCT(-120)/2R	T/DCT(-150)/2R	T/DCT(-180)/2R
Amostra 1	647,10	800,20	749,20	806,40
	607,34	845,80	742,10	809,10
	706,24	801,70	784,00	865,80
	647,10	723,00	830,30	796,40
	607,34	835,70	844,10	884,80
	653,56	812,00	891,40	806,40
Amostra 2	647,10	740,40	795,90	805,90
	607,34	778,40	809,60	748,80
	706,24	766,70	770,30	800,90
	630,80	692,00	841,40	860,40
	644,67	748,56	830,84	840,94
	620,15	750,22	815,95	838,95
Amostra 3	610,94	790,61	794,85	820,04
	660,70	755,93	840,72	844,42
	706,24	773,61	820,10	818,94
	650,50	760,00	800,27	833,05
	634,40	797,83	805,84	850,50
	620,03	801,74	852,23	873,66
Amostra 4	678,94	800,20	784,85	812,20
	640,00	845,80	789,83	853,73
	655,84	801,70	801,96	840,95
	660,03	723,00	808,18	860,60
	620,86	835,70	803,94	890,94
	650,62	812,00	789,33	855,53
Amostra 5	647,10	803,42	749,20	810,04
	607,34	769,51	742,10	824,85
	706,24	780,84	784,00	815,95
	647,10	790,22	830,30	800,95
	607,34	780,10	844,10	833,84
	653,56	763,94	891,40	828,84
Amostra 6	640,38	804,84	818,43	852,12
	646,87	777,42	800,93	844,85
	639,50	793,56	760,65	895,95
	644,40	790,90	793,67	874,84
	661,33	780,00	800,03	864,48
	653,40	802,95	815,10	841,03
Amostra 7	638,83	808,85	780,83	806,40
	644,56	795,93	770,83	809,10
	632,32	776,50	788,95	865,80
	655,81	774,44	750,93	796,40
	645,45	798,60	801,94	884,80
	670,45	803,57	825,94	806,40
Amostra 8	641,05	759,72	795,90	818,94
	636,42	770,94	809,60	830,95
	648,78	795,95	770,30	828,95
	636,89	783,73	841,40	848,38
	644,18	785,12	840,97	836,85
	632,83	779,84	784,96	810,82
Amostra 9	647,10	800,20	818,11	804,94
	607,34	845,80	825,95	894,85
	706,24	801,70	789,56	830,84
	647,10	723,00	779,94	860,50
	607,34	835,70	812,00	838,96
	653,56	812,00	804,11	847,00
Amostra 10	647,59	790,61	749,20	806,40
	628,74	755,93	742,10	809,10
	642,77	773,61	784,00	865,80
	631,86	760,00	830,30	796,40
	645,55	797,83	844,10	884,80
	651,72	801,74	891,40	806,40
MÉDIA	653,56	779,59	805,83	818,49
DESVIO PADRÃO	49,63	49,52	46,86	40,25
TAXA DE VARIAÇÃO	6,21	6,35	5,81	4,91

FONTE: Próprio autor.

7.7 APÊNDICE G – Valores encontrados para ensaio de impacto

Figura 42 - Valores encontrados no ensaio de impacto Charpy.

	T/2R	T/DCT(-120)/2R	T/DCT(-150)/2R	T/DCT(-180)/2R
1	3,8	2,90	2,20	1,50
2	4	4,45	1,80	2,10
3	--	4,00	3,10	1,80
4	3,5	3,30	2,60	2,70
5	4,1	5,60	1,90	2,55
6	3,8	3,50	1,69	3,70
7	4	4,80	2,89	2,40
8	--	2,60	2,30	3,40
9	3,5	3,00	2,50	2,70
10	4,1	5,40	2,40	2,80
Média	3,08	3,96	2,34	2,57
Desvio Padrão	1,63	1,06	0,46	0,67
Taxa de Variação	53,16	26,98	19,68	26,12

FONTE: Próprio autor.

7.8 APÊNDICE H – Valores encontrados no ensaio de desgaste

Figura 43 - Valores encontrados no ensaio de desgaste.

	T/2R	T/DCT(-120)/2R	T/DCT(-150)/2R	T/DCT(-180)/2R
Massa Inicial	10,7675	10,1088	9,8625	9,5452
Massa Final	10,7388	10,1000	9,8208	9,5078
PERDA DE MASSA	2,87	0,88	4,17	3,74
Massa Inicial	10,7388	10,1000	9,8208	9,5078
Massa Final	10,5967	10,0870	9,7716	9,4588
PERDA DE MASSA	14,21	1,30	4,92	4,90
Massa Inicial	10,9551	10,0866	9,7716	9,4588
Massa Final	10,8958	10,0388	9,7343	9,423
PERDA DE MASSA	5,93	4,78	3,73	3,58
MEDIA	7,67	2,32	4,27	4,07
DESVIO PADRÃO	5,867	2,141	0,602	0,720
TAXA DE VARIAÇÃO	76,491	92,274	14,080	17,685

FONTE: Próprio autor.