

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO SUB ZERO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL DIN EN 1.4034

Lucas Grilo Mendonça

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Lício Schaeffer

Porto Alegre
2021

CIP - Catalogação na Publicação

Mendonça, Lucas Grilo
Estudo da influência do tratamento térmico sub zero
nas propriedades mecânicas do aço inoxidável DIN EN
1.4034 / Lucas Grilo Mendonça. -- 2021.
55 f.
Orientador: Lírío Schaeffer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Aço inoxidável martensítico. 2. Tratamento
térmico sub zero. 3. microestrutura e propriedades
mecânicas. 4. precipitação de carbonetos. I.
Schaeffer, Lírío, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico este trabalho a meu querido avô
Dr. Domingos Henriques Grilo (in memoriam),
que ao meu lado tanto sonhou com este momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por sua graça e misericórdia, com tantas oportunidades colocadas diante de mim.

Aos meus pais, Maria e Milton, responsáveis pela formação do meu caráter, e que não mediram esforços para que eu tivesse condições de cursar engenharia.

À minha noiva Camila Hermel, pelo companheirismo, paciência, e por todo o apoio para a concretização do meu sonho em tornar-me engenheiro.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lírio Schaeffer, pela enorme disponibilidade, conselhos e direcionamentos desde o primeiro contato, e durante toda a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly, do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, pela disponibilização da infraestrutura para a realização dos ensaios mecânicos, e aos colegas do Grupo de Ensaios Mecânicos do LAMEF, Eng. Diego Vieira, Eng.^a Carolina Fink, Eng. Cleiton Mertz e Leonardo Flor, pelo apoio na execução.

À Mundial SA Produtos de Consumo – unidade Gravataí/RS – empresa na qual tenho muito orgulho de trabalhar, por me incentivar e apoiar na realização deste trabalho. Agradeço especialmente aos meus gestores Hamilton Vaz e Geominario Silva, e aos colegas da engenharia Ivan Schardosim, Lisane Idalino e Eng. Miguel Manfrin.

Finalmente, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente aos professores e colegas do Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, pelos anos de ensinamentos e aprendizados que me proporcionaram.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Aços Inoxidáveis.....	3
2.1.1 Propriedades dos Aços Inoxidáveis Martensíticos.....	5
2.1.2 Propriedades do Aço DIN EN 1.4034.....	6
2.1.3 Tratamentos Térmicos dos Aços Inoxidáveis Martensíticos	7
2.1.4 Processo de Têmpera dos Aços Inoxidáveis Martensíticos	7
2.1.5 Tratamento Sub Zero.....	10
2.1.6 Processo de Revenimento dos Aços Inoxidáveis Martensíticos	11
2.1.7 Diagrama Tempo-Temperatura-Transformação	12
2.1.8 Caracterização da Microestrutura	13
2.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais.....	14
2.2.1 Ensaio de Dureza.....	14
2.2.2 Ensaio de Tração	14
2.2.3 Curva de Engenharia	16
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Material.....	19
3.1.1 Análise de Composição Química.....	19
3.2 Tratamentos Térmicos	19

3.2.1	Têmpera.....	20
3.2.2	Tratamento Sub Zero.....	20
3.2.3	Revenimento	21
3.3	Análise Microestrutural	22
3.3.1	Caracterização da Microestrutura	22
3.3.2	Determinação do Percentual de Carbonetos	22
3.4	Determinação das Propriedades Mecânicas.....	23
3.4.1	Ensaio de Dureza.....	23
3.4.2	Ensaio de Tração	23
3.5	Resumo das Análises e Ensaios Realizados.....	25
4.0	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	26
4.1	Análise de Composição Química.....	26
4.2	Análise Microestrutural	26
4.2.1	Caracterização da Microestrutura	26
4.2.2	Percentual de Carbonetos	31
4.3	Propriedades Mecânicas.....	33
4.3.1	Dureza	33
4.3.2	Curva de Engenharia	34
5.0	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
6.0	CONCLUSÕES	39
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
9.0	APÊNDICES	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de equilíbrio Fe-Cr (Adptado de ASM Handbook Stainless Steels, 1999).....	5
Figura 2.2	Efeito do carbono e nitrogênio na lupa austenítica de ligas Fe-Cr (FORTIS, 2014).....	6
Figura 2.3	Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera (CHIAVERINI, 2003).....	8
Figura 2.4	Efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 4340 (adaptado de COLPAERT, 2008)	12
Figura 2.5	Diagrama TTT para o aço AISI 420 (adaptado de BONIARDI, CASAROLI, 2014).....	13
Figura 2.6	Representação do equipamento utilizado para a realização de ensaios de tração (CALLISTER, 2012).....	15
Figura 2.7	Dimensões representadas esquematicamente em um ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004).....	16
Figura 2.8	Curva tensão-deformação de engenharia (DIETER, 1981)	17
Figura 3.1	Fluxograma apresentando as etapas da realização do procedimento experimental	18
Figura 3.2	(a) Chapas em bobina de aço DIN EN 1.4034 (largura 200 mm e espessura 2,20 mm); (b) Corte de tiras do aço, utilizada na confecção dos CPs.....	19
Figura 3.3	(a) Forno resistivo para pré-aquecimento; (b) Banho de sal para aquecimento/austenitização; (c) Banho de sal para o resfriamento 1	20
Figura 3.4	(a) Câmara de resfriamento sub zero; (b) Detalhe do sistema de controle da válvula reguladora de pressão	21
Figura 3.5	Forno de Convecção para a realização do tratamento térmico de Revenimento	22
Figura 3.6	Desenho utilizado para a confecção dos CPs do ensaio de tração	23
Figura 3.7	CP confeccionado para ensaio de tração	24
Figura 3.8	Prensa servo-hidráulica MTS 810	24

Figura 3.9	Extensômetro utilizado para a medição do alongamento (δ).....	25
Figura 4.1	Microestrutura do material na condição CR – 100x (a) e 400x (b).....	27
Figura 4.2	Microestrutura do material na condição SZ-NA – 100x (a) e 400x (b).....	28
Figura 4.3	Microestrutura do material na condição SZ-90 – 100x (a) e 400x (b).....	29
Figura 4.4	Microestrutura do material na condição SZ-120 – 100x (a) e 400x (b).....	30
Figura 4.5	Microestrutura do material na condição SZ-160 – 100x (a) e 400x (b).....	31
Figura 4.6	Resultados médios de percentual de carbonetos medidos para as condições analisadas	32
Figura 4.7	Resultados de dureza média obtidos para as condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160	34
Figura 4.8	CP após a realização do ensaio de tração	34
Figura 4.9	Curva de engenharia para a condição CR	35
Figura 4.10	Curvas de engenharia para as condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160 .	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações, composições, propriedades mecânicas e aplicações típicas para aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação (adaptado de CALLISTER, 2012).....	4
Tabela 2.2	Normas equivalentes ao aço DIN EN 1.4034 (X46Cr13).....	6
Tabela 2.3	Composição química do aço DIN EN 1.4034 (% em massa)	7
Tabela 2.4	Propriedades mecânicas do aço DIN EN 1.4034 (adaptado de MANFRIN, 2020)	7
Tabela 3.1	Procedimento realizado para a Têmpera do material	20
Tabela 3.2	Condições estabelecidas para avaliação do Tratamento Sub Zero.....	21
Tabela 3.3	Parâmetros do tratamento de Revenimento.....	22
Tabela 3.4	Resumo das análises e ensaios realizados	25
Tabela 4.1	Composição química do material (% em massa)	26
Tabela 4.2	Resultados da análise do percentual de carbonetos.....	32
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios de dureza realizados	33
Tabela 4.4	Propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração	35
Tabela 9.1	Estimativa de custos para a realização do trabalho	42

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de Prova
CR	Condição de Recebimento
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Norm
HRB	Dureza Rockwell B
HRC	Dureza Rockwell C
LAFUN	Laboratório de Fundição
ISO	International Organization for Standardization
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
SZ	Sub Zero
SZ-NA	Condição de Tratamento Térmico sem aplicação de Sub Zero (Não Aplicado)
SZ-90	Condição de Tratamento Térmico com aplicação de Sub Zero à -90°C
SZ-120	Condição de Tratamento Térmico com aplicação de Sub Zero à -120°C
SZ-160	Condição de Tratamento Térmico com aplicação de Sub Zero à -160°C
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área inicial	[mm ²]
A_{e3}	Temperatura de austenitização	[°C]
b_0	Largura inicial	[mm]
b_1	Largura instantânea	[mm]
E	Módulo de Elasticidade	[MPa]
F	Força.....	[N]
l	Comprimento.....	[mm]
l_0	Comprimento inicial.....	[mm]
l_1	Comprimento instantâneo	[mm]
M_F	Final de formação da martensita	[°C]
M_I	Início de formação da martensita	[°C]
P_c	Percentual de carbonetos	[%]
R_e	Tensão de escoamento.....	[MPa]
R_m	Tensão máxima de resistência.....	[MPa]
s_0	Espessura inicial	[mm]
s_1	Espessura instantânea	[mm]
t	Tempo.....	[s]
P_m	Percentual em massa	[%]

SÍMBOLOS GREGOS

Δb	Deformação absoluta em largura.....	[mm]
Δl	Deformação absoluta em comprimento.....	[mm]
Δs	Deformação absoluta em espessura.....	[mm]
δ	Alongamento	[mm]
ε	Deformação relativa	[%]
σ	Tensão de engenharia	[MPa]

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência do tratamento térmico sub zero nas propriedades mecânicas do aço inoxidável DIN EN 1.4034 (X46Cr13/ABNT NBR 5601). Para a realização do tratamento térmico sub zero foram selecionadas as temperaturas de -90, -120 e -160°C. Foram ainda utilizadas, para fins de comparação, amostras do material na sua condição de recebimento – recozido – e sem a aplicação do tratamento sub zero – apenas submetidas à têmpera e revenimento. Os resultados obtidos a partir das análises microestruturais e dos ensaios mecânicos de dureza e tração indicaram a influência do percentual de carbonetos sobre os resultados de dureza do material, sobre a Tensão de Escoamento e Tensão Máxima de Resistência. Os ensaios de tração indicaram similaridades entre os resultados obtidos, em relação às propriedades mecânicas, entre as diferentes temperaturas de sub zero empregadas. Foi observado um aumento dos valores das Tensões de Escoamento (R_e) e Tensões Máximas de Resistência (R_m) de 199 MPa e 119 MPa, respectivamente, para a temperatura de -160°C em relação ao material sem a aplicação deste tratamento.

Palavras chave: aço inoxidável martensítico; tratamento térmico sub zero; microestrutura e propriedades mecânicas; precipitação de carbonetos.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of cryogenic treatments on the mechanical properties of stainless steel DIN EN 1.4034 (X46Cr13 / ABNT NBR 5601). To carry out this study the cryogenic temperatures of -90, -120 and -160°C were selected, For comparison purposes, the material was used in its condition of receipt - annealed - and without the application of cryogenic treatment - only to hardening and tempering. The results obtained from the microstructural analyzes and the mechanical tests of hardness and tensile indicated the influence of the percentage of carbides on the results of hardness of the material, yield strength and ultimate strength. The tensile tests indicated similar results, of mechanical properties for cryogenic temperatures. It was observed an increase of yield strength (Re) and ultimate strength (Rm) of 199 MPa and 119 MPa, to -160°C in relation to the material without the application of this treatment.

Keywords: martensitic stainless steels, cryogenic treatments; microstructure and mechanical properties; carbide precipitation.

1.0 INTRODUÇÃO

A fabricação de itens de cutelaria emprega diversos tipos de materiais, porém algumas classes de aços são reconhecidas pelos profissionais da área como as mais adequadas, tendo em vista o melhor desempenho apresentado, como no caso dos aços inoxidáveis martensíticos. O aço inoxidável martensítico DIN EN 1.4034, por conta de sua resistência ao desgaste e tenacidade, aliadas à boa resistência à corrosão, tem sido utilizado neste mercado para a produção de facas profissionais, de caça, facas táticas e canivetes de bolso, além de lâminas de patinação no gelo e brocas para furação de gelo.

Sabe-se que os aços inoxidáveis com maiores teores de carbono, temperados e revenidos, podem apresentar boa resistência mecânica e elevada dureza, fatores estes os quais são cruciais no bom desempenho dos itens de cutelaria. No entanto, com a competitividade do mercado e a constante busca por melhores desempenhos dos produtos, faz-se necessária a pesquisa por processos os quais possam oferecer resultados cada vez melhores, extraindo o limite de desempenho dos materiais.

A aplicação do Tratamento Térmico de Sub Zero tem sido empregada para a melhoria da resistência ao desgaste, entre outras propriedades dos aços temperados, impactando diretamente no desempenho dos produtos de cutelaria. Desta forma torna-se importante o estudo dos parâmetros deste tratamento, bem como dos impactos sobre as propriedades mecânicas do material.

1.1 Objetivo Principal

Estudar a influência do Tratamento Térmico Sub Zero nas propriedades mecânicas do aço DIN EN 1.4034, de modo a avaliar seu impacto sobre os resultados entre as peças tratadas em diferentes temperaturas.

1.1.1 Objetivos Específicos

Definir, através de ensaios mecânicos de tração e dureza, além de avaliação microestrutural e percentual de carbonetos, qual a relação entre o tratamento térmico sub zero e as propriedades de dureza e resistência à tração.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão em diversos ambientes, especialmente na atmosfera ambiente. Seu elemento de liga predominante é o cromo (Cr); uma concentração de pelo menos 11% (em massa) Cr é necessária. A resistência à corrosão também pode ser melhorada pela adição de níquel (Ni) e molibdênio (Mo) (CALLISTER, 2012).

As composições mais comuns de aços inoxidáveis (por exemplo, 12% Cr, 18% Cr + 8% Ni, etc.) foram desenvolvidas, acidentalmente, no começo do século XX. Novas composições vêm sendo desenvolvidas desde então, de forma sistemática e científica. Como a microestrutura destes aços tem efeito dominante sobre as propriedades, eles são classificados com base na microestrutura a temperatura ambiente. Os efeitos dos diversos elementos de liga sobre a microestrutura dos aços inoxidáveis podem ser apreciados a partir dos diagramas de equilíbrio de fases, embora grande parte dos aços inoxidáveis seja empregada em condições microestruturais fora do equilíbrio termodinâmico (COLPAERT, 2008).

Os aços inoxidáveis são normalmente agrupados em cinco categorias:

Martensíticos: São ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono, em geral, acima de cerca de 0,1%. O aço AISI 410 é o mais comum. A composição química destes materiais intercepta o campo austeníticos no diagrama de fases, sendo, portanto, endurecíveis por tratamento térmico de têmpera. São magnéticos (COLPAERT, 2008).

Ferríticos: São ligas de ferro e cromo essencialmente ferríticas a todas as temperaturas, e que não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Normalmente, têm teores de cromo mais elevados do que os aços martensíticos e têm, naturalmente, menores teores de carbono (COLPAERT, 2008).

Austeníticos: São ligas à base de ferro, cromo (16-30%) e níquel (8-35%) predominantemente austeníticas após tratamento térmico comercial. São, em geral, não-magnéticas (COLPAERT, 2008).

Ferrítico-austeníticos (dúplex): Microestruturas contendo austenita e ferrita em frações aproximadamente iguais são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos, especialmente nitrogênio e apresentam propriedades muito interessantes para diversas aplicações (COLPAERT, 2008).

Endurecíveis por precipitação: Ligas Fe, Cr (12-17%), Ni (4-8%), Mo (0-2%) contendo adições que permitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos intermetálicos (Al, Cu, Ti e/ou Nb) (COLPAERT, 2008).

A Tabela 2.1 lista vários aços inoxidáveis, por classe, juntamente com sua composição, as propriedades mecânicas típicas e as aplicações. Uma ampla variedade de propriedades mecânicas, combinadas com excelente resistência à corrosão, torna os aços inoxidáveis muito versáteis em termos de aplicações (CALLISTER, 2012).

Tabela 2.1 Especificações, composições, propriedades mecânicas e aplicações típicas para aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação.

Número AISI/ ABNT	Número UNS	Composição (Pm*)	Condição	Propriedades Mecânicas			Aplicações Típicas
				Limite de Resistência à Tração - R _m [MPa]	Limite de Escoamento - R _e [MPa]	Ductilidade - ε [%AL em 50 mm]	
Ferríticos							
409	S40900	0,08 C, 11,0 Cr, 1,0 Mn, 0,50 Ni, 0,75 Ti	Recozido	380	205	20	Componentes de exaustão automotivos, tanques para pulverizadores agrícolas
446	S44600	0,20 C, 25 Cr, 1,5 Mn	Recozido	515	275	20	Válvulas (para alta temperatura), câmaras de combustão
Austeníticos							
304	S30400	0,80 C, 19 Cr, 9 Ni, 2,0 Mn	Recozido	515	205	40	Equipamentos para processamentos químicos, vasos criogênicos
316L	S31603	0,03 C, 17 Cr, 12 Ni, 2,5 Mo, 2,0 Mn	Recozido	485	170	40	Construções com solda
Martensíticos							
410	S41000	0,15 C, 12,5 Cr, 1,0 Mn	Recozido T & R	485 825	275 620	20 12	Canos de rifles, cutelaria, peças de motores de jatos
440A	S44002	0,70 C, 17 Cr, 0,75 Mo, 1,0 Mn	Recozido T & R	725 1790	415 1650	20 5	Cutelaria, mancais, instrumentos cirúrgicos
Endurecível por Precipitação							
17-7 PH	S11700	0,09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1,0 Al, 1,0 Mn	Endurecido por precipitação	1450	1310	1-6	Molas, facas, vasos de pressão

* o restante da composição é constituído por ferro (Fe).

Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2012.

2.1.1 Propriedades dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser considerados equivalentes aos aços para têmpera e revenimento (carbono ou ligados), com a diferença principal no alto teor de cromo. O elevado teor de cromo destes aços produz elevadíssima temperabilidade, abaixamento da temperatura M_f e aumento da resistência ao amolecimento no revenimento (COLPAERT, 2008). A Figura 2.1 apresenta o diagrama de equilíbrio ferro-cromo (Fe-Cr), onde é possível observar a influência relação entre estes dois elementos químicos nas fases obtidas do material.

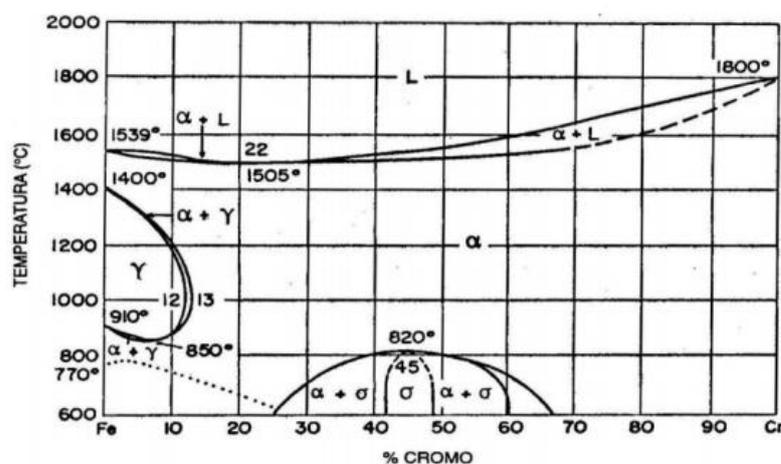


Figura 2.1 Diagrama de equilíbrio Fe-Cr.

Fonte: Adptado de ASM Handbook Stainless Steels, 1999.

Os aços martensíticos são austenitizados a temperaturas relativamente elevadas (925-1070°C), de modo a dissolver completamente os carbonetos para obter Austenita uniforme. O controle do tamanho de grão austeníticos é importante para garantir a tenacidade (COLPAERT, 2008). O tratamento térmico torna-se viável através de um balanço do teor de cromo, de forma que se garanta resistência à corrosão e, ao mesmo tempo, possa-se alcançar uma austenitização completa no aquecimento, dentro da lupa austenítica (área do diagrama onde a microestrutura do material apresenta-se austenítica). A lupa austenítica do sistema Fe-Cr é expandida pelo carbono e nitrogênio, ambos elementos estabilizadores da Austenita, como mostra a Figura 2.2. Assim, maiores teores de carbono e nitrogênio tornam possível mais altas concentrações de cromo nos aços inoxidáveis martensíticos (KWIETNIEWSKI, 2014).

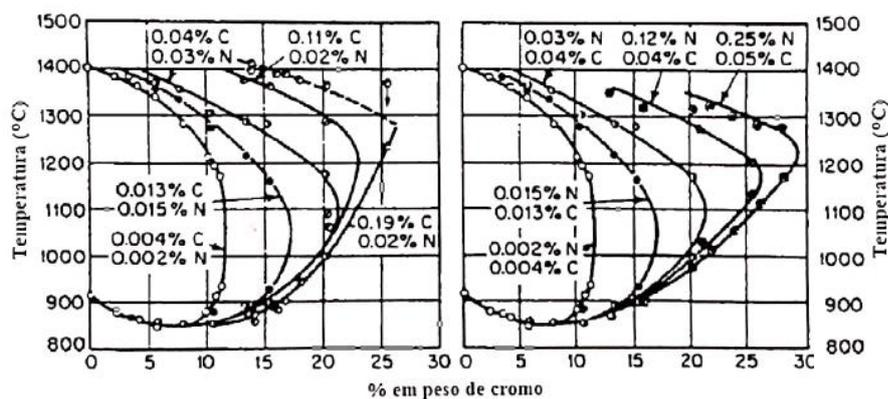


Figura 2.2 Efeito do carbono e nitrogênio na lupa austenítica de ligas Fe-Cr.

Fonte: KWIETNIEWSKI, 2014.

2.1.2 Propriedades do Aço DIN EN 1.4034

A Tabela 2.2 apresenta as normas equivalentes ao aço DIN EN 1.4034 (X46Cr13). Na norma ABNT o material é similar ao aço ABNT NBR 5601.

Tabela 2.2 Normas equivalentes ao aço DIN EN 1.4034 (X46Cr13).

União Europeia		US		ISO		China		Japão	
Padrão	Nome (Núm. Material)	Padrão	Grau (UNS)	Padrão	Grau (ISO)	Padrão	Grau (UNS)	Padrão	Grau
EN 10088-2;	X46Cr13	AISI; ASTM A240/ A240M;	420	ISO 15510	X46Cr13 (4034 – 420-00-1)	GB/T 1220;	3Cr13;	JIS D4303;	SUS420
EN 10088-3	(1.4034)	ASTM A276/ A276M; ASTM A959	(UNS S42000)			GB/T 3280	30Cr13 (S42030)	JIS D4304;	(SUS420J2)
								JIS G4305	

Fonte: The World Material (2021).

Aplicações

Por se tratar de um aço inoxidável martensítico, segundo Kwietniewski (2014), pode ser tratado termicamente (austenitização, têmpera e revenido) para muitas aplicações que requerem não somente resistência à corrosão, mas também boa retenção de “fio”, alta resistência e dureza, bem como resistência ao desgaste.

Desta forma, o aço inoxidável DIN EN 1.4034 é utilizado, na condição como temperado e revenido, em ferramentas de corte, facas para máquinas, ferramentas de medição, rolamentos de esferas, e cutelaria em geral.

Composição Química

A Tabela 2.3 apresenta a composição química padrão do aço DIN EN 1.4034 (X46Cr13) conforme as normas EN 10088-2 e EN 10088-3.

Tabela 2.3 Composição química do aço DIN EN 1.4034 (% em massa).

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,43 – 0,50	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 0,040	≤ 0,015	12,5 – 14,5

Fonte: The World Material (2021).

Propriedades Mecânicas

As informações técnicas acerca das propriedades mecânicas do aço DIN EN 1.4034 são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Propriedades mecânicas do aço DIN EN 1.4034.

Condição	Tensão de escoamento - R _e (MPa)	Tensão máxima de resistência - R _m (MPa)	Deformação relativa - ε (%)	Módulo de Elasticidade - E (Mpa)	Dureza
Recozido	-	≤ 700	-	-	Máximo 94,3 HRB
Temperado e Revenido	1572	1951	2,20	217	55 HRC

Fonte: adaptado de Sandvik 12C27M (2020) e Manfrin (2020).

2.1.3 Tratamentos térmicos dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são submetidos a processos de tratamentos térmicos similares aos empregados nos aços martensíticos convencionais, tais como, por exemplo, o endurecimento por têmpera e posterior revenimento, tendo como objetivo a otimização das propriedades mecânicas. De acordo com Chiaverini (1988), devido à alta temperabilidade conferida pelo alto teor de cromo estes materiais podem, geralmente, ser resfriados ao ar; alguns são resfriados em óleo ou em água (carbono mais baixo).

2.1.4 Processo de Têmpera dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

A têmpera, principal tratamento térmico dos aços inoxidáveis martensíticos, é aplicada para conferir-lhes as máximas dureza e resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2003).

De acordo com Colpaert (2008), o tratamento de têmpera consiste em:

- a) Aquecimento até a temperatura adequada para obter uma microestrutura austenítica.
- b) Manutenção da peça neste patamar de temperatura por um tempo adequado.
- c) Resfriamento em um meio que resulte em velocidade apropriada para obter a formação de martensita.

Devido à grande quantidade de cromo presente nestas ligas, o qual abaixa a temperatura de transformação da martensita e produz elevada temperabilidade, elas podem ser resfriadas em óleo ou até mesmo ao ar (KRAUSS, 1990).

A Figura 2.3 apresenta uma representação esquemática do processo superposta em uma curva tempo-temperatura-transformação (curva TTT), onde M_I e M_F representam as temperaturas iniciais e finais de transformação martensítica. Ae_3 trata-se da temperatura de austenitização do material.

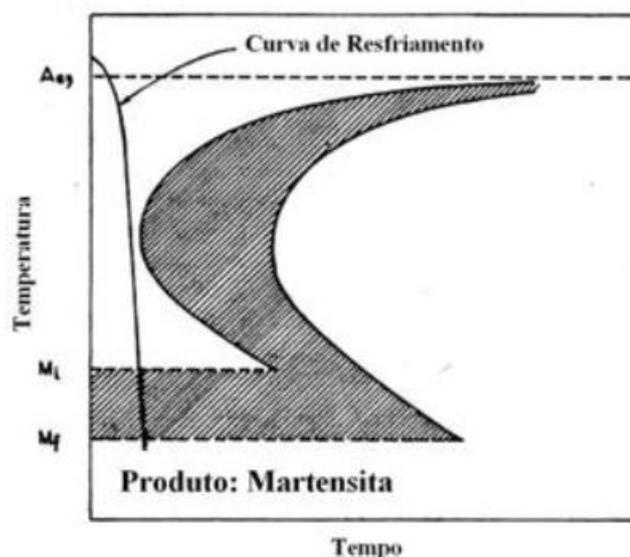


Figura 2.3 Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera.

Fonte: Chiaverini (2003).

Dissolução de Carbonetos

Submeter os Aços Inoxidáveis Martensíticos ao tratamento térmico de têmpera também tem como objetivo a dissolução de parte dos carbonetos formados em processos anteriores. Com esta dissolução tem-se maior teor de cromo e carbono dissolvidos na matriz,

fator este que tem como consequência a elevação das resistências mecânica e à corrosão do material.

Desta forma deve-se definir a temperatura de austenitização, utilizada durante a têmpera, de modo que estes carbonetos sejam dissolvidos. No entanto, deve-se evitar temperaturas excessivamente elevadas, para que não seja formada a ferrita delta, tampouco haja o crescimento acentuado dos grãos austeníticos. De acordo com Colpaert (2008), a faixa de temperaturas situa-se entre 925 e 1070°C.

Austenita Retida

O tratamento térmico de têmpera e o posterior revenimento dos Aços Inoxidáveis Martensíticos tem como objetivo a melhor combinação entre resistência mecânica, resistência à corrosão, ductilidade e tenacidade do material. No entanto, a presença de austenita retida na microestrutura do material pode alterar significativamente as propriedades mecânicas dos aços (NAKAGAWA; MIYAZAKI, 1999). De acordo com Colpaert (2008), a austenita retida pode ter importante efeito na resistência à fadiga. Durante o emprego destas peças a austenita retida pode sofrer transformação martensítica induzida por deformação e causar distorção ou trincas (COLPERT, 2008).

À medida que se aumenta o teor de carbono dos aços, as temperaturas M_I e M_F diminuem. Aumenta, então, a tendência à retenção de austenita, na têmpera (COPLAERT, 2008).

À temperatura ambiente, após o resfriamento para têmpera do material, pode-se ter certa quantidade de austenita retida, pois não foi alcançada a temperatura M_F (final de formação da martensita). A transformação da austenita retida é realizada, entre outros procedimentos, através do resfriamento sub zero – resfriamento após o aquecimento para têmpera a temperaturas abaixo de 0°C.

Entre os fenômenos conhecidos os quais podem explicar a presença da austenita retida no material, sabe-se que a adição de elementos de liga gamagênicos, principalmente o carbono, estabilizam a austenita, aumentando a energia necessária para a produção do mecanismo de cisalhamento na formação da martensita. Tal fato provoca uma diminuição no valor da M_I e, conseqüentemente, da M_F . A temperatura de austenitização ao qual o material é submetido também tem influência, de modo que quanto maior esta temperatura, maior a probabilidade de ocorrer o aumento do tamanho do grão e maior a dissolução de carbono e

elementos de liga na rede, baixando a M_I . Interromper ou diminuir a velocidade de resfriamento tende a ocasionar o alívio das tensões e a difusão, reduzindo assim a força motriz para a formação da martensita, dificultando a mobilidade das interfaces martensita/austenita levando a redução da M_I (COLLINS, 1996). Outros elementos de liga os quais promovem a estabilização da austenita são Co, Cu, Mn, Ni e N (KRAUSS, 1990).

2.1.5 Tratamento Sub Zero

O Tratamento Sub Zero é um dos métodos para a transformação da austenita retida, e além disso tem por objetivo melhorar a estabilização da martensita (HUANG, 2003).

Este tratamento minimiza o teor de austenita residual através do abaixamento da temperatura da peça em direção à M_F , enquanto a dureza do material é elevada com o aumento do percentual de martensita na estrutura (JUSTE, ALMEIDA, ANTÔNIO DE PAULA, 1986).

É importante observar que, quanto mais tempo a austenita retida for mantida a temperatura ambiente, menos efetivo é o tratamento sub zero em transformá-la em martensita (COLPAERT, 2008). Desta forma, o material deve ser submetido a este tratamento tão logo atinja a temperatura ambiente.

A maior fração da austenita retida é transformada entre -80°C e -110°C , sendo que apenas uma pequena quantidade transforma-se entre as temperaturas de -110°C e -196°C . A decomposição da martensita e a precipitação de carbonetos ultrafinos são semelhantes no revenimento, diferindo apenas pelo fato de que as transformações ocorrem a baixas temperaturas, de modo que os precipitados sejam muito menores e difusos (MENG, TAKASHIRA, AZUMA, SOHMA, 1994).

Segundo Kamody (1998), não apenas a austenita retida é transformada em martensita, mas ocorre também a alteração da morfologia da martensita de tetragonal para octaedral. Após, grande quantidade de austenita retida foi transformada em martensita e decomposta. Ao revenir esta martensita ocorrerá a precipitação de finos carbonetos ($0,1 - 5,0 \mu\text{m}$), com distribuição homogênea, produzindo maior resistência e tenacidade na matriz, elevando desta forma a resistência ao desgaste (YUN, XIAOPING, HONGSHEN, 1998). Segundo Barron (1982), a melhoria na resistência ao desgaste pode chegar a 28%. Ainda segundo Prieto, Ipiña e Tuckart (2014), pode-se observar um aumento da dureza atribuído à precipitação de pequenos carbonetos secundários, e sua distribuição fina ao longo do volume do material. O

tratamento criogênico refina os carbonetos secundários, aumentam sua quantidade e promove uma distribuição mais uniforme na estrutura química (DAS, DEY, RAY, 2010).

De acordo com Chiaverini (2003) e Colpaert (2008), o tratamento sub zero é positivo sob o ponto de vista de melhora de várias propriedades, tais como a resistência ao desgaste e a fadiga dos aços inoxidáveis martensíticos.

2.1.6 Processo de Revenimento dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

As microestruturas martensíticas, diretamente obtidas da têmpera têm, em geral, um nível de tensões residuais excessivo e ductilidade e tenacidade muito baixas para permitir seu emprego na maior parte das aplicações (COLPAERT, 2008). É necessária a realização do revenimento – tratamento térmico posterior à têmpera – o qual produz alterações microestruturais e alívio das tensões recorrentes da têmpera, permitindo a utilização das peças.

O tratamento térmico de revenimento consiste em um aquecimento do material em temperaturas inferiores à sua temperatura de austenitização (tratamento subcrítico), aumentando assim a sua ductilidade e a tenacidade, através da conversão da martensita numa estrutura de finos carbonetos de liga precipitados em uma matriz ferríticas (KRAUSS, 1990). Após o aquecimento do material, este deve permanecer na temperatura estabelecida por um determinado período de tempo e depois resfriar ao ar.

A martensita é um constituinte metaestável. O aquecimento, mesmo abaixo da zona crítica, favorece a transformação em fases mais próximas do equilíbrio. A Figura 2.4 apresenta as alterações de propriedades mecânicas que ocorrem no revenimento de aços. O comportamento geral é a redução da dureza e da resistência mecânica, e aumento da ductilidade.

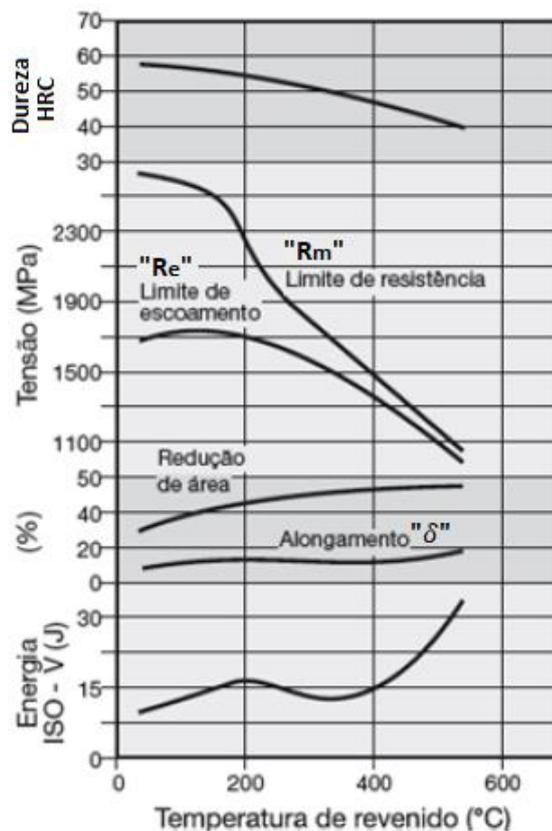


Figura 2.4 Efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 4340.
Fonte: Adaptado de Colpaert (2008).

2.1.7 Diagrama Tempo-Temperatura-Transformação

Os diagramas TTT, ou diagramas Tempo-Temperatura-Transformação, são formados por curvas as quais apresentam o início e término de transformações microestruturais dos aços e ferros fundidos, originadas a partir de tratamentos térmicos. Desta forma, o diagrama apresenta a microestrutura obtida por meio de um resfriamento a diferentes velocidades, em diferentes temperaturas, para um dado material.

Na Figura 2.5 pode-se observar o diagrama TTT para o aço AISI 420, similar ao aço inoxidável DIN EN 1.4034, material tratado no presente trabalho.

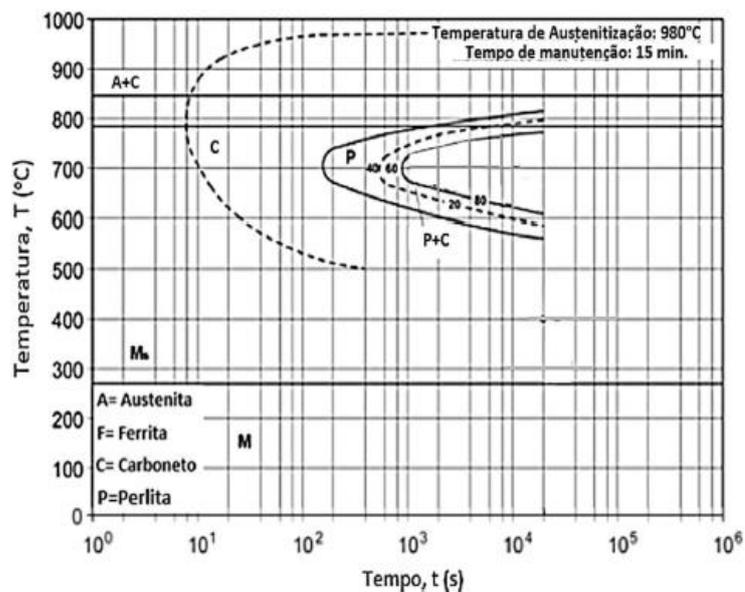


Figura 2.5 Diagrama TTT para o aço AISI 420.

Fonte: Adaptado de Boniardi, Casaroli (2014).

2.1.8 Caracterização da Microestrutura

O tamanho e a forma do grão são apenas duas características do que é denominado microestrutura (CALLISTER, 2012).

A caracterização dos metais trata-se de uma análise com padrões qualitativos ou quantitativos para a identificação da classificação do metal. A caracterização qualitativa tem como objetivo a determinação dos constituintes do material, enquanto a quantitativa busca quantificar os elementos presentes, como por exemplo as concentrações de cada fase, ou, de acordo com Colpaert (2008), frações volumétricas de algum componente.

Microscopia Ótica

Na maioria dos materiais os seus constituintes possuem dimensões microscópicas, com diâmetros que podem ser da ordem de micra e seus detalhes devem ser investigados utilizando-se algum tipo de microscópio (CALLISTER, 2012).

Dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, a mais comum é a microscopia ótica. Neste caso, emprega-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador (COLPAERT, 2008).

2.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas através da realização de experimentos de laboratório cuidadosamente planejados, que reproduzem da forma mais fiel possível às condições de serviço (CALLISTER, 2012).

2.2.1 Ensaio de Dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (CALLISTER, 2012). Segundo Dieter (1981), existem três tipos gerais de medidas de dureza dependendo da maneira em que o teste é realizado: dureza ao risco, dureza à penetração e dureza dinâmica ou de rebote. Apenas a dureza à penetração é de grande interesse para os metais usados em engenharia. Ainda de acordo com Dieter (1981), esta propriedade fornece informações sobre a resistência de um metal e seu tratamento térmico.

Ensaio de Dureza Rockwell

Os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois são muito simples de executar e não existem quaisquer habilidades especiais. Os penetradores incluem esferas de aço endurecidas ou um penetrador cônico de diamante, usado para os materiais mais duros (CALLISTER, 2012).

Com esse sistema, um número de dureza é determinado pela diferença na profundidade de penetração resultante da aplicação de uma carga inicial menor, seguida por uma carga principal maior (CALLISTER, 2012).

2.2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração trata-se de um ensaio destrutivo, submetendo o material a um esforço uniaxial a fim de alongá-lo e deformá-lo até sua ruptura. De acordo com Perini (2008), a partir deste ensaio é possível conhecer o comportamento dos materiais em relação às tensões de tração, identificar quais os limites de tração que suportam – tensão de escoamento e tensão máxima de resistência dos materiais – e a partir de que momento se rompem.

A imagem da Figura 2.6 apresenta, esquematicamente, um equipamento utilizado para a realização de ensaios de tração, o qual promove o alongamento do CP à velocidade

constante, medindo simultaneamente a força aplicada (F) e o deslocamento (δ) resultante. Uma célula de carga acoplada ao equipamento realiza a medição da força instantânea (F), e um extensômetro acoplado ao CP mede o deslocamento (δ).

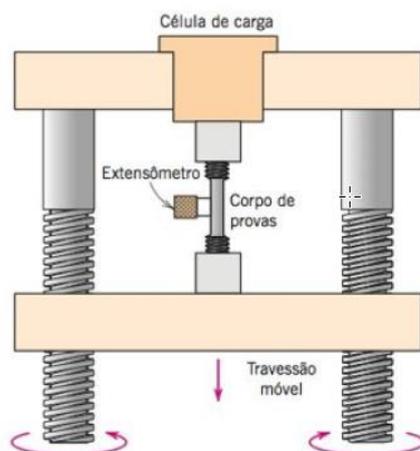


Figura 2.6 Representação do equipamento utilizado para a realização de ensaios de tração.
Fonte: Callister (2012)

O ensaio de tração, com o auxílio de um sistema computacional, apresenta como resultado um gráfico de linhas com os valores da força (F) versus deformação absoluta (Δl). Estas características, de acordo com Callister (2012), são dependentes do tamanho do CP.

A partir da realização do ensaio e devidas medições/registros dos dados de força (F) e comprimento (l), juntamente aos dados das dimensões da seção transversal do CP, torna-se possível a obtenção das tensões e deformações relativas do material.

Desta forma, a tensão de engenharia (σ) é definida pela relação apresentada na Equação 1.

$$\sigma = F/A_0 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde F é a força instantânea aplicada em uma direção perpendicular à seção transversal do corpo de provas, em unidades de newton (N), e A_0 é a área da seção transversal original antes da aplicação de qualquer carga (em mm^2) (CALLISTER, 2012).

As deformações absolutas são determinadas em função dos parâmetros do ensaio, através das dimensões as quais podem ser observadas na representação esquemática da Figura 2.7.

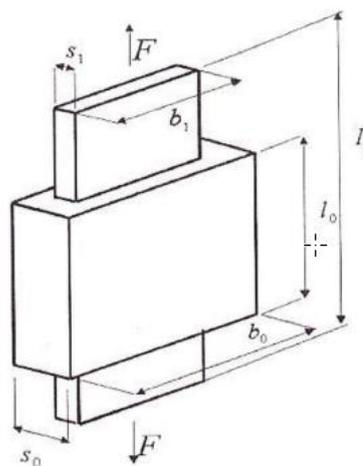


Figura 2.7 Dimensões representadas esquematicamente em um ensaio de tração.

Fonte: Schaeffer (2004).

As deformações absolutas são apresentadas nas Equações 2, 3 e 4, levando em consideração as dimensões apresentadas na Figura 2.5.

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (\text{em comprimento}) \quad \text{Eq. 2}$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (\text{em largura}) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad (\text{em espessura}) \quad \text{Eq. 4}$$

As deformações relativas (ε), ou deformações de engenharia, na direção do comprimento (l) são dadas pelas Equações 5 e 6.

$$\varepsilon = [(l_1 - l_0)/l_0] \times 100 \text{ [%]} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\varepsilon = [(\Delta l)/l_0] \times 100 \text{ [%]} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde Δl é o alongamento (deformação no comprimento do corpo de prova), l_0 e l_1 são respectivamente os comprimentos inicial e final (instantâneo) do CP (DIETER, 1981).

2.2.3 Curva de Engenharia

A tensão é obtida, segundo Dieter (1981), dividindo-se a força (F) pela área inicial (A_0) da seção reta do CP. Através das Equações 5 e 6 obtém-se a deformação relativa para a construção da curva de engenharia.

Um exemplo de curva de engenharia é apresentado esquematicamente na Figura 2.8.

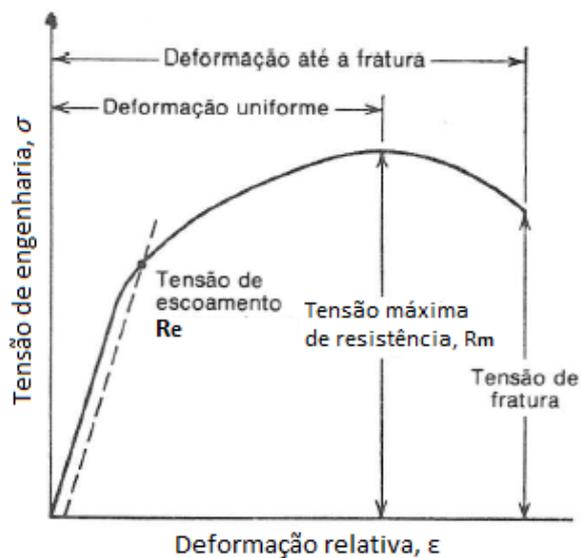


Figura 2.8 Curva tensão-deformação de engenharia.

Fonte: Dieter (1981).

Tensão de Escoamento, Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade

A tensão de escoamento (R_e) trata-se do parâmetro a partir do qual inicia-se o encruamento do material, enquanto a tensão máxima (R_m) refere-se à resistência máxima à tração. Após atingir a tensão máxima, o material (CP) sofre estricção, não deformando de modo uniforme, até ocorrer a sua ruptura (tensão de fratura – Figura 2.8).

A inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é uma medida de rigidez do material. Quanto maior é o módulo de elasticidade, menor é a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada carga (DIETER, 1981).

De acordo com Callister (2012), a partir da relação conhecida como lei de Hooke (Equação 7), obtém-se a constante de proporcionalidade E (módulo de elasticidade).

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{Eq. 7}$$

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental consistiu na realização dos tratamentos térmicos de têmpera, sub zero em diferentes temperaturas e posterior revenimento. Posteriormente foram realizadas as análises e ensaios, tais como análise de composição química e microestrutural, e ensaios de dureza e tração.

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta as etapas do procedimento experimental.

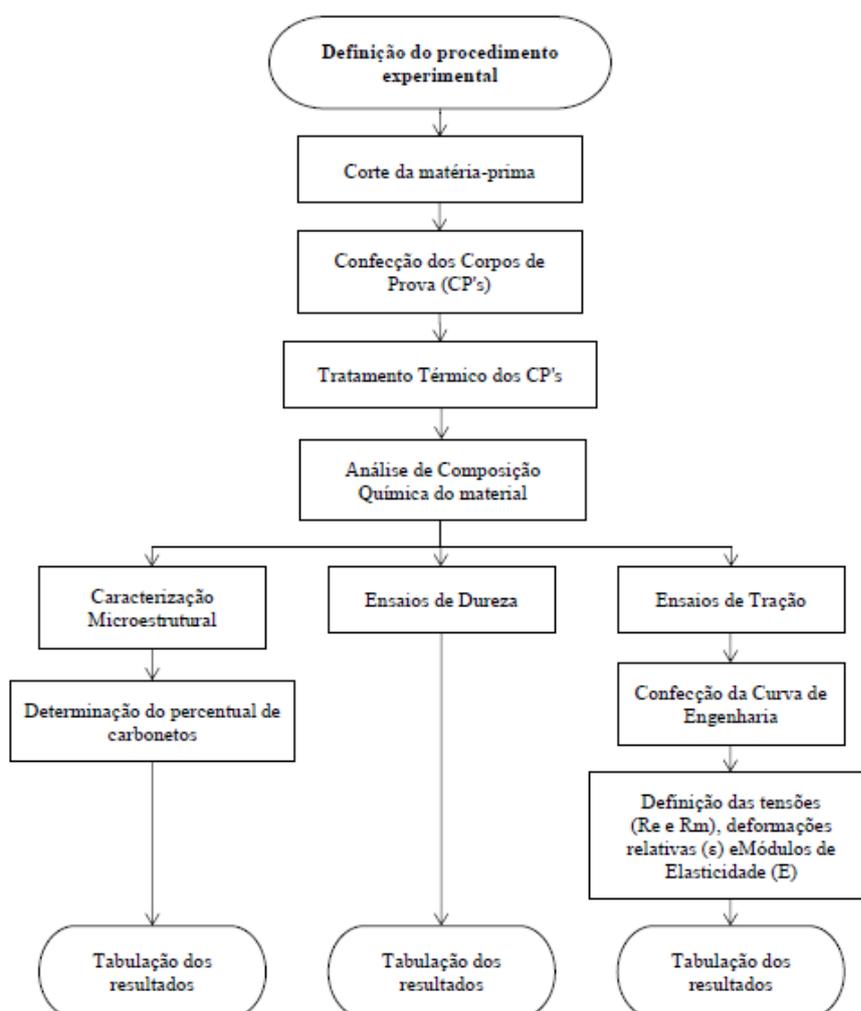


Figura 3.1 Fluxograma apresentando as etapas da realização do procedimento experimental.

3.1 Material

O material utilizado consiste no Aço Inoxidável Martensítico correspondente à norma DIN EN 1.4034 (X46Cr13), doado por uma empresa do setor de Cutelaria do município de Gravataí/RS – Brasil.

Os corpos de prova (CP) utilizados nos experimentos foram confeccionados a partir de amostras fornecidas em tiras, provenientes de uma bobina do material, conforme apresentado nas imagens da Figura 3.2.

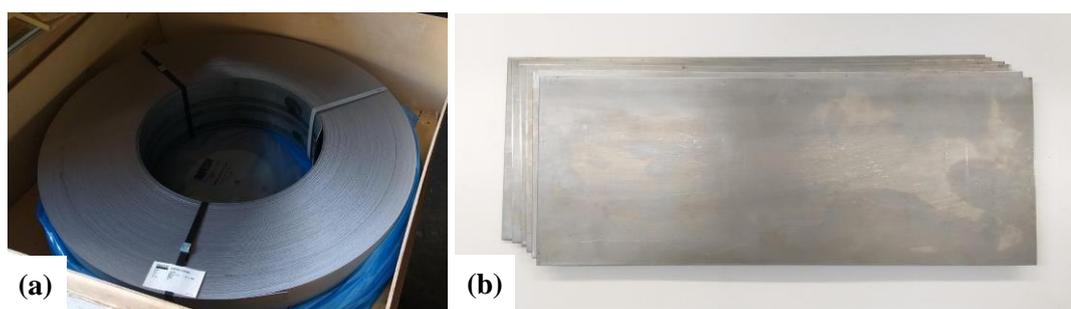


Figura 3.2 (a) Chapas em bobina de aço DIN EN 1.4034 (largura 200 mm e espessura 2,20 mm); (b) Corte de tiras do aço (largura 200 mm e comprimento 500 mm), utilizadas na confecção dos CPs.

3.1.1 Análise de Composição Química

A análise da composição química do material utilizado foi realizada através de espectrometria de emissão óptica, no Laboratório de Fundição (LAFUN) da UFRGS. Os resultados são obtidos em percentual (%) em massa para cada elemento químico.

3.2 Tratamentos Térmicos

O material (CPs) foi submetido aos tratamentos térmicos de Têmpera, Sub Zero e Revenimento. Foram utilizados os mesmos parâmetros de Têmpera e Revenimento para todos os CPs, variando-se apenas a temperatura do resfriamento Sub Zero, sendo que um dos CPs não foi submetido a este processo – apenas Têmpera e Revenimento.

3.2.1 Têmpera

Os CPs foram pré-aquecidos em forno resistivo, posteriormente aquecidos à temperatura de austenitização em forno de banho de sal, resfriados para a têmpera também em forno de banho de sal e posteriormente ao ar, conforme as orientações do fornecedor do material. As imagens da Figura 3.3 apresentam os equipamentos utilizados, enquanto a Tabela 3.1 apresenta o procedimento realizado, o qual foi aplicado em todos os CPs (exceto os CPs na condição de recebimento – CR).



Figura 3.3 (a) Forno resistivo para pré-aquecimento; (b) Banho de sal para aquecimento/austenitização; (c) Banho de sal para o resfriamento 1.

Tabela 3.1 Procedimento realizado para a Têmpera do material.

Etapa	Temperatura	Tempo	Meio
Pré-Aquecimento	400°C	30 minutos	Forno Resistivo
Aquecimento (austenitização)	1.060°C	10 minutos	Banho de Sal
Resfriamento 1	160°C	5 minutos	Banho de Sal
Resfriamento 2	~ 25°C (temperatura ambiente)	Até atingir a temperatura	Ao ar

3.2.2 Tratamento Sub Zero

O Tratamento Sub Zero foi realizado após a Têmpera, quando os CPs atingiram a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C), utilizando-se uma câmara de resfriamento com alimentação de Nitrogênio Líquido sob pressão. O equipamento é apresentado nas imagens da Figura 3.4.

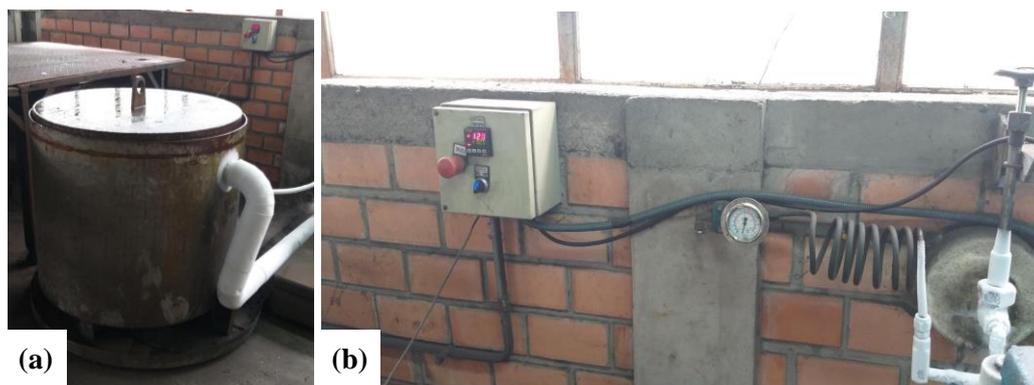


Figura 3.4 (a) Câmara de resfriamento sub zero; (b) Detalhe do sistema de controle da válvula reguladora de pressão.

Tendo em vista que o objetivo do presente trabalho é a avaliação da influência deste tratamento sobre as propriedades mecânicas do material, foram estabelecidas quatro condições para avaliação, as quais são apresentadas na Tabela 3.2. Os parâmetros de temperatura selecionados definem a nomenclatura dos CPs utilizada durante a realização do trabalho, conforme apresentado na primeira coluna da Tabela.

Tabela 3.2 Parâmetros estabelecidos para avaliação do Tratamento Sub Zero.

Condições (Nomenclatura dos CPs)	Parâmetros	
	Temperatura	Tempo
SZ-NA	N/A*	N/A
SZ-90	-90°C	40 minutos
SZ-120	-120°C	40 minutos
SZ-160	-160°C	40 minutos

* Nesta condição não foi aplicado o Tratamento Sub Zero.

3.2.3 Revenimento

O tratamento térmico de Revenimento foi realizado em forno de Convecção – apresentado na Figura 3.5 – após o Tratamento Sub Zero, quando os CPs atingiram a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). Os parâmetros de temperatura e tempo são apresentados na Tabela 3.3, tendo sido definidos de acordo com as orientações do fornecedor do material, e aplicados em todos os CPs. O resfriamento, posterior a este tratamento, foi realizado à temperatura ambiente.



Figura 3.5 Forno de Convecção para a realização do tratamento térmico de Revenimento.

Tabela 3.3 Parâmetros do tratamento de Revenimento.

Etapa	Temperatura	Tempo	Meio
Revenimento	300°C	1 hora e 30 minutos	Forno de Convecção

3.3 Análise Microestrutural

A análise microestrutural consistiu em caracterização da microestrutura e determinação do percentual de carbonetos em cada uma das condições avaliadas.

3.3.1 Caracterização da microestrutura

A caracterização da microestrutura foi realizada no Laboratório de Metalurgia de uma empresa do ramo de Cutelaria, localizada no município de Gravataí/RS – Brasil, seguindo-se a norma “Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento” ABNT NBR 13284-1995. Para a revelação da microestrutura foi utilizado o reagente Vilella (1 g Ácido Pírico + 5 mL HCl + 100 mL Álcool Etfílico).

3.3.2 Determinação do Percentual Carbonetos

As medições do percentual de carbonetos foram realizadas a partir das metalografias obtidas no item 3.3.1 – Caracterização da microestrutura – utilizando-se o software de

plataforma livre “ImageJ”, o qual possibilita a quantificação de microconstituintes em metais utilizando metodologias de análise de imagens.

3.4 Determinação das Propriedades Mecânicas

Para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza e de tração.

3.4.1 Dureza

As medições de dureza dos CPs foram realizadas no Laboratório de Metalurgia de uma empresa do ramo de Cutelaria, localizada no município de Gravataí/RS – Brasil, com o auxílio de um Durômetro Universal Acco Wilson Instrument Rockwell, seguindo-se a norma “Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell” ABNT NBR-ISO 6508-1/2019. Os ensaios foram realizados nas escalas Rockwell B (HRB) – para o material na condição de recebimento (CR) – e Rockwell C (HRC) – para o material nas condições de tratamento térmico.

3.4.2 Ensaio de Tração

Para fins de obtenção das principais propriedades mecânicas do material em cada parâmetro de Tratamento Sub Zero empregada, além da condição de recebimento (CR), foram realizados ensaios de tração, através dos quais é possível verificar características tais como: tensão de escoamento (R_e), tensão máxima de resistência (R_m), deformação relativa (ϵ) e módulo de elasticidade (E).

Os CPs foram confeccionados conforme apresentado na Figura 3.6, seguindo-se as diretrizes para a realização do ensaio conforme a norma técnica ABNT NBR ISO 6892-1/2013-versão corrigida 2018 (ASTM E8/E8M-09).

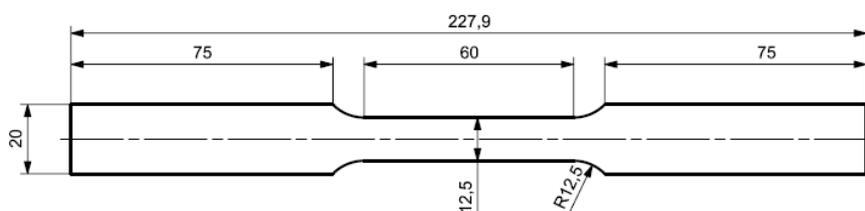


Figura 3.6 Desenho utilizado para a confecção dos CPs do ensaio de tração.

O corte dos CPs foi realizado em eletro-erosão à fio paralelamente ao sentido de laminação (0°). A Figura 3.7 apresenta a imagem de um CP confeccionado.



Figura 3.7 CP confeccionado para ensaio de tração.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, utilizando-se uma máquina servo-hidráulica MTS 810, com capacidade de 10 kN. A imagem da Figura 3.8 apresenta o equipamento utilizado.

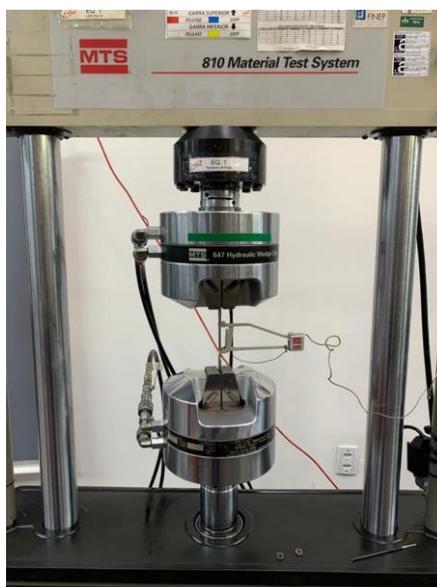


Figura 3.8 Prensa servo-hidráulica MTS 810.

A coleta dos dados levou em consideração três ensaios válidos para cada condição estabelecida (CR, SZ-NA, SZ-90, SZ-120, SZ-160), utilizando para cada ensaio um CP.

Foi considerado um comprimento útil inicial (l_0) de medição do alongamento de 50 mm – representado na Figura 3.9. Para mensurar o alongamento (δ) um extensômetro foi fixado no CP na marcação de l_0 , conforme apresentado na Figura 3.5.

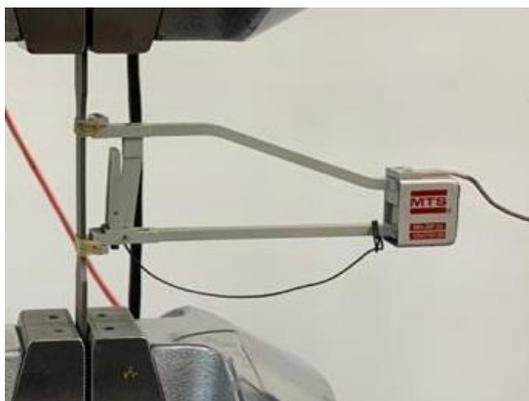


Figura 3.9 Extensômetro utilizado para a medição do alongamento (δ).

Para a visualização do comportamento de deformação dos CPs sob uma força de tração uniaxial, obtendo-se os valores das principais tensões que caracterizam os materiais (R_e e R_m) e o módulo de elasticidade (E), os dados obtidos nos ensaios de tração foram utilizados para a geração das curvas de engenharia ($\sigma \times \varepsilon$).

A tensão de engenharia (σ) para cada condição foi definida dividindo-se a força aplicada (F) pela área da seção transversal inicial (A_0) do CP. A deformação de engenharia (ε) foi calculada através da relação do alongamento sofrido pelo CP em relação ao seu comprimento inicial ($\Delta l/l_0$).

3.5 Resumo das Análises e Ensaios realizados

A Tabela 4.4 apresenta, em resumo para melhor visualização, a relação de análises e ensaios realizados em cada condição.

Tabela 3.4 Resumo das análises e ensaios realizados.

Condição	Composição Química	Caracterização Microestrutural	Percentual de Carbonetos	Ensaio de Dureza	Ensaio de Tração
CR	X	X	-	X	X
SZ-NA	-	X	X	X	X
SZ-90	-	X	X	X	X
SZ-120	-	X	X	X	X
SZ-160	-	X	X	X	X

4.0 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Análise de Composição Química

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos a partir da análise de composição química realizada em uma amostra do material utilizado, bem como a especificação para o aço DIN EN 1.4034 (conforme indicado na Tabela 2.3), para comparação.

Tabela 4.1 Composição química do material (% em massa).

Item	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	V
Material utilizado	0,457	0,590	0,510	0,026	0,013	12,65	0,139	0,123	< 0,003	0,020
Especificação DIN EN 1.4034	0,43 - 0,50	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 0,40	≤ 0,015	12,5 - 14,5	-	-	-	-

A partir dos resultados observa-se que o material utilizado corresponde à especificação para o aço DIN EN 1.4034.

4.2 Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada no sentido transversal, na região central do material, nas condições CR, SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160.

4.2.1 Caracterização da Microestrutura

As imagens da Figura 4.1 apresentam a microestrutura do material em sua condição de recebimento – CR – nas magnitudes 100x (a) e 400x (b). Pode-se observar que o material é fornecido no estado recozido, com microestrutura composta por ferrita.

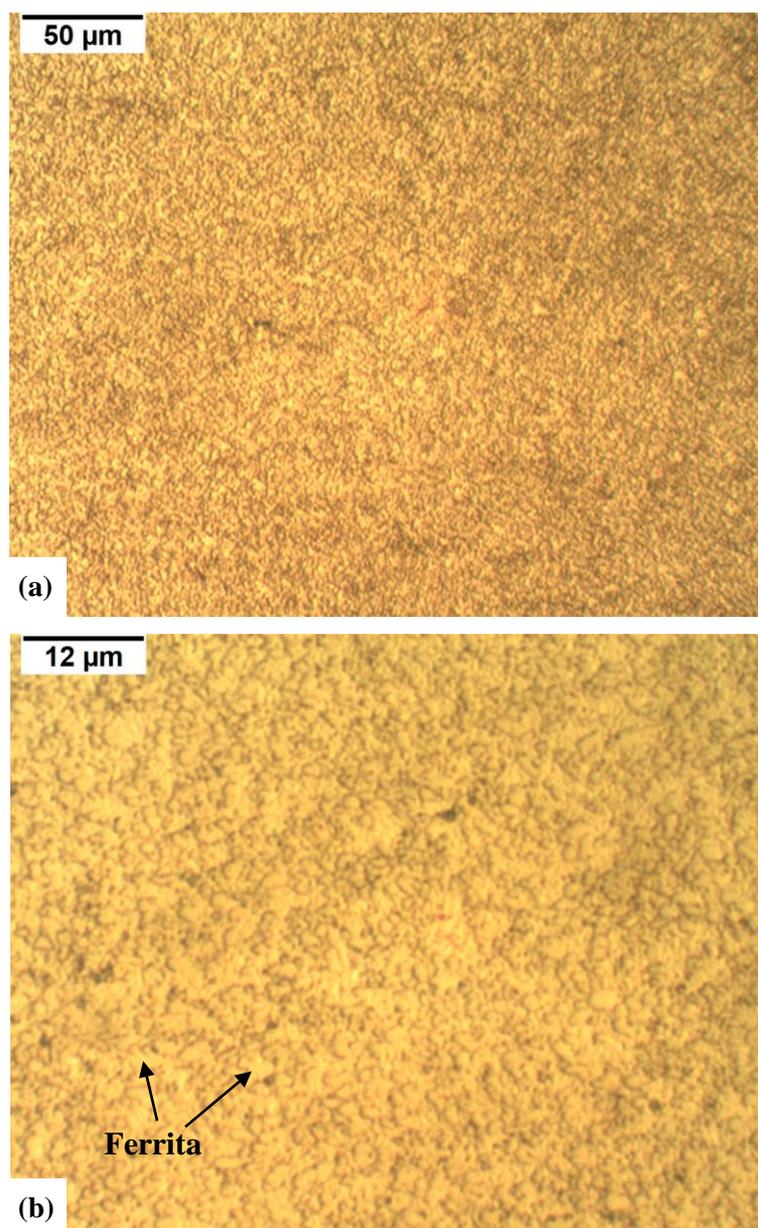


Figura 4.1 Microestrutura do material na condição CR (Condição de Recebimento) – 100x (a) e 400x (b).

Nas Figuras 4.2 a 4.5 são apresentadas imagens da microestrutura das condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160. Pode-se observar que as diferentes condições apresentam microestruturas similares, sendo compostas por martensita revenida e carbonetos secundários – estes são observados com maior evidência nas imagens (b) – 400x. É possível notar variação na concentração (percentual) de carbonetos presentes na microestrutura entre as diferentes condições analisadas. Esta característica foi avaliada no item 4.2.2 – Percentual de carbonetos.

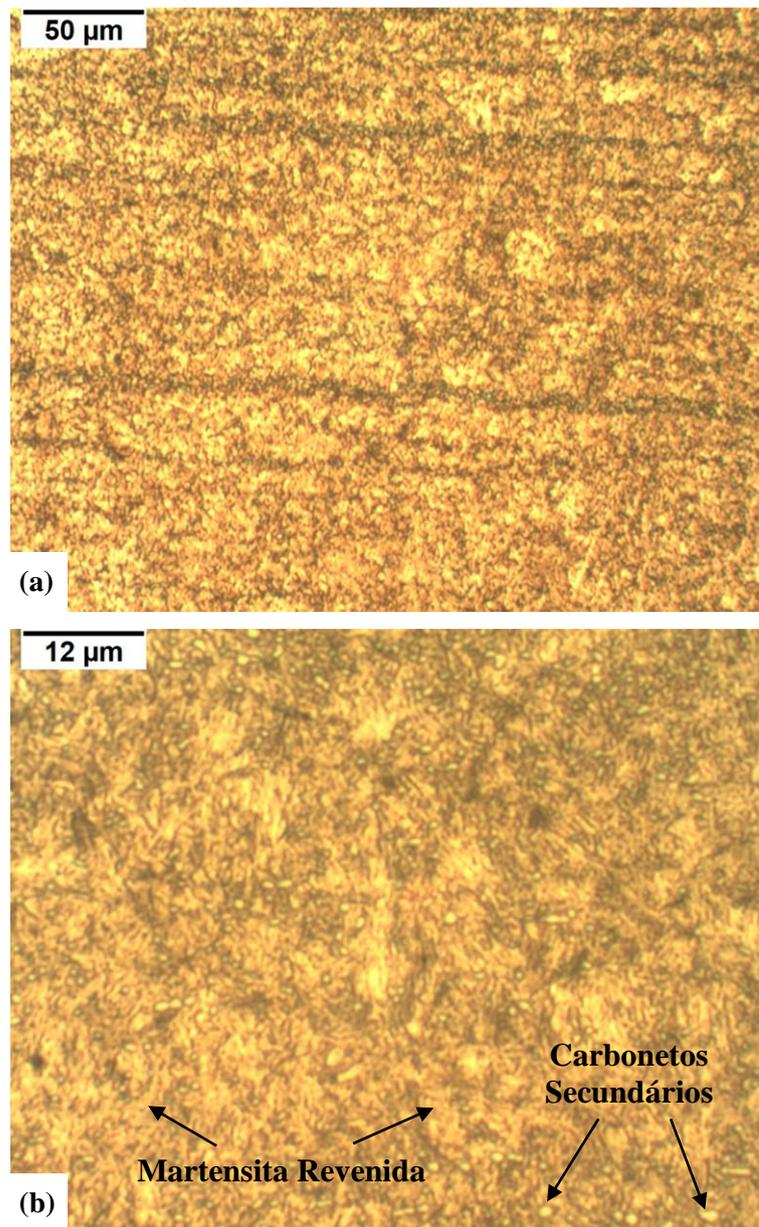


Figura 4.2 Microestrutura do material na condição SZ-NA (sem tratamento sub zero) – 100x (a) e 400x (b).

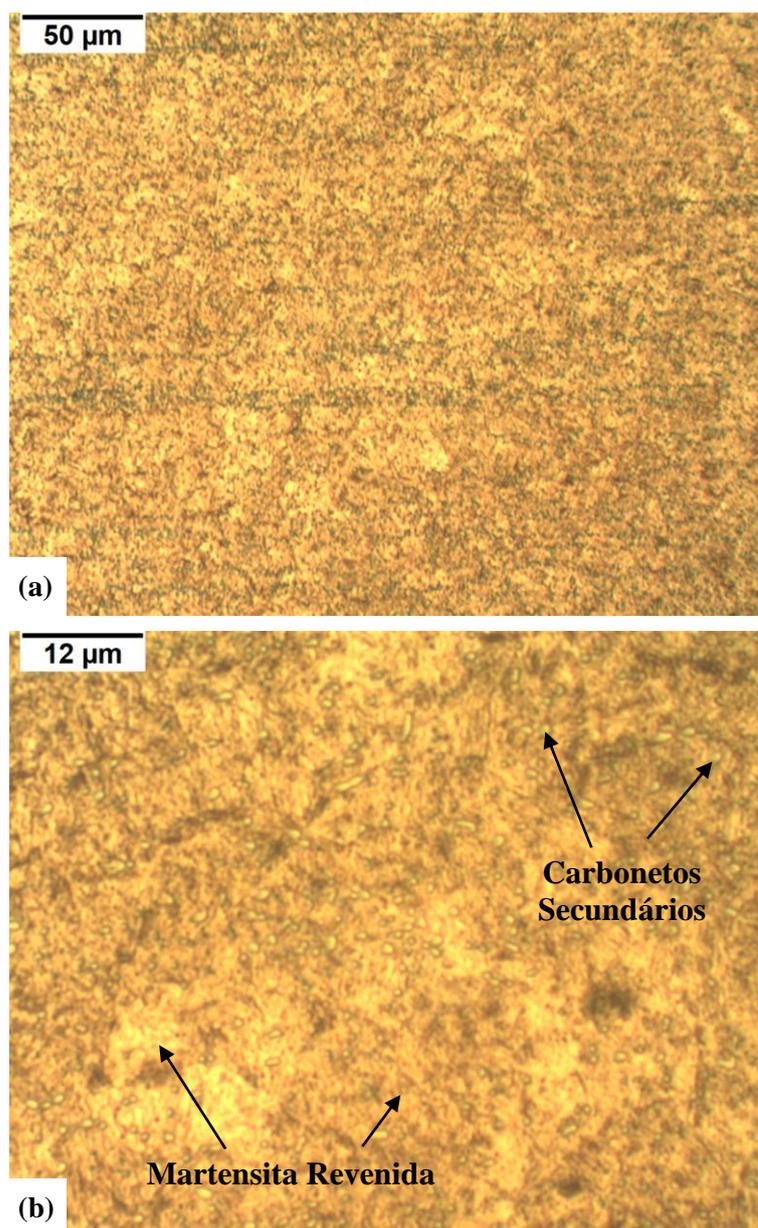


Figura 4.3 Microestrutura do material na condição SZ-90 (tratamento sub zero à -90°C) – 100x (a) e 400x (b).

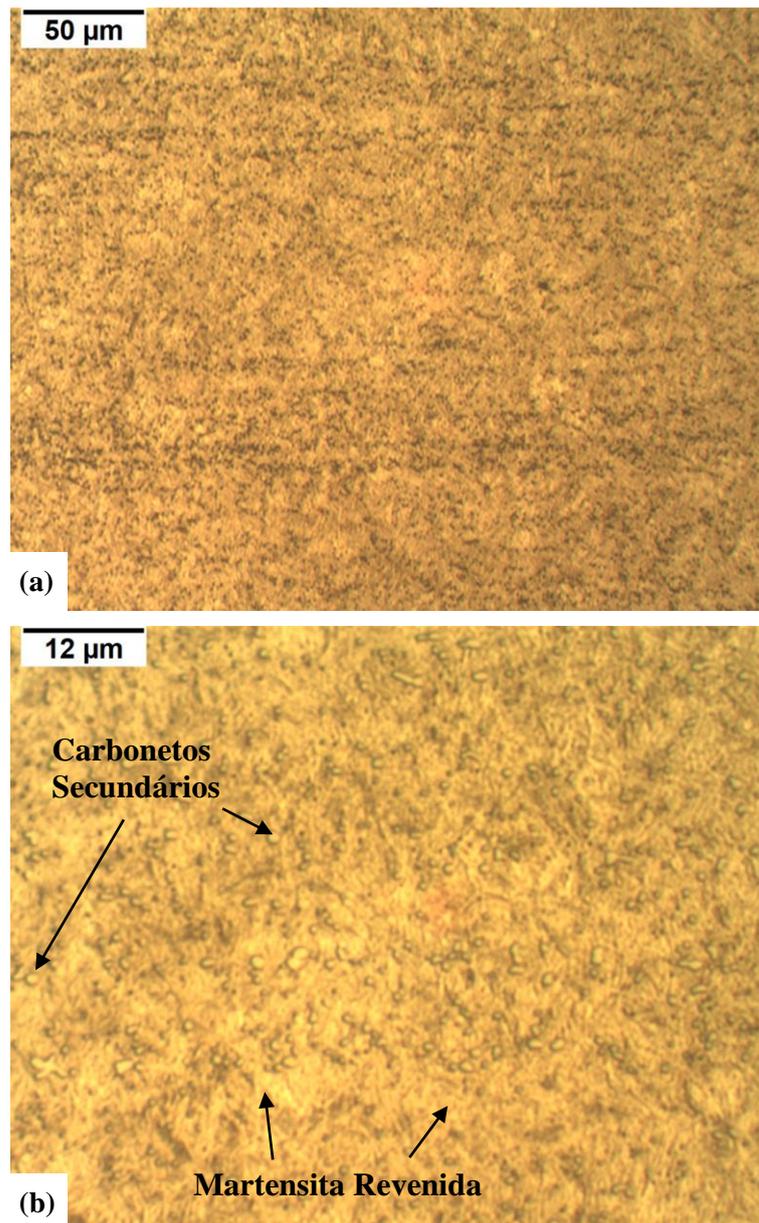


Figura 4.4 Microestrutura do material na condição SZ-120 (tratamento sub zero à -120°C) – 100x (a) e 400x (b).

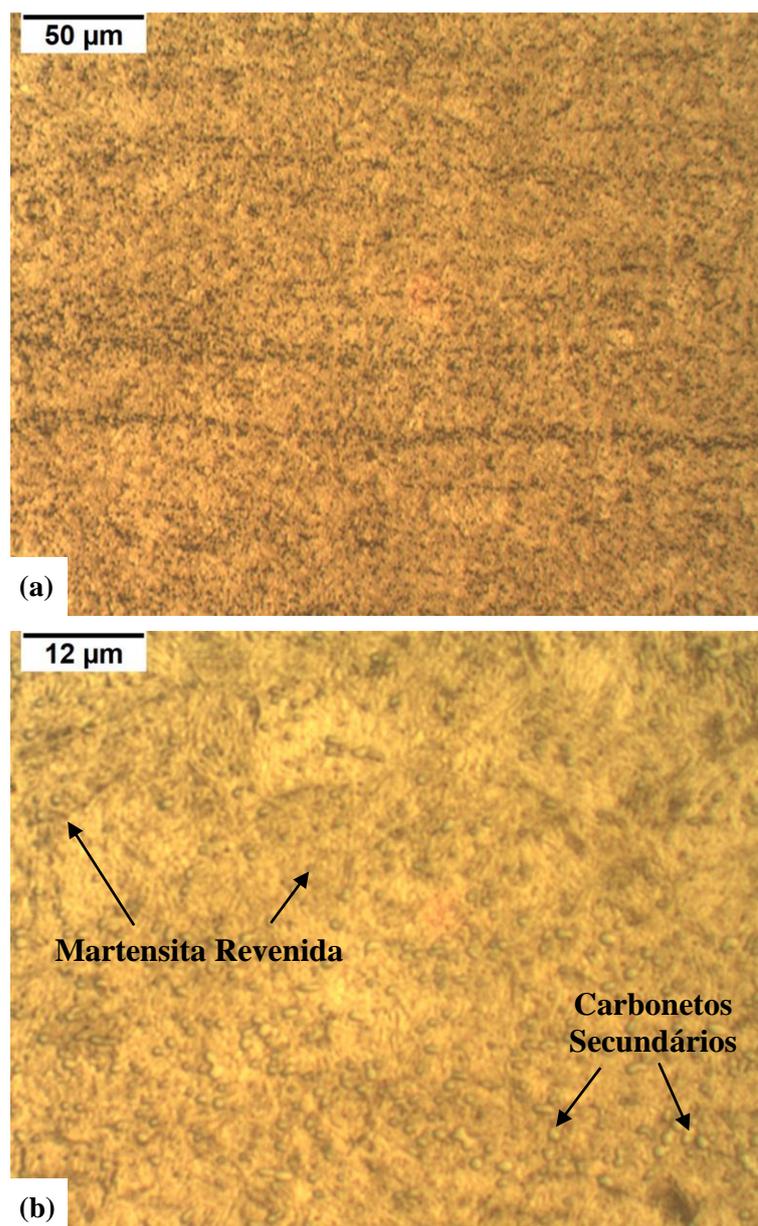


Figura 4.5 Microestrutura do material na condição SZ-160 (tratamento sub zero à -160°C) – 100x (a) e 400x (b).

4.2.2 Percentual de Carbonetos

Os resultados das medições do percentual de carbonetos, obtidos a partir da análise das metalografias com o software “ImageJ”, são apresentados na Tabela 4.2, juntamente à quantidade média de partículas/carbonetos identificados. O software calcula, através da edição das imagens, os carbonetos presentes em coloração diferente do restante da microestrutura do material. Desta forma é calculada o percentual da área da imagem, resultando no percentual de carbonetos presentes. São obtidas ainda as quantidades de “partículas” (carbonetos) contabilizados na imagem. O gráfico da Figura 4.6 apresenta os

resultados médios obtidos, para melhor visualização e comparação entre as condições analisadas.

Tabela 4.2 Resultados da análise do percentual de carbonetos (%).

Condição	Medições		Média	Desvio Padrão	Quantidade Média de Carbonetos
	1	2			
SZ-NA	2,11	2,87	2,49	0,54	1.269
SZ-90	2,93	2,44	2,68	0,35	1.614
SZ-120	3,85	4,29	4,07	0,31	1.973
SZ-160	6,88	6,75	6,82	0,09	2.851

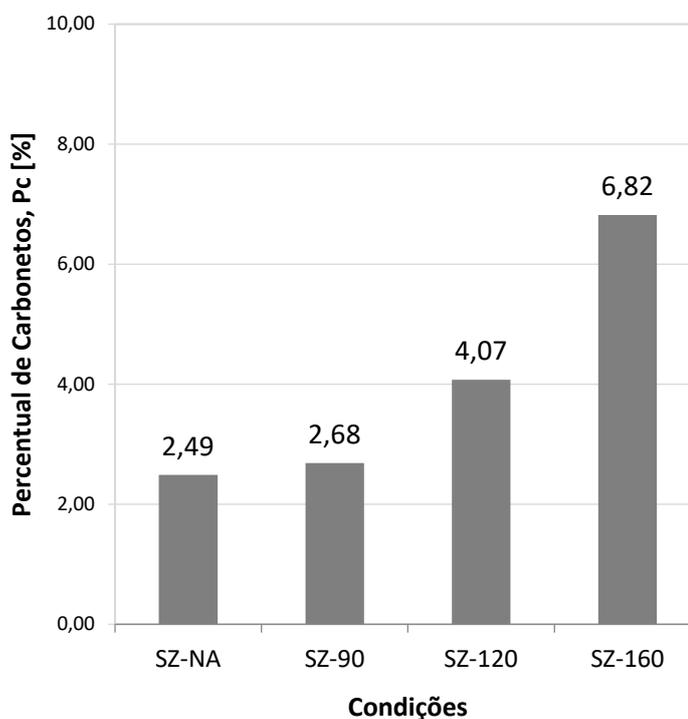


Figura 4.6 Resultados médios de percentual de carbonetos medidos para as condições analisadas.

As imagens analisadas indicam a presença de maiores percentuais de carbonetos para as condições mais severas de tratamento térmico sub zero empregadas.

4.3 Propriedades Mecânicas

4.3.1 Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza realizados são apresentados na Tabela 4.3, bem como o desvio padrão para cada condição avaliada. Para melhor visualização e comparação dos resultados entre as condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160, os valores médios obtidos são apresentados no gráfico da Figura 4.7.

Tabela 4.3 Resultados dos ensaios de dureza realizados.

Condição	Ensaio					Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5		
CR	91 HRB	91 HRB	91 HRB	91 HRB	91 HRB	91,0 HRB	0,00
SZ-NA	54,0 HRC	54,0 HRC	54,0 HRC	53,0 HRC	53,0 HRC	53,6 HRC	0,55
SZ-90	56,0 HRC	56,0 HRC	55,0 HRC	56,0 HRC	55,0 HRC	55,6 HRC	0,55
SZ-120	56,0 HRC	56,0 HRC	55,0 HRC	56,0 HRC	56,0 HRC	55,8 HRC	0,45
SZ-160	56,0 HRC	56,0 HRC	56,0 HRC	57,0 HRC	56,0 HRC	56,2 HRC	0,45

Pode-se observar, comparando os resultados dos CPs SZ-90, SZ-120 e SZ-160 – submetidos ao tratamento sub zero – com a condição SZ-NA – não submetido ao tratamento sub zero, ou seja, amostra apenas temperada e revenida – que houve maior aumento de dureza, conforme a severidade do tratamento sub zero. Os resultados obtidos indicaram dureza mais elevada para o CP SZ-160.

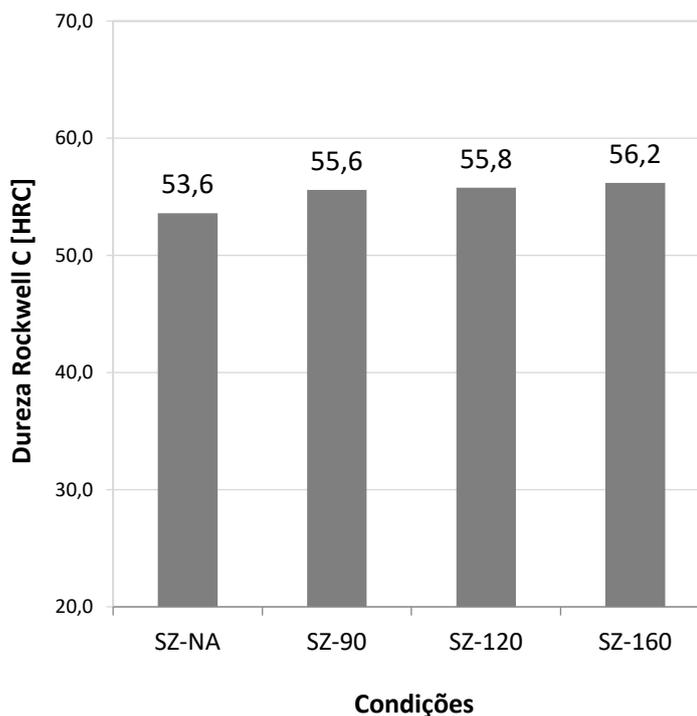


Figura 4.7 Resultados de dureza média obtidos para as condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160.

4.3.2 Curva de Engenharia

A obtenção das curvas de engenharia deu-se a partir da análise dos dados gerados pelo sistema computacional conectado à máquina de ensaio. Na Figura 4.7 pode-se observar um CP após a realização do ensaio.



Figura 4.8 CP após a realização do ensaio de tração.

Os resultados médios das propriedades mecânicas obtidas são apresentados na Tabela 4.4, bem como o desvio padrão para cada propriedade, enquanto as curvas de engenharia podem ser observadas nas Figuras 4.9 e 4.10.

Tabela 4.4 Propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração.

Condição	Tensão de Escoamento R_e Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Tensão máxima de resistência R_m Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Deformação Relativa ϵ Média (%)	Desvio Padrão (%)	Módulo de Elasticidade E Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CR	380	+9 -5	643	+5 -7	26,57	+0,61 -0,42	167	+12 -9
SZ-NA	1.367	+26 -36	1.807	+17 -27	5,08	+0,28 -0,29	199	+9 -13
SZ-90	1.565	+2 -1	1.922	+15 -8	2,07	+0,10 -0,06	203	+2 -2
SZ-120	1.564	+7 -12	1.903	+14 -17	1,94	+0,18 -0,17	204	+3 -2
SZ-160	1.566	+6 -11	1.926	+17 -9	2,10	+0,14 -0,09	203	+1 -1

Na Figura 4.9 é apresentada a curva de engenharia obtida para o material na condição CR (Condição de Recebimento), podendo-se observar elevada deformação relativa.

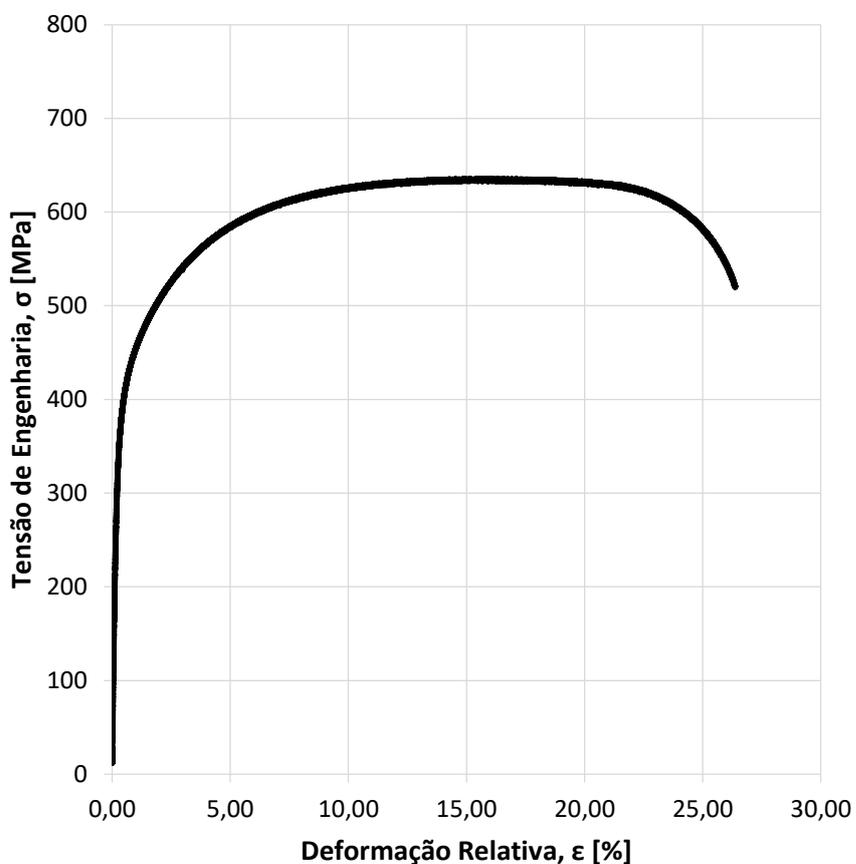


Figura 4.9 Curva de engenharia para a condição CR.

O resultado da tensão máxima de resistência (R_m) de 643 MPa apresenta-se similar ao apresentado na Tabela 2.4 – Dados de Sandvick 12C27M e Manfrin (2020).

A Figura 4.10 apresenta as curvas de engenharia obtidas para as condições SZ-NA (sem tratamento sub zero), SZ-90, SZ-120 e SZ-160 (tratamento sub zero à -90, -120 e -160°C, respectivamente). A condição sem aplicação de tratamento sub zero (SZ-NA) apresentou maior deformação relativa – maior alongamento – e menores valores de Tensão de Escoamento (R_e) e Tensão Máxima de Resistência (R_m), enquanto as condições com aplicação de tratamento sub zero em diferentes temperaturas (SZ-90, SZ-120 e SZ-160) apresentaram valores maiores e similares entre si para estas tensões (R_e e R_m). Manfrin (2020) obteve resultado similar para a Tensão Máxima de Resistência ($R_m = 1951 \text{ MPa}$ / Tabela 2.4).

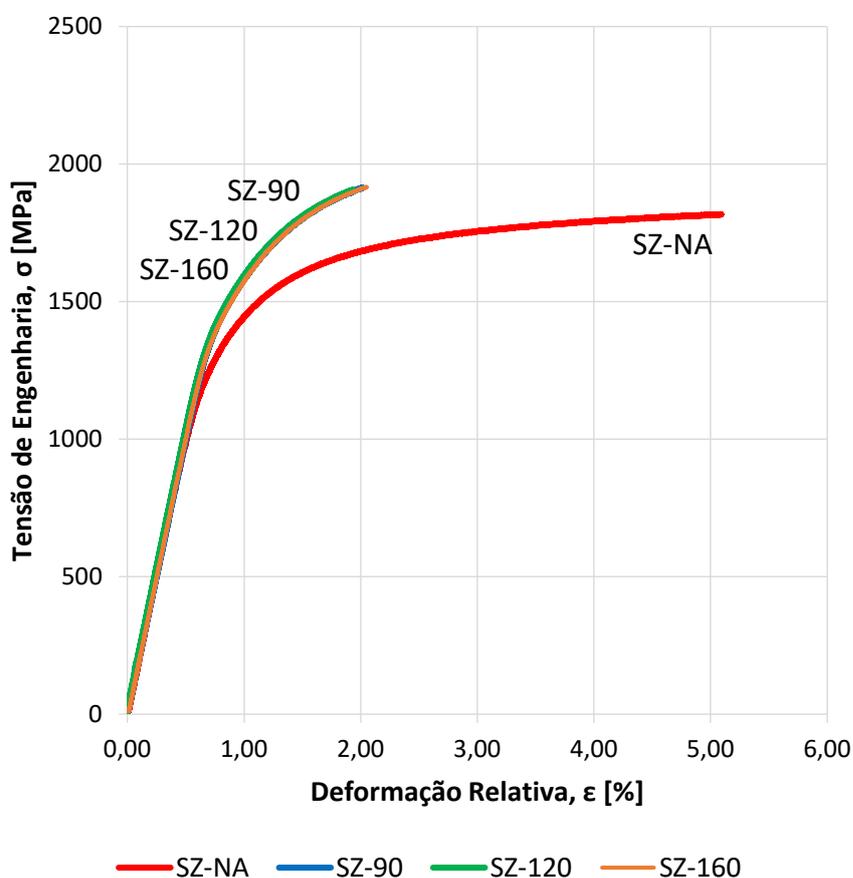


Figura 4.10 Curvas de engenharia para as condições SZ-NA, SZ-90, SZ-120 e SZ-160.

5.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como apresentado nos itens anteriores, análises e ensaios foram realizados para o estudo da influência do tratamento térmico sub zero sobre as propriedades mecânicas do material – aço inoxidável martensítico DIN EN 1.4034.

A **composição química** apresentou resultados conforme a especificação do material (Tabela 4.1).

A **análise microestrutural** evidenciou microestruturas características de aços inoxidáveis martensíticos. Na condição de recebimento do material foi identificada a microestrutura composta por ferrita (Figura 4.1), enquanto as amostras submetidas aos tratamentos térmicos apresentaram-se compostas essencialmente por martensita revenida e carbonetos secundários (Figuras 4.2 a 4.5).

Através da análise das imagens obtidas a partir da análise microestrutural foi possível realizar a medição do **percentual de carbonetos** nas amostras. Os resultados apresentaram valores crescentes de percentual de carbonetos conforme a severidade do tratamento térmico sub zero, ou seja, quanto menores as temperaturas empregadas (Tabela 4.2, Figura 4.6). As quantidades médias de carbonetos observadas também apresentaram a mesma tendência.

O **ensaio de dureza** realizado na condição de recebimento (CR) do material apresentou resultado de 91 HRB, similar ao indicado por Manfrin (2020), de 88 HRB (Tabela 2.4). As amostras na condição SZ-NA resultaram em uma dureza média de 53,6 HRC, enquanto as condições SZ-90, SZ-120 e SZ-160 tiveram resultados de 55,6, 55,8 e 56,2 HRC, respectivamente (Tabela 4.3, Figura 4.7). Nota-se que os valores de dureza foram maiores conforme a severidade do tratamento sub zero. Conforme Juste, Almeida e Antônio de Paula (1986), o tratamento sub zero promove a elevação da dureza do material, por conta do aumento do percentual de martensita na estrutura, e de carbonetos finos após o revenimento.

Através das **curvas de engenharia** foram obtidos os valores para Tensão de Escoamento (R_e) e Tensão Máxima de Resistência (R_m) para cada condição avaliada. A condição CR apresentou resultados coerentes com o material recozido, com elevada

deformação relativa (ϵ) e baixos valores de tensões (R_e e R_m) – (Tabela 4.4 – Figura 4.9). O material na condição SZ-NA apresentou valores inferiores de R_e e R_m , em comparação com as condições SZ-90, SZ-120 e SZ-160, porém maior deformação relativa (ϵ) – (Tabela 4.4, Figura 4.10). Os módulos de elasticidade (E) foram similares entre estas condições. A Tensão de Escoamento e a Tensão Máxima de Ruptura também apresentaram valores similares entre os CPs com diferentes temperaturas de tratamento térmico sub zero aplicadas.

A condição SZ-160 (tratamento térmico sub zero à -160°C) apresentou os maiores valores de R_e e R_m encontrados, sendo estes 1.566 MPa e 1.926 MPa. Tais resultados, em comparação com os valores obtidos para a condição SZ-NA (sem a aplicação do tratamento sub zero) – $R_e = 1.367$ MPa e $R_m = 1.807$ MPa – representam aumentos de 199 MPa e 119 MPa.

Os resultados obtidos apresentam coerência entre a microestrutura observada, as frações de carbonetos medidas, os resultados de dureza e de tensões (R_e e R_m). Meng, Takashira, Azuma e Sohma (1994) citam que ocorre a precipitação de carbonetos ultrafinos e difusos, semelhante ao ocorrido no revenimento. Prieto, Ipiña e Tuckart (2014) obtiveram resultados semelhantes, observando aumento de dureza relacionados à precipitação de carbonetos secundários no aço AISI 420.

Tal elevação no percentual de martensita na estrutura e conseqüente maiores quantidades de carbonetos presentes, conforme mais severo o tratamento térmico – quanto menor a temperatura empregada – produz maior resistência e tenacidade na matriz, elevando a resistência ao desgaste, segundo Yun, Xiaoping e Hongshen (1998).

6.0 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como proposta estudar a influência do tratamento térmico sub zero sobre as propriedades mecânicas de aço inoxidável martensítico DIN EN 1.4034.

A partir dos resultados das análises e ensaios realizados foi possível concluir que o tratamento sub zero propicia a precipitação de carbonetos finos na microestrutura do material, de modo que quanto mais severo este tratamento, ou seja, quanto menor a temperatura empregada, maior o percentual de carbonetos finos dispersos na matriz. Os valores médios de percentual de carbonetos obtidos foram de 2,49% para a condição SZ-NA, 2,68% para SZ-90, 4,07% para SZ-120 e 6,82% para a condição SZ-160. Esta característica, a qual ocorre em função da maior transformação martensítica, promove a elevação dos valores de dureza, gerando ganhos superiores a 2 HRC em relação ao material sem a aplicação do tratamento sub zero – o material na condição SZ-NA apresentou 53,6 HRC de dureza média, enquanto a condição SZ-160 apresentou 56,2 HRC. A resistência mecânica do material, especialmente os valores de Tensão de Escoamento (R_e) e Tensão Máxima de Resistência (R_m), também apresentam elevação após a aplicação do tratamento sub zero, com aumento de até 199 MPa para R_e e de 119 MPa para R_m (na condição SZ-160), em comparação com o material sem a aplicação deste tratamento (SZ-NA) – apesar de não serem identificadas significativas alterações entre as diferentes temperaturas de sub zero empregadas. A condição SZ-NA apresentou valores médios de R_e e R_m de 1.367 MPa e 1.807 MPa, respectivamente, enquanto as condições SZ-90, SZ-120 e SZ-160 apresentaram valores próximos à 1.565 MPa para R_e e acima de 1.900 MPa para R_m .

Desta forma torna-se evidente a influência direta do tratamento sub zero sobre as propriedades mecânicas do material, com aumento dos valores de dureza e tensões de escoamento e máxima de resistência. A condição mais severa (SZ-160), onde foi utilizada a temperatura de -160°C no tratamento térmico sub zero, apresentou maior valor médio de percentual de carbonetos (6,82%).

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análise do percentual de austenita retida no material sem a aplicação do tratamento térmico sub zero, e nas diferentes temperaturas de sub zero selecionadas;
- Realizar ensaios de fadiga em corpos de prova nas diferentes condições de tratamento;
- Realizar ensaio de resistência ao desgaste nas diferentes condições de tratamento;
- Realizar análise do material em MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura – para a determinação do dimensional dos carbonetos.

8.0 REFERÊNCIAS

ASM METALS HANDBOOK, Handbook Stainless Steels, ASM International, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-ISO 6508-1**: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1/2013-versão corrigida 2018 (ASTM E8/E8M-09)**: Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013.

BARRON, R. F. **Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance**, In. *Cryogenic*, v. 22, p. 409-413, 1982.

BONIARDI, M. e CASAROLI, A. **Stainless steels**. Dipartimento Di Meccanica. Politecnico Di Milano, Brescia-Italy, p. 28, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos**. ABM, 1988.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 1. ed. São Paulo: ABM, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. edição. São Paulo: Blücher, 2008.

COLLINS, D. N. **Deep cryogenic treatment of tool steels: a review**. *Heat Treatment of Metals*, Ireland, v. 23, p. 40-42, 1996.

DAS, D.; DEY, T. K.; RAY, K. K. **Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness**, *Materials Science & Engineering*, v. 527, p. 2182-2193, 2010.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. edição. Guanabara Dois, 1981.

DIN EN 1.4034 Stainless Steel X46Cr13 Material Datasheet Equivalent Properties Composition. The World Material.

<<https://www.theworldmaterial.com/din-en-1-4034-stainless-steel-x46cr13-material/>>
Acesso em 11 Fev. 2021.

HUANG, J. Y., ZHU, Y. T., LIAO, X. Z., BEYERLEIN, I. J., BOURKE, M. A., MITCHELL, T. E. **Microstructure of cryogenic treatem M2 tool steel**. Materials Science and Engineering, v. 339, p. 241-244, 2003.

JUSTE, P. S., ALMEIDA, J. N., ANTÔNIO DE PAULA, A. **Tratamento Sub-Zero em cilindros para laminação a frio**. Anais do 41º Congresso sobre Laminação, Vitória, ES, p. 115-128, 1986.

KAMODY, D. J. **Using deep cryogenics to advantage**. Advance Materials & Processes, v. 10, p. 215-218, 1998.

KRAUSS, G. **Steels - Heat treatment and Processing Principles**. American Society for Metals, Metals Park, Ohio 1990.

KWIETNIEWSKI, C. E. F.; KISS, F. J.; STROHAECKER, T. R.; REGULY, A. **Tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**. 1. ed. Porto Alegre. Editora UFRGS, 2014.

MANFRIN, M. C. **Estudo dos processos de fabricação de lâminas de facas em aço inoxidável martensítico comparando dois materiais alternativos**. Dissertação de Mestrado. PPGEM:UFRGS, 2020.

MENG, F., TAKASHIRA, K., AZUMA, R., SOHMA, H. **Role of Eta-carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12-Cv-Mo-V-1.4C**. ISIJ International, v. 34, p. 205-210, 1994.

NAKAGAWA, H.; MIYAZAKI, T. **Effect of retained austenite on the microstructure and mechanical properties of martensitic precipitations hardening stainless steel**. Journal of Materials Science. v. 34, p. 3901–3908, 1999.

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa ligas soldados**, Dissertação Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Materiais. UCS, 2008.

PRIETO, G.; IPIÑA, J. E. P.; TUCKART, W. R. **Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel: Microstructure**. Materials Science & Engineering. v. 605, p. 236-243, 2014.

Sandvik 12C27M – Ficha técnica do aço DIN 1.4034. Sandvik.

<<https://www.materials.sandvik/pt-br/centro-de-materiais/datasheets-do-material/strip-steel/sandvik-12c27m/>>.

Acesso em 01 Abr 2021.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre. Imprensa Livre, 2004.

STEPHENS, R.I. **Metal Fatigue in Engineering**, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 2. ed., 2001.

YUN, D.; XIAOPING, L.; HONGSHEN, X. **Deep Cryogenic treatment of highspeed steel and its mechanism**. In: Heat Treatment of Metals, v.3, p. 55-59, 1998.

9.0 APÊNDICES

9.1 Apêndice A – Custos para a elaboração do trabalho

Para a realização do trabalho de diplomação em questão foram utilizadas as infraestruturas de laboratórios acadêmicos e de uma empresa, bem como se fez necessário o consumo de matéria-prima e insumos. A Tabela 9.1 apresenta uma estimativa dos custos, após a finalização dos ensaios e análises.

Tabela 9.1 Estimativa de custos para a realização do trabalho.

Item	Descrição	Custo
Matéria-prima	Aço DIN EN 1.4034	R\$ 583,86
Preparação dos CPs	Corte, Usinagem	R\$ 513,08
Tratamentos Térmicos	Têmpera, Sub Zero, Revenimento	R\$ 1.087,95
Ensaio – Laboratórios Acadêmicos	Ensaio de tração	R\$ 4.500
Ensaio – Laboratório Empresa	Preparação de amostras, ensaio de dureza	R\$ 172,39
	Custo Total:	R\$ 6.857,27