

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gabriel Ximendes Quinhones

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DAS
TELHAS DAS LAGARTAS DOS BLINDADOS LEOPARD 1A5-BR PARA
PROCESSO DE NACIONALIZAÇÃO DO COMPONENTE**

Santa Maria, RS

2023

Gabriel Ximendes Quinhones

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DAS
TELHAS DAS LAGARTAS DOS BLINDADOS LEOPARD 1A5-BR PARA
PROCESSO DE NACIONALIZAÇÃO DO COMPONENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS), como requisito parcial para obtenção do grau
de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Inácio da Fontoura Limberger

Santa Maria, RS

2023

Gabriel Ximendes Quinhones

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DAS
TELHAS DAS LAGARTAS DOS BLINDADOS LEOPARD 1A5-BR PARA
PROCESSO DE NACIONALIZAÇÃO DO COMPONENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS), como requisito parcial para obtenção do grau
de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 18 de agosto de 2023

Inácio da Fontoura Limberger, Dr. Eng. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

César Gabriel dos Santos, Dr. Eng. (UFSM)

Leandro Costa de Oliveira, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS.

2023.

AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus em Nossa Senhora Medianeira, pois estes sempre caminharam a minha frente, guiando-me.

Agradeço ao destino, pois: o que é nosso vem a nós, com facilidade alegria e glória. O que é tirado de nós, com certeza foi um livramento. O que passou, nos fortalece como seres-humanos.

Agradeço a família e principalmente aos meus pais Amilcar e Marta, que me educaram e sempre incentivaram aos estudos. Sem vocês, de nada eu seria- como pessoa para a família e para o mundo.

Agradeço à minha inspiração, Vô João, por todos os conselhos e a criação que me destes. Teus cabelos podem até ficar mais brancos com o tempo, mas teu olhar de menino inteligente é o que me cativa e sempre será assim.

Agradeço ao meu Professor e orientador, Dr. Inácio Limberger, que muito cativou nas aulas de Ciência dos Materiais e durante todo o tempo em que fui colaborador do Laboratório de Metalurgia Física-UFSM. É meu guru.

Agradeço ao Exército Brasileiro, por depositar em mim através do conhecimento, este estudo importante para nacionalização de componentes dos Leopard 1A5-BR.

Agradeço ao Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF-UFRGS) e Laboratório de Tecnologia Mecânica e Aeroespacial (NUMAE), antigo NAFA.

Agradeço aos meus colegas de graduação e demais professores do curso que me acompanharam em toda minha passagem pelo honrado curso de Engenharia Mecânica na UFSM.

Agradeço ao meu time da Engenharia Industrial da empresa WEG-CESTARI, onde consigo desenvolver e aperfeiçoar todas as lições aprendidas na graduação. Mas, principalmente aprender dia-a-dia a rotina da Indústria e aperfeiçoar-me para ela. Especialmente ao meu chefe Eng. Mec. Adriano Sartori Colpo, meu agradecimento.

Reitero que isso é só o começo. O conhecimento é a única coisa que não ocupa espaço. E quão mais adquirimos, mais produzimos e desenvolvemos instrumentos e processos que facilitam a vida da sociedade através da ciência. Fazer Engenharia é uma arte, para poucos.

“Se faltam máquinas, você pode comprá-las;
Se não há dinheiro, você toma emprestado;
Mas homens você não pode comprar;
E nem pedir emprestado. E homens,
Motivados por uma ideia, são a base do êxito.”

(Da Silva, Eggon).

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DAS TELHAS DAS LAGARTAS DOS BLINDADOS LEOPARD 1A5- PARA PROCESSO DE NACIONALIZAÇÃO DO COMPONENTE

AUTOR: Gabriel Ximendes Quinhones

ORIENTADOR: Inácio da Fontoura Limberger

A cidade de Santa Maria conta com uma unidade do Exército que é responsável pela manutenção e modernização dos Blindados Leopard 1A5-BR. O processo de manutenção requer o suprimento de componentes que em muitos casos não estão disponíveis no mercado internacional e em algumas vezes os preços são abusivos. Por questões estratégicas é preciso nacionalizar os componentes, dentre os componentes estratégicos para serem nacionalizados, estão as telhas dos Leopard 1A5-BR. Este trabalho visa fazer Engenharia Reversa da telha das esteiras do Leopard 1A5-BR. Para isso serão feitas, a avaliação dimensional e redesenho do componente; o levantamento dos processos empregados para a sua manufatura e os tratamentos térmicos, bem como das propriedades mecânicas e características metalúrgicas do material. Estes valores levantados serão então disponibilizados ao Exército Brasileiro para a elaboração dos critérios técnicos e orientar a elaboração de licitação de compra. Os dados levantados experimentalmente serão posteriormente usados para avaliação dos componentes entregues pelo fornecedor escolhidos para que seja feita a homologação de compra. Uma vez que a cidade de Santa Maria/RS apresenta uma unidade responsável pela manutenção e modernização do Leopard 1A5-BR, os componentes que foram selecionados como estratégicos, precisam ser nacionalizados

Palavras-chave: Engenharia Reversa. Caracterização. Processos. Manufatura. Ensaios Mecânicos. Microestrutura. Nacionalização. Aço fundido.

ABSTRACT

MATERIAL CHARACTERIZATION AND DIMENSIONAL EVALUATION OF LEOPARD 1A5-BR ARMORED TILES FROM THE TRACKS FOR COMPONENT NATIONALIZATION PROCESS

Author: Gabriel Ximendes Quinhones

Advisor: Inácio da Fontoura Limberger

The city of Santa Maria has an Army unit that is responsible for the maintenance and modernization of the Armored Leopard 1A5-BR. The maintenance process requires the supply of components that in many cases are not available in the international market and sometimes the prices are abusive. For strategic reasons it is necessary to nationalize the components, among the strategic components to be nationalized are the Leopard 1A5-BR tiles. This work aims to Reverse Engineering the tile of the Leopard 1A5-BR tracks. For this, the dimensional evaluation and redesign of the component will be done; the survey of the processes used for its manufacture and heat treatments, as well as the mechanical properties and metallurgical characteristics of the material. These values raised will then be made available to the Brazilian Army for the preparation of technical criteria and guide the preparation of the purchase bid. The experimentally collected data will later be used to evaluate the components delivered by the chosen supplier for the approval of the purchase. Since the city of Santa Maria/RS has a unit responsible for the maintenance and modernization of the Leopard 1A5-BR, the components that were selected as strategic need to be nationalized.

Key-words: Reverse engineering. Description. Law Suit. Manufacturing. Mechanical tests. Microstructure. Nationalization. Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio Fe-C. Carboneto de ferro (Fe-Fe ₃ C).	19
Figura 5: Morfologia de Ferrita Pró-Eutetóide. A Ferrita Alotriomórfica nucleada nos contornos de grãos austenísticos e Ferrita Idiomórfica nucleada no interior dos grãos.....	27
Figura 6: Esquema mostrando os tipos de formação de Ferrita de Widmanstätten. Placas de Ferrita de Widmanstätten, dispostas 60° entre si.....	28
Figura 5: Estrutura martensítica em formação e a célula unitária tetragonal de corpo centrado (TCC)Figura 6: Diagrama da transformação isotérmica para aço eutetóide.	31
Figura 10: Curva TTT para aço com médio teor de carbono com elementos de liga.	33
Figura 10: Curvas para recozimento pleno e normalização sobrepostos.....	35
Figura 11: Tratamento isotérmico de Austêmpera para formação de Bainita. Entende-se por A- Austenita; B- Bainita; F- Ferrita; C- Cementita e M- Martensita.	39
Figura 12: Diagrama esquemático de transformação para Martêmpera.	41
Figura 13: Funcionamento de uma máquina à tração em e extensômetro medindo a deformação do corpo de prova.	43
Figura 14: Exemplo de máquina universal para ensaio de tração, presente no LADIPP-UFSM.	44
Figura 15: Forma gráfica dos comportamentos dos materiais dúcteis e frágeis.....	45
Figura 16: Curva tensão x deformação típica de materiais metálicos.	46
Figura 17: Curvas de ensaio de tração convencional x real.	48
Figura 18: Em (A), fratura por tensão de cisalhamento de material dúctil. Em (B), fratura por tensão normal de material frágil.	49
Figura 19: Exemplo de equipamento para ensaio de macro dureza.	51
Figura 20: Máquina Charpy do Lab. de Metalurgia Física-UFSM. Em (A), a escala da máquina.	52
Figura 21: Sequência de contração de solidificação em um cubo de ferro. Em (A) contração líquida, (B) início formação de Rechupe, (C) metal sólido e vazio formado, (D) Rechupe interno e deformação externa e (E) forma final.	55
Figura 27: Processo de manutenção, para substituição das almofadas nos patins e a desmontagem realizada no conjunto.....	59

Figura 28: Em (A) Telha das Lagartas dos blindados do Leopard 1A5-BR na vista superior e inferior. Em (B) telha removida do conjunto.	59
Figura 29: Máquina Fowler Baty Venture Plus usada para as medições da telha do Leopard 1 A5 BR.	61
Figura 30: Corte da telha em Serra fita, no CTISM-UFSM.	62
Figura 31: Em (A) telha antes de corte. Em (B), amostra após o corte.	62
Figura 32: Amostra resultante do processo de corte sendo faceada por fresamento.	63
Figura 33: Dimensões do corpo de prova, conforme Norma ASTM A370.	63
Figura 34: Formato e dimensões do corpo de prova para usados nos ensaios de tração, conforme ASTM A 370.	64
Figura 35: Em (A) traçador mecânico utilizado e em (B) as marcações realizadas para exatidão dos valores de comprimento.	65
Figura 36: Representação do corpo de prova, para ensaio de Impacto Charpy, conforme ASTM A370.	66
Figura 37: Amostra com as marcações para indentação e o Durômetro de bancada WPR.	69
Figura 39: Representação Isométrica da Telha da Lagarta.	71
Figura 42: Curvas de Tensão Normal x Deformação Específica para cada amostra ensaiada.	75
Figura 46: Fraturas das amostras, após Ensaio de Impacto (Charpy)	81
Figura 41: Presença de micro-rechupes, análise em Microscopia Ótica sem ataque químico e análise em MEV com ataque químico de Nital 0,2%.	82
Figura 42: (A) Inclusão não metálica encontrada no aço fundido análise em MEV ataque Nital 2%. (B) Espectros de intensidade de raios X resultante da análise feita na inclusão não metálica. Microsonda EDS.	83
Figura 43: Inclusão metálica na forma de esfera.	85
Figura 46: Corte transversal de uma amostra. Presença de vazios, Rechupe. Macrografia.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistemas de especificação AISI/SAE para aços carbono comuns e aços de liga.	24
Tabela 2: Especificações técnicas militares.....	25
Tabela 3: Passos da Engenharia Reversa, segundo Back.	57
Tabela 8: Dureza Rockwell C com média das leituras e média geral das durezas.....	74
Tabela 10: Alongamento das amostras, com base no Lr após ensaio de tração.....	79
Tabela 13: Resultados obtidos nos ensaios Impacto Charpy. (kgfm-- J)	81

LISTA DE SÍMBOLOS

σ : Tensão [MPa]

ε : Deformação [%]

δ : Deformação Real [%]

φ : Estricção [%]

L_0 : Comprimento/largura inicial [mm]

L_r : Comprimento/largura final [mm]

ΔL : Acréscimo no comprimento [mm]

L : Comprimento final [mm]

l_0 : Largura útil [mm]

l : Espessura do corpo de prova [mm]

C_m : Carga Máquina [N]

Alt : Altura [mm]

d_m : Deslocamento máquina [mm]

σ_R : Tensão Real [MPa]

σ_r : Tensão Máxima ou limite de resistência ruptura [MPa]

σ_{Ip} : Tensão do limite de proporcionalidade [MPa]

E : Módulo de elasticidade ou módulo de Young [MPa]

σ_E : Tensão de escoamento [MPa]

A : Alongamento [%]

σ_{max} : Tensão máxima suportada [MPa]

Q_H : Carga aplicada no ensaio de dureza [kgf]

HB : Dureza Brinell [N/mm²] / [MPa] / [kgf/mm²]

HV : Dureza Vickers [N/mm²] / [MPa] / [kgf/mm²]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1- APRESENTAÇÃO	15
1.2.1 Geral.....	16
1.2.2 Específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.2 DIAGRAMA FERRO CARBONO	19
2.3 AÇOS PARA FUNDIÇÃO	21
2.5.1 Estruturas encontradas nos Aços Tratados Termicamente.....	26
2.5.1.1 Ferrita	26
2.1.1.1 Austenita	28
2.1.1.2 Martensita.....	30
2.1.1.3 Bainita	32
2.5.2- Recozimento.....	34
2.5.3- Normalização	34
2.5.4 – Têmpera.....	36
2.7.1- Austêmpera	38
2.7.2- Martêmpera	40
2.8.1- Ensaio de Tração	42
2.8.2- Ensaio de Dureza.....	51
2.8.3 – Ensaio de Impacto e tenacidade	52
2.9.1- Formação de Rechupes	54
3.3 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	62
4.3.1- Ensaio de Dureza e correlações.....	74

4.3.2- Ensaio de Tração	75
4.3.2.1 – Fraturas das amostras e confronto com dados obtidos em ensaio.....	79
4.3.3- Resultados Ensaio de Impacto (CHARPY).....	80
4.4- ANÁLISE METALOGRAFICA.....	82
4.5- ANÁLISE DA PEÇA FUNDIDA	87
5. CONCLUSÕES	88
6. REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

1.1- APRESENTAÇÃO

As ligas de ferro são utilizadas pelo homem desde 1200 aC, a qual por ser um dos cinco elementos mais abundantes da crosta terrestre é um metal de fácil processamento e caracteriza-se pela sua união com demais elementos metálicos e não-metálicos, sendo o carbono o principal elemento utilizado para o processamento para obtenção de produtos de ferro, produzindo assim importantes efeitos sobre as propriedades das ligas de ferro dando origem aos aços e ferros fundidos.

Com o avanço da tecnologia, as formas para obtenção de produtos a partir das ligas de ferro vêm sendo aprimoradas nos setores da engenharia e na indústria, entretanto processos básicos como a obtenção de ferro metálico a partir de óxidos presentes na natureza (minério), fundição e forjamento se mantêm seguindo princípios já conhecidos e corriqueiros.

Complementa-se a esses fatos, o constante progresso para aperfeiçoamento de antigas técnicas já utilizadas e com isto, exigiu-se maior preocupação com a qualidade, propriedade e tipo de materiais aplicados. Por isso, as propriedades mecânicas, químicas, físicas e metalográficas são de interesse estratégico e científico para a ciência dos materiais e a indústria como um todo.

O Exército Brasileiro é uma das três forças armadas do Brasil, responsável pela defesa do País em operações terrestres e na garantia da lei, ordem e poderes constitucionais. Dentro de sua estrutura, o órgão de direção geral é do Estado-Maior do Exército, existindo também, vários órgãos de direção setorial e operacional. Junto a isto, o exército está organizado em vários comandos, unidades e subunidades espalhadas nas Regiões Militares. (CASTRO,1963).

Dentre as armas de fogo que compõe a estrutura do Exército Brasileiro, tem-se a cavalaria. A Cavalaria reconhece, proporciona segurança às demais formações em combate, e combate, por seus próprios meios; seja blindada ou mecanizada mantém nos seus atuais veículos as capacidades das tradicionais formações hipomóveis (a cavalo). (EB, 2022). A partir

dos anos 70, findaram-se a motomecanização desta arma de fogo, ficando a cargo o Regimento de Carros de Combate (RCC) a manutenção destas viaturas, bem como possíveis estudos de otimização dos mesmos.

A partir de 2009, incorporou-se às massas da cavalaria o veículo blindado Leopard 1A5-BR, de origem alemã, o qual passou por alguns ajustes “tropicalização”, para ficar mais adequado as condições operacionais locais. O Exército Brasileiro teve que estruturar um plano de manutenção e suprimento de peças, na maioria importadas da Alemanha. Dessa forma, surge a necessidade de nacionalização de alguns componentes e outros conhecimentos que devem ser adquiridos. (BASTOS, 2011). Nesse trabalho, abordar-se a todos os aspectos técnicos necessários nacionalizar as TELHAS DAS LAGARTAS do Leopard 1A5-BR.

1.2- OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é redesenhar e definir os processos de manufatura e tratamentos térmicos usados para produzir as TELHAS DAS LAGARTAS dos blindados 1A5-BR. Caracterizar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material, para que se tenha subsídios técnicos fazer o processo de nacionalização deste componente.

1.2.2 Específicos

- Elaborar testes de tração e impacto para verificar as propriedades mecânicas dos materiais analisados.
- Elaborar testes de dureza para verificar a efetividade dos tratamentos térmicos dos materiais analisados.

- Elaborar e analisar a metalografia dos materiais, relacionando as propriedades mecânicas com as estruturas encontradas.
- Realizar a Engenharia Reversa das TELHAS DAS LAGARTAS do Leopard 1A5-BR.
- Encontrar as características metalúrgicas do material, bem como os processos empregados na sua manufatura.

1.3– JUSTIFICATIVA

O atual estudo é justificado pela necessidade a qual o Exército Brasileiro possui de nacionalizar alguns componentes do Leopard 1A5-BR dentre eles as TELHAS DAS LAGARTAS, devido ao custo e demora na importação dessas peças. Uma vez que conhecido todos os critérios técnicos, bem como suas características, os resultados obtidos serão entregues ao EB para posterior processo de nacionalização do componente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentar-se-á uma revisão da literatura explicitando os conceitos fundamentais a partir das definições: diagrama de equilíbrio ferro-carbono, efeitos dos elementos de liga sobre o aço e processos de fabricação envolvidos no que tange o tema. Também será apresentada a classificação dos aços, bem como tratamentos, propriedades e ensaios mecânicos da amostra posteriormente analisada. Este capítulo servirá de suporte para as conclusões do trabalho.

2.1 DEFINIÇÃO DE AÇO

Classicamente, define-se aço como uma liga ferro- carbono com até 2,11% de carbono. Esse limite é associado à máxima solubilidade do carbono no ferro com estrutura CFC- Austenita. (COLPAERT, 2008). Devido aos processos de fabricação, os aços apresentam elementos secundários em sua composição apesar do ferro e carbono serem os principais elementos. Para Chiaverini (1988), aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação.

Distintas concentrações de elementos residuais podem interferir no limite de solubilidade do carbono no ferro, sendo mais comumente encontrados o manganês, silício, enxofre e fósforo. Podem também estar presentes na liga, em forma residual, o cobre, zinco, arsênio, antimônio que são oriundos de sucatas e por sua vez, hidrogênio e oxigênio oriundos da atmosfera. (CHIAVEINI, 1988).

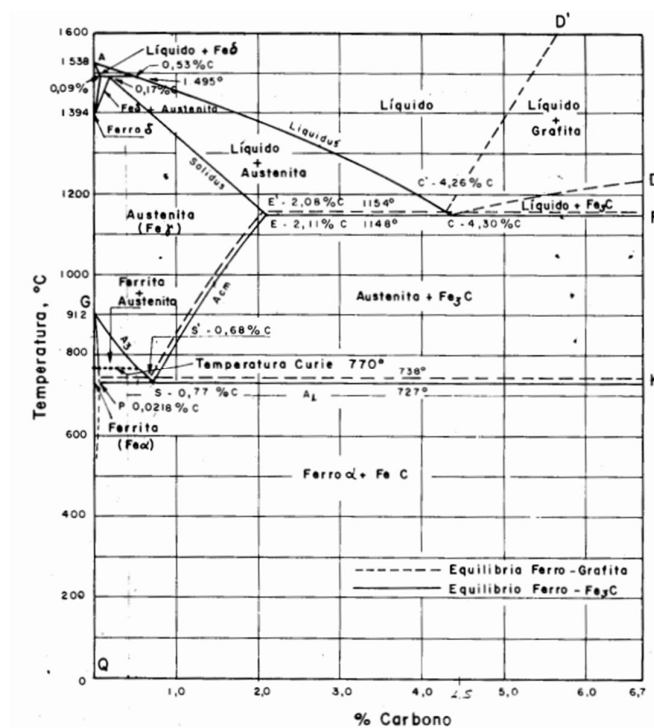
Uma das características principais que diferencia os aços dos ferros fundidos é a capacidade que os aços têm de serem deformados plasticamente, sendo as propriedades dos aços aferidas por sua composição química e estrutura. Das propriedades, destaca-se: resistência, dureza, ductilidade, tenacidade, elasticidade e plasticidade. (CALLISTER, 2016). Dentro dos aços uma divisão se faz presente, essa divisão leva em conta a concentração de carbono e também uma subdivisão entre a concentração quanto a concentração dos elementos de liga.

Para Colpaert (2008), os aços são especialmente valorizados, sobretudo em sua facilidade de serem reciclados, pela vida relativamente curta quando reciclados e pelo consumo de energia relativamente baixo em sua produção.

2.2 DIAGRAMA FERRO CARBONO

A figura 1, representa o diagrama da liga binária Fe-C para teores de carbono de até 6,7% de C. Na extremidade à esquerda, consta uma solução de 0% a 0,008% de carbono no ferro, sendo considerada ferro puro. À direita, no limite, tem-se 6,7% de carbono, sendo o constituinte o carboneto de ferro (Fe_3C). Observa-se a divisão entre aços e ferros fundidos no ponto E 2,11% de carbono.

Figura 1: Diagrama de equilíbrio Fe-C. Carboneto de ferro ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$).



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, 1988.

Sob a forma alotrópica alfa (α) até 912°C tem-se Ferrita, porém este apresenta transformações ao ser aquecido. Da temperatura de -274°C até 912°C tem-se a microestrutura denominada Ferrita ($\text{Fe}-\alpha$). A partir desta temperatura, ocorre uma transformação de fase e o ferro passa para a forma alotrópica gama (γ) também chamada de Austenita. Esta estrutura é estável de 912°C até 1394°C. A partir da temperatura de 1394 ocorre outra transformação de

fase do ferro e ele passa para a forma alotrópica delta (δ) que a 1538°C se fundirá passando para a fase líquida. Importante ressaltar que as formas alotrópicas possuem reticulados cristalinos distintos: ferro α reticulado cúbico de corpo centrado (CCC), o ferro γ reticulado cúbico de face centrada (CFC) e o ferro δ com reticulado cúbico de corpo centrado (CCC).

O ferro α , ou Ferrita, é encontrada até 912°C com sua composição química variando entre 0,008 %C a temperatura ambiente até 0,2 %C a 723°C. A Ferrita, possui estrutura cristalina CCC, apresentando menor dureza e resistência a tração quando comparada as demais fases, porém grande resistência ao choque e alongamento considerável. A Ferrita pode ser estabilizada com outros elementos dissolvidos de mesma estrutura cristalina, quando puros, como por exemplo: Cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni) dentre outros.

O ferro γ , ou Austenita, é encontrada de 727°C com 0,77 %C, atingindo seu máximo teor de carbono de 2,11 % a temperatura de 1148°C e pode ser encontrada a temperatura de 1495°C a uma concentração de 0,17 %C. A Austenita possui estrutura cristalina (CFC), e por dissolver maior teor de carbono é mais resistente do que a Ferrita. Alguns elementos como mesma estrutura CFC, sendo puros, estabilizam essa fase, como por exemplo: Manganês (Mn), Carbono (C), Cobalto (Co), dentre outros.

Entre 1398°C a 1538°C tem-se o ferro δ . Sua estrutura cristalina é (CCC), com parâmetro de rede maior que na Ferrita. O ferro δ pode ser encontrado com 0,09 %C a temperatura de 1495°C.

Salienta-se alguns pontos importantes presentes no diagrama Fe-Fe₃C (na figura 1):

- Ponto (S) Eutetóide: Austenita com 0,77% de C dá origem a Ferrita com 0,2%C e Cementita 6,67%C à 723°C. A esta mistura de fases se denomina Perlita.
- Ponto (C) Eutético: líquido com 4,3 %C transforma-se em Austenita com 2,11 %C e Cementita com 6,67 %C à 1148°C. A esta mistura de fases se denomina Ledeburita
- Ponto (H) Peritético; combinação entre sólido ferro δ com 0,09 %C e líquido com 0,53 %C, dando origem a Austenita com 0,17 %C à 1495°C.

Aços com exatos 0,77 %C, são denominados Eutetóides e sua microestrutura é 100% Perlita. Aços com teores de carbono inferiores a 0,77 %C ou que estão à esquerda do ponto S do diagrama de fase Fe-Fe₃C são denominados Hipoeutetóides e sua microestrutura é composta de Ferrita Pró-Eutetóide e Perlita. Aços com teores superiores a 0,77 %C são denominados

Hipereutetóides e estão a direita do ponto S no diagrama de fases e sua microestrutura é composta de Cementita Pró-Eutetóide e Perlita.

Em suma, Krauss (1994) afirma que este diagrama define a composição das regiões de temperatura em que várias fases do aço estão estáveis, assim como os limites de equilíbrio entre os campos de fase.

2.3 AÇOS PARA FUNDIÇÃO

Aço fundido é aquele vazado em moldes de areia ou metálicos, onde solidificando-se adquire a forma exata da cavidade do molde, de modo a apresentar a forma praticamente definida, necessitando pouco ou nenhum, retrabalho de acabamento por meio da Usinagem. (CHIAVERINI, 1988).

Emprega-se os aços fundidos, sobretudo, pelo seu custo relativamente baixo quando comparado aos demais processos e por produzir peças de grande variedade de formas e dimensões com considerável resistência e tenacidade. Peças submetidas ao processo de fundição, geralmente apresentam defeitos superficiais ou internos inerentes ao processo e que são toleráveis dependendo de onde estão localizados na peça e qual o tipo de solicitação que estarão sendo submetidos. Peças em aço fundido devem possuir requisitos metalúrgicos e de qualidade, como segue:

- Granulação fina;
- Isenção de tensões internas;
- Homogeneidade.

Entende-se que o quesito de granulação fina possa ser obtido controlando o processo de fusão, vazamento e resfriamento. A homogeneidade estrutural e a isenção de tensões internas, podem ser obtidas ou minimizadas por tratamentos térmicos posteriores possibilitando eliminar a textura dendrítica do aço e o alívio das tensões internas oriundas da contração de solidificação do metal no interior do molde. Lakytin (2016) ressalta que aços para fundição, são tratados

termicamente para obter propriedades exigidas conforme solicitação do fabricante e agregado a isto, corrige-se a estrutura de fundição de modo a eliminar a heterogeneidade química.

A sanidade das peças fundidas é obtida com base no projeto adequado da peça e do molde, com canais e massalotes convenientemente localizados e mediante uma apropriada desoxidação e remoção da escória, com o aço ainda no estado líquido (CHIAVERINI, 1988).

Ressalta-se que, as propriedades mecânicas adequadas para o aço dependem dos tipos e da forma com que os esforços estarão sendo aplicados as peças. Determinados estas propriedades mecânicas parte-se para a elaboração da composição química do aço como pelo teor de carbono, adição de elementos de liga e tratamento térmico apropriado.

Os aços para fundição podem ser classificados nos seguintes grupos, conforme citação de Chiaverini (1986):

- Aços de baixo carbono ($\leq 0,20\%$);
- Aços de médio carbono ($0,20\% \leq 0,50\%$);
- Aços de alto teor de carbono ($> 0,50\%$);
- Aços-liga de baixo teor em liga (soma dos elementos de liga inferior a 8%);
- Aços liga de alto teor em liga (soma dos elementos de liga superiores a 8%).

Os elementos de liga são aqueles que, além do ferro e carbono, podem ser adicionados à composição química do material em quantidades superiores aos níveis residuais. Com adição de elementos de liga, o material tende a melhorar as propriedades mecânicas, químicas e elétricas. Segundo Chiaverini (1988), a adição de elementos de liga altera as propriedades mecânicas, aumenta usinabilidade, temperabilidade dentre outros aspectos.

Callister (2016), afirma que aços com médio teor de carbono, tem baixa temperabilidade e podem ser tratados termicamente com sucesso apenas em seções muito finas e com rápida taxa de resfriamento. Adição de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade dessas ligas serem tratadas termicamente, melhorando assim suas propriedades mecânicas.

Da Costa (2017) e Venson (2017) destacam alguns elementos de liga que apresentam algumas melhorias nas propriedades dos aços.

- Cromo: Contribui para capacidade de endurecimento até quando adicionado a cerca de 1%. Ligeiramente resistente ao amolecimento durante a têmpera. Quando aplicado, aumenta a resistência a temperaturas elevadas, oxidação e tração. Reduz o desgaste do material.
- Manganês: Contribui para o endurecimento do aço. Promove a Austenita retida na têmpera e melhora a usinabilidade. Aumenta a resistência e reduz a ductilidade em aços ferríticos e promove a trabalhabilidade a quente.
- Molibdênio: Contribui para o endurecimento do aço, aumenta a temperabilidade, aumenta a resistência temperaturas elevadas.
- Silício: Aumenta a resistência a corrosão e à tração, sendo um agente desoxidante na produção do aço. É utilizado em núcleos magnéticos, devido sua resistividade elétrica.
- Níquel: Melhora a temperabilidade possibilitando redução da velocidade de resfriamento. Em média, a cada 1% de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa. Interfere favoravelmente no limite de elasticidade.

2.4- NOMENCLATURA DOS AÇOS

A quantidade e os tipos de aços existentes são em números bastante grandes. Estes aços podem ser classificados de várias formas tais como; pela finalidade e aplicação, pelos processos de fabricação, pelas propriedades mecânicas e pela composição química. Destas possibilidades de classificar dos aços a mais empregada, a mais usual, é a que classifica os aços conforme sua composição química. Dentre as normas que classificam os aços desta forma estão a *Society of Automotive Engineering (SAE)*, *American Institute of Steel and Iron (AISI)*, *Deutsches Institut für Normung (DIN)* e *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*.

O sistema brasileiro ABNT se baseou nos sistemas americanos, SAE e AISI para sua formulação, onde os vários tipos de aço até 1% de carbono, são classificados. De forma simplificada os aços são identificados por uma sequência de quatro algarismos: os dois últimos correspondem ao teor de carbono médio multiplicado por cem (x100) e os dois primeiros à presença ou não de elementos de liga. Quando os dois primeiros algarismos forem 1 e 0 (10XX) significa que o aço não apresenta elementos de liga adicionados propositalmente, a não ser Carbono e os elementos residuais Manganês, Silício, Fósforo e Enxofre oriundos do processo siderúrgico.

Quando os dois primeiros algarismos forem diferentes de 1 e 0 significa que nestas circunstâncias ocorre a adição de elementos de liga propositalmente que alteram as características Mecânicas, Química ou Elétricas do aço. Cada combinação dos dois primeiros algarismos representa a presença de um ou mais elementos adicionados propositalmente e que podem estar presentes em proporções definidas.

A Tabela 1 exemplifica o sistema de classificação dos aços para as Normas AISI/SAE e a Tabela 2 apresenta um sistema de classificação de aço para uma Norma de uso exclusivo em aplicações Militares.

Tabela 1: Sistemas de especificação AISI/SAE para aços carbono comuns e aços de liga.

Especificação AISI/SAE ^a	Especificação UNS	Faixas de Composição (%p dos Elementos de Liga em Adição ao C) ^b			
		Ni	Cr	Mo	Outros
10xx, Aço-carbono comum	G10xx0				
11xx, Fácil usinagem	G11xx0				0,08–0,33 S
12xx, Fácil usinagem	G12xx0				0,10–0,35 S, 0,04–0,12 P
13xx	G13xx0				1,60–1,90 Mn
40xx	G40xx0			0,20–0,30	
41xx	G41xx0		0,80–1,10	0,15–0,25	
43xx	G43xx0	1,65–2,00	0,40–0,90	0,20–0,30	
46xx	G46xx0	0,70–2,00		0,15–0,30	
48xx	G48xx0	3,25–3,75		0,20–0,30	
51xx	G51xx0		0,70–1,10		
61xx	G61xx0		0,50–1,10		0,10–0,15 V
86xx	G86xx0	0,40–0,70	0,40–0,60	0,15–0,25	
92xx	G92xx0				1,80–2,20 Si

Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2016.

Tabela 2: Especificações técnicas militares.

SELECTED MILITARY SPECIFICATIONS

Chemical Composition Ranges and Limits

MIL.	C	Mn	P Max	S Max	Si	Cr	Ni	Mo	Nearest Equivalent	
									AMS	SAE No.
S-5000	.38/.43	.65/.85	.025	.025	.15/.35	.70/.90	1.65/2.00	20/30	6415	E4340
S-50783 ¹	1.00/1.15	1.60/1.90	.035	.040	.70/1.00	.20 max	.25 max	.06 max	—	—
S-5626	.38/.43	.75/1.00	.025	.025	20/35	.80/1.10	.25 max	.15/.25	6382	4140
S-6049	.38/.43	.75/1.00	.025	.025	20/35	.40/.60	.40/.70	20/30	638740	—
S-6050	.28/.33	.70/.90	.025	.025	20/35	.40/.60	.40/.70	.15/.25	6280	8630
S-6709 ²	.38/.43	.50/.70	.025	.025	20/40	1.40/1.80	—	30/40	6470	—
S-6758	.28/.33	.40/.60	.025	.025	20/35	.80/1.10	.25 max	.15/.25	637	4130
S-7108 ³	.23/.28	1.20/1.50	.040	.040	1.30/1.70	.40 max	1.65/2.00	35/45	6418	4625M4
S-7393	.08/.13	.45/.60	.015	.015	20/35	1.25/1.75	3.25/3.75	—	6250	3310
	.14/.19	.45/.60	.025	.025	20/35	1.25/1.75	3.25/4.00	—	—	3316
	.07/.13	.40/.70	.025	.025	20/35	1.00/1.40	3.00/3.50	.08/.15	—	9310
S-7420	.95/1.10	.25/.45	.025	.025	20/35	1.30/1.60	—	—	6440	52100
S-8503 ⁴	.48/.53	.70/.90	.025	.025	20/35	.75/1.20	—	—	6448	6150
S-8690 ⁴	.18/.23	.70/1.00	.025	.025	20/35	.40/.60	.40/.70	.15/.25	6274	8620
S-8695 ⁴	.34/.41	.60/1.00	.040	.040	20/35	—	—	20/30	6300	4037
S-8699 ^{4A}	.28/.33	.80/1.00	.040	.040	20/35	.75/.95	1.65/2.00	35/50	6427	4330M4V1
S-8707	.38/.43	.70/.90	.040	.040	20/35	.70/.90	.85/1.15	20/30	6342	9840
S-8844-1	.38/.43	.65/.90	.010	.010	.15/.35	.70/.90	1.65/2.00	20/30	—	4340
S-8844-3 ⁴	.40/.45	.65/.90	.010	.010	1.45/1.80	.70/.95	1.65/2.00	35/45	—	300M
T-5066	.22/.28	.30/.60	.025	.025	.30 max	—	—	—	—	1025
S-11595 ⁵	.48/.55	.75/1.00	.040	.040	20/35	.80/1.10	—	.15/.25	—	4150
S-11595 ⁶	.47/.55	.70/1.00	.040	.05/.09	20/35	.80/1.15	—	.15/.25	—	41R50
S-11595 ⁷	.41/.49	.60/.90	.040	.040	20/35	.80/1.15	—	.30/.40	—	4142M3V2
S-4604 ⁸	.38/.45	.75/1.00	.025	.020	20/35	.95/1.25	—	.55/.70	—	—

NOTE: Aircraft quality steels except where indicated. 1. Al = .020 max. 2. P & S = .025 max if Basic Electric Furnace Steel is specified. 3. V = .13 max. 4. Al = .040 max. 5. Cu = .33 max unless specified. 6. Al = .013 max. 7. P & S = .013 max if consumable vacuum melted steel is specified. 8. V = .03/20. 9. V = .20/30.

Fonte: Catálogo Gerdau- Aços Piratini.

2.5 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS PARA FUNDIÇÃO

Por definição, os tratamentos térmicos visam a alteração das propriedades mecânicas iniciais de um material através das alterações nas fases presentes na microestrutura deste, sendo o tempo e a temperatura as variáveis consideradas fundamentais para realização destes tratamentos.

Segundo Chiaverini (1988) os objetivos dos tratamentos térmicos em aços obtidos por fundição são diminuir ou acabar com a textura bruta de solidificação dendrítica, comuns neste processo de manufatura, e indesejadas para o desempenho mecânicos dos componentes fundidos. Eliminar as tensões internas originadas das diferentes velocidades de resfriamento na solidificação e resfriamento nas diferentes seções das peças.

Componentes mecânicos obtidos em aço ligado fundido são passíveis de serem tratados termicamente pelos mais variados processos de tratamentos existentes aplicados a elementos que compõem a liga.

O diagrama Fe-Fe₃C poderá auxiliar na compreensão destes tratamentos, sobretudo aqueles, em que a velocidade de arrefecimento é bastante baixa, as quais fornecem tempo suficiente para que os elementos se arranjam adequadamente por difusão. Tratamentos térmicos como Recozimento Pleno, Normalização, Recozimento de Alívio de Tensão, Recozimento de Esferoidização e Revenido se enquadram neste perfil.

Para tratamentos térmicos nos quais o resfriamento deva ser muito rápido, ou seja, sai fora do regime de equilíbrio formando soluções metaestáveis, os cuidados com relação temperaturas, velocidade de resfriamento são baseados nos Diagrama Transformação- Tempo-Temperatura (TTT). Se enquadram neste tipo de tratamento a Têmpera, Martêmpera e Austêmpera.

As propriedades dos aços dependem de sua microestrutura, sendo que os tratamentos térmicos modificam em maior ou menor escala a estrutura dos aços.

2.5.1 Estruturas encontradas nos Aços Tratados Termicamente

Nos Tratamentos Térmicos os processos de o aquecimento ou resfriamento, podem ser bruscos ou lentos e dependendo da forma que estes são feitos o tipo de microestrutura resultante pode ser bastante variado. Nas transformações de fase, pelo menos uma nova fase é obtida, possuindo forma e características distintas de sua forma original ou podem formar duas ou mais fases distintas estáveis ou metaestáveis, com morfologia distintas das fases comumente obtidas nas transformações em equilíbrio. As fases e microestruturas comumente obtidas nos Aços após os Tratamentos Térmicos são: Ferrita, Austenita, Martensita, Perlita e Bainita.

2.5.1.1 Ferrita

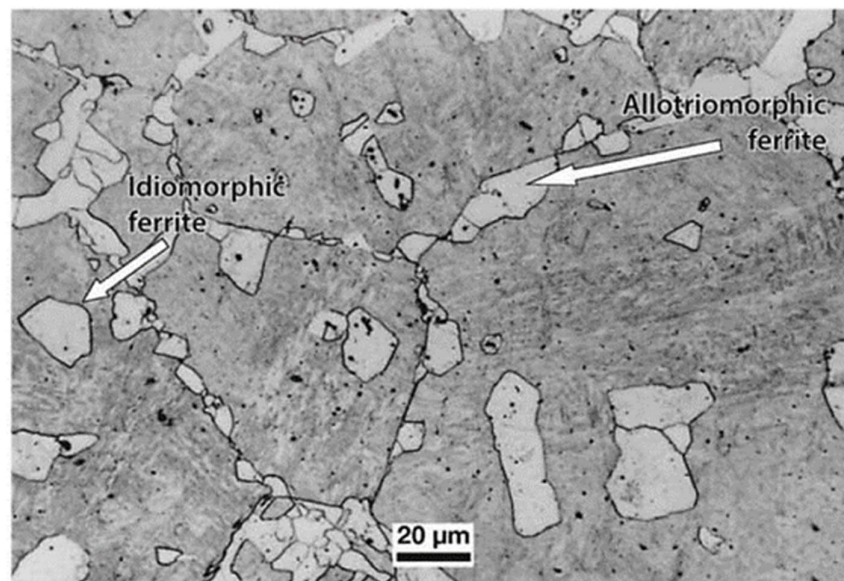
A Ferrita é ferro no estado alotrópico Alfa (Fe α), apresentando um reticulado cristalino Cúbico de Corpo Centrado (CCC). O Ferro puro ou aços que contenham teores de carbono abaixo do limite de solubilidade, 0,02% C, se apresenta na forma de Fe α são essencialmente

monofásicos a temperatura ambiente. (COLPAERT, 2008). A ferrita normalmente apresenta estrutura de grãos poligonais irregulares de baixa dureza e baixa resistência à tração, porém excelente resistência ao choque (Tenacidade) e elevado alongamento (Ductilidade).

Na ferrita, o teor de carbono, presença de elementos de liga e diferentes taxas de resfriamento são importantes na formação de novas morfologias de ferrita durante as transformações de decomposição da Austenita.

A figura 5 mostra a Ferrita Pró-Eutetóide em duas situações: uma na forma que nucleou e cresceu ao longo de um contorno de grão austenítico, designada Ferrita Alotriomorfa e outra, a Ferrita Idiomorfa, tem a tendência de nuclear no interior do grão, em inclusões não-metálicas, sem influência dos contornos de grãos austeníticos.

Figura 2: Morfologia de Ferrita Pró-Eutetóide. A Ferrita Alotriomórfica nucleada nos contornos de grãos austenísticos e Ferrita Idiomórfica nucleada no interior dos grãos.

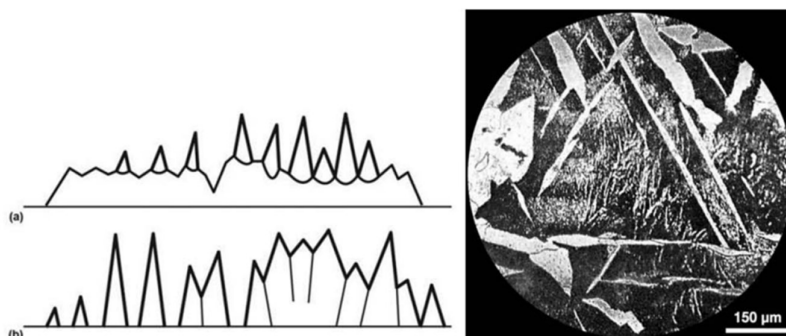


Fonte: COLPAERT, 2008. Pág 229.

Dentro da classificação morfológica da ferrita, existem ferritas que se apresenta alongadas em estruturas chamadas de aciculares, em forma de ripas e placas e são denominadas Ferrita de Widmanstätten. Essas podem nuclear diretamente no contorno dos grãos austenísticos ou desenvolver-se a partir das ferritas alotriomorfas já nucleados inicialmente no

contorno de grão. (COLPAERT, 2008). A Ferrita de Widmanstatten é formada em temperaturas mais elevadas e a altas taxas de resfriamento. A figura 6 representa a Ferrita de Widmanstatten em aço de médio carbono, bem como a representação dos mecanismos propostos para nucleação das mesmas.

Figura 3: Esquema mostrando os tipos de formação de Ferrita de Widmanstatten. Placas de Ferrita de Widmanstatten, dispostas 60° entre si.

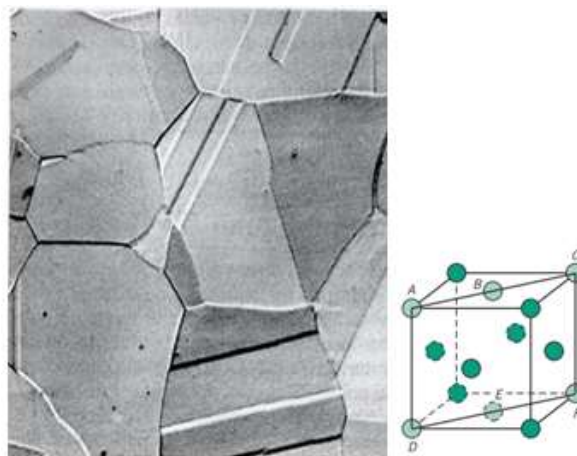


Fonte: COLPAERT, 2008. Págs. 232 e 233.

2.1.1.1 Austenita

A Austenita é o ferro no estado alotrópico Gama ($Fe \gamma$), apresentando um reticulado cristalino Cúbico de Face Centrado (CFC), figura 7. A Austenita por ter reticulado cristalina CFC é capaz de reter em Solução Sólida Intersticial (SS) uma quantidade maior de carbono que a ferrita (CCC). A solubilidade do carbono na Austenita atinge um máximo de 2,11% a 1148°C e diminui para 0,77% a 727°C.

Figura 7: Fotomicrografia da Austenita e sua respectiva célula unitária CFC.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2016. Pág 72.

O aquecimento dos aços de médios a altos teores de carbono à temperatura de austenitização dissolvem os carbonetos e retém o carbono e todos os elementos de liga em Solução Sólida na Austenita. (CHIAVERINI, 1988).

A Austenita é formada por nucleação e cresce por difusão a partir do contorno de grão ou em inclusões não metálicas quando este é aquecido para tratamento térmico ou tratamento termomecânico. A sua microestrutura resultante passará a ser uma solução sólida intersticial de carbono e elementos de liga dissolvidos no Fe γ .

No geral, a Austenita consta de uma estrutura de grãos poligonais irregulares, possuindo boa resistência mecânica e tenacidade e é não magnética.

Varshney *et all* (2016) afirma que para se obter aços com propriedades mecânicas desejáveis como boa resistência mecânica combinada a ductilidade, podem ser obtidas a partir de processos de recozimento intercrítico e tratamentos isotérmicos de transformação bainítica. Através da estabilidade da Austenita retida, obtêm-se aços fundidos de maior resistência mecânica e ductilidade (REED- HILL, 2009). A Austenita retida pode transformar-se em Martensita por solicação mecânica.

2.1.1.2 *Martensita*

A Martensita é uma estrutura monofásica, uma Solução Sólida Supersaturada Metaestável (SSSM) de carbono dissolvido intersticialmente no ferro, que se forma a partir do resfriamento brusco da Austenita.

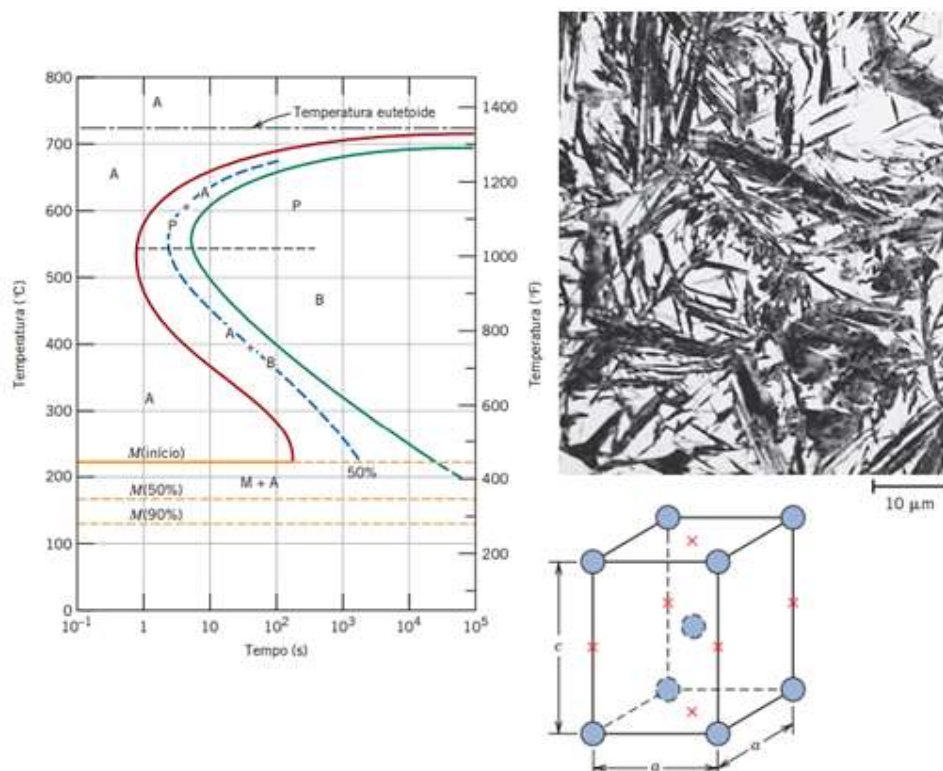
A taxa de resfriamento, para se obter Martensita (SSSM) a partir Austenita (SS), deve ser rápida o suficiente para evitar a difusão do carbono na estrutura e, por conseguinte, evitar formação de ferrita e cementita na estrutura.

A temperatura ambiente o ferro deve estar com reticulado cristalino CCC e devido à baixa solubilidade do carbono neste e a rápida velocidade de resfriamento que impede a difusão do carbono, distorcendo o reticulado cristalino ficando este Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) com o carbono retido em uma Solução Sólida Super Saturada Metaestável.

A distorção provocada pela presença do carbono gera um tensionamento no reticulado cristalino que justifica a elevada resistência mecânica e a baixa tenacidade da Martensita. Para que este tensionamento diminua é preciso fazer um tratamento térmico denominado revenido que transforma a solução sólida super saturada em uma estrutura bifásica composta de micros precipitados de Carboneto de Ferro, Cementita (Fe_3C), finamente dispersos em uma matriz Ferrítica ($\text{Fe-}\alpha$) denominado Martensita Revenida.

Na figura 8, “M” representa a fase de Martensita, a qual é uma estrutura monofásica e Callister (2016) ressalta que a taxa da transformação martensítica é independente do tempo uma vez que não ocorre difusão.

Figura 8: Diagrama da transformação isotérmica para aço Eutetóide e uma reticulado Tetragonal de Corpo Centrado.



Fonte: CALLISTER, 2016. Pág 345.

Observa-se pela figura 8 que entre a faixa de 200°C a 100°C, entra as linhas indicadas por “M” surge a Martensita. Para aços com uma proporção maior de carbono, a temperatura de início de formação da Martensita tende a diminuir e a sua dureza aumenta para aproximadamente 65 Rockwell C.

Ao analisar a microestrutura martensítica observa-se seu crescimento em contornos de grãos austenísticos sob formas alongadas de ripas ou placas dependendo do teor de carbono do material a ser analisado.

Com o resfriamento a Austenita se transformará em ferrita e carbonetos, no entanto se o resfriamento for muito rápido não ocorrerá a transformação e aparecerá a Martensita na forma ripa com Austenita retida, formando o microconstituente Martensita-Austenita (MA). (BRAMFITT; SPEER, 1990).

A Martensita pode se formar a partir da Austenita retida, se esta for deformada mecanicamente. Esta Martensita é comumente deletéria para o material pois comporta-se como Martensita não revenida, podendo ser ponto de nucleação de trincas de fadiga. (BRAMFITT; SPEER, 1990; KRAUSS, G., 2005).

2.1.1.3 Bainita

Segundo Colpaert (2008), a Bainita pode ser definida como um produto de transformação em faixa de temperatura intermediária entre transformação eutetoide (formação de perlita) e transformação da martensita (Solução Sólida Super Saturada), que é constituída por agregados de cementita e ferrita. Suas microestruturas podem ser classificadas de duas maneiras, em função da faixa de temperatura em que se formam e das características microestruturas: *Bainita superior e Bainita inferior*. (BHADESHIA, *et.al*).

A Bainita superior se forma nas faixas de temperatura imediatamente abaixo da faixa em que a Perlita se forma, sendo que em aços hipoeutetóides apresenta-se na forma de pilhas ou agulhas de ferrita, que crescem através dos grãos de Austenita. Nos aços hipoeutetóides, figura 9, o início da formação de bainita superior corresponde a formação de ferrita. Os aços contendo cerca de 2% de silício e austemperados na região de Bainita superior terão em sua microestrutura placas de ferrita bainítica separadas por regiões de Austenita enriquecidas de carbono (BHADESHIA; EDMONDS, 1983).

A bainita inferior, figura 10, forma-se a temperaturas abaixo de 350°C, apresentando placas de ferrita longas não paralelas, para teores de carbono entre 0,30- 0,35%. Sua diferenciação da martensita é difícil através da microscopia ótica. (COLPAERT, 2008).

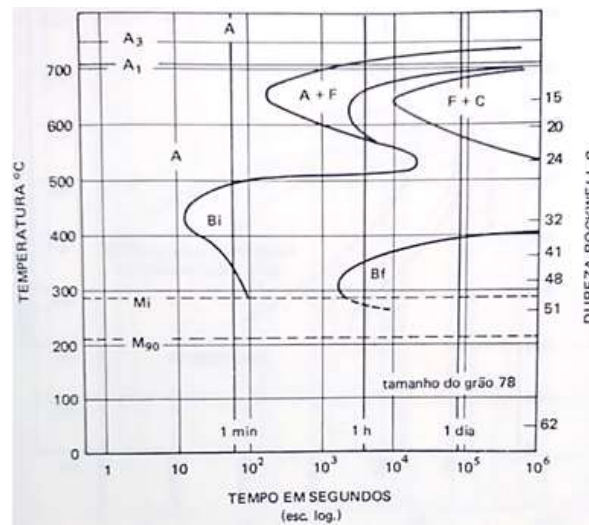
Chiaverini (1988), afirma que os diagramas de transformação isotérmica não deveriam ser utilizados com base para estudos de tratamento térmico, sendo que na prática a maioria dos tratamentos térmicos aplicados as ligas ferrosas são de resfriamento contínuo.

Figura 9: Exemplo de curva de transformação isotérmica, para um aço 4140.



Fonte: Tabela da Gerdau- aços finos Piratini.

Figura 6: Curva TTT para aço com médio teor de carbono com elementos de liga.



Fonte: CHIAVERINI, 1990. Pág 85.

2.5.2- Reozimento

Reozimento é um tratamento térmico cujos objetivos são; homogeneizar as estruturas brutas de fusão e a composição química; reduzir as tensões e a dureza induzida por deformação mecânica a frio (Encruamento); melhorar a usinabilidade; alterar propriedades mecânicas como dureza e tenacidade e reverter propriedades alteradas por tratamentos térmicos anteriores.

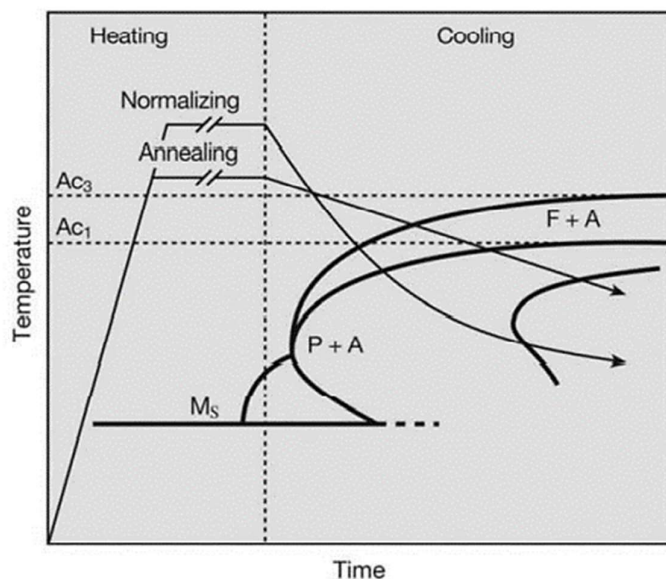
Para o Reozimento Pleno dos aços Hipoeutetóide devem ser aquecidos na região austenítica, cerca de 50 °C acima da linha de transformação A_3 e mantidos a esta temperatura por um tempo suficiente para que ocorra a transformação de todo o material em Austenita. Posteriormente o material é resfriado lentamente, ao forno, até a temperatura ambiente, resultando numa estrutura formada por Ferrita pró Eutetóide e colônias grandes de Perlita grosseira.

Para o Reozimento de Alívio de Tensões, os aços Hipoeutetóides devem ser aquecidos a temperaturas abaixo da zona crítica, abaixo da linha de transformação A_1 , temperaturas normalmente entre 550°C e 650°C. Seu objetivo é aliviar tensões internas dos materiais oriundas dos processos de soldagem, fundição ou conformação mecânica a frio, principalmente para aços de baixos teores de carbono, teores inferiores a 0,30% C.

2.5.3- Normalização

Normalização é o processo de tratamento térmico no qual o aço é aquecido a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar, sendo utilizada quando se deseja homogeneizar as estruturas brutas de solidificação e a composição química em peças fundidas e também obter um aumento na resistência mecânica, na tenacidade e dureza. Para isso, no caso de aços hipoeutetóides pode-se admitir que a temperatura de aquecimento ultrapasse em 50°C a linha A_{C3} da figura 10 conforme recomenda o comitê da ASM sobre reozimento e normalização de aços.

Figura 7: Curvas para recozimento pleno e normalização sobrepostos.



Fonte: COLPAERT, 2008. Pág 268.

No tratamento de normalização por ser feito um resfriamento mais rápido que no recozimento, tem-se a possibilidade obter uma microestrutura com melhores propriedades mecânicas. Na Normalização, como no Recozimento Pleno dos aços Hipoeutetóide, estes devem ser aquecidos na região austenítica, cerca de 50 °C acima da linha de transformação AC_3 e mantidos a esta temperatura por um tempo suficiente para que ocorra a transformação de todo o material em Austenita. Posteriormente o material é resfriado fora do forno, ao Ar, de forma mais rápida até a temperatura ambiente, resultando numa estrutura formada por Ferrita pró Eutetóide e colônias pequenas de Perlita e está com espaçamento interlamelar menor (Perlita fina).

A Normalização também é indicada como um tratamento térmico que deve ser prévio ao de têmpera e revenido. As microestruturas que resultam deste tratamento térmico dependem, sobretudo de sua composição química. Ciclos sucessivos de normalização podem ter efeito favorável sobre o tamanho do grão austenístico. (COLPAERT, 2008).

2.5.4 – Têmpera

Consiste no tratamento térmico em que o material é aquecimento previamente, geralmente entre 50°C acima da temperatura de austenitização e resfriado rapidamente até a temperatura ambiente. O objetivo do resfriamento brusco é evitar que ocorra o processo de difusão para que ocorram as mudanças de fases previstas pelo diagrama de equilíbrio e passe a formar uma estrutura metaestável identificada como Martensita.

A velocidade de resfriamento deve ser apropriada, de modo que haja a total transformação da Austenita em Martensita evitando que intercepte as linhas de formação de Perlita, no máximo que tangencie o joelho das curvas do Diagrama Transformação Tempo Temperaturas (TTT). A temperatura de aquecimento para têmpera tem influência total na estrutura do aço. Logo, o aquecimento deve ser de 50 °C acima da linha de transformação A_3 para aços Hipoeutetóides e para aços Hipereutetóides 50 °C acima da linha de transformação A_{Cm} .

A microestrutura Martensítica é dependente do teor de carbono e da presença de elementos de liga se apresenta como uma solução sólida supersaturada de carbono num reticulado cristalino Tetragonal de Corpo Centrado (TCC), ao invés das fases Ferrita ($Fe\alpha$ - CCC) e Cementita (Fe_3C – Ortorrômbica) distribuídas como Ferrita Pró-Eutetóide e Perlita.

Na têmpera, a fase Martensita, por estar altamente distorcida pela presença do carbono dissolvido nela, produzindo uma combinação de altíssima resistência à tração e elevada dureza do aço. Em contrapartida, há redução drástica da ductilidade e da tenacidade o que inviabiliza seu uso no estado simplesmente temperado, para ser usado o material deve passar por um tratamento de revenido para que a solução sólida passe a ser uma mistura de duas fases, composta de uma matriz Ferrítica com micro precipitados de Cementita uniformemente distribuídos ao qual se denomina Martensita Revenida.

Enquanto o carbono tem um forte efeito sobre a dureza da Martensita, a maior parte dos elementos de liga adicionados ao aço retarda as transformações de decomposição difusional da Austenita, aumentando sua temperabilidade. Temperabilidade é a característica que define a variação de dureza desde a superfície até o núcleo da peça temperada. (COLPAERT, 2008).

2.6- FATORES QUE INFLUENCIAM OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para que se consigam melhores propriedades mecânicas em determinado aço, é preciso que se realizem alterações nos constituintes microestruturais destes e a forma mais usual é fazendo o tratamento térmico do aço. Para tanto é necessário fazer um aquecimento, acima da zona crítica, ou seja, mais ou menos cinquenta graus da linha de transformação A₃ do diagrama de equilíbrio, para que se tenha completa austenitização do aço. A austenitização completa é a dissolução total da Cementita (Carboneto de Ferro (Fe₃C) - Ortorrômbico) para que o carbono possa ficar em solução sólida na Austenita (Ferro- γ - (CFC)) que passa a existir pela transformação alotrópica da Ferrita (Ferro α - (CCC)).

Quando os aços fundidos estão em estado de tensão interna, ou possuem tensões residuais, um aquecimento muito rápido para promover a austenitização pode provocar fissuras e empenamentos nas peças. Logo, a velocidade de aquecimento bem como a temperatura máxima alcançada são pontos relevantes nos tratamentos térmicos.

Chiaverini (1988) ressalta a influência do tempo de permanência e a temperatura escolhida, visto que, quanto mais longo o tempo e mais alta a temperatura de austenitização, mais completa será a dissolução da Cementita, dos elementos de liga e a total transformação da Ferrita em Austenita. Entretanto, temperaturas elevadas e longos tempos de permanência nestas temperaturas, podem fazer com que ocorra um crescimento do grão austenítico o que não é recomendado. Em virtude disto, evita-se a permanência desta temperatura de austenitização por muito tempo, uma vez que o objetivo é obter uma temperatura uniforme em toda a secção da peça conseguindo assim, modificações estruturais mais convenientes.

O resfriamento nos tratamentos térmicos, lentos ou rápidos, é um dos fatores mais importantes, pois através deste, ocorrerá a determinação da microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços. Obviamente, que a composição química destes, pela presença de diferentes elementos de liga, é fundamental para que ocorram as mudanças desejadas.

Os meios de resfriamento podem ser bruscos por meios líquidos ou lentos, por meio do ar a temperatura ambiente ou ainda no próprio ambiente do forno a qual a peça é aquecida. O meio de resfriamento deve ser escolhido com base na estrutura final desejada e que este não provoque danos indesejados como trincas ou empenamento as peças.

2.7- TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS

Quando dos experimentos realizados por Bain para estudar as alterações na microestrutura que ocorrem na decomposição da Austenita, foi utilizado um método na qual as amostras são inicialmente austenitizadas, em seguida sofrem um resfriamento brusco (têmpera) em um banho de sal fundido até uma determinada temperatura e mantida esta temperatura para que as transformações de fases ocorram de forma isotérmica.

Para aços temperados a quente, em banho de sal, na faixa de temperatura de 550 a 250°C e mantida a temperatura constante observa-se a formação de uma estrutura intermediária entre a Perlita Fina obtida na Normalização e da Martensita obtida na Tempera. A esta estrutura dá-se o nome de Bainita e é uma estrutura Eutetóide não lamelar composta de Ferrita ($Fe-\alpha$) e Cementita (Fe_3C).

Se destacam entre os tratamentos isotérmicos a Austêmpera na qual obtém-se a estrutura bainítica e a Martêmpera na qual se faz a tempera em banho de sal a temperatura próxima à da transformação martensítica e deixa-se nesta temperatura até que se equalize a temperatura da peça e depois se faz uma nova têmpera em água para obter uma estrutura martensítica que depois deverá ser Revenida.

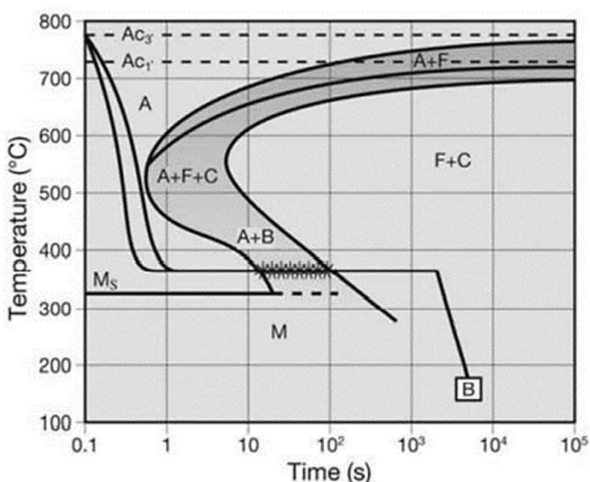
2.7.1- Austêmpera

Austêmpera é o tratamento considerado isotérmico no qual a peça primeiramente é aquecida para promover a austenitização do aço a uma temperatura de 50 °C acima da linha crítica, linha Ac_3 para aços Hipoeutetóides e linha Ac_m para aços Hipereutetóides, seguido de resfriamento brusco para evitar passar pelas linhas de transformação perlíticas e no máximo tangenciar o “joelho” da curva TTT. A peça deve ser mantida a temperatura constante no banho de sal, acima da temperatura de início de formação da Martensita (M_s) por um longo período de tempo para que a Austenita se transforme 100% em Bainita.

Chiaverini (1988), ressalta que a Bainita tem propriedades idênticas, ou até superiores, à Martensita Revenida, sendo que este tratamento, evita a formação direta de Martensita, eliminando por meio de revenimento posterior, os inconvenientes que se apresentam na estrutura da amostra oriundas de têmpera. O tratamento de austêmpera pode ser até duas vezes mais demorado que tratamentos convencionais, ou seja, a transformação da Austenita em Bainita demanda tempo.

O tratamento térmico de Austêmpera mostrado nas curvas C ou TTT, figura XX, mostra que o produto obtido é a Bainita, a qual pode ser caracterizada conforme descrito item 2.5.1.4 deste estudo.

Figura 8: Tratamento isotérmico de Austêmpera para formação de Bainita. Entende-se por A- Austenita; B- Bainita; F- Ferrita; C- Cementita e M- Martensita.



Fonte: COLPAERT, 2008. Pág 318.

Com base nos estudos da ASM COMMITTEE ON AUSTEMPERING, as estruturas bainíticas obtidas após a austêmpera, próximo à linha de 200°C do diagrama TTT, apresentam boa ductilidade e resistência ao choque, com durezas superiores a 50 Rockwell C. Valor este que é superior ao normalmente encontrado para a Martensita Revenida.

A austêmpera distingue-se da têmpera e revenido, pelo fato da estrutura bainítica se formar diretamente a partir da Austenita, com temperaturas superiores a temperatura Ms de início de transformação martensítica, reduzindo assim as tensões internas,

distorções/empenamento e aparecimento de trinca ou fissuras. O resfriamento brusco das amostras submetidas a Austêmpera, podem ser através de banhos em sais fundidos, ceras de polímeros ou nitreto de sódio, que mais se adequam a temperatura constante na qual se deseja obter a Bainita, superior ou inferior.

Chiaverini (1988) recomenda os seguintes passos para se fazer o tratamento isotérmico de austempera em aços Hipoeutetóides:

- Aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenitização- (785°C a 870°C);
- Resfriamento em um banho mantido a uma temperatura constante – (entre 260°C a 400°C);
- Permanência no banho a esta temperatura, para obter a transformação isotérmica da Austenita em bainita;
- Resfriamento até temperatura ambiente.

2.7.2- Martêmpera

A Martêmpera, é um processo modificado de têmpera, visando amenizar as distorções e formações de trincas ou fissuras que podem ocorrer durante o arrefecimento desigual do material tratado. A Martêmpera é o tratamento considerado isotérmico no qual a peça primeiramente é aquecida para promover a austenitização do aço a uma temperatura de 50°C acima da linha crítica, linha A_3 para aços Hipoeutetóides e linha A_{c_m} para aços Hipereutetóides, seguido de resfriamento brusco para evitar as linhas de transformação perlíticas e no máximo tangenciar o joelho da curva TTT.

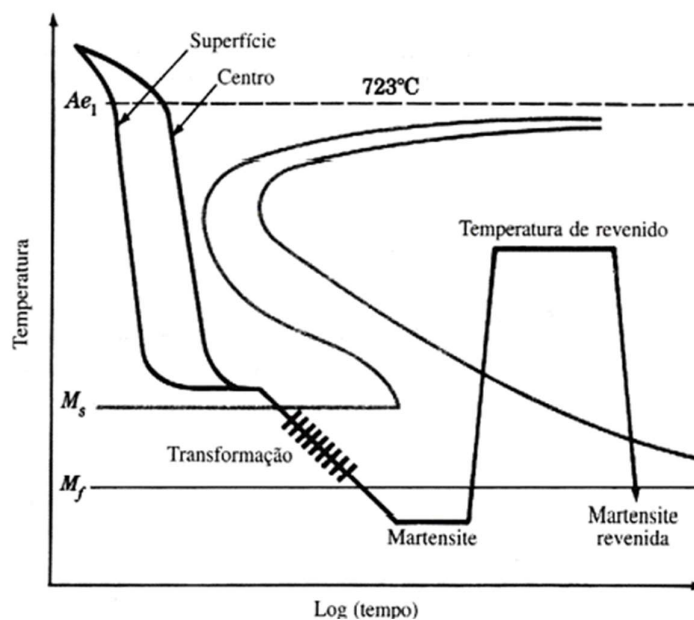
A peça deve ser e mantidas a temperatura constante do banho de sal, acima da temperatura de início de formação da Martensita (M_s) por um período de tempo suficiente para que ocorra a homogeneização da temperatura em toda a sua massa. Só então a peça é resfriada bruscamente em água para que a Austenita se transforme em Martensita. A estrutura martensítica, obtida nos aços após a martêmpera deve passar pelo tratamento de revenido, obtendo-se Martensita Revenida.

Colpaert (2008) ressalta que o emprego da Martêmpera não dispensa o revenimento, como na Austêmpera. Aços-liga apresentam condições superiores quando realizado martêmpera, sendo os aços SAE 1090, 4130, 4140, 4340 os mais utilizados.

A Martêmpera é obtida pela seguinte sequência de operações, segundo Chiaverini, (1988):

- Aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenitização;
- Resfriamento em óleo quente ou sal fundido mantido a uma temperatura superior a linha de início de transformação martensítica (M_s) do diagrama TTT;
- Manutenção no meio de resfriamento até que a temperatura de toda a seção do aço se torne uniforme;
- Resfriamento, em água ou ar forçado, a velocidade moderada, de modo a prevenir qualquer diferença de temperatura entre a parte externa/interna da seção.

Figura 9: Diagrama esquemático de transformação para Martêmpera.



Fonte: Adaptado de "Metals Handbook", vol. 2, 8a ed., American Society for Metals. 1964, p. 37

2.8- PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS

Os vários materiais que são utilizados em estruturas e conjuntos mecânicos são solicitados a forças e cargas que variam conforme sua necessidade de uso e são projetados, obviamente, seguindo vários critérios dentro das Normas empregadas na engenharia. O comportamento de um material reflete sua deformação a solicitação a qual está sendo aplicada no momento. Resistência, dureza, ductilidade, tenacidade, limite de resistência a tração e elasticidade, são algumas das propriedades mecânicas de maior importantes dos metais. (CALLISTER, 2012).

As propriedades mecânicas são obtidas, analisadas, estudadas e comprovadas a partir de ensaios mecânicos em laboratórios ou em condições de serviços. Cargas (compressão, tração, cisalhamento) aplicadas nos testes, constantes ou oscilantes, ao longo do tempo ou não, tempo e temperatura de testes são fatores relevantes durante realização de ensaios.

Existem Normas como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) que norteiam os ensaios tornando-os padronizados. Sendo assim pode-se dizer que as especificações dos metais usados para a fabricação de vários produtos e estruturas mecânicas são baseadas nestes testes ou ensaios mecânicos.

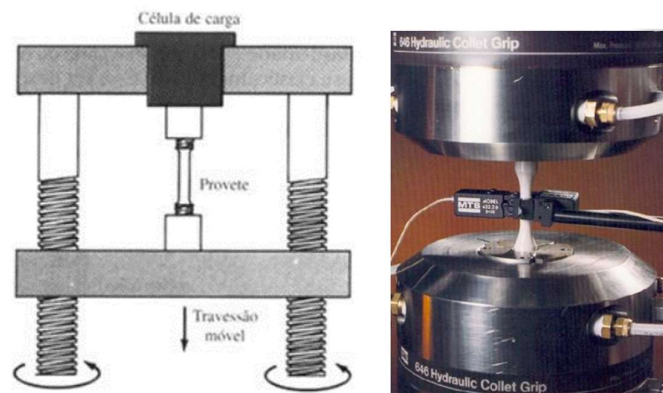
Conforme cita Souza (1982), os ensaios mecânicos podem ser do tipo destrutivo como ensaios de tração, compressão, fadiga, dobramento, flexão, torção, impacto, ou do tipo não destrutivos, como os ensaios de Raios-X, Ultra-som, Condutividade Elétricos e etc.

2.8.1- Ensaio de Tração

O ensaio de tração é utilizado para avaliar o comportamento mecânico de metais e ligas, para tanto são utilizados equipamentos e dispositivos específicos para esses ensaios. O Corpo de Prova (CP) a ser analisado é posicionado na máquina e é estirado (tracionado) até a sua fratura em um intervalo de tempo relativamente curto a uma velocidade constante para que a combinação destes parâmetros faça com que o ensaio seja considerado estático. A carga

aplicada ao CP e a deformação provocada são registrados a partir de sinais de sensores elétricos montados com extensômetros e plotados em gráficos de Força por Deformação ou Tensão por Deformação Específica para ser então avaliado o comportamento do material perante a sollicitação.

Figura 10: Funcionamento de uma máquina à tração em e extensômetro medindo a deformação do corpo de prova.



Fonte: Notas de aula e ASTM.

Figura 11: Exemplo de máquina universal para ensaio de tração, presente no LADIPP-UFSM.



Fonte: Autor.

Segundo Beer (1989), algumas propriedades mecânicas importantes dos metais e ligas relevantes em projetos de estrutura e de componentes mecânicos, podem ser obtidas a partir do ensaio de tração. Num ensaio de tração podem ser obtidas as seguintes propriedades mecânicas: Módulo de Elasticidade (E), Tensão de Escoamento (σ_e), Tensão Máxima (σ_{Max}), Alongamento (Ductilidade), Tenacidade e Resiliência. Alguns conceitos equações são importantes para melhor compreensão na curva Tensão Normal por Deformação Específica.

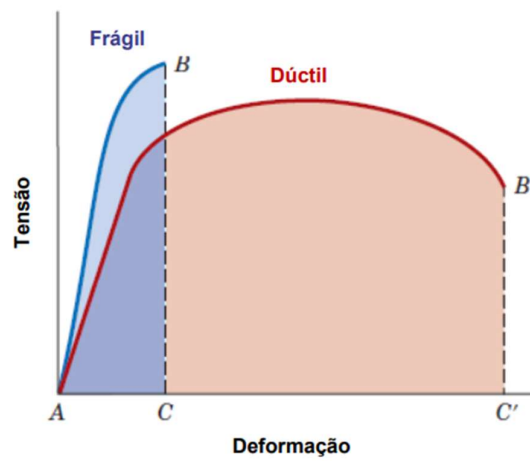
A representação gráfica de um ensaio quando feito pela força e deformação avalia o comportamento de um componente perante a solitação mecânica. Já a representação gráfica feita com a Tensão Normal (σ) e Deformação Específica (ϵ) permitem que se obtenha o comportamento do material para ensaios convencionais que podem ser representados pelas equações (1) e (2), respectivamente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (Pa)} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \text{ (mm/mm)} \quad (2)$$

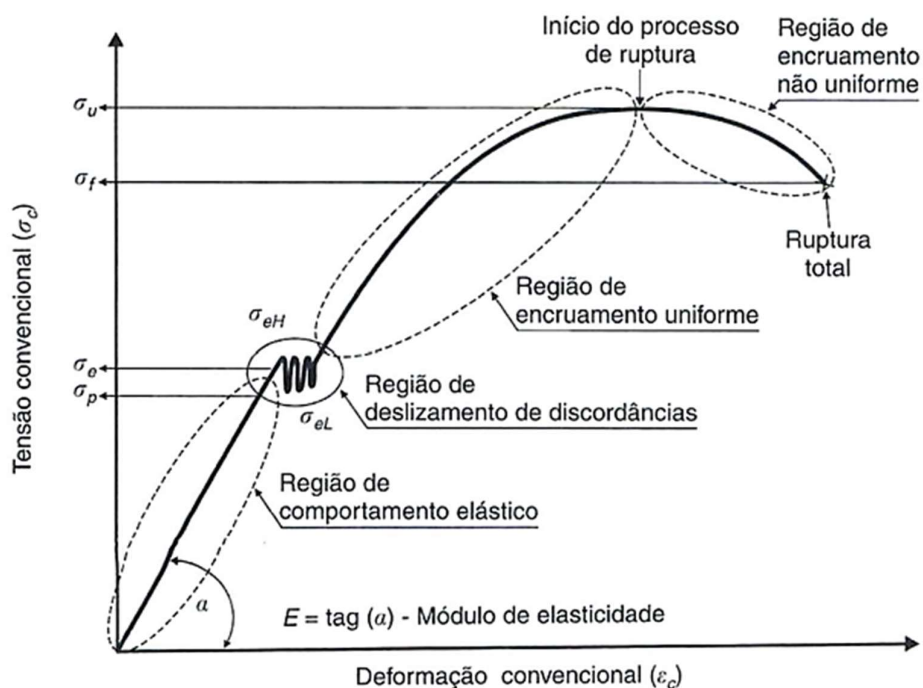
Uma representação esquemática de um gráfico convencional de Tensão Normal por Deformação Específica pode ser vista na figura 15, onde se pode identificar vários pontos e regiões característicos, que representam propriedade e comportamentos do material testado.

Figura 12: Forma gráfica dos comportamentos dos materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: CALLISTER (2020).

Figura 13: Curva tensão x deformação típica de materiais metálicos.



Fonte: Garcia et.al (2012).

A partir do gráfico convencional Tensão Normal por Deformação Específica da figura 16, é possível explicitar algumas características sobre o comportamento do material testado:

Região Elástica: Observa-se que nesta região a tensão é proporcional a deformação específica segundo uma constante, que é o Módulo de Elasticidade característico do material. Nessa região do gráfico, quando retirada a carga o material retorna ao seu comprimento inicial caracterizando o comportamento elástico deste demonstrando que o material é linearmente elástico.

O valor máximo que este regime ocorre é conhecido como Limite de Proporcionalidade a tensão correspondente a este ponto conhecida como Tensão Limite de Proporcionalidade (σ_{lp}). Ao ultrapassar este limite, o material ainda pode responder de forma elástica, à aplicação de carga, porém a reta tende a achatar-se até o material atingir seu limite de elasticidade, obtendo-se neste ponto a Tensão de Escoamento (σ_e), acima deste valor o material passa a se comporta de forma plástica, de tal forma que retirada a carga aplicada o material recupera a

parte elástica, mas seu comprimento passa a ser maior que o inicial devido deformação permanente (plástica).

Tensão de Escoamento: Com o aumento da tensão, a partir do limite elástico do material, começará a aparecer a formação de discordâncias o que caracteriza a deformar permanentemente, tendo esse comportamento o início a uma determinada tensão designado por tensão de escoamento (σ_e). A tensão de escoamento é a transição entre o regime elástico e plástico, caracterizando por grande deformação com pequeno aumento da tensão. Nesta região do gráfico a carga que está sendo aplicada numa taxa e velocidade constante é convertida em deformação plástica, formação e movimentação das discordâncias para o contorno de grão onde se ancoram e começa a região de encruamento.

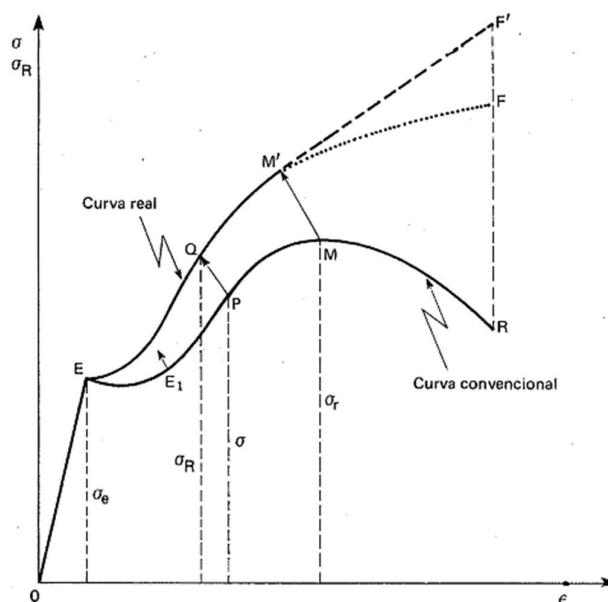
Encruamento: A Região de Encruamento Uniforme é delimitada entre a Tensão de Escoamento até a Tensão Última (σ_u) ou Tensão Máxima. Nesta região a cada instante que passa fica mais difícil de criar novas discordâncias e de movê-las para o contorno de grão e este fenômeno é denominado Encruamento (Aumento de Resistência Mecânica do Material por Deformação Plástica a Frio). Este fenômeno ocorre até o ponto de Resistência Máxima Tensão Máxima ou ainda de Tensão Última, quando começa a Região de Encruamento não Uniforme. Nesta região percebe-se no gráfico uma queda no valor da tensão, quando começa a ocorrer a estrição da seção transversal do corpo de prova, porque não é feita a correção instantânea da área resistente. Quando a área é corrigida percebe-se que o encruamento continua ocorrendo, pois, a tensão continua aumentando até que ocorre a ruptura do corpo de prova.

Estricção: Para um gráfico Tensão por Deformação Convencional quando o carregamento atinge um determinado valor, provoca o início de uma redução bastante significativa da seção transversal do corpo de prova, identificado no gráfico convencional como o de maior valor para a tensão para o ensaio (σ_{Max} ou σ_u). Após o começo da estrição, o corpo de prova se deformando até que ocorra sua ruptura, na Tensão de Ruptura (σ_r) que neste caso é inferior a Tensão Máxima para este tipo de gráfico. Para gráficos que são plotados com correção

instantânea da área, Gráficos de Tensão Real ou Verdadeira, a tensão é sempre crescente até a ruptura mesmo com a ocorrência da estricção.

Souza (1982), afirma que a curva convencional da tensão x deformação não fornece indicações precisas a respeito de determinadas características dos materiais, principalmente em materiais com comportamento dúctil. Por isso, em casos especiais, é necessário fazer ensaios para levantar os dados a partir de gráficos de ensaios de tração reais ou verdadeiros, que seguem os mesmos parâmetros dos gráficos convencionais, só que para este caso é feita a avaliação a cada instante da variação da área da seção transversal do corpo de prova. Assim, tendo a área calculada para cada instante pode-se obter a tensão instantânea que representa o verdadeiro comportamento do material quando solicitado. A figura 18, ressalta essa diferença entre ensaios e reafirma a importância dessa diferenciação para a construção exata das propriedades mecânicas a serem analisadas.

Figura 14: Curvas de ensaio de tração convencional x real.



Fonte: Souza (1982).

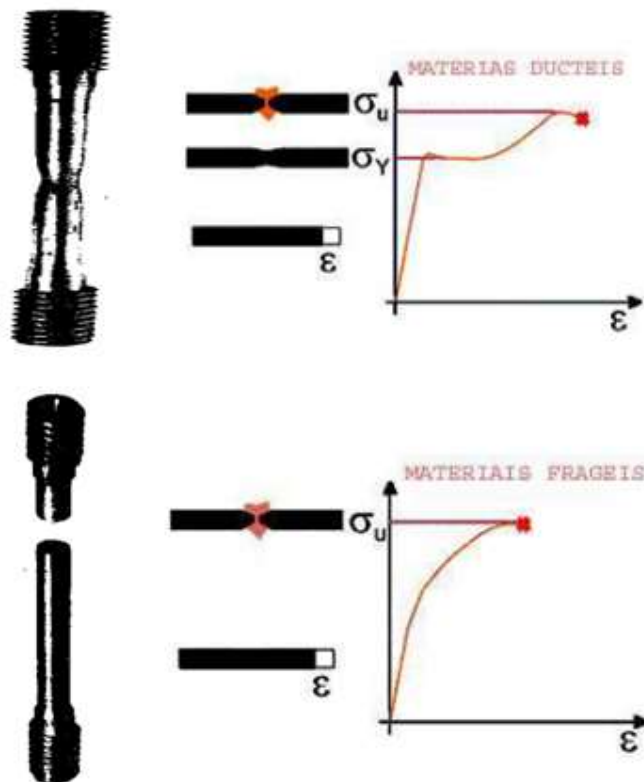
Beer (1989), mostra que após a ruptura do material, pode-se analisar a região da fratura e determinar o comportamento do material, se dúctil ou frágil. Se a ruptura se dá segundo uma superfície em forma de taça-cone com as bordas a 45° com a superfície externa, ou mesmo um

único plano inclinado a 45° com a superfície inicial do corpo de prova, pode-se dizer que ocorre uma ruptura de comportamento dúctil para este material, comandada por uma tensão de cisalhamento.

Já para matérias de comportamento frágeis, pode-se dizer que a fratura ocorre sem nenhuma mudança sensível no modo de deformação do material. Não ocorre estrição ou qualquer outro tipo de deformação plástica aparente, sendo que a ruptura forma uma superfície perpendicular ao sentido do carregamento, podendo assim concluir que os materiais tiveram um comportamento frágeis na ruptura e que esta ruptura foi comandada por tensões normais.

A figura 19 mostra a partir do corpo de prova e gráficos Tensão Normal pó Deformação Específica típico para ensaios de tração, o comportamento em regime Dúctil e Frágil.

Figura 15: Em (A), fratura por tensão de cisalhamento de material dúctil. Em (B), fratura por tensão normal de material frágil.



Fonte: Adaptado de Beer (1989) e Hibbler (2005).

Ainda analisando os gráficos de Tensão Normal por Deformação Específica percebe-se que na região de comportamento elástica para materiais de comportamento dúcteis, que estes seguem a Lei de Hooke, equação (3), onde E é o módulo de elasticidade do material. Beer (1989) afirma que o maior valor da tensão (σ) para qual a Lei de Hooke é válida se denomina limite de proporcionalidade do material. Quando o material é dúctil e possui o início do escoamento em um ponto bem definido do diagrama, o limite de proporcionalidade coincide com o ponto de escoamento.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (Pa) \quad (3)$$

Outras características obtidas nestes gráficos são a Ductilidade, Tenacidade e Resiliência. A Ductilidade representa a medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura pelo corpo de prova. No gráfico, o valor da Ductilidade pode ser obtido pegando-se o ponto de ruptura na curva do ensaio e traçando uma reta paralela a linha de comportamento elástico da matéria, a ductilidade vai ser o valor da deformação específica onde essa reta paralela intercepta o eixo do gráfico, multiplicado por cem. Outra forma usual de medir a ductilidade de um material é o seu alongamento percentual, equação (4):

$$\text{Alongamento percentual} = 100 \cdot \frac{L_r - L_o}{L_o} \quad (4)$$

Onde, L_o é o comprimento inicial do corpo de prova e L_r é o comprimento deste após a ruptura no ensaio de tração.

A Tenacidade que representa a energia acumulada pelo corpo de prova até o momento da fratura e também pode ser obtida a partir destes gráficos. O valor da Tenacidade é dado em Joules e equivale a área abaixo da curva do ensaio.

Resiliência também representa uma energia acumulada pelo corpo de prova durante o ensaio, só que neste caso está restrita a região do regime elástico, ou seja, é obtida calculando a área abaixo da curva do regime elástico e o valor é obtido em Joules.

2.8.2- Ensaio de Dureza

Dureza é uma medida de resistência de um material metálico à deformação permanente (plástica). A dureza de um material metálico é medida forçando um indentador a penetrar na superfície da amostra, tendo este indentador geralmente, forma de uma esfera, uma pirâmide ou de um cone e estes indentadores devem ser de material muito duro, aço temperado, Carboneto de Tungstênio e diamante. (DIETER, 1976).

A dureza de um material metálico depende da facilidade com que ele se deforma plasticamente. Pode então estabelecer-se uma relação empírica entre a dureza e a resistência mecânica de um material metálico. O ensaio de dureza é muito mais simples do que o ensaio de tração e pode ser não-destrutivo (isto é, a pequena impressão deixada pelo indentador pode não ser prejudicial à posterior utilização do objeto). Por estas razões, o ensaio de dureza é extensivamente utilizado em controle de qualidade na indústria.

Existem ensaios de micro dureza, são utilizados para medir dureza em microconstituintes do material ou medir perfis de dureza em camadas muito finas. Já a macro dureza, são utilizadas em ensaios, cujas peças tem seção maior. Dentre os tipos de ensaios de dureza os mais utilizados são Dureza das Escalas Brinell, Vickers, Knup e Rockwell.

Figura 16: Exemplo de equipamento para ensaio de macro dureza.



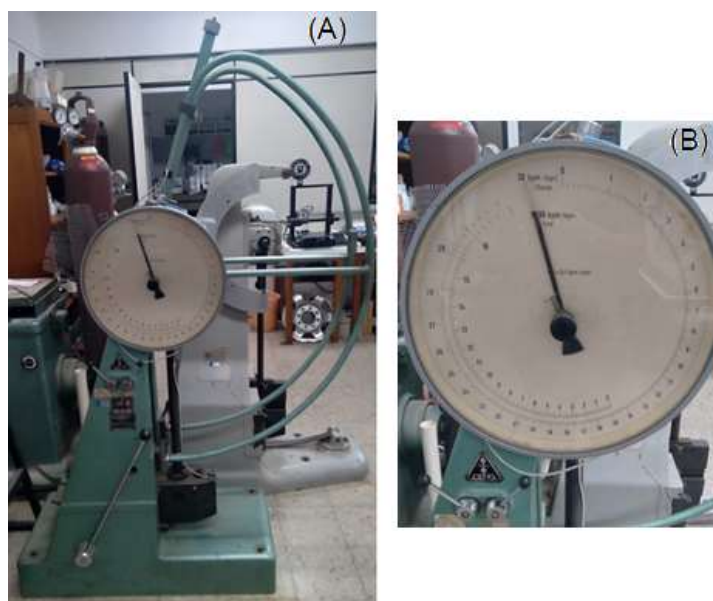
Fonte: Autor (2023).

A dureza Rockwell, ao ser realizado, apresenta o resultado diretamente na máquina de ensaio e pode ser utilizado para indicar pequenas diferenças de dureza especialmente em casos com tratamento térmico. Esses ensaios, contam com carga e pré-carga. A carga, para Rockwell C de 150kgf, garantirá a impressão propriamente dita e a pré-carga garante o assentamento e contato entre o corpo em teste e o penetrador. A medição se dá pela diferença de profundidade da impressão deixada e profundidade atingida com pré-carga.

2.8.3 – Ensaio de Impacto e tenacidade

A tenacidade é uma medida da quantidade de energia que um material pode absorver até que ocorra a fratura, sendo o método mais simples para se medir tenacidade o ensaio de impacto. Uma das maneiras de utilizar este aparelho consiste em colocar um corpo de prova de Charpy com entalhe em V transversalmente aos apoios paralelos (ou amarras) da máquina. No ensaio de impacto, um pêndulo com determinada massa é solto de uma altura conhecida, choca com a amostra, durante o seu balanço descendente, fraturando-a.

Figura 17: Máquina Charpy do Lab. de Metalurgia Física-UFSM. Em (A), a escala da máquina.



Fonte: Autor (2023).

O ensaio de impacto pode ser utilizado para determinar o intervalo de temperatura em que ocorre a transição do comportamento dúctil para o comportamento frágil de metais e ligas, à medida que a temperatura baixa. A tenacidade é a propriedade conhecida, após os testes em charpy. Para o equipamento da figura 20, faz-se necessários conversões de unidades, conforme equação (5), enquadrá-la de acordo com o (SI).

2.9 FUNDIÇÃO DE METAIS

Fundição é o processo no qual o metal líquido flui pela força de gravidade, ou por ação de outra força, para dentro de um molde, no qual passa por um resfriamento e se solidifica com a forma de cavidade do molde. O termo fundido é aplicado ao componente ou peça obtido por esse processo. (GROOVER, 2018).

O processo de fundição inclui a fundição de lingote e fundição de peças. Os lingotes são fundidos de grande porte que possui forma simples e que pode ser conformado por processo de laminação e forjamento. A fundição de lingotes pode ser dividida em processos como o Convencional, Semi Contínua ou Contínua. A fundição de peças envolve geometrias mais complexas, de modo que desejamos obter a peça quase no seu estado final de fabricação, ou seja, sem que precisem passar por outros processos de fabricação para que adquiram a forma fina. Em alguns casos, operações de usinagem são necessárias para dar precisão dimensional as peças prontas. A fundição de peças pode ser dividida em vários processos como o em Areia Verde, Molde Metálico (Coquilha) ou Molde Cerâmico (Microfusão).

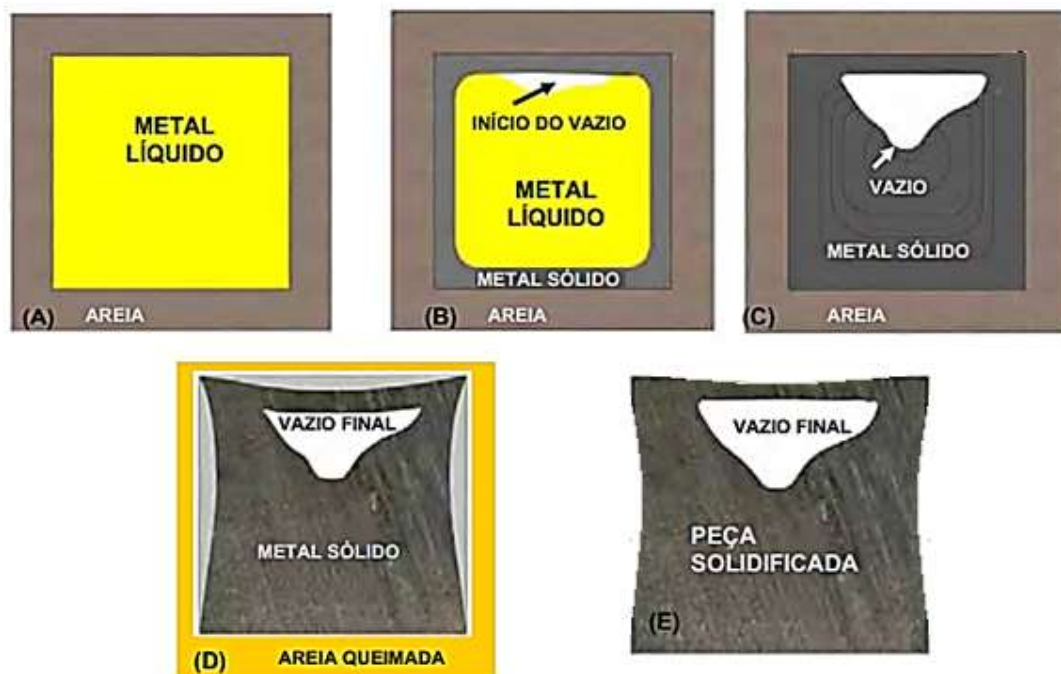
Pode ser produzida por fundição a maior parte das ligas comerciais, tais como aços, ferros fundidos, cobre e suas ligas, alumínio e suas ligas, ouro, prata, dentre outros, bem como as formas mais variadas e complexas de produtos. Em face de sua complexidade e tamanho, determinados tipos de peça, como blocos de motor, caixas de transmissão, engates de vagões ferroviários, torneiras e corpos de válvulas são produzidos por fundição. (GOODWAY, 1996).

2.9.1- Formação de Rechupes

Plutshack e Suschil (1996), afirmam que quando o metal se solidifica e resfria para formar o fundido, o mesmo passa por três estágios de contração volumétrica. Serão descritas essas etapas, conforme (ALVES, 2009)

- **Contração Líquida:** o metal líquido reduz o seu volume no interior do molde desde a temperatura de sobreaquecimento para vazamento até a temperatura de solidificação. O sobreaquecimento é para que o metal possa ter fluidez suficiente para preencher a cavidade do molde;
- **Contração de solidificação:** O metal, ao se solidificar diminui de volume, uma vez que a densidade do metal no estado sólido é maior que no estado líquido. Para um metal puro, esta contração ocorrerá em uma temperatura única. Para as ligas, esta contração ocorre dentro de uma faixa de temperatura;
- **Contração de estado sólido:** É a contração que ocorre desde o final da solidificação até a temperatura ambiente. Esta contração não interfere na formação do Rechupe e, nos fundidos, é compensada no ferramental.

Figura 18: Sequência de contração de solidificação em um cubo de ferro. Em (A) contração líquida, (B) início formação de Rechupe, (C) metal sólido e vazio formado, (D) Rechupe interno e deformação externa e (E) forma final.



Fonte: (ALVES), 2009.

Blair et.al; 2005 e Plutshack, 1995, define, de forma geral o Rechupe como sendo, vazios ou cavidades formadas nos últimos estágios da solidificação. Apresentam-se com forma irregular, esponjoso, com a superfície interior composta por cristais dendríticos. Geralmente ocorrem próximo ao centro das maiores seções da peça, em transições de seções com variações de espessura, junções, cantos ou pontos quentes. Ocorrem também como depressões ou vazios abertos em faces superiores de peças grossas e planas, em forma lamelar no centro da seção e ainda em forma de trincas largas ou ainda podem se apresentar na forma de microporosidades conhecidas como micro-rechupes.

Gases dissolvidos no metal podem aumentar o tamanho dos Rechupes ou ainda contribuir para a formação de porosidades internas em regiões típicas para formação de Rechupes. Durante o resfriamento e solidificação, esses gases dissolvidos no metal são rejeitados do líquido, e, atingindo-se uma pressão crítica para formação de uma bolha de gás,

inicia-se uma porosidade. Se esta bolha se forma na zona pastosa nos últimos estágios da solidificação, ela ficará presa na rede dendrítica e contribuirá para aumentar o tamanho do Rechupe ou mesmo o tamanho de micro-rechupes. (FINARDI, et.al 1993).

Independentemente de o metal fundido ser puro ou uma liga, o processo de solidificação leva algum tempo após o vazamento do líquido no molde. Esse período de tempo independe do tamanho e a forma da peça fundida e pode ser calculado com o uso da Regra de Chvorinov. (GROOVER, 2018).

Ainda durante as etapas de contração e solidificação do metal fundido, tem-se dois efeitos segundo Groover, 2018: a contração do metal no molde que causa redução adicional na altura do fundido e a quantidade de metal líquido disponível para alimentar a parte central superior da peça se torna restrita. Tal cavidade de contração é Rechupe.

O super-resfriamento imposto ao líquido devido à diferença de temperatura entre a parede do molde e o metal cria quase que instantaneamente uma fina pele de metal sólido que define a forma externa da peça. Adicionalmente, tanto o líquido quanto o sólido sofrem dilatação ou contração térmica. À medida que o metal sólido é resfriado, a variação de volume associada à contração também contribui para que o volume sólido seja menor que o volume líquido. É esta diferença volumétrica que causará os Rechupes nos aços. (BLAIR, et.al, 2005).

2.10- ENGENHARIA REVERSA

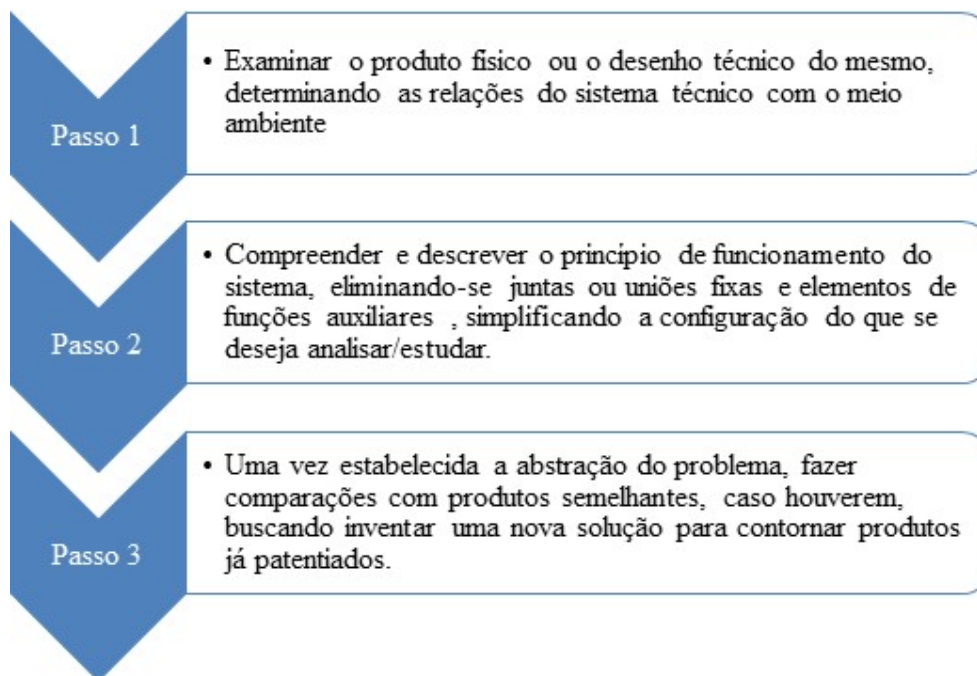
Segundo Braga (1988), Engenharia Reversa é o processo cujo princípio é descobrir a tecnologia e funcionamento a partir da análise de sua estrutura, operação e funcionamento, sendo este processo caracterizado pelas atividades retroativas do ciclo de vida do produto/ peça, partindo de um baixo nível de abstração ao alto nível de abstração. Define-se, nesse contexto, abstração como sendo a habilidade de ignorar os aspectos e assuntos irrelevantes a proposta de Engenharia Reversa. Conforme o nível de abstração aumenta, mais compreensível tornam-se as informações.

Back et al. (2018), define Engenharia Reversa conforme Otto (1998) e Wood (2001) como o processo de análise de um objeto para identificar os componentes do sistema e suas

inter-relações, criando uma representação do sistema em outra forma ou em um nível de abstração mais elevado, para posterior modelagem, simulação e busca de nova solução.

Back et al. (2018), destaca alguns passos aos quais foram resumidos neste estudo, tabela 3, afim que se chegar à função global conforme os passos abaixo:

Tabela 3: Passos da Engenharia Reversa, segundo Back.



Fonte: Autor. Adaptado de Back et.al, 2018. Pág 324-325.

Ainda, segundo Back, et al, 2018, são apresentadas várias razões para efetuar-se a Engenharia Reversa:

- O fabricante original não existe mais e consumidores necessitam do produto;
- A documentação original do projeto foi perdida ou não existe;
- Não existem peças de reposição ou essa está fora do alcance do consumidor.
- Conhecer as características de produtos desativados, ou que foram descartados, que apresentam alto desempenho e durabilidade, cujas soluções podem ser utilizadas em novos produtos.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental do presente trabalho, visa obter dados técnicos sobre o material e processo de fabricação empregados na produção das Telhas (*patins*) que compõem as lagartas do sistema de movimentação dos blindados Leopard 1A5 BR.

Para a execução deste trabalho, algumas Telhas das lagartas dos Blindados do Leopard 1A5 BR foram fornecidas ao Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais (GMat), vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo Parque Regional de Manutenção da 3ª Região Militar (Pq R Mnt/3) do Exército Brasileiro, que é a parte interessada neste estudo de nacionalização do componente.

Foi utilizado a infraestrutura do Laboratório de Metalurgia Física (DEM-UFSM), Laboratório de Usinagem do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM-UFSM), Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos (LADIPP-UFSM) e o Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF-UFRGS) para fazer o processo de Engenharia Reversa da Telha das Lagartas do Blindado Leopard 1A5 BR, para posterior nacionalização do componente.

3.1 OBTENÇÃO DAS TELHA

A viatura de combate blindada Leopard 1 A5 BR possui em seus trens de rolamento, Lagartas, que são compostas por duas Telhas metálicas e suas respectivas almofadas de borracha unidas entre si por pinos metálicos, compondo um Patin. Cada Lagarta é composta por 84 Patins, sendo que cada Telha. O desgaste máximo permitido para as almofadas de borracha deve ser tal que não permita que a parte metálica da telha toque o solo. A figura 27, mostra a maneira como os Patins estão dispostos, compondo as lagartas do Leopard 1 A5 BR e uma força tarefa do 1ª Regimento de Carros de Combate (1ªRCC) fazendo substituição de Patins desgastados.

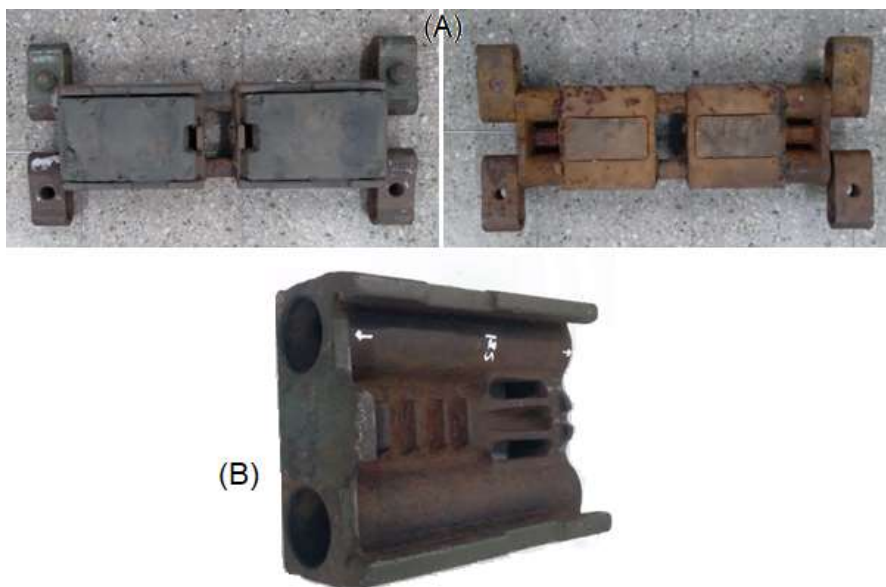
Figura 19: Processo de manutenção, para substituição das almofadas nos patins e a desmontagem realizada no conjunto.



Fonte: BRASIL (2022)

Foram entregues para dar início ao processo de Engenharia Reversa alguns Patins montados, como mostrado na figura na figura 20 (A). Em função disto foi preciso desmontar o conjunto para separar as telhas e depois removera as almofadas destas para que fosse possível a retirada de corpos de prova, como visto na figura 20 (B).

Figura 20: Em (A) Telha das Lagartas dos blindados do Leopard 1A5-BR na vista superior e inferior. Em (B) telha removida do conjunto.



Fonte: Autor.

Para fazer a Engenharia Reversa foram separadas algumas Telhas do conjunto mecânico. Destas seis Telhas que foram usadas para o levantamento dimensional do componente, análise química, ensaios de tração, impacto, dureza e análise metalográfica.

Com isso consegue-se construir a linha do processo de fabricação do componente desde a composição química do material até os processos de manufatura e tratamentos térmico. A partir destes resultados roteiros de produção serão apresentados e disponibilizados ao Exército Brasileiro para a elaboração de critérios técnicos e orientação para nacionalização e posterior licitação para compra deste componente.

As Telhas selecionadas foram limpas para que fossem encaminhadas ao Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos (LADIPP-UFSM) para que fosse realizada a avaliação dimensional e posterior desenho da Telha.

Outras Telhas foram encaminhadas ao Laboratório de Usinagem do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM-UFSM) e ao Núcleo de Automação e Fabricação (NAFAD-DEM). Para iniciar o processo de corte do componente e definir regiões e seções para iniciar os estudos de avaliação e caracterização do material. Para isso foi utilizada a serra-fita com fluido de corte, FM 500- FRANHO do Laboratório de Usinagem do (CTISM) e ao Laboratório de Tecnologia Mecânica e Aeroespacial (NUMAE).

3.2- AVALIAÇÃO DIMENSIONAL E DESENHO DO COMPONENTE

As Telhas recebidas foram devidamente limpas, para serem encaminhadas ao LADIPP- (UFSM) onde foi feito o processo de medição, de modo a obter as corretas dimensões da peça e elaborar o Desenho Técnico do componente (plantas, vistas, cortes e perspectivas). Para a obtenção das medidas da peça, foi utilizado a máquina Fowler Baty Venture Plus, figura 29. Com os dados obtidos nas medições, e com o uso do software SOLIDWORKS, foi possível então elaborar o desenho Técnico da Telha.

Figura 21: Máquina Fowler Baty Venture Plus usada para as medições da telha do Leopard 1 A5 BR.



3.3 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Nas seis Telhas escolhidas e encaminhadas pelo Exército Brasileiro para serem avaliadas foram feitos cortes em serra fita com o uso de fluido de corte, figura 30, em locais e posições previamente determinados para retirar amostras do material e posterior usinagem de corpos de prova para caracterização mecânica, metalúrgica e composição química.

Figura 220: Corte da telha em Serra fita, no CTISM-UFSM.



Fonte: Autor, 2022

Dá estrutura da telha, após o corte, foi utilizado para confecção de amostras somente a região central da peça, como mostra a figura 31, nota-se a ausência da estrutura central da telha. Essa estrutura central foi usada como fonte de material para confecção de amostras para obtenção da composição química, das características mecânicas e da caracterização micro estrutural do material empregado para a manufatura das Telhas.

Figura 23: Em (A) telha antes de corte. Em (B), amostra após o corte.



Fonte: Autor

Este material retirado da telha passou por processos de aplainamento, fresamento e retífica, figura 32 para depois serem retirados destas placas os corpos de prova os Ensaio de Tração, Charpy, Dureza e Metalografia.

Figura 24: Amostra resultante do processo de corte sendo faceada por fresamento.



Fonte: Autor

Neste trabalho, as amostras seguiram padrões geométricos e dimensionais, conforme recomenda a Norma ASTM A370, figura 33, para produtos em aço fundido. Dessa forma, as especificações, serviram como base para os ensaios mecânicos de tração e impacto.

Figura 25: Dimensões do corpo de prova, conforme Norma ASTM A370.

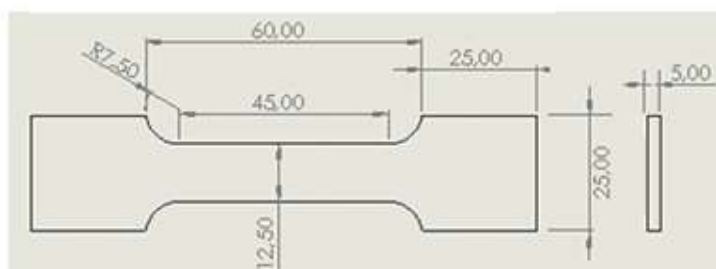
	Standard Specimens				Subsize Specimen			
	Plate-type, 1½-in. (40 mm) Wide				Sheet-type, ½ in. (12.5 mm) Wide			
	8-in. (200 mm) Gauge Length		2-in. (50 mm) Gauge Length		½ in. (12.5 mm) Wide		¼-in. (6 mm) Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gauge length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ¼ -¼	40 + 3 -6	1½ + ¼ -¼	40 + 3 -6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)	Thickness of Material							
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	½	13	¼	6
L—Overall length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Note 4, Note 10, and Note 11)	2	50	2	50	¾	20	¾	10

Fonte: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0370-22%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true> Acesso em 29 nov. 2022>

3.4 - ENSAIO DE TRAÇÃO

O material usado para a usinagem dos corpos de prova, foi retirado da parte central das telhas do Leopard 1A5 BR. Os corpos de prova foram preparados em conformidade com a Norma ASTM A370, além de serem adequadas à capacidade de carga da máquina de ensaios. A figura 34 ilustra o formato e as dimensões usadas na confecção dos corpos de prova empregados nos ensaios de tração.

Figura 26: Formato e dimensões do corpo de prova para usados nos ensaios de tração, conforme ASTM A 370.



Fonte: Autor

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados em uma máquina universal de ensaios modelo EMIC® DL100, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do CTISM. Este equipamento é controlado pelo software Test Script instalado em um microcomputador servindo de interface a máquina de ensaios uniaxial. Esse software permite configurar diversos parâmetros dos ensaios, como velocidade de deslocamento da garra, deslocamento máximo da garra, carga máxima do teste entre outros.

Os experimentos foram realizados a temperatura ambiente em torno de 25°C e a velocidade utilizada de deslocamento da garra nos ensaios foi de 0,035mm/s.

Durante o ensaio o tempo (s), o deslocamento da garra (**d_m**) (mm) e a carga da máquina (N), foram armazenados em tabelas para que fosse possível fazer a plotagem dos gráficos Tensão Normal por Deformação Específica usando o software Origin 9.0.

Para cada amostra ensaiada do material das telhas, foi obtido um gráfico convencional de Tensão Normal por Deformação Específica e obtidos como resultados a Tensão de Escoamento (σ_e), Tensão Máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), Ductilidade e o Módulo de Elasticidade (E).

Da equação (3), pode-se obter a deformação específica, onde L_f é o valor do comprimento final depois da ruptura e L_o comprimento inicial. O comprimento inicial L_o é

traçado de 5 em 5 mm no comprimento útil do corpo de prova. Para todos os corpos de prova, $L_0 = 45,0$ mm.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (\text{mm/mm}) \quad (3)$$

Para a marcação do L_0 utilizou-se em uma mesa de desempenho o equipamento traçador mecânico, afim padronizar as linhas na região que será fraturada durante o ensaio, figura 35. Dessa forma, pode-se comparar o valor da Ductilidade obtida no gráfico com a medida pelo alongamento do corpo de prova após a ruptura.

Figura 27: Em (A) traçador mecânico utilizado e em (B) as marcações realizadas para exatidão dos valores de comprimento.



Fonte: Autor

A largura (l) e a espessura (e) dos corpos de prova tem pequena variação em suas dimensões, que foram levados em consideração para os cálculos da área da seção transversal. Calculada a área, considera-se que está se mantém constante durante o ensaio, seguindo as normas das especificações técnicas da ASTM A 370. Para o cálculo da Tensão Normal para um gráfico convencional, usando a equação (4):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

Da equação (4), F é a carga da máquina dada em Newton (N), e A é a área da seção transversal do corpo de prova dada em mm^2 na região útil deste. Para realização dos cálculos, utiliza-se o software Origin Pro 9.0.

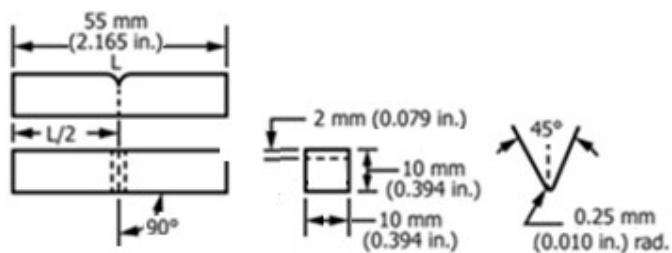
De posse destes dados, os gráficos são plotados gerando a curva característica para cada corpo de prova, e com isso, consegue-se encontrar as propriedades mecânicas, a Tensão de Escoamento (σ_e), Tensão Máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), Ductilidade e o Módulo de Elasticidade (E). para cada corpo de prova.

3.5- ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)

Foram preparados corpos de prova para serem ensaiados por impacto utilizando Martelo Charpy. A forma e dimensões do corpo de prova foram definidas de modo a respeitem as proporções definidas pela Norma ASTM A370.

Para os ensaios de Impacto (Charpy), utilizou-se uma Máquina de ensaio da marca WPR do Laboratório de Metalurgia Física do DEM (UFSM) com energia de 300 Joules, corpos de prova com entalhe em V a 45° , com mostra a figura 36. Os ensaios foram realizados temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) e seguindo as Normas ABNT NBR ISSO 148-1: 2013 e ASTM A370.

Figura 28: Representação do corpo de prova, para ensaio de Impacto Charpy, conforme ASTM A370.



Fonte: Norma ASTM A 370.

3.6- ANÁLISE QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Como parte da Engenharia Reversa, é preciso conhecer a composição química do material usado para manufaturar o componente. A partir das amostras previamente cortadas para este ensaio, pequenas amostras da seção transversal e longitudinal, da telha do Leopard 1A5 BR foram enviadas ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para a determinação da composição química, utilizando para isso um espectrômetro de emissão ótica Spectrolab LAVMB08B. Dessa forma, pode-se então conhecer quais os elementos químicos estavam presentes no material e a concentração em porcentagem % destes elementos químicos contidos no material da amostra.

3.7- METALOGRAFIA

Foi feito a análise da microestrutura no material usado para fazer as telhas, afim de identificar os microconstituintes do material e associar estes a composição química do material, as propriedades mecânicas e a possíveis tratamentos térmicos a qual a peça teria sido submetida.

Retirou-se das Telha, pequenas amostras do metal, com auxílio de máquinas de corte com disco abrasivo (máquina Struers) com fluido refrigerante para evitar, assim, alterações na microestrutura devido ao calor gerado no corte.

As amostras foram embutidas com baquelite a quente, em prensa embutidora (marca Struers), justamente para prevenir a formação de abaulamentos durante o processo de lixamento destas amostras.

Para realização do lixamento, foram utilizadas lixas d'água de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, com rotação de 90° das amostras a cada troca de lixa. O parâmetro para troca de lixa é que quando não forem mais visíveis as linhas deixadas pela lixa anterior, deve-se prosseguir para uma lixa de menor granulometria.

Após lixamento das peças, as mesmas foram submetidas ao polimento em politriz (DP 9ª- Panambra) com pano de polimento adequado ao material e pasta de diamante com

granulometria de $1\mu\text{m}$, deixando dessa forma, a superfície livre de riscos e espelhada. Utiliza-se álcool etílico e posterior jato de ar comprimido para secar as amostras.

O ataque químico foi realizado com 2% de ácido nítrico (HNO_3) e 98% de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) durante alguns segundos. Após o ataque, as amostras são limpas com água destilada, algodão com álcool etílico e seco com ar comprimido.

As amostras, atacadas e as não atacadas foram então observadas por microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura.

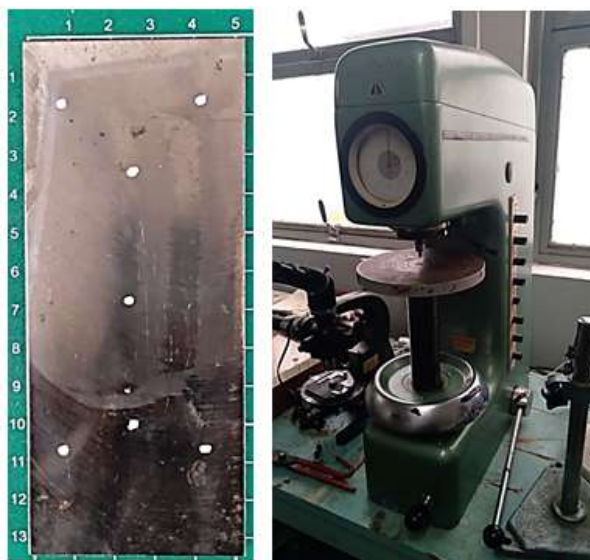
3.8- ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Com o objetivo de se obter imagens de alta resolução da superfície da amostra, foi utilizado o microscópio JEOL, do Laboratório de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica. Além das imagens das microestruturas também foram feitas espectrometria com microsonda EDS para identificar a composição química de micro constituintes e melhor identificar as fases presentes.

3.9- DUREZA DAS AMOSTRAS

Os ensaios de dureza realizados neste estudo foram feitos em durômetro de escala Rockwell C, sendo o número de dureza determinado pela diferença de profundidade de endentação, resultante da aplicação de uma carga inicial menor (pré-carga de 10kgf), seguida por uma carga principal maior (150kgf). Nas amostras previamente preparadas e planas, foram escolhidos sete pontos na base da amostra, figura 37, e realizado o ensaio de dureza no Durômetro de bancada da marca WPR do Laboratório de Metalurgia Física (UFMS-DEM).

Figura 29: Amostra com as marcações para indentação e o Durômetro de bancada WPR.



Fonte: Autor, 2022.

3.10 – LIMITAÇÕES

O processo para execução da Engenharia Reversa do componente Telha das Lagartas dos Blindados Leopard 1A5 BR, proporciona resultados satisfatórios para definir parâmetros que possibilitem a nacionalização do componente entanto, seria importante destacar que um maior número de amostras ou repetições de experimentos para minimizar possíveis erros oriundos dos processos experimentais.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo será dedicado a discussão dos resultados dos experimentos realizados para a caracterização do material usado para fazer as Telhas das Lagartas do sistema de movimentação dos Blindados Leopard 1A5 BR. Desta forma são apresentados os resultados da medição feitas para obter as dimensões das Telhas, das avaliações das propriedades Mecânica e Metalúrgicas do material.

4.1- AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DAS TELHAS DAS LAGARTAS DO LEOPARD 1A5-BR

Uma Telha da Lagarta do Leopard 1A5 BR, em perfeito estado sem uso, foi submetida a avaliação geométrica e dimensional, num equipamento de medição tridimensional Baty Vision Systems- Venture Plus do LADIPP (DEM). Com o sistema tridimensional posicionado e referenciado foram feitas centenas de medições em todas as faces e em regiões internas como furos e reentrâncias.

Estes medições foram agrupadas em bancos de dados e foram transferidas para o software SolidWorks no qual foi modelado a peça gerados os desenhos volumétricos, desenhos planificados, cotados, vistas e cortes da peça, que poderão ser usados para definir os moldes de fundição e dimensões e tolerâncias para posteriores usinagens.

A figura 38 mostra as linhas de medição realizadas na amostra e que foram usadas como referência para este estudo e a tabela 4 apresenta os valores médios resultantes das 6 medidas realizadas para cada dimensão da telha.

Além das medições feitas com o equipamento de medição tridimensional, também foram feitas com o uso de paquímetros digitais, micrômetros, traçador e mesas de desempenho para complementação das medições realizadas. Dessa forma, foi possível replicar a telha em SolidWorks, figura 39. As cotas destes desenhos estão em anexo neste trabalho.

Figura 38: Linhas estabelecidas para coleta de medidas, com equipamento de medição.

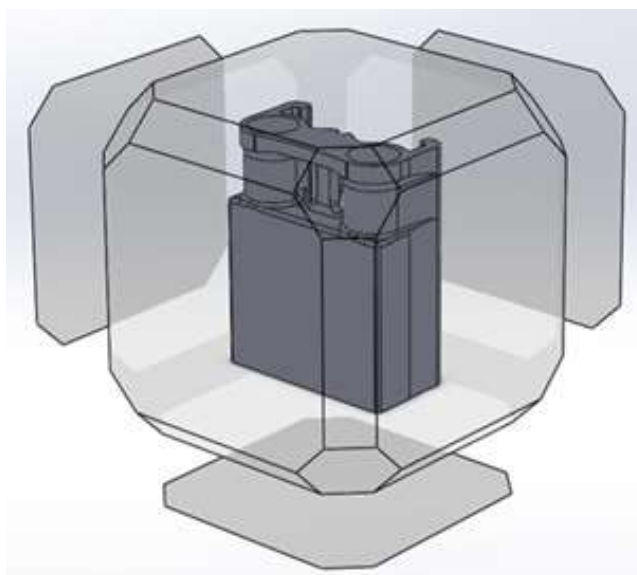


Fonte: Autor

Tabela 4: Dimensões da Telha do Leopard 1A5BR

Largura (mm)	Alt 1 (mm)	Alt 2(mm)	Alt 3 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
197,25	11,61	16,68	4,82	97,54	118,55

Figura 30: Representação Isométrica da Telha da Lagarta.



Fonte: Autor, Solidworks, 2022.

4.2- RESULTADO DAS ANÁLISES QUÍMICAS

As amostras extraídas das Telhas das Lagartas dos Blindados Leopard 1A5BR foram encaminhados Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS onde foram feitas análises para identificar e quantificar os elementos que compõem a liga do material de que é feita as telhas. Foi usado um espectrômetro de emissão ótica SPECTROLAB LAVMB08B. Foram feitas análises da composição química em três amostras, designadas como I, II e III. A tabela 5, mostra os elementos identificados e os valores das quantidades destes presentes no material (aço) possibilitando dessa forma identificar o material e confrontar este com os aços classificados pelas Normas existentes.

Tabela 5: Composições Química encontrada para os aços das Telhas das Lagartas do Leopard 1 A5 BR

Amostra	I	II	III	Média
Elemento				
C	0,2085	0,3392	0,2580	0,2685
Mn	0,6710	0,6730	0,6990	0,6810
Si	0,3476	0,3589	0,4120	0,3728
P	0,0074	0,0070	0,0130	0,0091
S	0,0021	0,0027	<0,001	0,0019
Cr	0,9090	0,9010	1,0760	0,9620
Mo	0,2454	0,2455	0,3220	0,2709
Ni	0,1419	0,1430	0,1830	0,1559
Cu	0,0648	0,0563	0,0820	0,0677
Al	0,0247	0,0259	0,0150	0,0216
Nb	0,0050	0,0046	0,0071	0,0055
Sn	0,0032	0,0032	<0,001	0,0032
Ti	0,0019	0,0017	<0,001	0,0015
Fe	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

Fonte: Adaptado de LAMEF.

Com base nos resultados obtidos para os elementos constituintes na liga e nas quantidades encontradas, e comparando com a literatura, o aço em estudo se assemelha à liga S-6758 da Military Specification, conforme pode visto na tabela 6.

Tabela 6: Tabela da composição química, conforme a Military Specification.

Chemical composition. MIL-S-6758B

Element	Analysis (percent)	Check analysis tolerance \pm (percent)
Carbon	0.28 - 0.33	± 0.02
Manganese	0.40 - 0.60	± 0.03
Silicon	0.15 - 0.35	± 0.02
Phosphorus	0.025 (max)	± 0.005
Sulfur	0.025 (max)	± 0.005
Chromium	0.80 - 1.10	± 0.05
Molybdenum	0.15 - 0.25	± 0.02
Nickel	0.25 (max)	± 0.03
Copper	0.35 (max)	± 0.03

Fonte: Steel, Chrome-Molybdenum (4130). (1993).

Ao realizar comparações do aço usado para produzir as Telhas com aços comerciais usando tabelas de equivalência de Normas, pode-se observar que o aço analisado tem correspondência com o aço SAE 4130, conforme mostra a tabela 7.

Tabela 7: Composição química do aço SAE 4130. Composição em %.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SAE4130	0,30	0,25	0,80	0,035	0,040	0,95	0,30	-
Telha 1A5BR	0,268	0,372	0,681	0,009	0,002	0,962	0,271	0,156

Fonte: Adaptado do Catálogo Gerdau (Aços Piratini).

4.3- RESULTADO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1- Ensaio de Dureza e correlações.

Todos os ensaios de dureza realizados nas amostras desse estudo, foram feitos no Laboratório de Metalurgia Física do DEM-UFSN.

Para a obtenção do valor médio da dureza do material das Telhas, foram ensaiadas cinco amostras sendo que em cada amostra foram feitas sete indentações. Para a avaliação da dureza foi usado o Método Rockwell C e as indentações foram feitas seguindo uma sequência previamente estipulada. A tabela 8, mostra os valores obtidos para as sete indentações realizadas em cada uma das cinco amostras, o valor médio para cada amostra e o valor médio de todas as amostras.

Tabela 4: Dureza Rockwell C com média das leituras e média geral das durezas.

Amostra	Dureza I	Dureza II	Dureza III	Dureza IV	Dureza V	Dureza VI	Dureza VII	Média das durezas
1	53	49	54	51,5	48	52	52	51,4
2	51	51	50	53	52	47	53	51,0
3	52	48	55	51	50	50	50	50,9
4	50	49	49	50	44	45	43	47,1
5	50	46	52,5	51	53	51,5	50	50,6
Média das Leituras								50,2

Fonte: Produzido pelo próprio autor, com base nos ensaios de dureza. (2022)

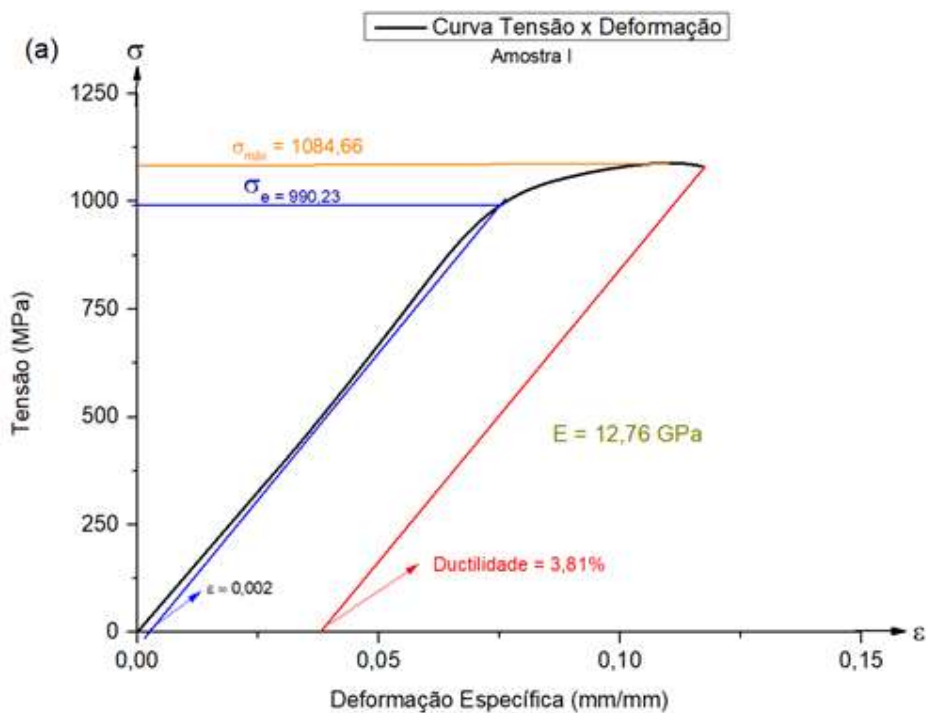
Com base nos resultados obtidos, a partir da média geral das durezas, constatou-se que a dureza encontrada é compatível com a dureza encontrada para o aço SAE 4130 temperado e revenido ou austemperado. Como o aço em estudo, material das Telhas, apresenta uma certa equivalência na composição química com o aço SAE 4130 pede-se direcionar este estudo a comparar as demais propriedades mecânicas e metalúrgicas com as encontradas para o aço SAE 4130 temperado e revenido ou austemperado. Chiaverini (1988) reitera que a aplicação do tratamento térmico de austêmpera é feita em peças aço-carbono ou ligados que exigem uma tenacidade elevada e dureza próxima de 50 Rockwell C.

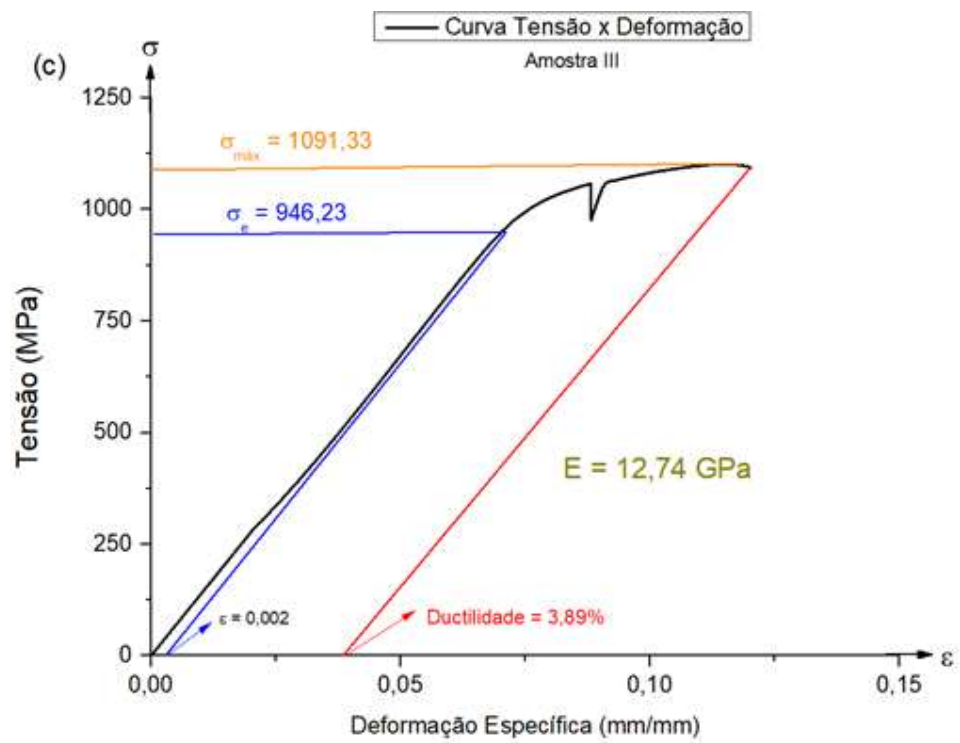
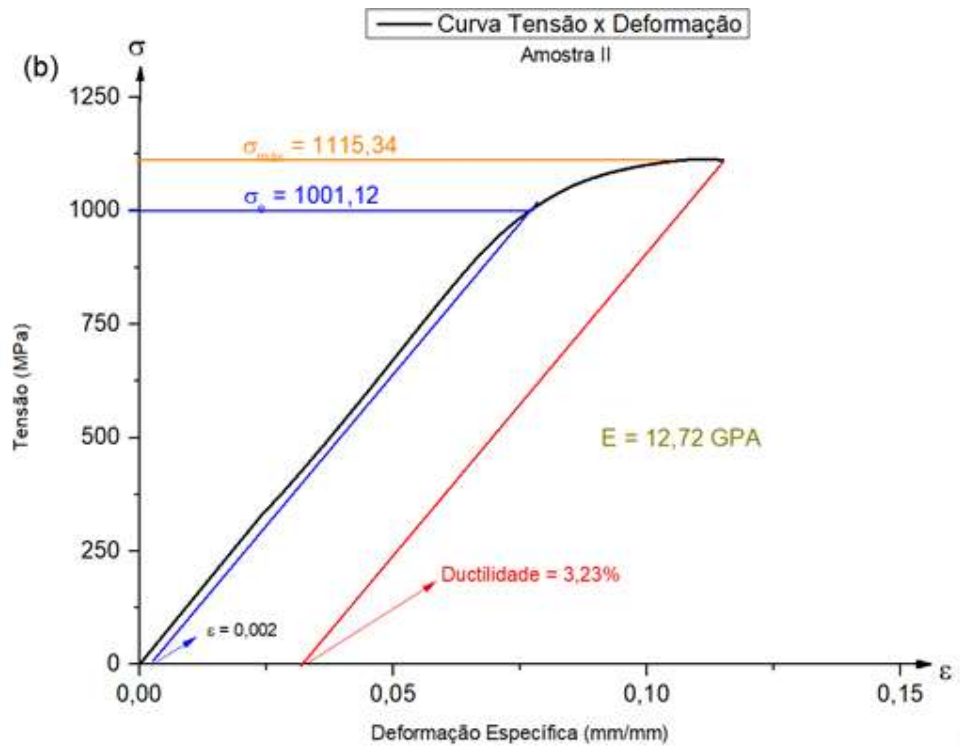
4.3.2- Ensaio de Tração

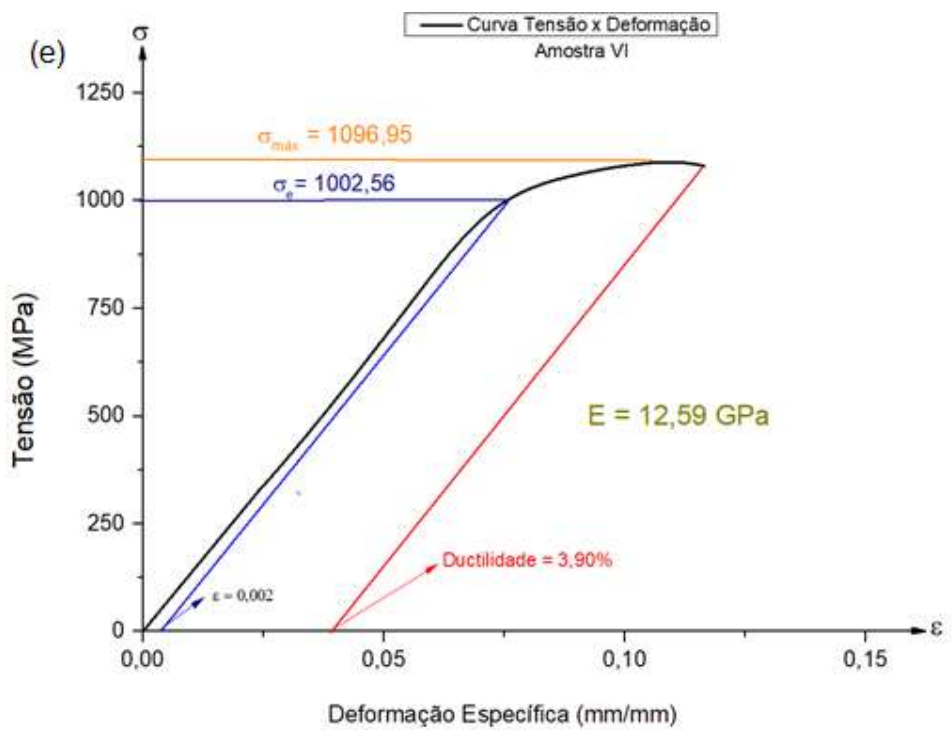
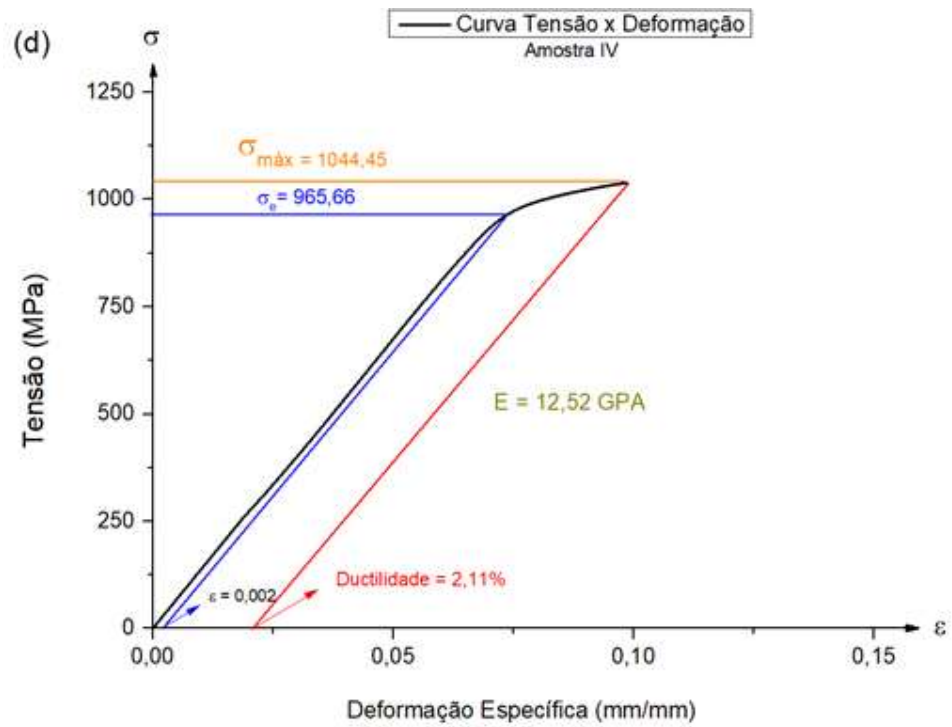
Cinco amostras foram ensaiadas em tração obtendo-se os cinco gráficos convencionais de Tensão Normal por Deformação Específica que retratam o comportamento do material. Nestes gráficos são obtidos a Tensão de Escoamento (σ_e), a Tensão Máxima (σ_{Max}), o Módulo de Elasticidade (E) e a Ductilidade.

As curvas da figura 42 são características de um material com resistência mecânica elevada e com um uma região considerável de deformação plástica, apresentando um comportamento dúctil. Este comportamento dúctil também pode ser notado observando a superfície da fratura dos corpos de prova após o ensaio, as quais apresentam em sua superfície um ângulo aproximado de 45° junto a borda na seção transversal. Os gráficos, gerados em Software Origin Pro 9.0, permitem obter os valores das propriedades mecânicas, Tensão de Escoamento, Tensão Máxima, Módulo de Elasticidade e Ductilidade das amostras.

Figura 31: Curvas de Tensão Normal x Deformação Específica para cada amostra ensaiada.







Fonte: Autor (2022)

Ao analisar os gráficos da figura 42, nota-se que não é visível a região de transição entre os regimes de deformação elástica e plástica nas curvas Tensão Normal por Deformação Específica. Em função disto, para se determinar o valor da Tensão de Escoamento e o Módulo de Elasticidade, foi preciso fazer uma reta auxiliar com a maior quantidade de ponto coincidentes com a parte elástica do gráfico.

Esta reta auxiliar foi usada junto com a regra da deformação a 0,2% para determinar a Tensão de Escoamento (σ_e) e determinar o ângulo entre esta e o eixo do deslocamento para determinar o Módulo de Elasticidade (E). Dessa forma, tem-se os valores das propriedades mecânicas do material possíveis de serem obtidas num ensaio de tração convencional, que são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Valor Médio das propriedades mecânicas por amostra e Média Geral.

	σ_e (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Ductilidade (%)	E (GPa)
Amostra I	990,23	1084,66	3,81	12,76
Amostra II	1001,12	1115,34	3,23	12,72
Amostra III	946,23	1091,33	3,89	12,74
Amostra IV	949,97	1044,45	2,11	12,52
Amostra VI	1002,56	1096,95	3,90	12,59
Média	981,16	1086,54	3,38	12,66

Fonte: Produzida pelo próprio autor, com base nos ensaios mecânicos de tração na máquina Emic.

Após a realização dos ensaios de tração, foi aplicada outra forma de obter a ductilidade para os materiais ensaiados. Esta avaliação foi feita medindo o alongamento das amostras após a ruptura e calculando a deformação específica em relação ao comprimento inicial de referência, os resultados obtidos são apresentados na tabela 10. O valor médio da ductilidade obtida por este método foi de 6,73%

Tabela 5: Alongamento das amostras, com base no Lr após ensaio de tração.

Amostras	Alongamento em 45mm (%)
I	6,54
II	5,66
III	6,75
IV	5,21
VI	9,50
Média	6,73

Fonte: Produzida pelo autor, conforme dados do alongamento. (2022)

4.3.2.1 – Fraturas das amostras e confronto com dados obtidos em ensaio.

A partir dos ensaios mecânicos e da maneira como os corpos de prova ficam visualmente após este, foi possível identificar o modo de fratura ocorrido no metal, distinguindo as amostras que sofreram maior ou menor deformação plástica. A medida usual da ductilidade é o seu alongamento percentual, e como pode-se perceber na tabela 12, as amostras I e IV resultaram em um alongamento superior as demais amostras. A figura 44, evidencia a estrição mais pronunciada nessas amostras, caracterizando que as mesmas obtiveram maior deformação plástica durante o ensaio realizado, fato este que justifica os valores encontrados em % com base na tabela 12.

Em contrapartida, a análise da tabela 12 demonstra que a amostra VI apresenta pouca deformação plástica, fato este justificado através da figura 45, pois visualmente percebe-se que a estrição não foi acentuada como nas amostras de maior alongamento percentual para um comprimento de 45 mm.

Figura 44: Amostras 3 e 6 apresentam estrição mais pronunciada.



Fonte: Autor (2022)

Figura 45: Amostra 4 com pouca deformação plástica.



Fonte: Autor (2022)

4.3.3- Resultados Ensaio de Impacto (CHARPY)

Os valores da Tenacidade obtida nos ensaios de Impacto Charpy, apresentados na tabela 13 seguem a tendência dos resultados para a ductilidade obtidos nos ensaios de Tração. Os materiais que apresentaram maior Ductilidade coincidem com os que apresentam maior Tenacidade visto que são propriedades que apresentam correlação entre si.

Os valores obtidos nos ensaios Impacto Charpy, associadas as outras propriedades mecânicas já avaliadas, corroboram a ideia de que o material, devido a sua composição química, deve ter sido submetido a um tratamento térmico que resulte em uma microestrutura composta de Martensita Revenida ou Bainita.

Tabela 6: Resultados obtidos nos ensaios Impacto Charpy. (kgfm-- J)

Amostras	(kgfm)	(J)
I	4,50	44,1
II	6,10	59,8
III	4,50	44,1
IV	5,40	52,9
Média	5,12	50,2

Fonte: Dados obtidos pelo autor, após ensaios em máquina de impacto.

Brick, et.al (1985), elucidaram vários trabalhos que mostram as vantagens e resultados positivos obtidos com o tratamento térmico de austêmpera. O valor médio obtido nos ensaios de impacto, neste trabalho, está de acordo os valores esperados para um aço SAE 4130 austemparado, o que põe a prova mais uma vez, a assertiva quanto aos demais ensaios realizados para a caracterização e do tratamento térmico que foi/será utilizado para nacionalização do componente.

Após o ensaio, nota-se analisando a superfície das fraturas uma sutil deformação plástica, uma região da superfície com aspecto fibrosa cinzenta característica de cisalhamento e uma região com forma granular (cristalina brilhante), o que caracteriza uma fratura com comportamento frágil. Estas características também são observadas quando são avaliadas as superfícies das fraturas para os corpos de prova dos ensaios de tração.

Na figura 46, mostra-se as fraturas após o Ensaio de Impacto, com aumento de 20x, em Lupa Estereoscópica.

Figura 32: Fraturas das amostras, após Ensaio de Impacto (Charpy)



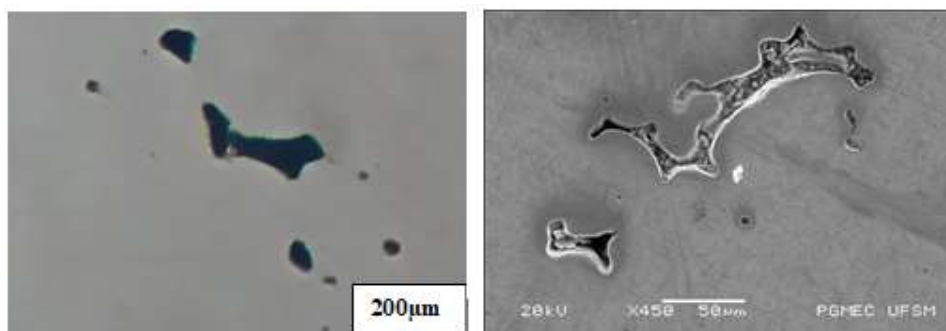
Fonte: Autor

4.4- ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para a análise metalográfica dos materiais investigados, as amostras foram preparadas conforme seção prévia 3.6, e dessa forma pode-se observar as microestruturas presentes no material. Para revelar a microestrutura do material todas as amostras, depois de polidas, passaram por um ataque químico, com Nital a 2%.

Na figura 41 em (A) e (B) está indicado pelas setas, regiões com presença de micro-rechupes nas amostras analisadas. Essa falha de preenchimento ocorre durante a solidificação do metal. O metal ao passar do estado líquido para o estado sólido diminui seu volume, desse modo aparecem porosidades na região central ou em regiões adjacentes a locais com variações de espessura numa mesma peça podem ocasionar o surgimento de rechupe e ou micro-rechupes (CALLISTER,2008).

Figura 331: Presença de micro-rechupes, análise em Microscopia Ótica sem ataque químico e análise em MEV com ataque químico de Nital 0,2%.



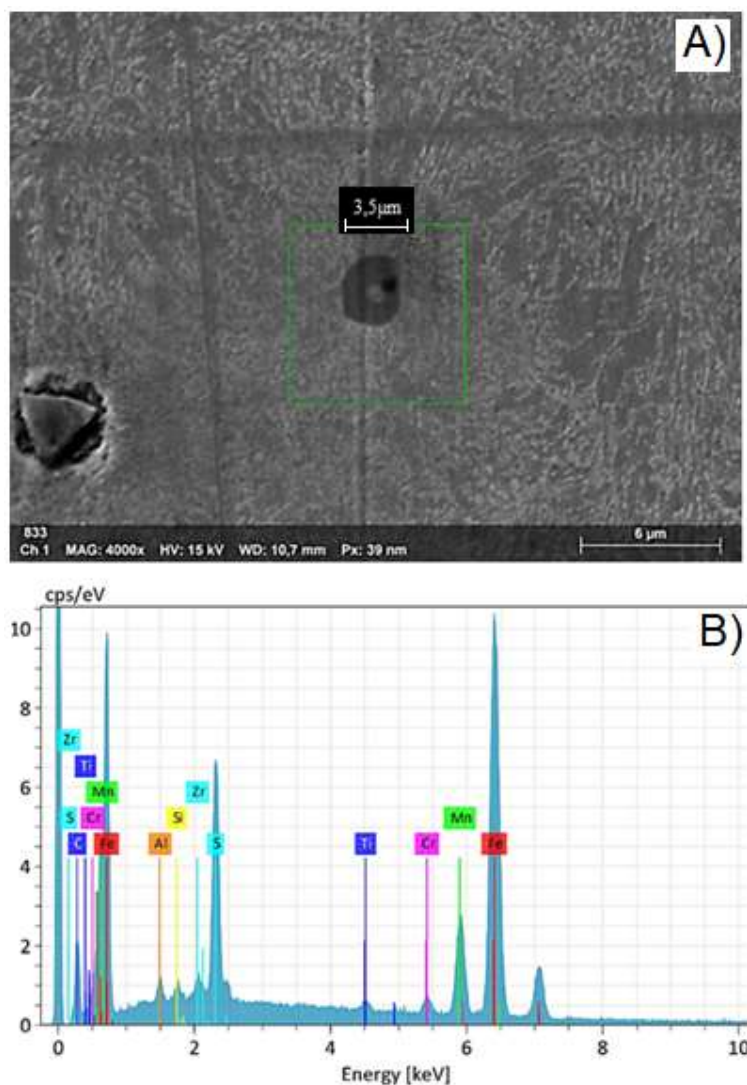
Fonte: autor - Lab. de Metalurgia Física (UFSM).

Nas análises da microestrutura percebe-se a presença de vários elementos não metálicos em forma de inclusões com geometria característica do processo de solidificação. Na figura 42 em (A), observa-se a presença de uma inclusão não metálica apresentando uma forma geométrica (arredondada, circular) característica da sua formação durante o processo de solidificação do metal.

A figura 42 (B) mostra o gráfico obtido por microsonda EDS, feito sobre a inclusão, mostrando os elementos químicos que a constituem, caracterizando assim está como uma inclusão não metálica de sulfeto de manganês.

COLPAERT (2008), afirma que o sulfeto mais comum em aços é o Mn-S, tendo ponto de fusão e estabilidade suficientemente altos, fato este que dificulta a precipitação do FeS na forma de películas no fim da solidificação do aço. O FeS deve ser evitado pois na forma de película pode provocar a fragilização do material.

Figura 34: (A) Inclusão não metálica encontrada no aço fundido análise em MEV ataque Nital 2%. (B) Espectros de intensidade de raios X resultante da análise feita na inclusão não metálica. Microsonda EDS.



Fonte: (A) MEV e (B)- EDS. Imagens fornecidas pelo Lab. de Metalurgia.

Na figura 43 (A) pode ser visto outro tipo de inclusão não metálica encontrada, com as mesmas características geométricas porém sua forma interna fracionada (granulada) é bastante diferente da inclusão da figura 42. Na figura 43 (B) pode ser vista, num mapa de distribuição, os elementos químicos distribuídos nas distintas regiões que compõem a inclusão. Neste mapa é possível constatar distintas regiões, cada uma delas, com um dos elementos de liga agrupados. A distribuição dos componentes dissolvidos na inclusão na forma de um mapa de concentração, torna mais fácil a visualização da inclusão e a sua heterogeneidade de composição

A figura 43 (C) mostra o resultado obtido por microsonda EDS, feito sobre a inclusão, mostrando os elementos químicos que a constituem. Para esta inclusão não metálica foi encontrado a presença de oxigênio, possibilitando assim caracterizar esta como uma inclusão não metálica exógena. As inclusões exógenas, são formadas por fontes externas como escória, erosão dos refratários das paredes do forno ou das paredes dos canais de alimentação dos moldes de fundição, metais e ligas. Estas inclusões são geralmente constituídas de silicatos, aluminatos e óxidos variados e se caracterizam por dimensões maiores, forma irregular e constituição complexa.

As análises feitas via Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura possibilitaram identificar a microestrutura presente no material das telhas avaliadas. Na figura 44, é apresentada a microestrutura encontrada para o aço fundido. A região destacada, área dentro do retângulo, indica placas individuais de bainita, esta microestrutura é possível de ser obtida por tratamentos isotérmicos como a austêmpera ou em alguns aços ligados, por resfriamento contínuo. A presença desta microestrutura depende dos elementos de liga, da velocidade de resfriamento, da temperatura de transformação pode resultar uma microestrutura 100% bainita ou uma mistura de bainita e martensita revenida.

Figura 35: Inclusão metálica na forma de esfera.

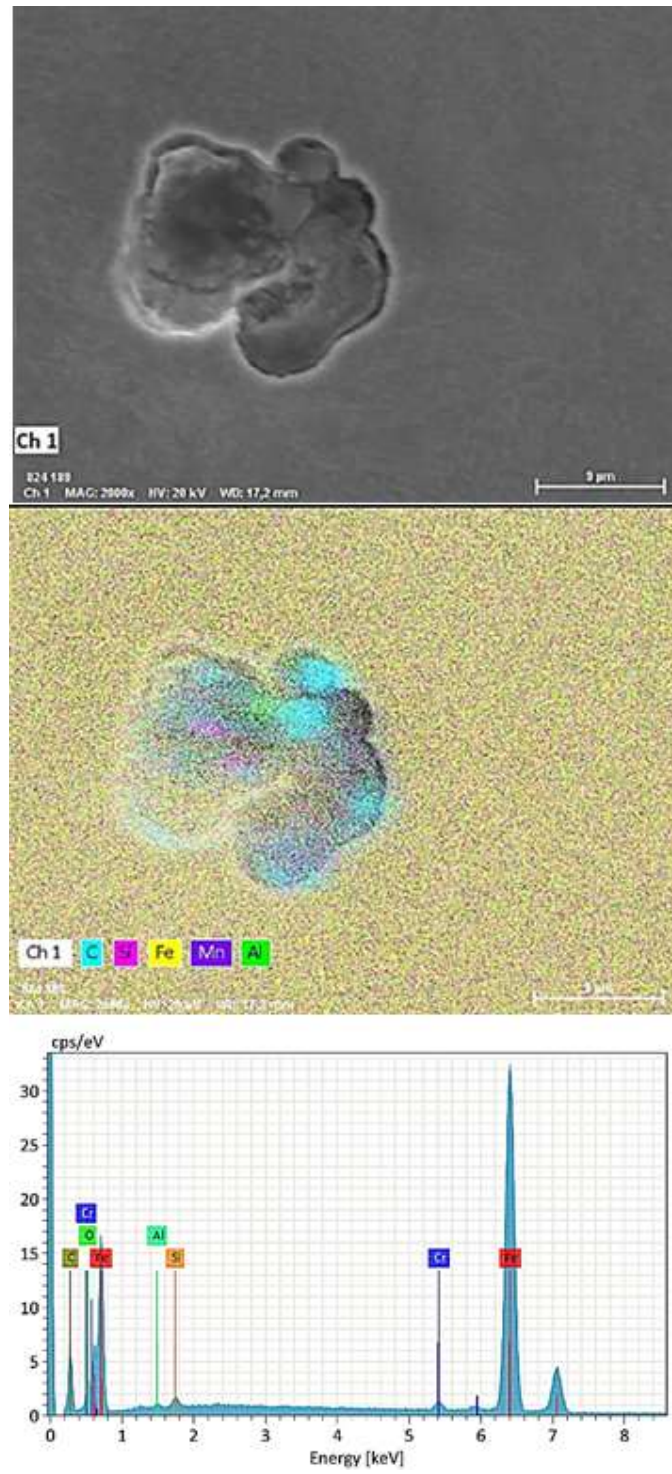
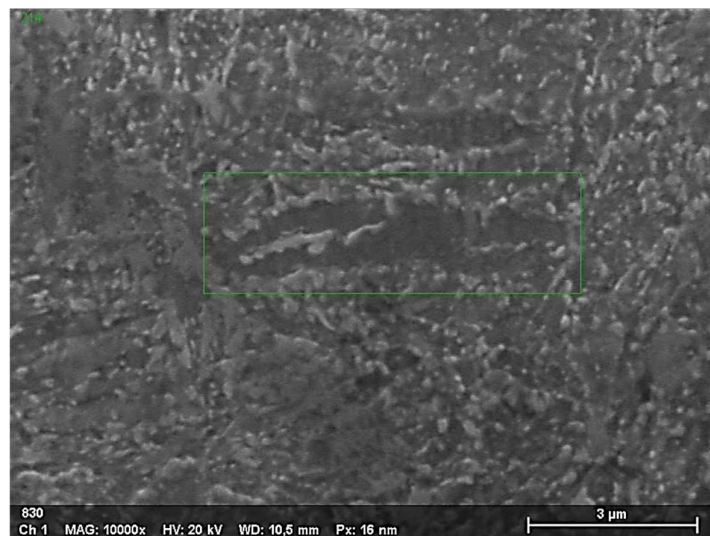


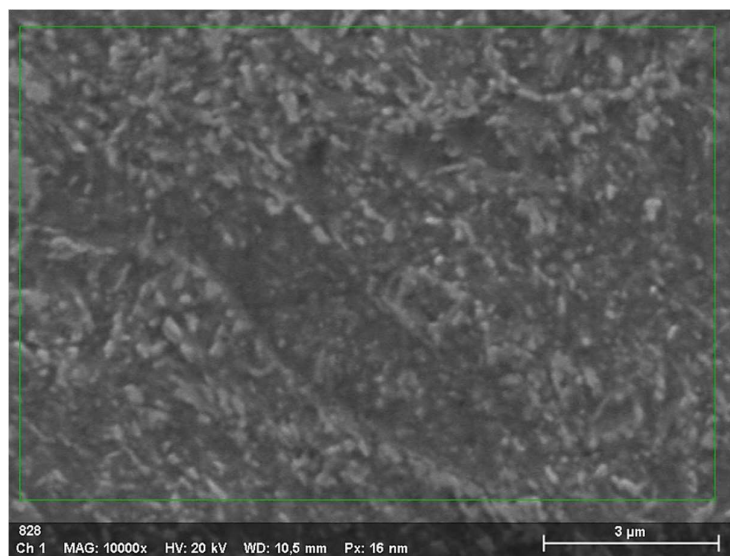
Figura 44: Crescimento de placas, característico de estrutura bainítica. Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%, MEV.



Fonte: MEV- EDS. Metalurgia de Metalurgia Física (UFSM).

Na microestrutura da figura 45, numa seção transversal da figura 44, é possível observar a estrutura bainítica em 100% da amostra do material analisada.

Figura 45: Fases de bainita. Aumento de 10000x em MEV.

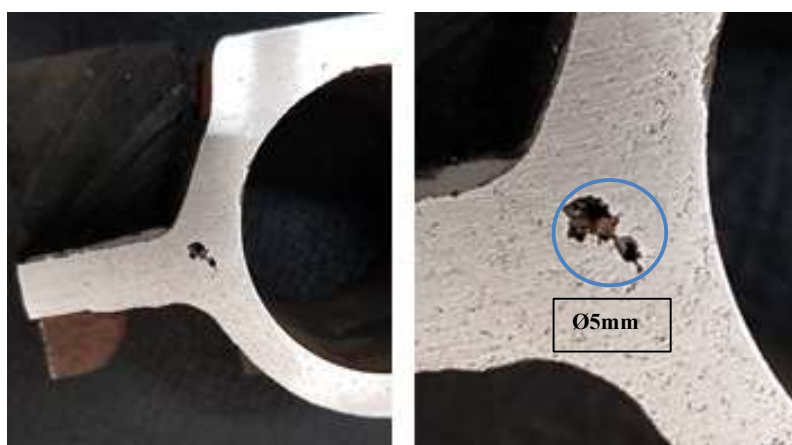


Fonte: Lab de Metalurgia Física (UFSM).

4.5- ANÁLISE DA PEÇA FUNDIDA

Ao realizar-se os cortes em serra fita das amostras, notou-se a presença de vazios/Rechupes, formados provavelmente no último estágio de solidificação da peça, uma vez que se trata de um componente fundido. Os cortes, realizados de modo transversal, demonstraram que próximos aos pontos de variação de espessura e/ou junções esse fenômeno de fundição se fez presente.

Figura 36: Corte transversal de uma amostra. Presença de vazios, Rechupe. Macrografia.



Fonte: Autor.

Os Rechupes que estão presentes nas peças, são defeitos com tamanhos toleráveis, de acordo com as normas e exigências especificadas para fabricante dos blindados. Ou seja, os maiores Rechupes encontrados, nas peças avaliadas são menores que os limites impostos pela Norma usada, no caso são considerados toleráveis. Desta forma defeitos que possam ser circunscritos em uma circunferência de 5mm, podem ser aceitos.

5. CONCLUSÕES

Em função da análise metalográfica por micrografia e macrografia, constatou-se que o material é um aço fundido, pela presença de micro-rechupes, rechupes e inclusões não-metálicas de forma circulares e semiesféricas, também características de materiais fundidos. A telha foi feita por um processo de fundição.

Ao considerar o ensaio de espectrômetro realizado no LAMEF-UFRGS, obtivemos um primeiro ponto de referência para o aço-fundido da telha da Lagarta do Leopard 1A5-BR, da qual resultou sua composição química semelhante ao aço S-6758 (especial dentro das ligas militares) e ao aço comercial SAE 4130.

Ao realizar a análise metalográfica, notou-se que a estrutura presente- Bainita e/ou Martensita Revenida, demonstrou que o componente foi tratado termicamente, por têmpera e revenido, martêmpera ou austêmpera, para aumento em suas propriedades mecânicas.

Os resultados obtidos nos ensaios de Dureza (Rockwell C), apresentaram uma média de 50.2 HRC, constando que esse material apresenta elevada dureza, o que é compatível com a microestrutura analisada na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A partir dos ensaios mecânicos de tração, obteve-se as principais características do material empregado para produzir as Telhas para as Lagartas do Leopard 1A5-BR, a partir do gráfico Tensão Normal x Deformação Específica. Obteve-se para a Tensão Máxima do material o valor médio de 1086 MPa. Valor alto para um material com aproximadamente 0.3% de C, o que corrobora o fato de o material ter sido tratado termicamente. Outro resultado obtido nos ensaios de tração, foi o valor médio de 981 MPa para a Tensão Limite de Escoamento, valor esse também elevado para esse tipo de material.

Com os valores elevados de Tensão Máxima e Tensão de Escoamento era de se esperar, como ocorreu, o valor obtido para a Ductilidade deste material foi de 3.38% obtida descontando a Tensão Elástico a partir da Tensão de Ruptura do material. Valor este, compatível para um material com microestrutura de Bainita ou Martensita Revenida. Os testes de Ductilidade a partir do alongamento após a ruptura mostram um valor elevado quando comparados com os valores obtidos do gráfico, porém continuam baixos, compatíveis com as microestruturas referidas.

A Tenacidade das amostras, obtidas a partir do ensaio de Impacto (Charpy), resultou em um valor médio de 50.22 Joules. Valor este, esperado para aços ligados de médio Carbono submetidos a tratamento de Têmpera e Revenido ou Austêmperado.

Como resultado dos cortes longitudinais e transversais feitos nas Telhas, foi observado a presença de Rechupes principalmente em regiões de junções, variações de espessura sendo que os Rechupes de maior tamanho encontrados cabem dentro de uma circunferência com aproximadamente 5mm de diâmetro, o qual nos permite tomar como base de maior Rechupe toleráveis no interior das peças.

A avaliação dimensional possibilitou o redesenho desse componente, dados esses que servirão de base para a definição da construção de modelos para confecção de moldes de fundição e para a definição de tolerâncias nos processos de Usinagem para calibração de furos e superfícies.

Em virtude do exposto acima, pode-se concluir que as Telhas usadas na Lagartas no sistema de movimentação dos Leopard 1A5-BR, pode ser replicada nos mesmos parâmetros das existentes pelo processo de fundição e posterior tratamento térmico de Austêmpera e posterior Usinagem para acabamentos e calibração da qualidade.

Desenvolver os processos de fabricação e processos de tratamentos térmico se faz necessário para a exatidão desse processo de nacionalização.

Esse estudo, serve como referencial para o processo de nacionalização das TELHAS DAS LAGARTAS do Blindado Leopard 1A5-BR.

A partir desse estudo, futuros ensaios deverão ser realizados nas peças a partir do (s) fornecedor (es) que se dispõe a produzi-las. Atestando-se assim, que as peças estão em conformidade com os resultados apresentados nesse escopo.

6. REFERÊNCIAS

ANDERIELI, Rudimar. **Desenvolvimento de liga para aços de fundição**. Trabalho de diplomação- Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal Spray Basics**. Disponível em: <<https://app.aws.org/wj/2002/11/feature/>>. Acesso em: 24 ago. 2022.

ALVES, Luiz H. **Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processos de fundição de aço ABNT 1030**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

BASTOS, Expedito Carlos Stephani. **Blindados No Brasil - Um Longo e Árduo Aprendizado** - Vol. 1. São Paulo: Editora Tallere, 2011.

BADESHIA, *et al.* Bainite in steels- 2ª edição. London: Institute of Materials, 2001.

BACK, N. et al. Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem. 1ª ed. Barueri, SP. Editora: Manole, 2008.

BEER, F.P *et al.* **Mecânica dos Materiais**. 7ª edição. São Paulo: Editora Bookman.

BORGES, Antônio. A. **Requisitos Operacionais básicos para nova família de Blindados sobre lagarta: Viatura Básica**. Trabalho Acadêmico, apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito parcial para a obtenção da especialização em Ciências Militares, com ênfase em Doutrina Militar Terrestre, pós-graduação universitária lato sensu, 2018.

BLAIR, M. et al. Predicting the occurrence and Effects of Defects in Castings. JOM. (2005).

BHADESHIA, H. K. D. H.; EDMONDS, D. V. Bainite in silicon steels: new composition– property approach Part 2. Metal Science, 1983.

BRASIL. Exército. Manual Técnico 1240/010-13 Periscópio do comandante TRP1A/2A com suporte de periscópio 2A e sistema de transferência de ângulos TEW1A (Carro de Combate Leopard 1A5-BR). 1. ed. Alemanha, 1972.

BRICK, et al. Structures and Properties of Alloys. McGraw Hill Book Co, Inc. (1985).

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos processos siderúrgicos comuns**. 4ª ed. Edgard Blucher, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ª ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1988.

CALLISTER, Willian. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASTRO, Celso. **Exército e Nação: estudos sobre a história do exército brasileiro**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2012.

DA COSTA, E. M. **Aços**. Material didático. Pontifícia Universidade Católica-RS (PUCRS). Disponível em: <www.feng.pucrs.br/~eleani/Protegidos/tranformacoes_fase.ppt>. Acesso em: 27. Out. 2022.

DE SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5ª ed. Edgard Blucher, 2014.

DIETER, G. E **Metalurgia Mecânica**, 1981.

DO CARMO, D. **Obtenção de aços fundidos de elevada resistência mecânica, boa tenacidade e resistência ao desgaste**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. 2017

EB. Armas, Quadros e Serviços. Disponível em: http://www.eb.mil.br/armas-quadros-e-servicos/-/asset_publisher/W4kQIILo3SEa/content/arma-de-cavalaria?inheritRedirect=false. Acesso em: 24 out. 2022.

EB. 1º REGIMENTO DE CARROS DE COMBATE REALIZA MANUTENÇÃO EM SEUS BLINDADOS LEOPARD 1A5-BR. Disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito//asset_publisher/znUQcGfQ6N3x/content/id/16419372. Acesso em 24 nov. 2022

FINARDI, J. Refino e desoxidação de aço destinado à fabricação de peças fundidas. IV Combrafund. ABIFA. São Paulo, (1993).

GONÇALVES, E.M. Estudo Comparativo de Temperabilidade para a substituição do aço SAE 1045 por um aço SAE 4140 aplicado a engrenagens fundidas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UNISATC. 2021.

HABRAKEN, L. J; ECONOMOPOULOS, M. Bainitic microstructures in low-carbon allow steels and their mechanical properties. Ann Harbor: Climax Molybdenum, 1967.

HIBBLER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5ª ed. São Paulo, Editora: Pearson, 2005.

LAKHTIN, Y. **Metais e ligas metálicas**. Trad. Eng. Helio Mezzomo. Santa Maria, RS, 2016.

MALAZARI, M. de I. N. M; RIZO, E. M. da S; SANTO, R. G. dos S. Análise da influência do teor de hidrogênio e da contração na forma de microporosidades durante solidificação da liga AL4,5%Cu. In 51º congresso anual da ABM. São Paulo, P.609-620. 1996.

OTTO, K.N.; WOOD, K.L. Product design: techniques in reverse engineering and new product development. New York, Prentice-Hall, 2001.

KRAUSS, G. Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 1994.

LLEWELLYN, D. et al. Steels: metallurgy and applications Woburn, USA: Butterworth-Heinemann, 1998.

REED-HILL. Princípios de metalurgia física. 2nd ed. Rio de Janeiro, 1982.

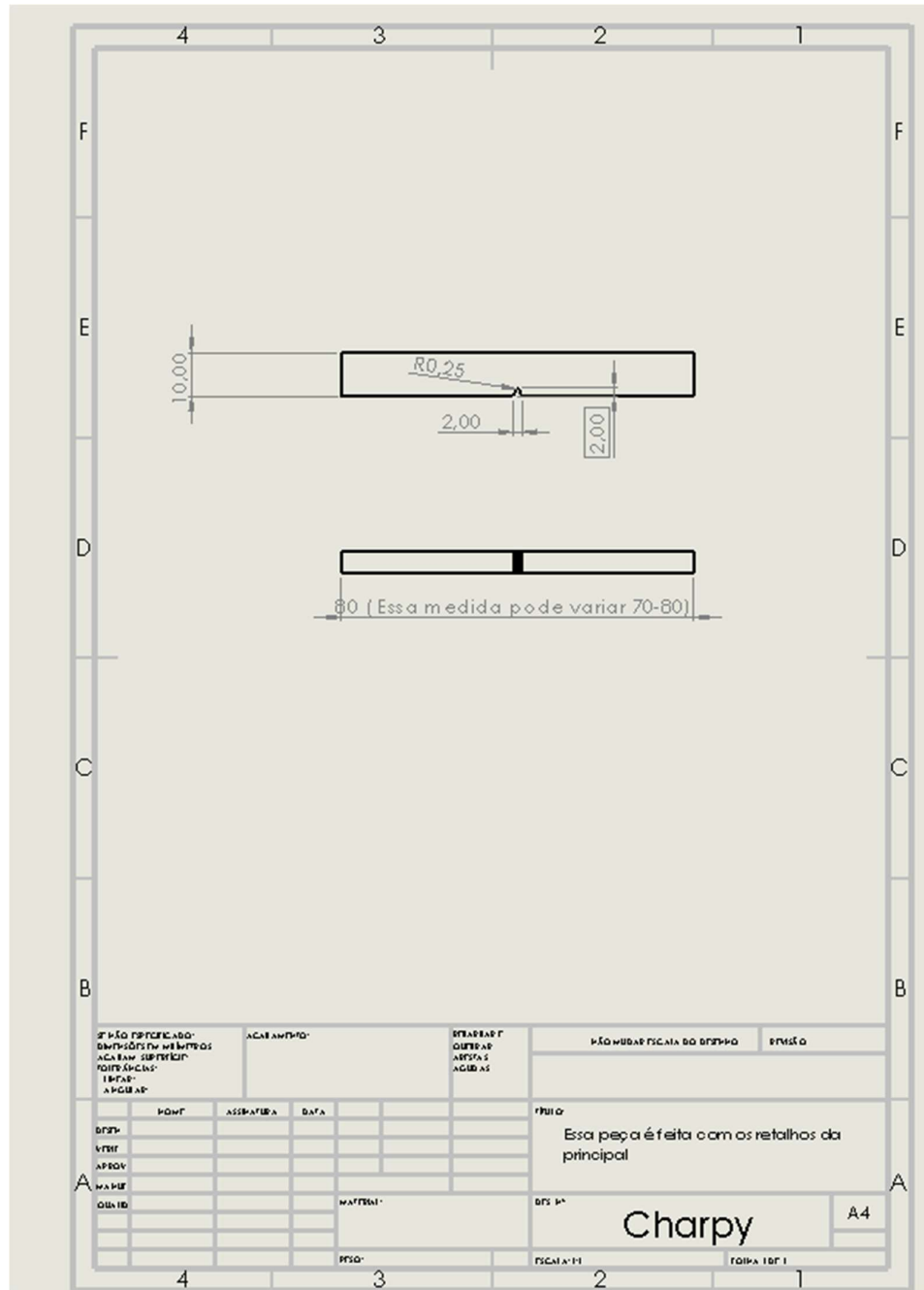
VENSON, I. **Ferro e aço: conceitos**. Material didático. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processocorte_arquivo/FerroAcoConceitos.pdf> Acesso em: 27. Out. 2022

SUB-COMMITTEE ON NORMALIZING AND ANNEALING- Normalizing of steel- Metals Handbook- Vol 2 – 8ª ed ASM.

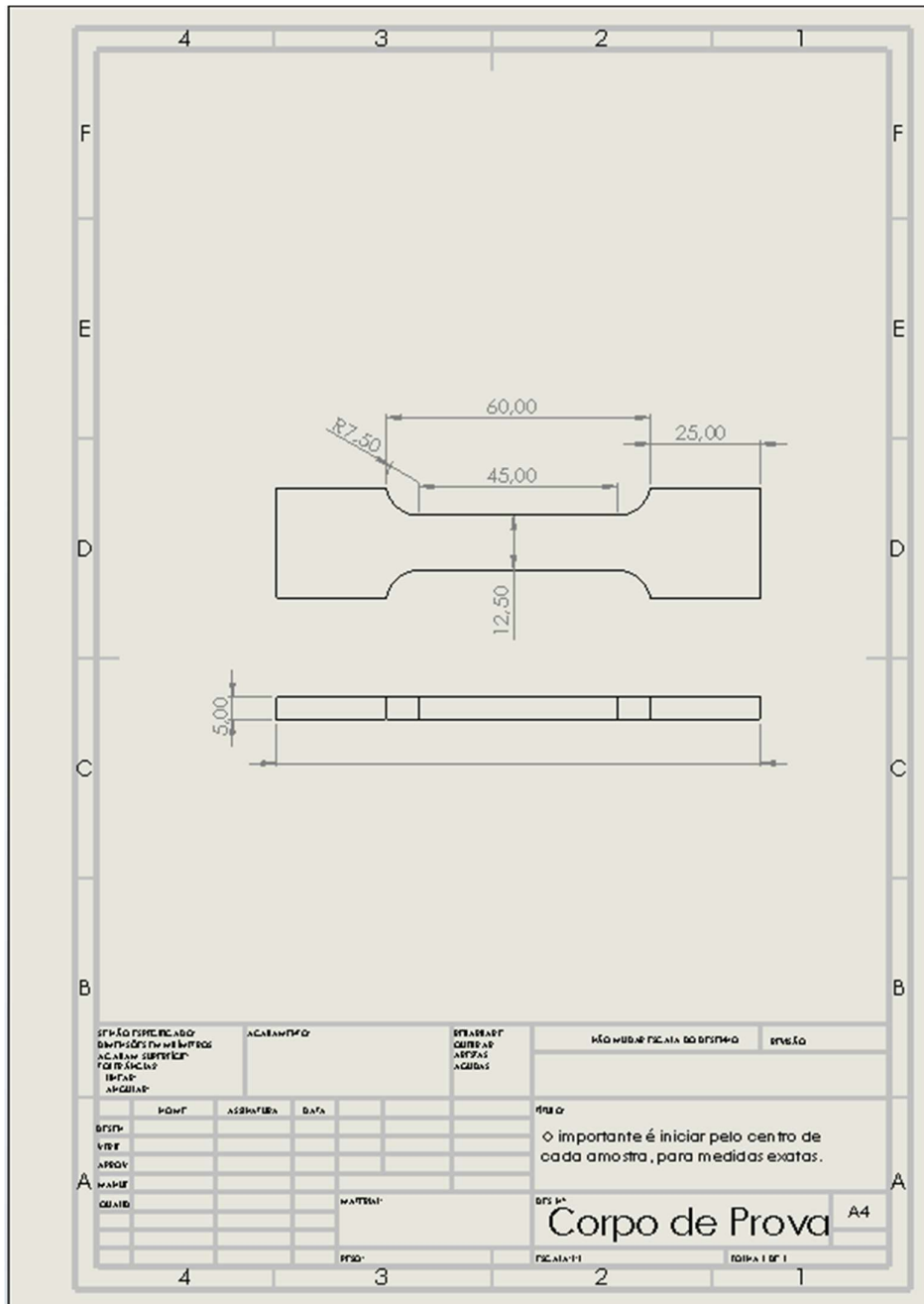
VARSHNEY, A *et al.* Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite. Materials and Design, v. 95, p. 75–88, 2016.

<http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm> < acesso em 03. Nov. 2022>.

ANEXO A – REPRESENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CHARPY.



ANEXO B- REPRESENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.

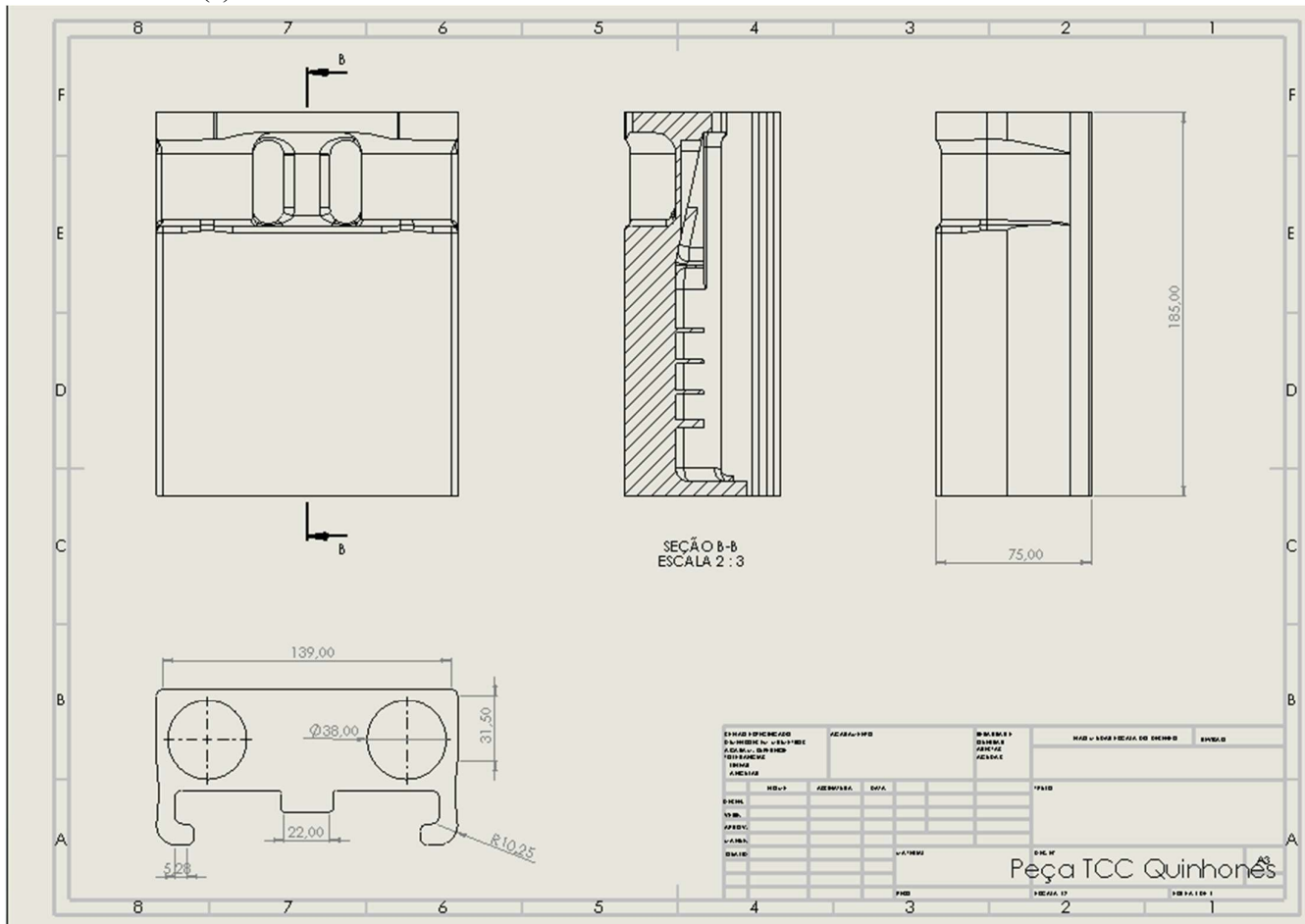


IDENTIFICAÇÃO DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE TOLERÂNCIAS UNIDADES ABREVIAÇ.		ACHABAMENTO		DESENO QUANTAS VISTAS ACOTAS		NÚMERO DE FIGURA DO DESENHO	ESCALA
DT: _____ VIZ: _____ PROJ: _____ MANE: _____ QUANT: _____	FÓRM: _____ ASSINATURA: _____ DATA: _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____	OBS:			
						O importante é iniciar pelo centro de cada amostra, para medidas exatas.	
						OBS:	
						Corpo de Prova	
						ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1

A4

ANEXO C- VISTAS E CORTES DA TELHAS DAS LAGARTAS:

(a)



(b)

